

Учебник для высших морских учебных заведений

Ю.К. Баранов, М.И. Гаврюк,
В.А. Логиновский, Ю.А. Песков



НАВИГАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Слово «навигация» происходит от латинского «navigation», что означает «мореплавание, судоходство». В русский язык оно вошло в эпоху Петра I, когда всех изучающих вопросы мореплавания называли навигаторами. К настоящему времени слово «навигация» приобрело два значения: в широком смысле его используют как первоначальное понятие «мореплавание» (например, зимняя навигация, открытие навигации и т. д.), в более узком смысле навигация – это наука о вождении судна в море намеченным маршрутом с учетом влияния внешней среды на движение судна. В задачу навигации входят:

- выбор безопасного и выгодного пути судна;

- следование избранным путем на основании показаний приборов с учетом необходимых поправок к направлению движения судна и пройденному им расстоянию (счисление пути); контрольные определения места судна (обсервация) с помощью визуальных и радиолокационных наблюдений береговых объектов, различного вида радионавигационных систем, позволяющих определить место судна по неподвижным (береговые установки) или подвижным (спутники) радиоизлучателям;

- анализ возможных ошибок в счислении пути и при определениях места судна с целью гарантии безопасности плавания.

Навигация объединяет цикл судоводительских дисциплин, выделившихся из нее в процессе развития мореплавания:

- лоцию, изучающую навигационные пособия и навигационное оборудование морских бассейнов;

- мореходную астрономию, изучающую один из вопросов навигации – определение места судна по небесным светилам;

- технические средства судовождения, с помощью которых ведутся счисление пути и определение места судна.

Навигация тесно соприкасается с вопросами управления судами при маневрировании в узкостях, портах, при плавании во льдах, в штормовых условиях и при расхождении с другими судами.

Ряд навигационных задач решается с использованием выводов смежных наук: геодезии, картографии, океанографии и метеорологии.

Навигация – точная наука, построенная на строгой математической основе. Однако для полноценного выполнения штурманских обязанностей недостаточно знания только теории. Штурман обязан иметь необходимые практические навыки в использовании всей сложной навигационной техники, а это достигается только непрерывными тренировками. Безопасное, безаварийное плавание обеспечивают только тщательное проведение навигационных измерений и их обработка, по возможности сопровождаемые контрольными наблюдениями и вычислениями.

Судоводитель несет ответственность за аварию независимо от того, произошла ли она от серьезного упущения в штурманском деле или от незначительной ошибки в его наблюдениях или вычислениях.

Учебник написали: Ю. К. Баранов – введение, главы 13... 17, предметный указатель; М. И. Гаврюк – главы 4...12; В. А. Логиновский – главы 1...3, пп. 6.4 и 16.7; Ю. А. Песков – главы 18...21 и п. 16.8.

Авторы выражают благодарность ветерану пассажирского флота Сандулову Юрию Аскольдовичу за помощь в издании этой книги.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БГМЦ – береговой гидрометеоцентр
ВРЛС – береговая радиолокационная станция
БРНК – базовая радионавигационная камера
ВАРУ – временная автоматическая регулировка усиления
ВВП – внутренние водные пути
ВЩЛП – ведущая линия положения
ГА – гироазимут
ГК – гирокомпас
ДВРП – двухканальный визуальный радиопеленгатор
ДП – диаметральной плоскость
ЗУ – запоминающее устройство
ИД – истинное движение
ИК – истинный курс
ИКО – индикатор кругового обзора
ИП – истинный пеленг
ИРП – истинный радиопеленг
КВЦ – координатно-вычислительный центр
КК – компасный курс
КЛП – контрольная линия положения
КП – компасный пеленг
КУ – курсовой угол
ЛИД – линия истинного движения
ЛЗП – линия заданного пути
ЛОД – линия относительного движения
МАМС – Международная ассоциация маячных служб
МК – магнитный курс
МНК – морская навигационная карта
МП – магнитный пеленг
НАК – навигационный автоматизированный комплекс
НИСП – научно-исследовательское судно погоды
НКД – неподвижный круг дальности
ОД – относительное движение
ОИП – обратный истинный пеленг
ОКП – обратный компасный пеленг
ОЛ – отсчет лага
ОЛЗ – обратная локсодромическая задача
ОЛП – ограждающая линия положения
ОМП – обратный магнитный пеленг
ОРКУ – отсчет радиокурсового угла
ОТШ – отшествие
ПИ – приемоиндикатор
ПКД – подвижный круг дальности
ПРДС – пост регулирования движения судов
ПРЛО – пассивный радиолокационный отражатель

ПСНО – плавучее средство навигационного ограждения
РД – разность долгот
РИС – радиолокационный индикатор ситуации
РКУ – радиокурсовой угол
РЛКУ – радиолокационный курсовой угол
РЛП – радиолокационный пеленг
РЛС – радиолокационная станция
РМЧ – разность меридиональных частей
РНС – радионавигационная система
РТС – радиотехническое средство
РШ – разность широт
САРП – средства автоматической радиолокационной прокладки
СКП – средняя квадратичная погрешность
СНО – средство навигационного ограждения
СРД – система разделения движения
СРНС – спутниковая радионавигационная система
СС – станция слежения
СУДС – система управления движением судов
ТВЛ – точка встречи лоцмана
ТКП – точка конца поворота
ТПКР – точка подачи команды на руль
ТСН – техническое средство навигации
ЭДЦ – элементы движения цели
ЭЛТ – электронно-лучевая трубка

Раздел I

ОСНОВЫ НАВИГАЦИИ

Глава 1

Основные понятия навигации.

Глава 2

**Использование компасов для определения направлений в море.
Определение скорости и пройденного расстояния.**

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАВИГАЦИИ

1.1. Фигура и модели Земли

Мы живем на планете Земля, имеющей уникальную форму. Суда совершают плавания по водам Мирового океана, который является частью этой планеты, а поэтому для задач морской навигации необходимо знать ее форму и размеры. Когда говорят о фигуре Земли, то не имеют в виду ее естественную неправильную конфигурацию, ее горы и впадины. Речь идет о воображаемом земном теле, которое можно представить поверхностью уровня вод Мирового океана, продолженной под всеми материками. Такая поверхность называется *уровенной*, и важным ее свойством является то, что в любой точке она перпендикулярна, или, как говорят математики, нормальна вектору силы тяжести g .

Плотность масс Земли в ее толще распределена чрезвычайно неравномерно, поэтому уровенная поверхность образует сложное в математическом отношении трехмерное тело. Эта фигура, образованная уровенной поверхностью, имеющая неправильную геометрическую форму, и называется *геоидом*, что в переводе с греческого означает «землеподобный» (рис. 1.1, а).

Геометрия геоида очень сложна. Это обстоятельство затрудняет обработку навигационных измерений на его поверхности.

Поэтому для решения задач морской навигации используют аппроксимацию (приближение) геоида телом правильной математической формы. Это тело – *эллипсоид вращения*, полученный в результате вращения эллипса вокруг малой оси. Другими словами, геоид заменяют его моделью. Сечение геоида, а также эллипсоида по экватору и меридиану $80^\circ\text{E} \dots 100^\circ\text{W}$ показано на рис. 1.1, б.

Используют следующие условия аппроксимации:

- объем эллипсоида предполагается равным объему геоида;
- большая полуось эллипсоида a совпадает с плоскостью экватора геоида;
- малая полуось b направлена по оси вращения Земли; сумма квадратов уклонений поверхности эллипсоида от поверхности геоида выбирается минимальной.

Такой эллипсоид получил название *общеземного эллипсоида*. Общий земной эллипсоид имеет малое сжатие и практически совпадает со сфероидом – фигурой равновесия вращающейся жидкой массы.

Их расхождение по высоте поверхностей составляет всего 2...3 м, поэтому эти два тела часто отождествляют. Понятие «земной сфероид» аналогично понятию «земной эллипсоид».

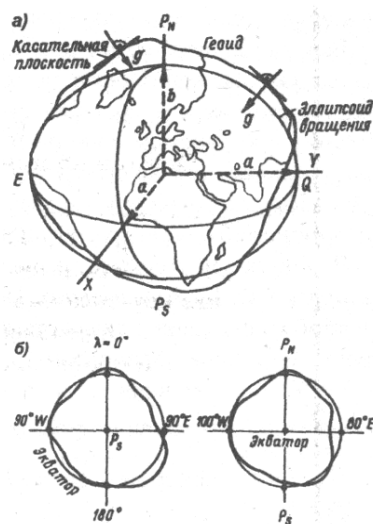


Рис. 1.1

Для геодезических и картографических расчетов в определенных районах Земли необходимо иметь земной эллипсоид, поверхность которого максимально совпадает с поверхностью этого района. Очевидно, что такой эллипсоид должен иметь вполне определенные ориентацию и размеры. Это *референц-эллипсоид*. В конкретном государстве к нему и относят все измерения на земной поверхности.

Важным практическим моментом здесь является то, что, координаты одинаковых точек могут не совпадать на картах, изданных в различных странах, т. е. составленных на разных *референц-эллипсоидах*. Поэтому при переходе с карты на карту, особенно в узкостях, необходима привязка не к координатной сетке, а к береговой черте. Рекомендуются переходить на другую карту по пеленгу и расстоянию до какого-либо точечного ориентира, обозначенного на обеих картах.

В России в качестве референц-эллипсоида принят референц-эллипсоид Ф. Н. Красовского. Этот референц-эллипсоид вычислен группой ученых под руководством профессора Ф. Н. Красовского. Он имеет следующие параметры:

Большая полуось $a = 6\,378\,245$ м;

Малая полуось $b = 6\,356\,863$ м,

$$\text{Полярное сжатие } a = \frac{a - b}{a} = 1/298.3$$

$$\text{Эксцентриситет } e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = 0,0818$$

Отклонения данного эллипсоида от геоида на территории нашей страны не превышают 150 м.

В навигационных задачах, не требующих высокой точности, Землю принимают за шар, объем которого равен объему земного эллипсоида, исходя из соотношения

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi a^2 b$$

Для референц-эллипсоида Ф. Н. Красовского радиус модели Земли как шара равен $R = 6\,371\,110$ м.

В ряде стран Западной Европы используют референц-эллипсоид Хайфорда; в Японии, Германии, Швеции, Греции — Бесселя; в странах Центральной и Северной Америки — Кларка; в Великобритании и Ирландии — референц-эллипсоид Эйри. Более детально параметры этих моделей изучаются в курсе математических основ судовождения. Здесь же мы ограничимся вопросами прикладного характера.

Для решения некоторых специальных навигационных задач, например задач определения места судна с помощью глобальных радионавигационных систем, применяются специальные референц-эллипсоиды, имеющие международный статус. С их помощью согласуются измерения, произведенные в различных странах.

Это общеземные, или международные, референц-эллипсоиды, оптимальные по критерию минимума отклонения от поверхности геоида в целом. В качестве модели геоида для спутниковых навигационных систем до недавнего времени, например, использовался эллипсоид WGS-72, в настоящее время применяется более точная модель WGS-84 (World Geodetic System –1984).

Для безопасности мореплавания важно помнить, что если автоматизированный приемоиндикатор какой-либо радионавигационной или спутниковой системы выдает координаты судна на усредненном международном эллипсоиде, то, используя на мостике судна карту, составленную на другом референц-эллипсоиде, необходимо вводить поправки к координатам φ – географической широте и λ – географической долготы, полученным по этим системам.

Таблица 1.1.

Геодезическая система (референц-эллипсоид)	Смещение центра референц- эллипсоида от центра эллипсоида WGS -84, м		
	ΔX	ΔY	ΔZ
Европейская (Хайфорда)	-84	-103	-131
Токийская (Бесселя)	-140	+ 516	+ 669
Североамериканская (Кларка)	-22	+ 157	+ 172

Эти поправки к широте $\Delta\varphi$ и долготы $\Delta\lambda$ в минутах могут быть рассчитаны по формулам профессора М. С. Молоденского, если известны параметры эллипсоидов:

$$\Delta\varphi = \frac{3438}{M} \{ \Delta X \sin\varphi \cos\lambda + \Delta Y \sin\varphi \sin\lambda - \Delta Z \cos\varphi - [a_R(a - a_K) + a_K(a - a_K)] \sin 2\varphi \};$$

$$\Delta\lambda' = \frac{3438}{N \cos\varphi} (\Delta X \sin\lambda - \Delta Y \cos\lambda)$$

где ΔX , ΔY , ΔZ – смещения центра референц-эллипсоида (прямоугольная система координат), принятого для составления навигационной карты, от центра эллипсоида, принятого в алгоритме определения места судна по навигационной системе; a_K – большая полуось эллипсоида карты; a – сжатие эллипсоида карты; a – сжатие усредненного эллипсоида; M , N – главные радиусы кривизны усредненного эллипсоида.

Величины ΔX , ΔY , ΔZ используют в навигационных изданиях, в табл. 1.1 они приведены для некоторых геодезических систем относительно эллипсоида WGS-84.

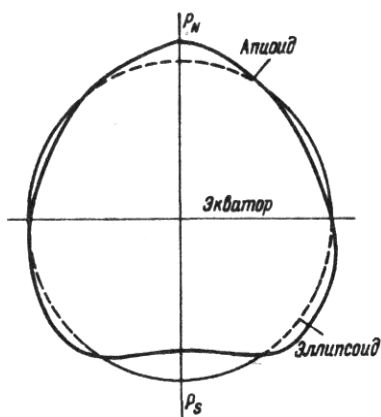


Рис.1.2.

Уточнение формы и размеров Земли очень важны не только для навигации. По последним данным спутниковой геодезии, Земля имеет форму апиоида, т. е. тела грушевидной формы (рис. 1.2). Как ни парадоксально это звучит, но именно такую форму нашей планеты предполагал Христофор Колумб.

Ведутся работы по применению в навигации и более точной модели геоида, которой является *трехосный эллипсоид*.

1.2. Системы координат

Для определения положения точки на поверхности земного сфероида применяют так называемую *географическую систему координат*. В этой системе координатными линиями являются параллели и меридианы. Любую точку определяют пересечением соответствующих координатных линий, а в качестве начала системы используют пересечение экватора и нулевого меридиана.

В соответствии с решением Международной меридианной конференции в Вашингтоне (1884 г.) в качестве нулевого установлен меридиан, проходящий через пассажный прибор Гринвичской обсерватории, близ Лондона. Он получил название Гринвичского меридиана.

Дадим основные понятия, необходимые для ориентации наблюдателя на поверхности Земли и принятые в морской навигации.

Земной осью называют воображаемую линию, вокруг которой происходит суточное вращение Земли.

Земная ось «протыкает» сфероид в двух точках, называемых *географическими полюсами*, причем тот полюс, откуда вращение Земли усматривается против часовой стрелки, называют северным и обозначают P_N . Его антипод – южный географический полюс, P_S (рис. 1.3).

Географические полюса еще называют *истинными*.

При пересечении сфероида плоскостями, перпендикулярными оси вращения, на его поверхности образуются малые круги, называемые параллелями ($p\ell$).

Если такая плоскость проходит через центр Земли, то ее след на поверхности сфероида образует большой круг, это *экватор* (EQ).

Следы от пересечения земного сфероида плоскостями, проходящими через ось вращения Земли, называются *географическими* или *истинными* меридианами.

Меридиан, проходящий через точку наблюдения, – *истинный меридиан наблюдателя*.

Соответствующие плоскости называются: плоскость параллели, плоскость экватора и плоскость истинного меридиана.

Дадим определение координатам. Географической широтой φ некоторой точки на поверхности земного сфероида называется угол между плоскостью экватора и нормалью к этой поверхности. Применение нормали, или отвесной линии, для определения широты говорит о том, что в ее основу заложены не только геометрические, но и физические принципы. Широта измеряется дугой меридиана от экватора до параллели данной точки (рис. 1.4).

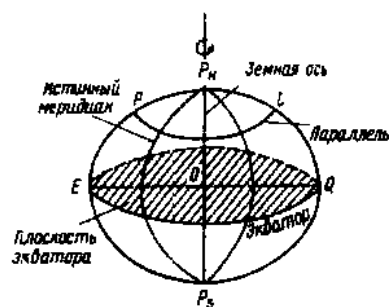


Рис.1.3.

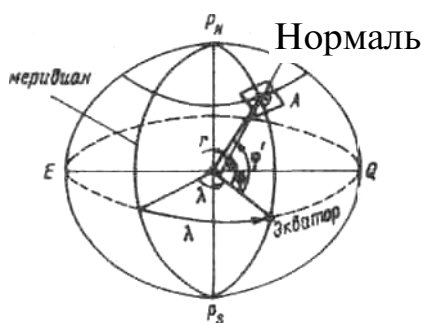


Рис.1.4.

Совершенно очевидно, что на параллелях $\varphi = \text{const}$.

Плоскость экватора делит Землю на два полушария – северное и южное. Счет географических широт ведется от экватора к северу N и югу S от О до 90° . В алгебраических расчетах они имеют соответственно знаки «+» и «-», например:

$$\varphi = 40^\circ 30,5' N = + 40^\circ 30,5'',$$

$$\varphi = 80^\circ 40' 20'' S = - 80^\circ 40' 20''.$$

Следует отметить, что в «ручных» навигационных расчетах и записях, во избежание ошибок, не принято опускать математический знак «+»,

В некоторых прикладных дисциплинах, смежных с навигацией, используется понятие *геоцентрической широты* φ' . Как видно из рис. 1.4, геоцентрическая широта $\varphi' < \varphi$. Величина их разности r называется *редукцией широты* и вычисляется по следующей формуле в угловых единицах:

$$r'' = \frac{\alpha \sin 2\varphi}{\text{arc} 1''} \quad (1.2)$$

где α – полярное сжатие; φ – географическая широта.

Максимальное значение редукции на широте 45° достигает значения $11' 27''$.

Теперь определим значение второй координаты – географической долготы.

Географической долготой λ некоторой точки на поверхности сфероида называется двугранный угол между плоскостью начального (нулевого) меридиана и плоскостью меридиана данной точки. Плоскость нулевого меридиана делит Землю на восточное и западное полушария. Долгота измеряется наименьшей дугой экватора. Естественно, что все точки меридиана имеют равную долготу. Пределы измерения долгот от 0 до 180° к востоку E и западу W. В алгебраических расчетах им присваиваются соответственно знаки “+” или “-”. Например:

$$\begin{aligned}\lambda &= 140^{\circ}30,5'E = + 140^{\circ}30,5', \\ \lambda &= 90^{\circ}40'20'' W = - 90^{\circ}40'20''.\end{aligned}$$

Если в результате расчетов долгота имеет значение больше 180°, то необходимо взять ее дополнение до 360° и поменять наименование. Например:

$$\lambda = 240^{\circ}40,5'W = 119^{\circ}19,5'E.$$

В морской навигации наряду с русскими обозначениями «Север», «Восток», «Юг», «Запад» широко приняты их голландско-немецкие эквиваленты «Норд», «Ост», «Зюйд», «Вест». Часто говорят «широта нордовая», «долгота вестовая» и т.д. Раньше восточная долгота обозначалась буквами «OST». Для того чтобы не спутать обозначение восточной долготы с нулем используют латинскую букву «E» (от английского East – восток), но называют по традиции долготу «остовой».

Меридиан 180° определен как международная линия перемены дат. Выбор Гринвичского меридиана как нулевого удобен тем, что линия перемены дат практически вся проходит в Тихом океане, что исключает путаницу с датами.

Если в качестве аппроксимирующей геоид поверхности применяется сфера, то географическая система координат превращается в традиционную сферическую. В этом случае нормаль к ее поверхности совпадает с направлением на центр сферы. Понятие географических координат возникло в Древней Греции примерно за 300 лет до н.э., но их трактовка была совершенно иной. Широта определялась как продолжительность самого длинного светового дня в году, а разность долгот – различием местных времен. Первым, кто предложил математическую концепцию географических координат, был Клавдий Птолемей (примерно 90...160 гг. н.э.).

Геометрические особенности рассмотренной системы координат таковы, что полюса являются особыми точками, где долгота не определена.

*Квазигеографической*¹ называется система географических координат, в которой квазиполюса P_{qN} и P_{qS} смещены на 90° относительно географических полюсов, т.е. оба полюса располагаются на экваторе, причем поворот $P_N \rightarrow P_{qN}$ осуществляется по меридиану 180°, а $P_S \rightarrow P_{qS}$ – по нулевому меридиану (рис. 1.5).

¹ Более подробно см. раздел III.

Здесь координатными осями считаются квазиэкватор, которым является меридиан $90^\circ \text{ E} - 90^\circ \text{ W}$, и начальный квазимеридиан $0^\circ - 180^\circ$. Координатными линиями являются квазипараллели и квазимеридианы, фиксирующие квазишироту φ_q и, квазидолготу λ_q

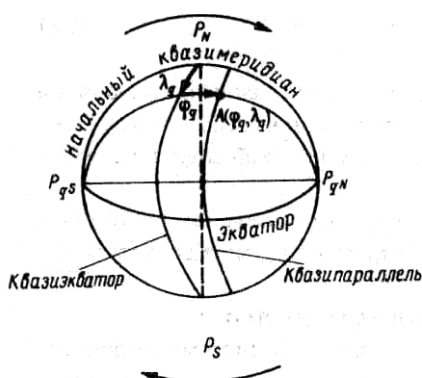


Рис.1.5

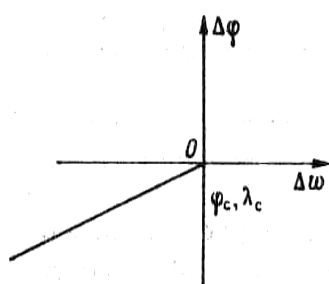


Рис.1.6

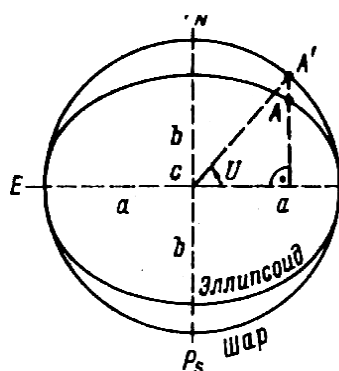


Рис. 2.7

Квазигеографическая система координат применяется в картографии для построения карт районов высоких широт

Локальная система координат $\Delta\varphi-0-\Delta\omega$ с началом φ_c, λ_c в счислимой точке применяется для решения задач определения, места судна методом линий положения (рис. 1.6).

Полярная система фиксирует положение заданной точки относительно другой точки по направлению и расстоянию.

Геодезическая система координат относится к поверхности референц-эллипсоида. Геодезические широта B и долгота L определяются относительно пунктов государственной геодезической сети, исходным пунктом которой в России является центр Круглого зала Пулковской обсерватории близ Санкт-Петербурга (Система координат 1942 г.)

Система координат с *приведенной* широтой применяется в теоретической картографии и для решения ряда практических навигационных задач по расчету кратчайших расстояний и азимутов на поверхности эллипсоида. В этой системе положение точки определяется геодезической или географической долготой и приведенной широтой U (рис. 1.7). Использование широты U упрощает расчетные формулы, так как все вычисления переносятся на поверхность шара.

Приведенная широта зависит от географической следующим образом:

$$\operatorname{tg} U = (1 - a) \operatorname{tg} \varphi \quad (1.3)$$

Астрономическая система координат также включает понятия широты и долготы точки. Эти координаты относятся к геоиду и не используют модели Земли. Они определяются по наблюдениям небесных светил.

В морской навигации применяют и другие системы координат, с которыми вы познакомитесь в главах по определению места судна.

1.3. Разность широт и разность долгот

Перемещение точки в любой координатной системе определяется приращением координат. Осуществляя движение по поверхности Мирового океана, судно использует в основном географическую систему для фиксации своего положения, поэтому приращения координат – это приращения широты и долготы. В морской навигации приняты термины разность широт и разность долгот.

Пусть судно переместилось из точки $A(\varphi_1, \lambda_1)$ в точку $B(\varphi_2, \lambda_2)$, как изображено на рис. 1.8.

Разностью широт (РШ, $\Delta\varphi$) называют дугу меридиана, заключенную между параллелями φ_1 – точки отшествия (отхода) и φ_2 – точки пришествия (прихода).

Разность широт измеряется в пределах от 0 до 180° и имеет наименование «к N» или «к S», либо соответствующие алгебраические знаки «+» или «-».

Не представляет труда написать расчетную формулу:

$$\text{РШ} = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (1.4)$$

Теперь обратим внимание на приращение второй координаты – долготы.

Разностью долгот (РД, $\Delta\lambda$) называют наименьшую из дуг экватора, заключенную между меридианами точки отшествия λ_1 и точки пришествия λ_2 .

Пределы измерения РД составляют от 0 до 180° , она имеет наименования «к E» или «к W» или алгебраические знаки «+» и «-» соответственно.

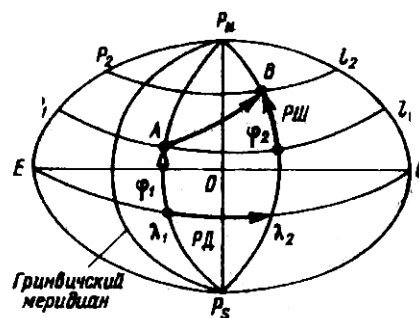


Рис.1.8

Формула расчета РД следующая:

$$\text{РД} = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (1.5)$$

Если в расчетах РД получилась больше 180° , то необходимо взять ее дополнение до 360° и поменять наименование.

Формулы (1.4) и (1.5) алгебраические, а поэтому наименования приращений координат в вычислениях соответствуют алгебраическим знакам.

Пример. Судно из точки А с координатами $\varphi_1 = 59^\circ 45,3' \text{ N}$, $\lambda_1 = 24^\circ 05,4' \text{ E}$ перешло в точку В с координатами $\varphi_2 = 58^\circ 54,7' \text{ N}$, $\lambda_2 = 25^\circ 16,8' \text{ E}$.

Определить $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$.

Все «ручные» штурманские расчеты рекомендуется выполнять «в столбик», подписывая разряды под разрядами для более наглядного контроля результатов вычислений.

Решение:

$$\varphi_2 = +58^\circ 54,7' \quad \lambda_2 = +25^\circ 16,8'$$

$$\varphi_1 = +59^\circ 45,3' \quad \lambda_1 = +24^\circ 05,4'$$

$$\Delta\varphi = -0^\circ 50,6' \quad \Delta\lambda = +1^\circ 11,4'$$

Ответ: $\Delta\varphi = -0^\circ 50,6'$ к S; $\Delta\lambda = 1^\circ 11,4'$ к E.

Неизвестными аргументами в формулах (1.4) и (1.5) могут быть любые элементы из трех в соответствии со смыслом навигационной задачи.

1.4. Счет направлений в море относительно истинного меридиана и диаметральной плоскости судна

Предположим, что наблюдатель находится в некоторой точке А на поверхности Земли. Проведем мысленно плоскость Н, перпендикулярную отвесной линии в данной точке. Это плоскость истинного горизонта (рис. 1.9).

Представим, что через наблюдателя проходит уже упоминавшаяся в п. 1.2 плоскость истинного меридиана М. Это плоскость истинного меридиана наблюдателя. Она образует, как известно, на поверхности Земли истинный меридиан наблюдателя. Все плоскости, проходящие через отвесную линию в точке А, — плоскости вертикалов. Плоскостью первого вертикала V называется вертикальная плоскость, перпендикулярная плоскости истинного меридиана наблюдателя.

Таким образом, как видно из рисунка, плоскости Н, М и V, пересекаясь, определяют в точке А, т. е. В плоскости истинного горизонта, две взаимно перпендикулярные линии N—S и E—W.

Линия N — S является полуденной линией. Она фиксирует направление на северный и южный географические полюса. Линия E — W определяет направление восток — запад. Локально — это бесконечно малые линейные отрезки истинного меридиана и параллели. Точка А делит меридиан на северную (нордовую) и южную (зюйдовую) части.

Рассмотренная система имеет особые точки на географических полюсах, где указанные направления не определены.

Положения судна принято фиксировать углом, который составляет его диаметральной плоскость (ДП) с плоскостью истинного меридиана (рис. 1.10).

Диаметральная плоскость — это условная вертикальная продольная плоскость, делящая корпус судна на две симметричные части. Она пересекается с плоскостью Н по прямой линии — это линия курса судна

Истинным курсом (ИК) судна называют двугранный угол между нордовой частью плоскости истинного меридиана и носовой частью диаметральной плоскости судна.

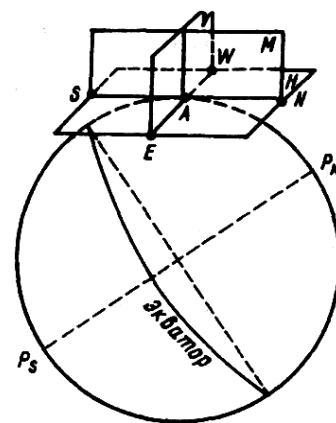


Рис. 1.9

Строгое определение ИК звучит проще, если оно дается для плоскости Н, тогда ИК судна – это плоский угол между нордовой частью истинного меридиана и носовой частью линии курса судна.

Направление на навигационный ориентир с судна можно определить относительно плоскости М или ДП.

Истинным пеленгом (ИП) ориентира называется двугранный угол между нордовой частью плоскости истинного меридиана и плоскостью вертикала, проходящей с судна через ориентир.

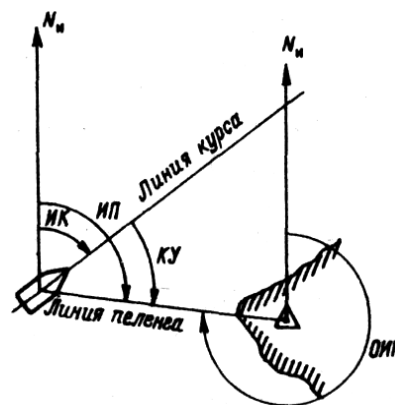


Рис.1 10



Рис.1 12

Ориентир

Плоскость вертикала, определяющая ИП, пересекает плоскость М по *линии пеленга*, а поэтому упрощенное определение сформулируем так: ИП – это плоский угол между нордовой частью истинного меридиана и линией пеленга.

Направление, отличающееся от ИП на 180° , называется *обратным истинным пеленгом* (ОИП):

$$\text{ОИП} = \text{ИП} \pm 180^\circ \quad (1.6)$$

Двугранный угол между носовой частью ДП судна и плоскостью вертикала, проходящей с судна через ориентир, называется курсовым углом (КУ).

В плоскости истинного горизонта КУ – это угол между линией курса и линией пеленга.

В круговой системе счета направлений ИК и ИП отсчитывают от 0° на северной части истинного меридиана до 360° по часовой стрелке (см. рис. 1.10).

В полукруговой системе счета КУ считают от 0° на носовой части ДП судна до 180° на правый (пр./б) или левый (л/б) борт, он имеет соответствующие знаки «+» или «-».

Например: $\text{КУ} = 30^\circ \text{пр/б} = +30^\circ$; $\text{КУ} = 130^\circ \text{л/б} = -130^\circ$.

Если КУ навигационного ориентира равен 90° , то говорят, что ориентир находится на траверзе судна.

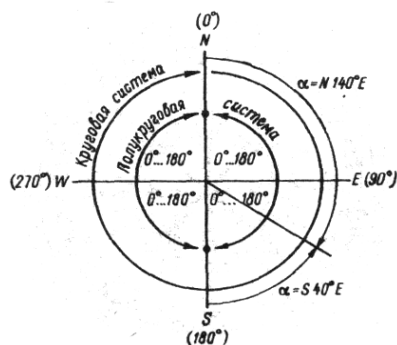


Рис. 1.14

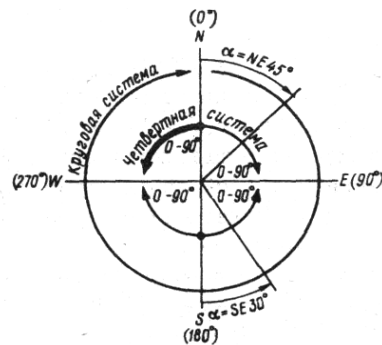


Рис.1.11

Соотношение между ИК, ИП и КУ выражается элементарной алгебраической формулой:

$$\text{ИП} = \text{ИК} + \text{КУ}. \quad (1.7)$$

Необходимо отметить, что вышеперечисленные определения основных навигационных углов не отнесены к поверхности Земли или ее модели. Поэтому более строго — это сферические углы, образованные соответствующими дугами больших кругов (рис. 1.11).

Теперь познакомимся с другими системами счета направлений относительно истинного меридиана, применяемыми в морской навигации и мореходной астрономии.

Одна из них называется полукруговой системой. Она широко используется в мореходной астрономии, но отсчет углов ведется уже не от ДП судна, а от N и S к E и W (рис. 1.12).

Например:

N 125°W; S 169°E;

N 120°E; S 50°W.

При решении параллактических треугольников используют четвертную систему. Здесь углы считаются в пределах от 0 до 90° от N и S к E и W (рис. 1.13).

Например:

NW 35°; NE 80°; SE 50°; SW 30° и т. д.

И последняя система, с которой нам предстоит познакомиться — это *румбовая система* счета направлений, дошедшая в наш век из эпохи парусного флота. В ней горизонт разбит на 32 румба, которые имеют соответствующие номера и наименования (рис. 1.14). Один румб равен 11,25°. Направления N, S, E и W называют главными направлениями; NE, SE, SW, NW — четвертными направлениями, а остальные 24 называют промежуточными. Четные промежуточные румбы имеют названия от ближайшего главного и четвертного румбов, например: NNW, WSW, ESE и т.д.

В названия нечетных промежуточных румбов входит голландская приставка «тень» (ten), что означает «к», например NtE читается «норд-тен-ост» и означает, что направление N «сдвинуто» на один румб к E, и т.д.



Рис. 1.13

Румбовая система счета применяется для обозначения направлений ветра, течения и волнения. Это традиционная система счета направлений.

1.5. Географическая дальность видимости горизонта

Видимость играет огромную роль в безопасности мореплавания и зачастую многие навигационные аварии могли бы не случиться, если бы моряки принимали видимость в районе движения судна во внимание.

Скорость судна должна назначаться с учетом текущей видимости. Совершенно необходима техника, которая бы автоматически определяла эту видимость, фиксировала ее.

Рассмотрим детально проблему видимости на море. Пусть высота глаза наблюдателя, находящегося в точке А' над уровнем моря, равна е (рис. 1.15). Задача заключается в том, чтобы определить, как далеко наблюдатель может увидеть линию горизонта. Представление поверхности Земли в виде сферы радиусом R нас вполне устраивает.

Лучи зрения, идущие к А' и касательные к поверхности воды по всем направлениям, образуют малый круг КК' который называется линией *теоретически видимого горизонта*.

Вследствие различной плотности атмосферы по высоте луч света распространяется не прямолинейно, а по некоторой кривой А'В, которая может быть аппроксимирована окружностью радиусом р.

Явление искривления зрительного луча в атмосфере Земли называется земной рефракцией и обычно увеличивает дальность теоретически видимого горизонта. Таким образом, наблюдатель видит не КК', а линию ВВ', являющуюся малым кругом, по которой поверхность воды касается небосвода. Это видимый горизонт наблюдателя.

Коэффициент земной рефракции рассчитывают по формуле. Его среднее значение

$$\chi = \frac{R}{\rho} = 0.16 \quad (1.8)$$

Угол рефракции r определяется, как показано на рисунке, углом между

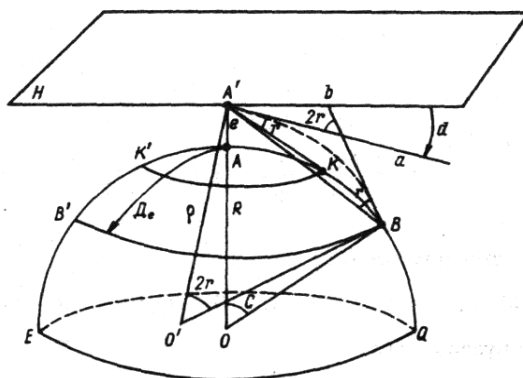


Рис.1.15

Сферический радиус А'В называется географической или *геометрической дальностью видимого горизонта* D_e . Эта дальность видимости не учитывает прозрачность атмосферы, т.е. считается, что атмосфера идеальна с коэффициентом прозрачности $\tau = 1$.

Проведем через точку A' плоскость истинного горизонта H , тогда вертикальный угол d между H и касательной к зрительному лучу $A'B$ будет называться наклоном горизонта.

После введения основной терминологии можно установить формальную зависимость между $\mathcal{D}_e$, e , и χ . Для этого напомним очевидные выражения для дуг АВ и А'В через параметры соответствующих окружностей:

$$\cup AB = RC \quad (1.9)$$

ТАК КАК $\rho \perp Bb$, ТО $\angle O' = 180 - 2(90 - r) = 2r$ ПОЭТОМУ

$$\cup A'B = \rho 2r \quad (1.10)$$

Полагая, что ε мало по сравнению с длинами указанных дуг, правые части формул (1.9) и (1.10) можно приравнять и написать следующие выражения:

$$RC = 2pr \quad (1.11)$$

$$r = \frac{RC}{2\rho} = \frac{\chi C}{2} = KC \quad (1.12)$$

где $K=\chi/2$.

Теперь рассмотрим $\triangle A'BO$:

$$\angle B = 90 - r$$

$$\angle A' = 180 - C - (90 - r) = 90 - (C - R)$$

по теореме синусов имеем

$$\frac{\sin B}{\sin A'} = \frac{R+e}{R} = \frac{\cos r}{\cos(C-r)} \quad (1.13)$$

$$\frac{e}{R} = \frac{2 \sin \frac{C}{2} \sin \frac{C-2r}{2}}{\cos(C-r)} \quad (1.14)$$

Величины углов C и r малы. Это позволяет практически без потери точности осуществить замену тригонометрических функций первыми членами их разложения в ряд, откуда получаем формулу

$$\frac{E}{R} = \frac{C(C-2r)}{2} \quad (1.15)$$

$$\text{но } r = KC, \text{ поэтому } C^2 = \frac{2e}{R(1-2K)} \quad (1.16)$$

$$\text{Так как } C = \frac{D_e}{R}$$

то, подставляя его значение в (1.16), получим аналитическое выражение для расчета искомой дальности

$$D_e = \sqrt{\frac{2R_e}{1-2K}} \quad (1.17)$$

Если $R = 6371$ км, а $\chi = 0,16$, то расчетные формулы для D_e будут таковы:

$$D_e = 4\sqrt{e_M}, \text{ км}; \quad (1.18)$$

$$D_e = 2,08\sqrt{e_M}, \text{ мили}; \quad (1.19)$$

$$\sqrt{e_{\text{фут}}} D_e = 16145, \text{ мили} \quad (1.20)$$

В Мореходных таблицах МТ-75 есть табл. 22 «Дальность видимого горизонта», рассчитанная по формуле (1.19).

1.6. Географическая дальность видимости предметов

Географическая дальность видимости предметов в море $D_{\text{п}}$, как следует из предыдущего параграфа, будет зависеть от величины e — высоты глаза наблюдателя, величины h — высоты предмета и от коэффициента рефракции χ .

Величина $D_{\text{п}}$ определяется наибольшим расстоянием, на котором наблюдатель увидит его вершину над линией горизонта. В профессиональной терминологии существует понятие дальности, а также моментов «открытия» и «закрытия» навигационного ориентира, например маяка или судна.

Расчет такой дальности позволяет штурману иметь дополнительную информацию о приближенном месте судна относительно ориентира.

Если не привлекать к рассуждениям физиологические особенности человеческого глаза, то рис. 1.16 полностью повторяет подход предыдущего параграфа. Здесь траектории зрительных лучей изображены прямыми линиями, что соответствует практической точности.

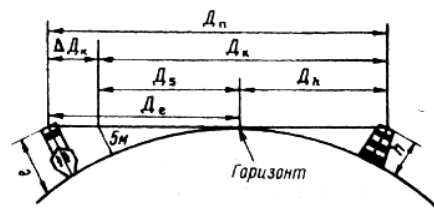


Рис. 1.16

Читатель сам может провести рассуждения и вывести формулу (1.21), используя рис. 1.16. Записываем расчетные формулы в соответствии с рисунком:

$$D_{\Pi} = D_e + D_h; \quad (1.21)$$

$$D_{\Pi} = 2.08(\sqrt{e} + \sqrt{h}) \approx 2.1(\sqrt{e} + \sqrt{h}) \quad (1.22)$$

где D_h – дальность видимости горизонта с высоты предмета.

Табл. 22 в МТ-75 позволяет рассчитать географическую дальность видимости предмета путем двукратного входа в нее по e и по h , а затем сложения результатов.

На морских навигационных картах географическая дальность видимости навигационных ориентиров дается для высоты глаза наблюдателя $e=5$ м и обозначается как D_K – дальность видимости, указанная на карте. В соответствии с (1.22) она вычисляется так:

$$D_K = 2.08(\sqrt{5} + \sqrt{h}) \quad (1.23)$$

Соответственно, если e отличается от 5 м, то для расчета D_{Π} к дальности видимости на карте необходима поправка, которая может быть вычислена следующим образом:

$$\Delta = 2.1(\sqrt{e} - \sqrt{5}) = 2.1\sqrt{e} - 4.7 \quad (1.24)$$

здесь и далее $2,08 \approx 2,1$.

$$\text{Теперь находим } D_{\Pi} \text{ через } D_K: \quad D_{\Pi} = D_K + \Delta \quad (1.25)$$

Рисунок 1.16 дает представление о соотношении дальностей и поправки Δ .

Графическая интерпретация табл. 22 МТ-75 представлена на рис. 1.17 номограммой Струйского. Это приложение № 6 в МТ-75.

Несомненно, что D_{Π} зависит от физиологических особенностей глаза наблюдателя, от остроты зрения, выраженной в разрешающей способности γ . Разрешающая способность по углу – это наименьший угол, на котором два предмета различаются глазом как отдельные, т.е. в нашей задаче – это способность различить предмет и линию горизонта

Рассмотрим рис. 1.18. Запишем формальное равенство

$$D_{\Pi} = 2.1(\sqrt{e} + \sqrt{BC'}) \quad (1.26)$$

В силу действия разрешающей способности у предмет будет виден лишь при условии, что его угловые размеры будут не меньше γ , т.е. он будет иметь высоту над линией горизонта не менее CC' . Очевидно, что γ должна уменьшать дальность, рассчитываемую по формулам (1.22).

Тогда

$$BC' = BC - CC' = h - CC' \quad (1.27)$$

Отрезок CC' фактически уменьшает высоту объекта h . Полагая, что в $\triangle A'CC'$ углы C и C' близки к 90° , находим

$$CC' = D_n \gamma \quad (1.28)$$

Если мы хотим получить $D_n \gamma$ в милях, а CC' в метрах, то формулу для расчета дальности видимости предмета, с учетом разрешающей способности человеческого глаза, надо привести к виду

$$D_n^\gamma = 2,1(\sqrt{e} + \sqrt{h - \frac{D_n \gamma'}{3438} 1852}) \quad (1.29)$$

$$D_n^\gamma = 2,1(\sqrt{e} + \sqrt{h - 0,54 D_n \gamma'}) \quad (1.30)$$

Здесь D_n^γ – дальность видимости с учетом γ .

Теперь можем анализировать влияние угла γ на географическую дальность видимости предметов.

1.7. Влияние гидрометеорологических факторов на дальность видимости горизонта, предметов и огней

Дальность видимости может трактоваться как априорная дальность без учета текущей прозрачности атмосферы, а также контрастности объекта и фона.

Введем понятие оптической дальности видимости. Это дальность видимости, зависящая от способности человеческого глаза различать предмет по яркости на некотором фоне, или, как говорят, различать определенный контраст.

Дневная *оптическая дальность видимости* зависит от контраста между наблюдаемым объектом и фоном местности. Она представляет собой наибольшее расстояние, на котором видимый контраст между объектом и фоном становится равным пороговой контрастности.

Ночная оптическая дальность видимости зависит от силы света наблюдаемого огня и представляет собой наибольшее расстояние, на котором освещенность, создаваемая на зрачке глаза наблюдателя огнем, равна пороговой освещенности. Другими словами, это максимальная дальность видимости огня в данное время, определяемая силой света и текущей метеорологической видимостью.

Минимальная величина K называется порогом контрастной чувствительности глаза и равна в среднем 0,02 для дневных условий и предметов, имеющих угловые размеры около 0,5°.

Часть светового потока огней маяков поглощается частицами, содержащимися в воздухе, поэтому происходит ослабление силы света. Это характеризуется коэффициентом прозрачности атмосферы

$$\tau = \frac{I_1}{I_0} \quad (1.32)$$

где I_0 — сила света источника; I_1 — сила света на некотором расстоянии от источника, принимаемого за единицу.

Коэффициент прозрачности атмосферы всегда меньше единицы, а значит, географическая дальность — это тот теоретический максимум, которого в реальных условиях дальность видимости не достигает, за исключением аномальных случаев.

Оценка прозрачности атмосферы в баллах может производиться по шкале видимости из табл. 51 МТ-75 в зависимости от состояния атмосферы: дождь, туман, снег, дымка и т.д.

Таким образом, возникает понятие *метеорологической дальности видимости*, которая зависит от прозрачности атмосферы.

Номинальной дальностью видимости огня называют оптическую дальность видимости при метеорологической дальности видимости 10 миль ($\tau = 0,74$).

Термин рекомендован Международной ассоциацией маячных служб (МАМС) и применяется за рубежом. На отечественных картах и в руководствах для плавания указывают стандартную дальность видимости (если она меньше географической).

Стандартная дальность видимости — это оптическая дальность при метеорологической видимости 13,5 мили ($\tau = 0,80$).

В навигационных пособиях «Огни», «Огни и знаки» имеются таблица дальности видимости горизонта, номограмма видимости предметов и номограмма оптической дальности видимости. В номограмму можно войти по силе света в канделах, по номинальной (стандартной) дальности и по метеорологической видимости, в результате чего получить оптическую дальность видимости огня (рис. 1.19).

Оптимальная светооптическая система маяка обеспечивает равенство оптической и географической дальностей видимости маяков для ясной погоды. Если эти дальности не равны, то на картах и в руководствах для плавания указывается наименьшая дальность.

Судоводитель должен экспериментально накапливать информацию о дальностях открытия конкретных огней и знаков в районе плавания в различных метеоусловиях. Состояние атмосферы можно оценивать по шкале видимости. Необходимо помнить, что если $D_k < 2,1\sqrt{h} + 4,7$, то к D_k поправка Δ не нужна.

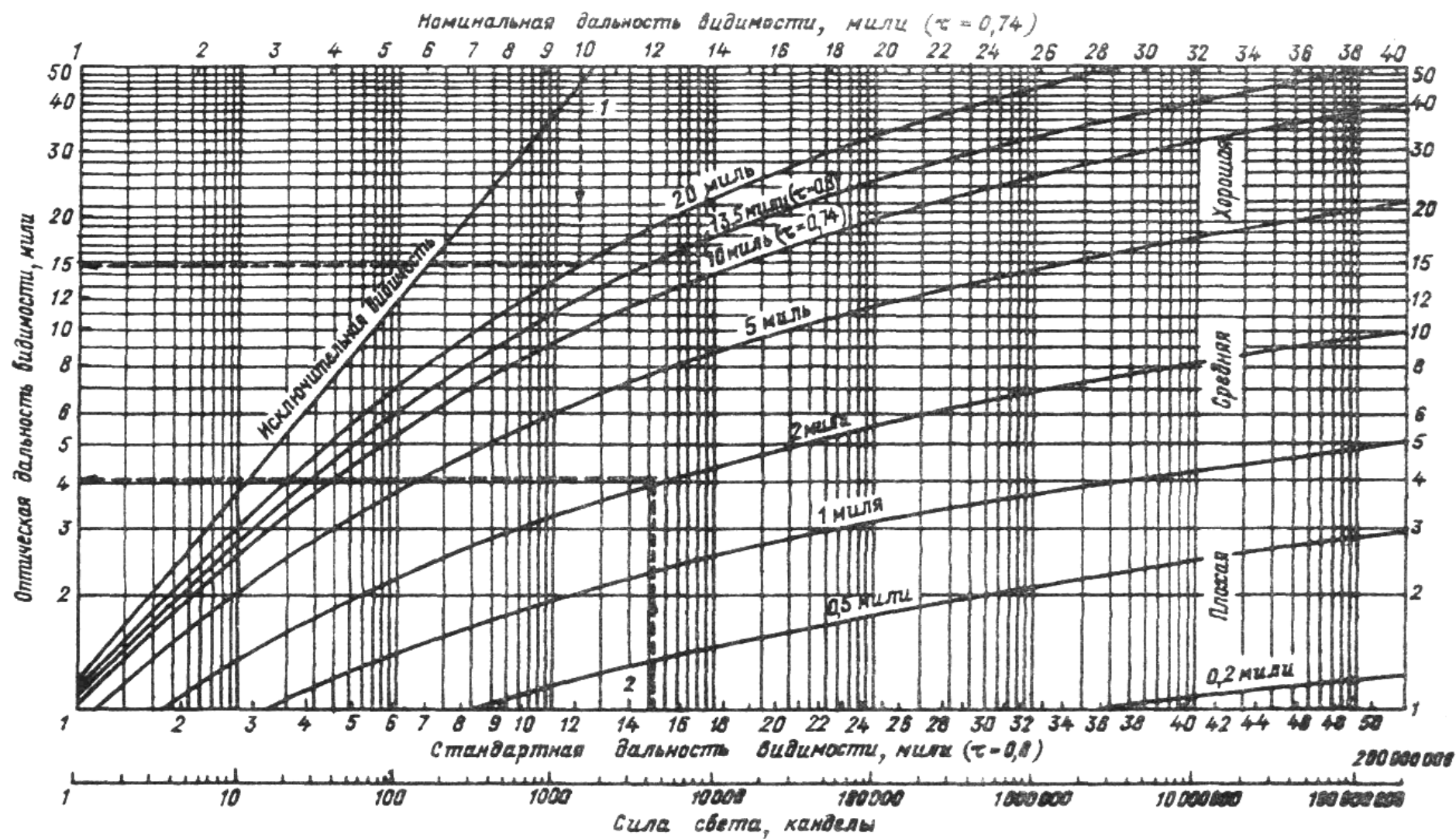


Рис. 1.19

Глава 2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПАСОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЙ В МОРЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И ПРОЙДЕННОГО РАССТОЯНИЯ

2.1. Основные сведения о земном магнетизме

Одним из типов курсоуказателей на судне является магнитный компас, работа которого основана на использовании магнитного поля Земли.

Магнитное поле Земли в любой точке можно описать вектором его напряженности. Единица напряженности поля называется эрстедом, по имени выдающегося датского физика Х.К.Эрстеда. Его можно представить в виде следующих элементов: собственно вектора напряженности T , его горизонтальной H и вертикальной Z составляющих, магнитного склонения d и магнитного наклонения I (рис. 2.1).

Вертикальная плоскость, содержащая в себе векторы T , H и Z , называется *плоскостью магнитного меридиана*, а след от ее пересечения с плоскостью истинного горизонта есть линия магнитного меридиана. Именно в этой плоскости и устанавливается картушка магнитного компаса с системой магнитных стрелок, подвешенная на вертикальной оси.

Горизонтальная составляющая H определяет направление магнитного меридиана в конкретной точке поверхности Земли и удерживает чувствительный элемент магнитного компаса в его плоскости.

Магнитное склонение d — это угол в плоскости истинного горизонта между географическим (истинным) и магнитным меридианами.

В различных точках Земли магнитный меридиан может быть отклонен к Е или W от истинного, соответственно d может иметь знак «+» или «-» в расчетных формулах (рис. 2.2).

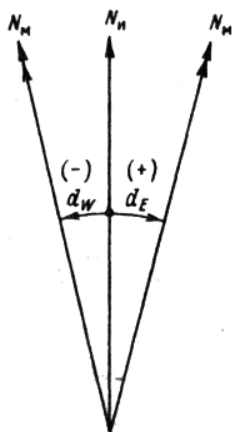


Рис. 2.2

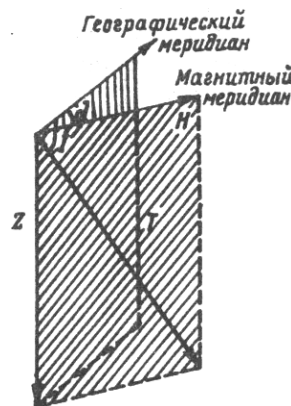


Рис. 1.1

Магнитным наклонением I называется угол между горизонтальной плоскостью и направлением вектора напряженности магнитного поля. Простые соотношения позволяют установить связь между элементами:

$$T = \sqrt{H^2 + Z^2}, \operatorname{tg} I = \frac{Z}{H}, H = T \cos I \quad (2.1)$$

Магнитное поле Земли приближенно может быть описано как поле однородно намагниченного шара с помощью следующих формул (рис. 2.3):

$$T = \frac{M}{R^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi_M}, Z = \frac{2M}{R^3} \sin \varphi_M \quad (2.2)$$

$$H = \frac{M}{R^3} \cos \varphi_M \quad (2.3)$$

где M – магнитный момент; R – радиус шара; φ_M – магнитная широта.

Из анализа приведенных соотношений становится ясно, что на магнитных полюсах $Z = T$, $H = 0$, а на магнитном экваторе $H = T$, $Z = 0$.

Как видим из (2.1) и (2.3), с приближением к магнитным полюсам уменьшается величина составляющей H и увеличивается наклонение I , что делает показания магнитного компаса менее точными и надежными.

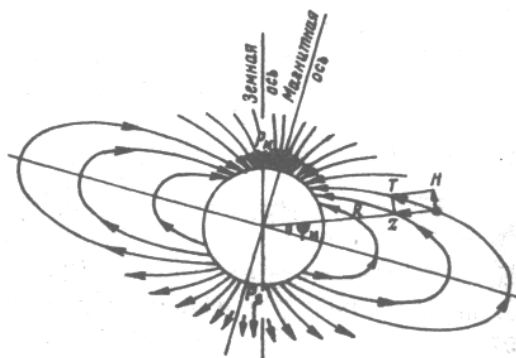


Рис. 2.3

Несовпадение магнитных и географических полюсов приводит к определенным ограничениям и неточностям в использовании магнитного компаса как курсоуказателя. Координаты магнитных полюсов Земли в настоящее время таковы:

северный магнитный полюс – $\varphi = 76^\circ \text{N}$, $\lambda = 100^\circ \text{W}$;
 южный магнитный полюс – $\varphi = 68^\circ \text{S}$, $\lambda = 144^\circ \text{E}$

На основу данных магнитных съемок составляются и издаются магнитные карты. На этих картах проведены линии равных значений элементов магнитного поля, которые имеют следующие названия:

$T = \text{const}$ – изодина;

$I = \text{const}$ – изоклина;

$d = \text{const}$ – изогона;

$d = 0$ – агона.

Магнитное поле Земли непостоянно во времени. Вариации среднегодовых значений его характеристик называются вековыми вариациями. Для морского судовождения наибольшее значение имеют вековые вариации магнитного склонения.

В качестве примеров приведем таблицу изменения магнитного склонения для Санкт-Петербурга и Лондона (табл. 2.1).

Прогноз изменения магнитного склонения Δd на морских навигационных картах показывают обычно в градусах или минутах в год.

Приводя склонения к году плавания (к определенной эпохе), необходимо иметь в виду, что Δd на картах относится к абсолютной величине d .

Пример. На карте показано магнитное склонение на 1985 г. $d_{85} = 1^\circ W$, годовое уменьшение $\Delta d = 0,2^\circ$, т. е. предполагается, что востовое склонение ежегодно уменьшается, приближаясь к 0° , а затем меняет наименование.

Необходимо определить склонение в 2000 г.

Решение: $\Delta t = 2000 - 1985 = 15$ лет,

$$D_{2000} = d_{85} + \Delta d \Delta t = +2^\circ = 2^\circ E.$$

На некоторых картах указывается изменение склонения к Е или к W.

Открыл изменение магнитного склонения на земном шаре Христофор Колумб в своем первом плавании к берегам Америки в 1492 г. Изменяется оно в широких пределах: от -180 до $+180^\circ$ (рис. 2.4).

Таблица 2.1

Год	СПб,град	Лондон
1540	—	+7,2
1600	—	+10,9
1720	-3,4	-10,9
1860	-3,0	-21,5
1900	-0,7	-16,5
1960	+6,4	-10,0
1995	+7,5	-4,4

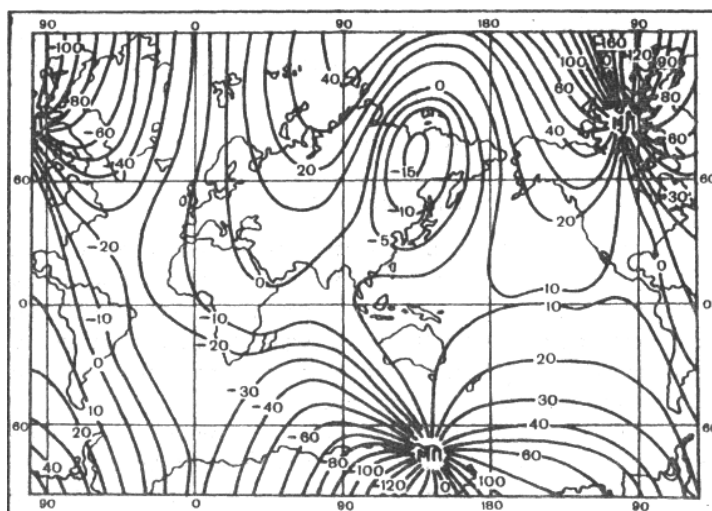


Рис. 2.4

В 1701 г. английский моряк и ученый Галлей составил первую морскую магнитную карту – карту магнитного склонения Атлантического океана. С тех пор штурманы всего мира используют данные магнитного склонения, представленные на морских навигационных картах.

При выборке d с навигационной карты после приведения к году плавания, осуществляют его линейную интерполяцию, если это необходимо, на район движения судна.

В отдельных частях Мирового океана имеет место резкое отклонение магнитного склонения от его значения, показанного в заголовке или на поле карты. Это магнитные аномалии. На морских навигационных картах такие акватории ограждены черными линиями с указанием пределов изменения склонения или отмечены звездочками. При использовании магнитного компаса в районах магнитных аномалий к его показаниям следует относиться критически.

2.2. Использование магнитного компаса

Теперь становится понятным, почему магнитный компас не показывает на истинный «норд» – это происходит из-за несовпадения положений магнитных и географических полюсов.

Все направления, отсчитываемые от магнитного меридиана называются **магнитными направлениями**. Это магнитный курс (МК) и магнитный пеленг (МП). Они определяются точно так же, как ИК и ИП, но относительно магнитного меридиана (рис. 2.5). Алгебраические формулы связи имеют вид

$$\text{ИК} = \text{МК} + d; \quad (2.4)$$

$$\text{ИП} = \text{МП} + d. \quad (2.5)$$

К сожалению, на судне магнитный компас находится под воздействием не только магнитного поля Земли. Его стрелки устанавливаются в направлении горизонтальной составляющей вектора напряженности суммарного поля Земли и судна. Компас показывает так называемое компасное направление, т.е. на условный компасный полюс, или, как говорят, на «норд компасный».

Это направление определяет компасный меридиан, а угол между северными частями магнитного и компасного меридианов называется девиацией магнитного компаса и обозначается греческой буквой d . Если компасный меридиан отклонен к Е от магнитного, то говорят, что девиация восточная (остовая), если к W, то – западная (вестовая). Соответствующие алгебраические знаки «+» и «-» (рис. 2.6).

Таким образом, на судне есть еще один меридиан, от которого ведут отсчет компасные направления: компасный курс (КК) и компасный пеленг (КП) (рис. 2.7). Необходимо отметить, что КК и КП относятся только к конкретному компасу в конкретном месте судна.

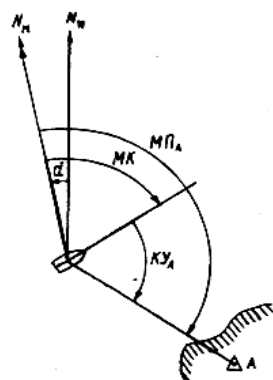


Рис. 2.5

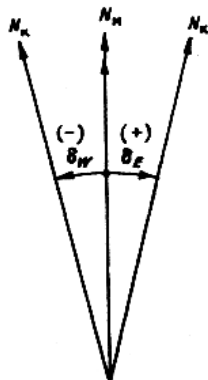


Рис.2.6

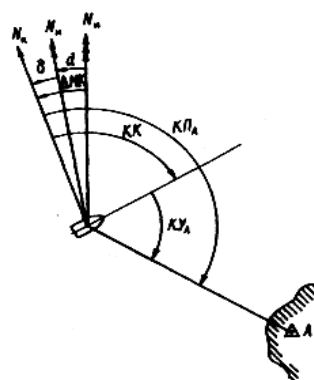


Рис.2.7

Формулы связи между компасным, магнитным и истинным направлениями элементарны (рис. 2.8)

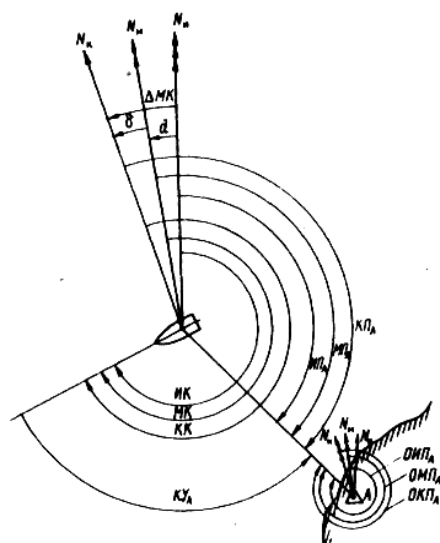


Рис. 2.8

$$MK = KK + \delta \quad (2.6)$$

$$MP = KP + \delta \quad (2.7)$$

$$IK = KK + d + \delta \quad (2.8)$$

$$IP = KP + d + \delta \quad (2.9)$$

Существуют понятия обратного магнитного (ОМП) и обратного компасного (ОКП) пеленгов, которые определены в смысле формулы (1.6).

Алгебраическая сумма склонения и девиации называется **поправкой магнитного компаса**:

$$\Delta MK = d + \delta \quad (2.10)$$

Формулы (2.8, (2.9) перепишем с учетом (2.10):

$$IK = KK + \Delta MK \quad (2.11)$$

$$IP = KP + \Delta MK \quad (2.12)$$

В навигации есть следующие типы задач, решаемые по вышеприведенным формулам, с которыми часто приходится иметь дело штурману.

Исправление румбов (прямая задача), т.е. переход от компасных к магнитным и истинным направлениям. Эта задача возникает при прокладке курса и определении места судна.

$$\left. \begin{aligned} IK &= KK + \Delta MK \\ IP &= KP + \Delta MK \\ IK &= MK + d \\ IP &= MP + d \\ MK &= KP + \delta \\ MP &= KP + \delta \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Перевод румбов (обратная задача) – это переход от истинных направлений к компасным и магнитным. Такую задачу, например, следует решать, когда необходимо задать КК рулевому, после того как ИК проложен на карте или при выходе в точку поворота по КП, который рассчитывается по снятому с карты ИП ориентиру.

$$\left. \begin{aligned} \text{КК} &= \text{ИК} - \Delta\text{МК} \\ \text{КП} &= \text{ИП} - \Delta\text{МК} \\ \text{МК} &= \text{ИК} - d \\ \text{МП} &= \text{ИП} - d \\ \text{КК} &= \text{МК} - \delta \\ \text{КП} &= \text{МП} - \delta \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Вспомогательные задачи.

$$\left. \begin{aligned} \Delta\text{МК} &= \text{ИК} - \text{КК} \\ \Delta\text{МК} &= \text{ИП} - \text{КП} \\ d &= \text{ИК} - \text{МК} \\ d &= \text{ИП} - \text{МП} \\ \delta &= \text{МК} - \text{КК} \\ \delta &= \text{МП} - \text{КП} \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

На первых этапах изучения навигации необходимо уметь осуществлять графическую проверку указанных формул при решении задач с помощью рисунков, аналогичных тем, что приведены в параграфе.

2.3. Использование гироскопических курсоуказателей

Гироскопические компасы (ГК) широко применяют на морском флоте. Они более точны, чем магнитные компасы, особенно при качке, и они удобны при работе с авторулевыми.

Чувствительным элементом ГК считается гироскоп со смещенным центром тяжести, осуществляющий слежение за положением истинного меридиана, которое непрерывно меняется в пространстве вследствие суточного вращения Земли.

Ось ГК на движущемся судне по ряду многих причин не устанавливается точно в плоскости истинного меридиана. Направление, которое он фиксирует, является условным *гироскопическим меридианом* («норд giroкомпасный»), и для получения направления на истинный север необходимо вводить поправку giroкомпаса ($\Delta\text{ГК}$) (рис. 2.9).

Направляющий момент ГК не зависит от магнитного поля Земли и значительно больше, чем у магнитного компаса.

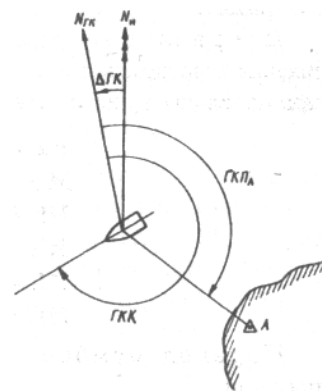


Рис. 2.9

Поправкой ГК называется угол между нордовыми частями истинного и гирокомпасного меридианов. Поправка ГК считается положительной, если $N_{ГК}$ отклонен к Е от истинного меридиана, и отрицательной, если $N_{ГК}$ отклонен к W.

Формулы связи запишутся так:

$$ИП = ГКП + \Delta GK \quad (2.17)$$

$$ИК = ГKK + \Delta GK \quad (2.16)$$

Использование различных физических принципов работы магнитного компаса и гирокомпаса позволяет осуществлять совместную обработку их показаний, т. е. создавать комплексные системы курсоуказания, обладающие наибольшей точностью.

Необходимо учитывать, что с увеличением географической широты линейная скорость вращения меридианов уменьшается, на полюсах она равна нулю.

Поэтому при плавании в высоких широтах ГК работает неустойчиво, т.е. становится менее чувствительным. В широтах более 80° к показаниям ГК необходимо относиться критически.

В качестве указателя направления в высоких широтах применяется *гиросазимут* (ГА). Этот гироскопический прибор, в отличие от гирокомпаса, предназначен для хранения заданного в пространстве направления.

Вследствие различных погрешностей ось чувствительного элемента ГА после его выставки не находится точно в плоскости истинного меридиана и с течением времени уходит от этой плоскости. Это процесс называется дрейфом гиросазимута. Поэтому поправка $\Delta AГ$ меняется со временем:

$$\Delta GA_i = \Delta GA_0 + \alpha(T_i - T_0) \quad (2.18)$$

где ΔGA_i – мгновенная поправка ГА; ΔGA_0 – поправка на начальный момент времени; α – скорость ухода ГА; T_i – текущий момент времени; T_0 – начальный момент времени.

Для удержания главной оси гироскопа гиросазимута в плоскости истинного меридиана и истинного горизонта используются азимутальный и горизонтальный корректоры.

Основным недостатком гиросазимута является то, что он не обладает направляющим моментом, способным отыскивать плоскость истинного меридиана.

Но он меньше подвержен влиянию сил инерции, возникающих при качке и маневрировании судна. В высоких широтах гиросазимут обеспечивает более устойчивое курсоуказание, чем гирокомпас.

Существуют комплексные системы курсоуказания с использованием гирокомпасов и гиросазимуты для плавания в высоких широтах.

2.4. Определение поправок компасов и контроль за их работой в море

Основными достоинствами магнитного компаса являются простота его устройства, высокая степень автономности и надежности. Главным недостатком — невысокая точность определения направлений. Погрешности могут достигать $2...4^\circ$, особенно при качке. Источники погрешностей: магнитное склонение, девиация, инерционность и недостаточная чувствительность системы магнитных стрелок к магнитному полю Земли. Необходимо иметь в виду, что картушка магнитного компаса после маневрирования судна приходит в меридиан через $3...4$ мин, поэтому его использование в этот интервал времени недопустимо.

На судне обычно устанавливают два магнитных компаса: *главный* компас для определения места судна и *путевой* — для управления судном. Главный компас устанавливают в ДП судна, в месте, обеспечивающем круговой обзор и максимальную защищенность от судовых магнитных полей. Обычно — это верхний мостик судна.

Важным для судовождения является точное знание девиации магнитного компаса. Большая девиация недопустима на судне, так как в этой ситуации компас перестает реагировать на магнитное поле Земли и становится просто бесполезным.

Девиация магнитного компаса уничтожается при нормальных условиях плавания не реже одного раза в 6 мес. специальными способами, изучаемыми в курсе девиации. Остаточная же девиация подлежит определению навигационными способами и не должна превышать нескольких градусов.

В соответствии с требованиями хорошей морской практики девиация магнитного компаса определяется:

- не реже одного раза в год;
- после ремонта, докования, размагничивания судна, а также после погрузки и выгрузки грузов, меняющих судовое магнитное поле;
- при значительном изменении магнитной широты;
- при расхождении фактической девиации с табличной более чем на 1° для главных компасов и на 2° для путевых;
- перед дальним рейсом.

Качественное определение «хорошая морская практика» включает в себя практические и теоретические знания, а также профессиональную интуицию, основанную на богатом опыте безопасного плавания многих поколений моряков, что не всегда поддается формализации. Одно из золотых штурманских правил хорошей морской практики: «Считай себя ближе к опасности».

Все способы определения остаточной девиации построены на использовании формулы (2.7). Так как девиация зависит от курса судна, то обычно ее определяют на 8 равноотстоящих компасных курсах, а промежуточные значения находят линейной интерполяцией.

Предполагают также, что судовое магнитное поле симметрично относительно ДП судна, т.е. девиация симметрично распределена относительно магнитного меридиана, поэтому среднее значение компасных пеленгов, взятых на какой-либо удаленный ориентир на равноотстоящих курсах, можно принять за оценку магнитного пеленга

Формулу для определения магнитного пеленга можно записать так:

$$МП = \frac{\sum_{i=1}^8 КП_i}{8} + A \quad (2.19)$$

где А – некоторая поправка за систематическую погрешность, которая должна быть известна на каждом судне для конкретного компаса.

Все измерения должны проводиться, как минимум, двумя наблюдателями.

Рассмотрим основные методы определения девиации.

1. По створу (рис. 2.10).

Это наиболее точный метод. Судно пересекает створ на 8 равноотстоящих компасных курсах, и штурман определяет К_{П_і} створа. Компасные курсы отстоят друг от друга на 45°.

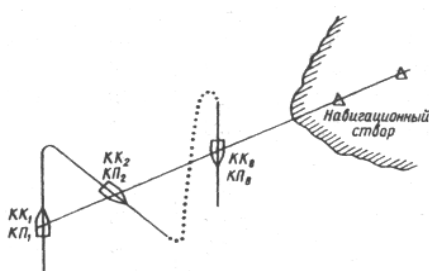


Рис. 2.10

Магнитный пеленг рассчитывают по формуле
МП = ИП - d (2.20)

ИП снимают с карты, d должно быть приведено к году плавания, а при маневрировании в окрестности створа необходимо учитывать инерционные характеристики магнитного компаса.

Если магнитное склонение неизвестно, то можно использовать формулу (2.19). Затем рассчитывают девиацию:

$$\delta_i = МП - КП_i$$

и составляют таблицу или график девиации как функции компасного курса.

Для удобства применения таблицу составляют через 10° по компасному курсу.

При пользовании таблицей девиации в задаче «перевод румбов» штурман не имеет компасного курса, а поэтому в таблицу входят с рассчитанным магнитным курсом и получают приближенное значение КК'. Если необходимо, то делают второе приближение, используя КК' для входа в таблицу.

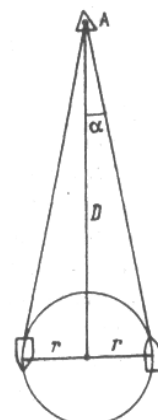


Рис. 2.11

2. По удаленному ориентиру.

Судно совершает циркуляцию на расстоянии D от навигационного ориентира и на 8 равноотстоящих компасных курсах производится его пеленгование (рис. 2.11). Определяют δ по формуле (2.21). Магнитный пеленг может быть рассчитан по формуле (2.19) либо с помощью ИП и d , снятых с навигационной карты.

Необходимо учесть, что дальность до ориентира должна быть выбрана с учетом заданной точности определения пеленга и может быть определена по следующей простой формуле:

$$D = \frac{r}{\sin \alpha} = \frac{r}{\alpha} \quad (2.22)$$

Например, если погрешность пеленга $\alpha = 0,2^\circ$, то

$$D = \frac{57,3^\circ}{0,2^\circ} r = 300r$$

Если акватория для маневрирования ограничена, то судно может быть поставлено на якорь или бочку и развернуто на необходимый КК с помощью буксира.

Таблица 2.2

КК	Δ	КК	δ	КК	δ	КК	δ
0	+2,3	100	-3,3	190	-0,7	280	+4,5
10	+1,7	110	-3,7	200	+0,3	290	+4,3
20	+1,3	120	-4,0	210	+1,3	300	+4,0
30	+1,0	130	-4,3	220	+2,0	310	+3,7
40	+0,5	140	-4,0	230	+2,7	320	+3,5
50	0,0	150	-3,7	240	+3,5	330	+3,0
60	-0,7	160	-3,3	250	+4,0	340	+2,7
70	-1,5	170	-2,5	260	+4,3	350	+2,5
80	-2,0	180	-1,7	270	+4,5	360	+2,3
90	-2,7						

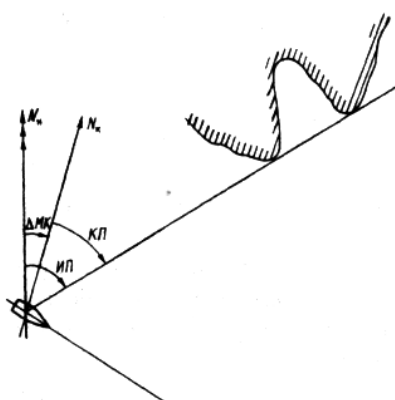


Рис. 2.12

3. С помощью пеленгования светила.

Метод аналогичен вышеописанному. На восьми компасных курсах определяют компасные пеленги светила. Затем рассчитывают его ИП, а зная склонение получают МП. Для расчета девиации применяют формулу (2.21). Для повышения точности пеленгования необходимо выбирать светило, расположенное на малой угловой высоте.

Существенным достоинством метода является то, что вследствие большой удаленности светила точность его не зависит от координат судна, т.е. судно имеет большое пространство для маневрирования.

4. По сличению с другим магнитным компасом или гирокомпасом.

Сличать компасы — это значит синхронно замечать их показания. Может производиться сличение путевого компаса с главным или гирокомпасом. Его производят обычно также на 8 равноотстоящих компасных курсах. Девиацию определяют из условия равенства магнитных курсов, полученных по разным курсоуказателям. Например, если производят сличение путевого и главного магнитных компасов или путевого и гирокомпаса, то справедливы соотношения

$$KK_{\Pi} + \delta_{\Pi} = KK_{ГЛ} + \delta_{ГЛ} \quad (2.23)$$

$$KK_{\Pi} + \delta_{\Pi} = ГKK + \Delta GK - d \quad (2.24)$$

Из этих соотношений может быть вычислена неизвестная девиация.

5. Методом взаимных пеленгов (в экстремальных ситуациях).

Для этого с судна пеленгуют магнитный компас, установленный на берегу или на деревянной шлюпке, а с берега или со шлюпки синхронно пеленгуют компас, установленный на судне. Девиация определяется так:

$$\delta_i = (180^\circ + МП_i) - КП_i \quad (2.25)$$

Современные гирокомпасы вырабатывают курс с точностью до $0,5^\circ$ (при вероятности 0,95) при постоянном курсе и качке не более 2° . При усилении качки и интенсивном маневрировании погрешность курсоуказания может достигать 4° .

Необходимо иметь в виду, что вследствие действия инерционных погрешностей наибольшая точность измерений может быть достигнута через 20...40 мин после окончания маневра, что необходимо учитывать при определении поправок прибора.

Как магнитный компас, так и гирокомпас имеют в своих показаниях систематические погрешности, которые необходимо компенсировать поправками. Эти поправки определяют навигационными или астронавигационными способами, и расчеты выполняет штурман, обычно вахтенный помощник капитана.

В качестве формул расчета применяют известные соотношения:

$$\Delta K = ИК - КК \quad (2.26)$$

$$\Delta K = ИП - КП \quad (2.27)$$

где ΔK , $КК$, $КП$ – общие обозначения поправки компаса, компасного курса и компасного пеленга.

Таким образом, задача заключается в определении истинных направлений, которые обычно снимаются с карты либо рассчитываются астронавигационными методами, если производится пеленгование светил.

Используют следующие методы определения поправок курсоуказателей:

1. По пеленгу створа навигационных ориентиров при плавании в пределах видимости берегов, ИП створа на карте обозначен.

Кроме искусственных створов часто используют естественные береговые створы навигационных ориентиров, например четкие срезы мысов и т.д. (рис. 2.12).

2. По ИП удаленного ориентира, если судно стоит у причала. В этом случае необходимо точно определить на карте или плане координаты компаса и снять ИП на пеленгуемый навигационный ориентир. У причала обычно имеется возможность определения серии поправок по различным ориентирам. Эти поправки необходимо осреднить для получения наиболее вероятных значений.

3. С помощью ИП светила.

4. По сличению с курсоуказателем, поправка которого известна, используя формулы, полученные при приравнении истинных курсов:

$$КК_{\Pi} + \Delta МК_{\Pi} = КК_{ГЛ} + \Delta МК_{ГЛ} \quad (2.28)$$

$$КК_{\Pi} + \Delta МК_{\Pi} = ГКК + \Delta ГК \quad (2.29)$$

Уравнения (2.28) и (2.29) решаются относительно неизвестной поправки.

Указанные формулы используют при переходе с показаний одного компаса на другой, если вышел из строя какой-либо из них. Например, при поломке ГК переходим на путевой компас, используя соотношение (2.29):

$$КК_{\Pi} = ГКК + \Delta ГК - \Delta МК_{\Pi} \quad (2.30)$$

Отсюда понятна необходимость как минимум раз за вахту и при каждой смене курса производить сличение показаний курсопоказателей.

2.5. Морские единицы длины и скорости

Метрическая система неудобна для измерения расстояний на море, так как в процессе судовождения приходится решать задачи, связанные с измерением углов и угловых расстояний. Именно поэтому в качестве основной единицы длины в практике мореплавания принята длина одной минуты дуги меридиана земного эллипсоида.

Для референц-эллипсоида Красовского длина одной минуты такой дуги выражается следующей формулой:

$$\Delta = 1852,23 - 9,34 \cos 2\varphi \quad (2.31)$$

Как видим, минута меридиана эллипсоида – величина непостоянная и является функцией широты места, что чрезвычайно неудобно для ее использования в практических целях.

Величина Драстет от экватора к полюсу, так как увеличивается радиус кривизны поверхности эллипсоида. Хотя разница между длинами минут на полюсе и на экваторе составляет всего около 19 м, но на практике она вызывает большие неудобства. Так, например, при градуировке приборов необходимо иметь постоянное значение единицы расстояния.

В 1928г. Международное гидрографическое бюро в качестве международной стандартной морской мили приняло постоянную величину, равную 1852 м. В России стандартная морская миля принята в 1931г.

Стандартная морская миля соответствует длине минуты меридиана референц-эллипсоида Красовского на широте $44^{\circ}18'$. Она отличается от значений на полюсах и экваторе всего на 0,5%, что практически не выходит за пределы точности определения поправок приборов, используемых для измерения пройденных судном расстояний.

Одна десятая часть морской мили называется кабельтов (кб):

$$1 \text{ кб} = 0,1 \text{ мили} = 185,2 \text{ м.}$$

За единицу скорости в морской навигации принят узел (уз):

$$1 \text{ уз} = 1 \text{ мили/ч.}$$

Понятие «узел» пришло в морскую навигацию из эпохи парусного флота, когда скорость измерялась по длине вытравленного за борт судна лаглиня, прикрепленного к деревянному сектору.

Лаглинь разделялся узелками на части, равные $\frac{1}{120}$ мили. Скорость измерялась в течение 30с, что составляло $\frac{1}{120}$ ч. Таким образом, количество вытравленных за борт узлов на ходу судна за 30 с соответствовало количеству миль в час.

Переход от скорости в узлах к скорости в кабельтовых в минуту производится по формуле

$$V_{\text{кб} / \text{мин}} \approx \frac{V_{\text{уз}}}{6}$$

При расчетах, связанных со скоростью ветра, и в других случаях используется единица метр в секунду (м/с):

$$1 \text{ м/с} \approx 2 \text{ уз}; 1 \text{ уз} \approx 0,5 \text{ м/с.}$$

Соотношение скоростей в различных единицах приведено в таблице 37
МТ = 75.

При использовании картографических материалов других стран могут встречаться другие единицы длины:

сажень морская, равна 1,828м или 6 футам применяется при обозначении глубин;

фут, равен 30,48 см применяется для обозначения высот побережья, малых глубин и осадки судна;

ярд, равен 3 футам или 91,44 см, используется для измерения небольших расстояний в США и Англии.

2.6. Скорость судна и принципы ее измерения

Приборы, служащие для измерения скорости судна и пройденного расстояния, называются *лагами*. Лаг упоминается как измеритель скорости, начиная с XVI в.

Судно, перемещаясь по водной поверхности Земли, совершает движение в двух средах – водной и воздушной, которые также движутся относительно дна морей и океанов.

Движение судна принято делить на *относительное* (относительно водных масс) и *абсолютное* (относительно поверхности Земли). Перемещение судна под действием водных и воздушных масс, т. е. под действием ветра и течения, называют *переносным* движением. В векторном представлении все три вида движения представлены на рис. 2.13 в виде треугольника скоростей.

В специальной литературе вектор переносной скорости $\bar{V}_c$ обычно связывают с понятием общего сноса судна под действием ветра и течения. Таким образом, векторные формулы связи скоростей могут быть записаны так:

$$\bar{V} = \bar{V}_o + \bar{V}_c \quad (2.32)$$

$$\bar{V}_c = \bar{V}_B + \bar{V}_T \quad (2.33)$$

где $\bar{V}$ – вектор абсолютной скорости; $\bar{V}_o$ – вектор относительной скорости; $\bar{V}_c$ – вектор переносной скорости; $\bar{V}_B$ – вектор скорости сноса судна ветром; $\bar{V}_T$ – вектор скорости течения.

В соответствии с типом измеряемой скорости современные лаги делят на абсолютные и относительные. В настоящее время реализованы два физических принципа измерения абсолютной скорости движения судна: по доплеровскому сдвигу частот и с помощью инерциальных систем навигации. Относительную скорость изменяют в основном двумя типами лагов: гидродинамическими и индукционными. Гидродинамические лаги работают по принципу измерения динамического давления набегающего потока воды при движении судна. Относительная скорость является функцией измеренного давления P_d : $V_o = f(P_d)$

Индукционные (электромагнитные) лаги работают по принципу электромагнитной индукции. Магнитное поле, создаваемое специальным устройством на днище судна, перемещается в потоке морской воды, являющейся электролитическим раствором. В ней наводится ЭДС – функция относительной скорости судна:

$$V_0 = f(\text{ЭДС})$$

К измерителям переносной скорости относят дрейфомеры и измерители течений.

Таким образом, *истинной* или *абсолютной* скоростью судна называют скорость судна V относительно Земли (дна) c , учетом действия ветра и течения.

Относительной скоростью V_0 называют скорость судна относительно водных масс.

На скорость оказывают влияние различные факторы.

1. Изменение осадки судна. Установлено, что изменение осадки, а следовательно, и водоизмещения оказывает незначительное влияние на скорость. Изменение водоизмещения на 5% изменяет скорость в среднем на 1%. Конкретное же судно в различных гидрометеоусловиях при различных вариантах загрузки может вести себя по-разному.

2. Обрастание корпуса судна. В результате обрастания подводной части корпуса судна ракушками и водорослями она становится шероховатой, при этом увеличивается трение о воду и уменьшается скорость. Значительное обрастание может уменьшить скорость на 25...30%. Для очистки корпуса судно ставят в док и применяют специальные антиобрастающие покрытия корпуса.

3. Крен судна. При наличии крена давление воды в носовой части судна меньше со стороны повышенного борта. Для удержания судна на курсе необходимо переключать руль на другой борт, что уменьшает его скорость.

4. Дифферент судна. Незначительный дифферент на корму не оказывает влияния на скорость судна, но его увеличение приведет к потере скорости из-за уменьшения эффективности работы винта. При большом дифференте на корму судно уваливается под ветер, и для приведения его на курс необходимо использовать руль. Это уменьшает скорость.

Дифферент на нос значительно влияет на скорость судна из-за увеличения лобового сопротивления движению и уменьшения эффективности работы винтов. Кроме того, корма увеличивает парусность и уваливается под ветер, поэтому для удержания судна на курсе опять используют руль, оказывающий тормозящее действие.

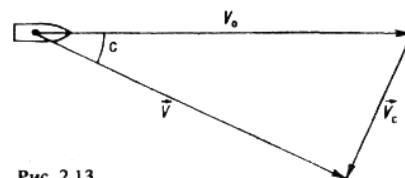


Рис. 2.13

Рис. 2.13

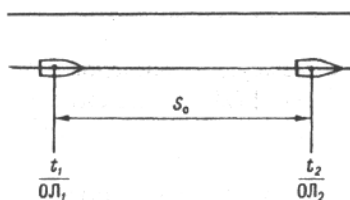


Рис. 2.14

5. Рыскание судна. Рыскание снижает скорость за счет переключек руля и увеличивает проходимое расстояние.

6. Мелководье. При плавании на мелководье скорость судна обычно падает на 10...15% за счет увеличения сопротивления воды движению судна.

7. Волнение и ветер. В большинстве ситуаций эти гидрометеорологические явления уменьшают скорость судна, но при попутном ветре и несильном волнении скорость может увеличиваться на 3...5%.

8. Течение. В зависимости от направления может уменьшить или увеличить скорость судна

9. Изменение числа работающих винтов. Экспериментально установлено, что если у двухвинтового судна работает один винт, то его скорость уменьшается примерно на 20%. Если у трехвинтового судна работает один винт, то его скорость уменьшается на 30%.

Определение вектора истинной скорости судна является важной задачей в морском судовождении, от которой существенно зависит точность счисления пути судна, а соответственно, и безопасность мореплавания.

На большинстве транспортных судов мирового флота для определения скорости используются относительные лаги, работающие на различных физических принципах. Эти лаги измеряют скорость V_0 по направлению диаметральной плоскости судна, т.е. по курсу. Важное значение имеет точное знание скорости V_0 при различных режимах работы двигателя для определения V , а также для расчета маневренных характеристик судна.

2.7. Определение относительной скорости и расстояния

Выработка расстояния относительными лагами производится по измеренной скорости с помощью интеграторов

$$S_0 = \int_{t_1}^{t_{i+1}} V_0 dt$$

Расстояние S_0 от некоторого нуля фиксируется специальным счетчиком, а его мгновенное значение в данный момент называется *отсчетом лага* (ОЛ). Пройденное судном расстояние определяют с помощью относительного лага как разность между его последовательными отсчетами (разность отсчетов лага, РОЛ) в моменты времени t_{i+1} и t_i снятыми со счетчика лага:

$$\text{РОЛ} = \text{ОЛ}_{i+1} - \text{ОЛ}_i.$$

Лег, как и любой прибор, определяет скорость с погрешностью. Систематическая погрешность в показаниях лага может быть компенсирована поправкой $\Delta Л$, имеющей обратный знак. Такая поправка, выраженная в процентах, называется поправкой лага.

Она рассчитана по следующим формулам и может иметь как положительный, так и отрицательный знаки (рис. 2.14):

$$\Delta L = \frac{S_0 - POЛ}{POЛ} 100 \quad (2.34)$$

$$\Delta L = \frac{V_0 - V_{\text{л}}}{V_{\text{л}}} 100 \quad (2.35)$$

где $POЛ$ – разность отсчетов лага, определяемая по его показаниям в последовательные моменты времени t_1 и t_2 $POЛ = OL_2 - OL_1$; S_0 – фактически пройденное судном расстояние относительно воды, которое может быть определено различными точными навигационными способами; соответственно V_0 и $V_{\text{л}}$ – скорости судна относительно воды и показанная лагом.

Необходимо четко представлять, что при отсутствии течения $S_0 = S$, где S – расстояние, проходимое судном относительно грунта.

В приложении 4 МТ-75 есть таблица, реализующая формулу (2.34).

Если поправка лага известна, то пройденное расстояние в море может быть получено из (2.34) так:

$$S_{\text{л}} = POЛ \left(1 + \frac{\Delta L}{100} \right) \quad (2.36)$$

Теперь к обозначению расстояния добавляют индекс «л». Это означает, что оно рассчитано по показаниям лага.

Вместо поправки часто используют коэффициент лага:

$$K_{\text{л}} = 1 + \frac{\Delta L}{100} = \frac{S_{\text{л}}}{POЛ} \quad (2.37)$$

откуда

$$S_{\text{л}} = POЛ K_{\text{л}} \quad (2.38)$$

Скорость судна и правильность работы лага, т.е. поправка лага определяются на ходовых испытаниях. Задача определения скорости заключается в том, чтобы получить ее относительно воды, искомая скорость течения, которую не учитывает относительный лаг, а потому ветер и волнение должны быть минимальны. В соответствии со стандартными рекомендациями волнение должно быть не более трех баллов, скорость ветра – до 8 м/с, глубина моря, не менее шести средних осадков судна.

Необходимо иметь в виду, что относительный лаг учитывает продольную составляющую вектора скорости ветрового дрейфа судна $V_{\text{л}}$, но сложность ее исключения из результатов измерения накладывает ограничения на силу ветра при скоростных испытаниях.

Скоростные испытания должны проводиться для всех режимов работы двигателя: полного, среднего, малого и самого малого хода. Загрузка должна быть нормальной, в полном грузу и в балласте. Определение скорости и поправки лага производится на мерной линии, которая представляет специальный полигон, оборудованный секущими, а иногда и ведущими створами. Одновременно с V_0 и $\Delta_{\text{л}}$ на мерной линии фиксируют количество оборотов винта N , соответствующих измеренной скорости, чтобы в море иметь дополнительный источник информации для определения относительной скорости судна по числу N .

Развив необходимую скорость, судно ложится на ИК пробега, который должен быть перпендикулярен секущим створам. При их пересечении с помощью секундомера засекаются время t_1 и t_2 , а также отсчеты лага $ОЛ_1$ и $ОЛ_2$.

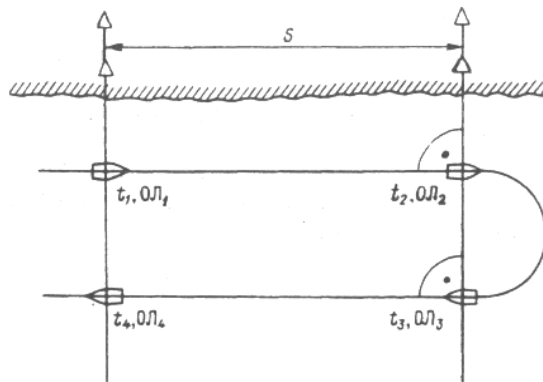


Рис. 2.15

Небольшое рыскание в пределах 3° не окажет заметного влияния на точность результата, так как $\cos 3^\circ \approx 0,999$.

Скорость судна при отсутствии течения рассчитывают по известным соотношениям:

$$t = t_2 - t_1 \quad (2.39)$$

$$V = V_0 = 3600 \frac{S}{T} \quad (2.40)$$

Поправку и коэффициент лага получают из формул (2.34)...(2.37), одновременно фиксируя величину N .

После пересечения второго секущего створа судно отворачивает на $10...15^\circ$ в сторону моря и совершает плавную циркуляцию для выхода на обратный курс (рис. 2.15).

Промежутки времени между пробегами должны быть определены с учетом времени разгона судна, так как на циркуляции может происходить потеря скорости до $40...50\%$.

Теоретически при отсутствии течения для определения скорости и поправки лага достаточно одного пробега. Если же в районе испытания существует постоянное течение, то для его исключения необходимо произвести аналогичные измерения на обратном курсе.

В таком случае осреднение результатов исключает влияние течения. Предположение об отсутствии постоянного течения на мерной линии практически невыполнимо, поэтому для большей надежности испытаний рекомендуется выполнять всегда два пробега на противоположных курсах.

Покажем, что осреднение результатов действительно исключает влияние постоянного течения при двух пробегах. Для упрощения рассуждений будем оперировать скоростными треугольниками. Если судно выдерживает по компасу заданные направления пробегов, которые отличаются на 180° , то проекция вектора скорости постоянного течения V'_T на эту линию будет одинакова в первом и во втором случаях, (рис. 2.16). Приняв относительную скорость на пробегах V_1 и V_2 , можно рассчитать относительную скорость:

$$V_0 = \frac{V_1 + v'_T + V_2 - v'_T}{2} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.41)$$

Результат говорит о том, что при скоростных испытаниях необходимо пользоваться компасом для удержания направления движения, а не ведущими створами.

Соответственно поправка лага при двух пробегах рассчитывается и как средняя поправка:

$$\Delta L = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{2} \quad (2.42)$$

где ΔL_1 , ΔL_2 – поправки, включающие погрешности от не исключенного вектора скорости постоянного течения.

Так же рассчитывают и средние обороты винта для данного режима работы двигателя:

$$N = \frac{N_1 + N_2}{2} \quad (2.43)$$

Постоянство вектора скорости течения легко проверяется третьим пробегом. Критерий проверки: $РОЛ_1 = РОЛ_3$, или $t_1 + t_3$.

При постоянном ускорении течения рекомендуется выполнять три пробега и использовать для осреднения следующие формулы:

$$V_0 = \frac{V_1 + 2V_2 + V_3}{4} \quad (2.44)$$

$$\Delta L = \frac{\Delta L_1 + 2\Delta L_2 + \Delta L_3}{4} \quad (2.45)$$

Четыре пробега дадут возможность частично скомпенсировать непостоянство вектора ускорения течения, тогда расчет производится по следующим формулам:

$$V_0 = \frac{V_1 + 3V_2 + 3V_3 + V_4}{8} \quad (2.46)$$

$$\Delta I = \frac{\Delta I_1 + 3\Delta I_2 + 3\Delta I_3 + \Delta I_4}{8} \quad (2.47)$$

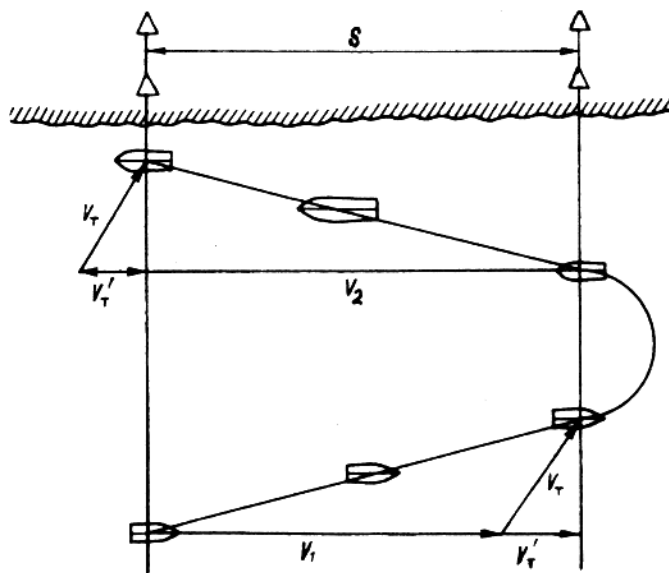


Рис. 2.16

После измерений определяются средние значения N и $K_{\text{д}}$ по аналогичным зависимостям. Применение формул (2.44)...(2.47) не обеспечивает полное исключение вектора скорости течения, но остаточная систематическая погрешность поглощается случайными погрешностями измерений, поэтому на практике они работоспособны.

Точность определения скорости на мерной линии можно получить из формулы $V_0 = S/t$ стандартным приемом вычисления средней квадратичной погрешности функции (операция взятия математического ожидания) при условии, что погрешности, оставшиеся от исключения течения, пренебрежимо малы:

$$m_{V_0} = \frac{1}{t} \sqrt{s^2 + \left[\frac{m_t}{t} S \right]^2}, m_{V_0} = \frac{V_0}{S} \sqrt{m_s^2 + m_t^2 V_0^2} \quad (2.48)$$

Как видим, m_{V_0} зависит от длины пробега S .

Полагая, что в (2.48) можно принять $m_s=0$, так как расстояние измеряют с карты с высокой точностью, относительная погрешность измерения скорости

$$\frac{m_{V_0}}{V_0} = 0.5 \%$$

а $m_t=1,5$ с, получим выражение для оптимальной длины пробега в милях при данных условиях и скорости судна в узлах:

$$S = \frac{V_0}{12} \quad (2.49)$$

Читателю предлагается самостоятельно получить результат (2.49) из (2.48).

Формулу точности определения поправки лага, %, получаем из формулы (2.37). Она имеет вид

$$m_{\Delta L} = \frac{m_{\text{РОЛ}}}{\text{РОЛ}^2} S * 100 \quad (2.50)$$

После испытаний на мерной миле строятся таблицы или графики соответствия скорости судна числу оборотов N , а также график зависимости поправки лага от скорости судна.

При необходимости определить скорость судна на переменном течении, т.е. когда $t_1 \neq t_3$, можно воспользоваться методом академика А.Н.Крылова, который реализуем, если проекция вектора скорости течения на линию ИК меняется линейно во времени. Воспользуемся известным изложением метода:

$$v'_T = v_{T_0} + kt \quad (2.51)$$

где v'_T – проекция скорости течения на линию ИК в момент времени t ; v_{T_0} – проекция скорости течения на линию ИК в момент $t=0$; k – постоянный неизвестный коэффициент.

Один пробег, перпендикулярный текущим створам, позволяет определить относительную скорость судна на этом пробеге с погрешностями, вносимыми течением:

$$V_1 = \frac{S}{t_1} \quad (2.52)$$

Иначе уравнение (2.52) может быть приближенно переписано так:

$$V_1 = V_0 + v'_{T_0} + kt'_{cp1} \quad (2.53)$$

где v'_{T_0} – проекция скорости течения на линию ИК в момент начала первого пробега;

$$t'_{cp1} = \frac{t_1}{2} - \text{средний момент первого пробега.}$$

Последнее слагаемое в правой части уравнения (2.53) частично учитывает изменение вектора скорости течения на первом пробеге, поэтому строго уравнения (2.52) и (2.53) не идентичны.

Второй пробег на противоположном курсе и рассчитанная V_2 , позволяют получить второе уравнение:

$$V_2 = V_0 - v'_{t_2} - kt_{cp_2} \quad (2.54)$$

где t_{cp_2} – средний момент второго пробега,

$$t_{cp} = t_1 + T_1 + \frac{t_2}{2} \quad (2.55)$$

T_1 – время между окончанием первого и началом второго пробегов, т.е. время циркуляции и выхода на новый курс.

Опять использование среднего времени t_{cp_2} дает частичный учет течения.

Аналогично третий пробег, который совершается в направлении первого, дает еще одно уравнение:

$$V_3 = V_0 + v'_{T_0} + kt_{cp_3} \quad (2.56)$$

$$t_{cp_3} = t_1 + T_1 + t_2 + T_2 + \frac{T_3}{2} \quad (2.57)$$

где T_3 – промежуток времени между концом второго и началом третьего пробега.

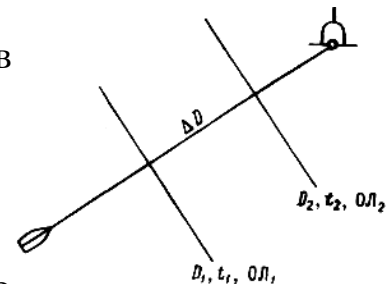


Рис. 2.17

Теперь из уравнений (2.53) и (2.56) можно найти коэффициент k , что неожиданно и достаточно красиво:

$$k = \frac{V_3 - V_1}{t_{cp_3} - t_{cp_1}} \quad (2.58)$$

Из выражений (2.53) и (2.54) можно определить скорость судна относительно воды:

$$V_0 = \frac{V_1 + V_2 + (V_3 - V_1) \left[\frac{t_{cp_2} - t_{cp_1}}{t_{cp_3} - t_{cp_1}} \right]}{2} \quad (2.59)$$

Моменты времени при скоростных испытаниях фиксируются секундомером.

В соответствии с вышеуказанными предположениями формула (2.59) справедлива лишь при линейной постановке задачи скорость судна V_0 и поправку лага ΔL в море можно определить с помощью радиолокационной станции (РЛС) и свободно плавающего буя или вехи.

В этом случае ложатся на курс, на плавающий ориентир, измеряют до него последовательные расстояния через 3...4 мили и фиксируют время (рис. 2.17), затем рассчитывают скорость и поправку лага:

$$V_0 = \frac{D_1 - D_2}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta D}{t}$$

Точность можно рассчитать, используя формулу (2.48), если положить $m_{\Delta D} = m_S$, а $\Delta D = S_0$:

$$m_{V_0} = \frac{1}{t} \sqrt{m_{\Delta D}^2 + \left[\frac{m_t}{t} \Delta D \right]^2}$$

Соответственно формула расчета поправки лага, %, запишется так:

$$\Delta L = \frac{\Delta D - РОЛ}{РОЛ} * 100$$

а точность расчета поправки определится формулой (2.50). Задаваясь погрешностями $m_{\Delta L}$ и $m_{РОЛ}$ и полагая, что можно принять $\Delta D = S_0 \approx РОЛ$, получим формулу для оценки величины ΔD

$$\Delta D = \frac{m_{РОЛ}}{m_{\Delta L}} * 100$$

Если для примера $m_{РОЛ} = 0,4$ кб, а $m_{\Delta L} = 1\%$, то минимальное расстояние $\Delta D = 4$ мили.

Для повышения точности результатов рекомендуется сделать несколько пробегов с последующим осреднением результатов. Поправка лага должна иметь точность не хуже 0,5%.

Для определения скорости и поправки лага можно воспользоваться измерениями, полученными с помощью точных радионавигационных систем (РНС) на специальных полигонах, о которых пойдет речь в следующих главах.

Если известны относительная скорость V_1 и соответствующие ей обороты винта N_1 то для прогноза относительной скорости V_2 по числу оборотов N_2 можно воспользоваться эмпирической формулой Афанасьева

$$V_2 = V_1 \left[\frac{N_2}{N_1} \right]^{0,9}$$

На судах, оборудованных гребными винтами регулируемого шага (ВРШ), испытания проводят при нескольких положениях лопастей для каждой скорости.

2.8. Определение скорости и расстояния с помощью абсолютного лага

Абсолютный лаг измеряет две составляющие абсолютной скорости судна V : продольную V_x и поперечную V_y (рис. 2.18). Продольная составляющая V_x направлена по ДП судна и имеет положительный 1 знак при переднем ходе. Поперечная составляющая V_y перпендикулярна ДП судна и имеет положительный знак при направлении в сторону правого борта.

Векторное уравнение скоростей можно записать так:

$$\vec{V} = \vec{V}_x + \vec{V}_y$$

Соответственно модуль и направление вектора $\vec{V}$ относительно ДП судна определяется следующим образом:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, \operatorname{tg} C = \frac{V_y}{V_x}$$

Угол C – суммарный угол сноса судна под действием ветра и течения, определяющий направление пути судна ПУ_C .

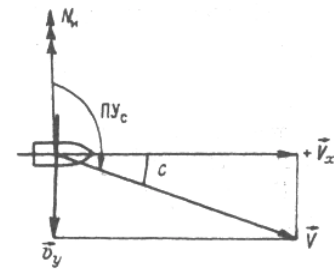


Рис. 2.18

На мерной линии для абсолютных лагов определяются две константы: соответственно по продольному и поперечному каналам.

По оси x определяется коэффициент лага, %,

$$K_{\text{л}} = 1 + \frac{V_x - V_{x\text{л}}}{V_{x\text{л}}} = \frac{V_x}{V_{x\text{л}}}$$

По оси y определяется условный угол разворота акустических антенн P_a :

$$P_a = \frac{V_y - V_{y\text{л}}}{V_x}$$

где V_x , V_y – истинные продольная и поперечная составляющие вектора абсолютной скорости $\vec{V}$; а $V_{x\text{л}}$, $V_{y\text{л}}$ – лаговые значения продольной и поперечной составляющих вектора абсолютной скорости $\vec{V}_{\text{л}}$.

Учет поправочных коэффициентов позволяет получить исправленные значения составляющих абсолютной скорости:

$$V_x = V_{x\text{л}} K, V_y = V_{y\text{л}} + V_x P_a$$

Расстояния, пройденные судном, рассчитывают по следующим формулам:

$$S_x = K_{\text{л}} (\text{ОЛ}_{x_2} - \text{ОЛ}_{x_1}) = \text{ПОЛ}_x K_{\text{л}}$$

$$S_y = (\text{ОЛ}_{y_2} - \text{ОЛ}_{y_1}) + S_x P_a = \text{ПОЛ}_y + S_x P_a$$

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

Поскольку абсолютный лаг значительно точнее относительного, то и к измерениям, определяющим его поправки, необходимо относиться более тщательно. Для определения поправочного коэффициента K_L на мерной линии наблюдения за моментами пересечения секущих створов необходимо вести в оптический пеленгатор или бинокль с кратностью увеличения не менее двух.

Для определения K_L и P_a с высокой точностью используют высокоточные радионавигационные системы (РНС) и теодолитные засечки с берега.

По обсервациям определяют эталонную абсолютную скорость судна и ее компоненты, синхронные же измерения курса и показаний лага дают лаговую скорость и ее составляющие. Число пробегов для каждого скоростного режима должно быть не менее семи, после чего статистически обрабатывают результаты измерений – определяют средние значения оцениваемых параметров и их доверительные интервалы. После этого составляют таблицы и графики поправок в зависимости от скорости судна.

Раздел II

КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЕКЦИИ И МОРСКИЕ КАРТЫ

Глава 3

Меркаторская проекция.

Глава 4

Другие виды

картографических проекций, применяемых в навигации.

Глава 5

Морские навигационные карты.

Глава 3

МЕРКАТОРСКАЯ ПРОЕКЦИЯ

3.1. Локсодромия

С появлением на морских судах магнитных компасов стало удобно плавать по линии постоянного курса, что стимулировало геометрические исследования в этой области. Кривую на поверхности Земли, пересекающую все меридианы под одним и тем же углом, назвали локсодромией, что с греческого переводится как «косой бег». Ее вид на поверхности сферы представлен на рис. 3.1. Для формального описания локсодромии применяется тот же математический аппарат, что и для описания картографической проекции Меркатора, эти вопросы тесно связаны между собой.

Расстояние между двумя точками на сфере по локсодромии не является кратчайшим и ее применение в мореплавании объясняется исключительным удобством использования компасов. Эта кривая чрезвычайно важна в практике навигации.

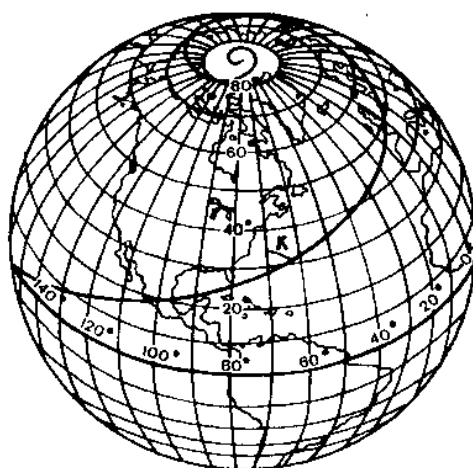
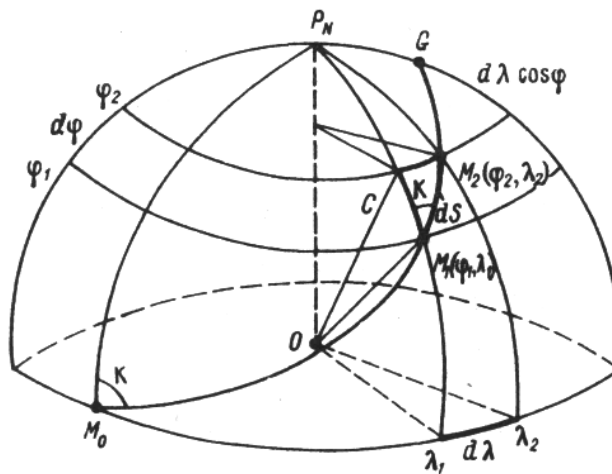


Рис. 3.1

Название локсодромия данная кривая имеет, в основном, в сферической геометрии и навигации, а в математике она известна под более общим названием — логарифмическая спираль. Это одна из замечательных математических кривых, у которой радиус-вектор составляет постоянный угол с касательной к ней в любой точке. В навигационной терминологии этот угол между истинным меридианом и носовой частью ДП судна называют истинным курсом.

Выведем уравнение кривой на поверхности сферы. Для этого рассмотрим рис.3.2, на котором изображен отрезок локсодромии, пересекающей меридианы под углом K . Выберем на локсодромии две точки $M_1(\varphi_1, \lambda_1)$ и $M_2(\varphi_2, \lambda_2)$, разделенные элементарным расстоянием d_s друг от друга, и проведем через них параллели и меридианы.



Замена пределов интегрирования от любой текущей точки $M(\varphi, \lambda)$ до фиксированной точки $M_1(\varphi_1, \lambda_1)$ даст более общее уравнение

$$\lambda_1 - \lambda = \operatorname{tg} K \left[\ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_1}{2} \right) - \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (3.5)$$

После получения уравнения локсодромии можно сделать анализ ее свойств, не прибегая к рис. 3.1, как было сделано выше. Проверим эти свойства кривой по уравнению (3.4).

1. Если $K=0$ или 180° , то $\lambda_1 = \lambda$, это подтверждает ранее полученное предположение, что локсодромия совпадает с меридианом. Подтверждается первое свойство.

2. При $K=90$ или 270° $\operatorname{tg} K = \infty$, что возможно, если выполняется следующее условие:

$$\ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_2}{2} \right) - \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_1}{2} \right) = 0$$

а это выполнимо при $\varphi_1 = \varphi_2$, т.е. когда локсодромия совпадает с параллелью или экватором и образует малый или большой круг на поверхности сферы. Второе свойство также подтверждается.

3. Пусть локсодромия проходит через точку на экваторе, т.е. $\varphi_1 = 0^\circ$, а $0^\circ < K < 90^\circ$ в четвертном счете. В этом случае (3.4) может быть записано так:

$$\ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_2}{2} \right) = \Delta \lambda \operatorname{ctg} K$$

Умножаем правую часть на $\ln e := 1$, производим операцию потенцирования, после чего получаем следующее выражение:

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_2}{2} \right) = e^{\Delta \lambda \operatorname{ctg} K}$$

Это уравнение логарифмической спирали. Для каждой $\Delta \lambda$, отличающейся от предыдущей на 2π , т.е. $\Delta \lambda_{i+1} = \Delta \lambda_i + n2\pi$, φ_2 будет иметь новое значение. Таким образом, локсодромия пересекает каждый меридиан бесчисленное количество раз, изменяя широту, и стремится к полюсу, никогда его не достигая. Итак, и третье свойство локсодромии имеет четкое формальное доказательство.

Напишем уравнение локсодромии с учетом сжатия Земли, поэтому трансформируем (3.3) для поверхности эллипсоида. Для этого необходимо в правую часть уравнения ввести выражения для главных радиусов кривизны земного эллипсоида M и N :

$$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}; N = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad (3.6)$$

где M – радиус кривизны меридианного сечения; N – радиус кривизны нормального сечения; e – эксцентриситет земного эллипсоида; a – радиус экватора эллипсоида.

Уравнение (3.3) переписывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda &= tgK \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{M d\varphi}{N \cos \varphi} = tgK \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{(1-e^2) d\varphi}{(1-e^2 \sin^2 \varphi) \cos \varphi} = \\ &= tgK \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{(1-e^2 \sin^2 \varphi - e^2 \cos^2 \varphi) d\varphi}{(1-e^2 \sin^2 \varphi) \cos \varphi} = tgK \left[\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\varphi}{\cos \varphi} - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{e^2 \cos \varphi d\varphi}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)} \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Произведем следующую подстановку в (3.7):

$$e \sin \varphi = \sin \psi \quad (3.8)$$

Дифференцируем (3.8):

$$e \cos \varphi d\varphi = \cos \psi d\psi \quad (3.9)$$

Теперь подставим (3.9) в (3.7) и обозначим соответствующие интегралы через I и J :

$$\lambda_2 - \lambda_1 = tgK \left[\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\varphi}{\cos \varphi} - \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{e d\psi}{\cos \psi} \right] = tgK (I - J) \quad (3.10)$$

Таким образом, когда $M = N$, т. е. в случае решения задачи на поверхности шара, за уравнение локсодромии отвечает интеграл I , а в случае эллипсоида вводится дополнительный интеграл J .

$$J = e \left[\ln tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi_2}{2}\right) - \ln tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi_1}{2}\right) \right] \quad (3.11)$$

Произведем обратную замену переменных. Элементарные тригонометрические соотношения позволяют получить следующие формулы:

$$tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}\right) = \sqrt{\frac{1 - \cos(\pi/2 + \psi)}{1 + \cos(\pi/2 + \psi)}} = \sqrt{\frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}} = \sqrt{\frac{1 + e \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} = \left(\frac{1 + e \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

После подстановки (3.12) в (3.11) получаем:

$$J = e \ln \left[\frac{1 + e \sin \varphi_2}{1 - \sin \varphi_2} \right]^{1/2} - e \ln \left[\frac{1 + e \sin \varphi_1}{1 - \sin \varphi_1} \right]^{1/2} = \ln \left[\frac{1 + e \sin \varphi_2}{1 - \sin \varphi_2} \right]^{e/2} - \ln \left[\frac{1 + e \sin \varphi_1}{1 - \sin \varphi_1} \right]^{e/2} \quad (3.13)$$

Теперь, подставив (3.13) в (3.10) и осуществив операцию потенцирования, напишем уравнение локсодромии для эллипсоида

$$\lambda_2 - \lambda_1 = tgK \left[\ln tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_2}{2}\right) \left[\frac{1 - e \sin \varphi_2}{1 + e \sin \varphi_2} \right]^{e/2} - \ln tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_1}{2}\right) \left[\frac{1 - e \sin \varphi_1}{1 + e \sin \varphi_1} \right]^{e/2} \right] \quad (3.14)$$

Более краткая запись выражения (3.14) выглядит так:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \operatorname{tg} K (\ln U_2 - \ln U_1) \quad (3.15)$$

где $U_{1,2}$ - изометрическая широта

Локсодромия играет одну из основных ролей в формализации условий проектирования морской навигационной карты.

3.2. Требования, предъявляемые к морской навигационной карте

С развитием практики мореплавания сформировались и требования, предъявляемые к морской навигационной карте. Перечислим основные из них, относящиеся непосредственно к картографической проекции.

Прежде всего, это конформность проекции, т.е. ее равноугольность. Все углы на карте должны быть соответственно равны углам, измеряемым на земной поверхности. Это вполне естественное требование практики, так как в навигации постоянно имеют дело с измерениями различных углов на поверхности Земли.

Локсодромия на карте должна изображаться прямой линией.

Из этого условия следует, что если произвольная локсодромия изображается на карте прямой линией, то и меридианы должны быть представлены параллельными прямыми линиями. По этим же соображениям экватор, который перпендикулярен меридианам, тоже является прямой, как и все параллельные ему параллели. Таким образом, предполагаемая проекция должна иметь ортогональную картографическую сетку параллелей и меридианов.

Картографическая проекция, удовлетворяющая поставленным требованиям, была предложена в 1569 г. крупным голландским математиком и картографом Герардом Кремером (1512 – 1594 гг.), носившим латинское имя Меркатор.

Незадолго до его рождения завершились исторические плавания Христофора Колумба, открывшего Америку, а португалец Васко да Гама, обогнув южную оконечность Африканского континента, достиг морским путем Индии. Меркатор был еще мальчиком, когда погиб знаменитый мореплаватель Фернан Магеллан совершивший первое кругосветное путешествие и отыскавший пролив из Атлантического океана в Тихий.

Эпоха Великих географических открытий, а может быть, точнее, эпоха великих и отважных мореплавателей послужила мощным толчком к развитию многих прикладных отраслей математики, из которых выделились навигация и картография.

Предложенная Меркатором картографическая проекция широко применяется в морской навигации и носит название меркаторской проекции.

Изучим основы ее теории.

3.3. Теория меркаторской проекции

Меркаторская проекция относится к классу цилиндрических нормальных равноугольных проекций, в которых параллели нормальной сетки есть параллельные прямые, а расстояния между меридианами пропорциональны соответствующим разностям долгот.

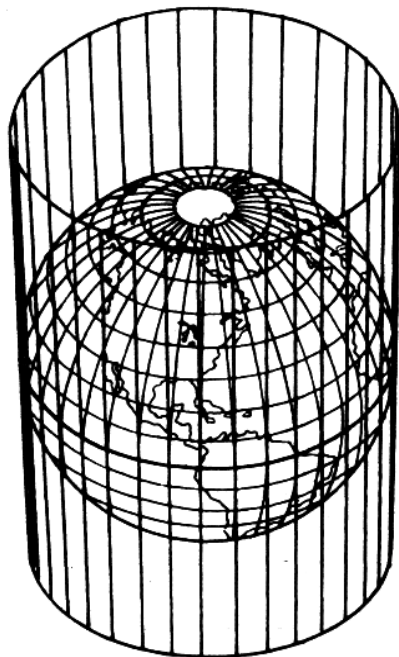


Рис. 3.3

Как известно, цилиндрическая проекция задается общими уравнениями следующего типа:

$$x = f(\varphi); y = C\lambda \quad (3.16)$$

где x, y – картографические координаты; C – произвольная постоянная; первое уравнение – уравнение параллелей, второе – уравнение меридианов.

Термин «цилиндрическая» говорит о том, что проекция имеет некоторую, правда не всегда точную, наглядную интерпретацию, как проекция эллипсоида или шара на поверхность цилиндра (рис. 3.3).

Меркаторская же проекция не может быть представлена четкой геометрической картиной из-за налагаемого на нее требования конформности, хотя (рис. 3.3) вполне дает общее представление о проекции.

Приведем основные этапы проектирования карты.

1-й этап. Осуществление геодезических измерений на поверхности Земли и их координатная привязка к конкретному референц-эллипсоиду.

2-й этап. Уменьшение размеров референта-эллипсоида до определенного масштаба с целью его дальнейшего разворачивания на плоскости, т. е. создание условной эллипсоидальной модели Земли (глобуса) в масштабе, пригодном для изготовления карт. Это математическое преобразование Эллипсоид – Глобус сохраняет геометрическое подобие контуров изображений. Масштаб преобразования называется главным масштабом μ_0 будущей карты.

3-й этап. Выбор картографической проекции для разворачивания условного глобуса на плоскости и проектирование (преобразование Глобус – Карта). Из теории искажений известно, что при проектировании эллипсоида на плоскость масштабно остается постоянным лишь на определенном множестве точек карты. В общем случае при удалении от этого множества масштаб изменяется и становится *частным масштабом* μ другого множества точек.

Величина $c = \frac{\mu_0}{\mu}$ – называется увеличением масштаба.

Вообще, выбор постоянной C в (3.16) может быть произвольным. Если $C = a$, где a – радиус экватора, то масштаб вдоль экватора n_0 равен главному масштабу μ_0 и в этом случае говорят о проекции на «касательном цилиндре», (см. рис. 3.3). Если требуется, чтобы масштаб вдоль какой-либо параллели был равен главному масштабу, например для $\varphi = 45^\circ$, то говорят о проекции на «секущем цилиндре».

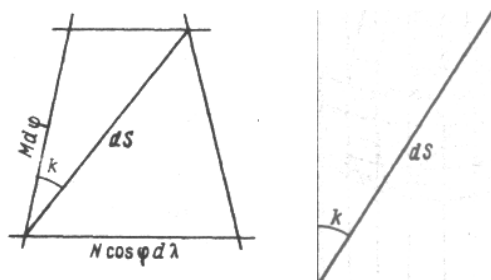


Рис. 3.4

Проследим ход мыслей великого картографа, следуя простой логике. На рис. 3.4 представлена элементарная трапеция поверхности земного эллипсоида, выполненная в масштабе μ_0 и ограниченная отрезками параллелей и меридианов. Локсодромия является диагональю трапеции и имеет элементарную длину dS . Справа на том же рисунке – желаемая форма этой трапеции после применения к ней математического преобразования, называемого картографической проекцией.

Функцию преобразования координат с учетом выдвинутых требований нам и нужно отыскать. Естественно, что в этой трапеции масштабы преобразования Эллипсоид – Глобус по параллели n и меридиану m равны, т.е. $m = n = \mu_0$, откуда углы на глобусе равны углам на эллипсоиде.

Теперь при проектировании глобуса на плоскость необходимо сохранить равенство углов на карте и глобусе, но изменить конфигурацию координатной сетки в соответствии с требованиями к карте. Этого можно достичь, когда при проектировании глобуса на плоскость масштабы m и n будут искажаться одинаково в любой точке карты.

Таким образом, формальный признак равноугольности карты $m/n = 1$. Отсюда получаем следующее условие равенства углов:

$$m = n. \quad (3.17)$$

Теперь, минуя промежуточный этап, запишем формулы для масштабов, получаемых при преобразовании Эллипсоид – Карта в соответствии с рис. 3.4.

$$m = \frac{dx}{M d\varphi}; n = \frac{dy}{r d\lambda} = \frac{dy}{N \cos \varphi d\lambda} \quad (3.18)$$

где r – радиус параллели.

Поскольку $y = \alpha\lambda$, то $dy = \alpha d\lambda$, и выражение для n будет выглядеть так:

$$n = \frac{\alpha d\lambda}{N \cos \varphi d\lambda} = \frac{\alpha}{N \cos \varphi} \quad (3.19)$$

Перепишем равенство (3.17) с учетом полученных выражений (3.18) и (3.19):

$$\frac{dx}{M d\varphi} = \frac{\alpha}{N \cos \varphi} \quad (3.20)$$

где a - радиус экватора земного эллипсоида.

Положив начало плоских прямоугольных координат на экваторе, найдем вид функции f , определяющей закон изменения расстояний

$$\int_0^x dx = D = \alpha \int_0^\varphi \frac{(1 - e^2) d\varphi}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi) \cos \varphi} \quad (3.21)$$

Окончательно уравнения меркаторской проекции и формулы масштабов запишутся после интегрирования выражения (3.21) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} x &= D = \alpha \ln U \\ y &= \alpha \lambda \\ m &= n = \frac{\alpha}{N \cos \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

Как отмечалось в п. 3.2, величина U в математической картографии называется изометрической широтой.

Для шара $N = a = R$ и уравнения проекции соответственно выглядят так:

$$\left. \begin{aligned} x &= R \ln \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \\ y &= R \lambda \\ m &= n = \frac{1}{\cos \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

где R - радиус шара

Размерность величин x и y обычно выражается в метрах, но для морских навигационных задач удобнее эти величины выражать в экваториальных минутах. Радиус экватора в минутах

$$a = 3437,74'.$$

Тогда, обозначив $x = D$, имеем

$$D = 3437,74' \ln U$$

Перейдя от натуральных логарифмов к десятичным, будем иметь следующую формулу для расчета D :

$$D = \frac{3437,74'}{0,434} \lg U = 7915,704468 \lg U \quad (3.24)$$

Для шара получим следующее выражение:

$$D = 7915,7045 \lg \operatorname{tg} U \quad (3.25)$$

Величины x , обозначаемые в специальной литературе также D или $MЧ$, называются *меридиональными частями*. Они представляют собой расстояния, отсчитываемые на меркаторской карте по меридиану от экватора до данных параллелей, и выражаются в экваториальных минутах (экваториальных милях). Значения меридиальных частей для эллипсоида Красовского приведены как в Картографических, так и в Мореходных таблицах.

Анализ выражении (3.24) и (3.25) позволяет выявить существенное ограничение проекции: при $\varphi = 90^\circ$ $D = \infty$, это говорит о том, что на карте меркаторской проекции полюс изобразить нельзя. Более того, это ограничение, в соответствии с формулами масштабов, накладывается и на районы высоких широт.

Рассмотрим некоторые понятия, используемые в меркаторской проекции для построения и анализа карт.

Уточним понятие главного масштаба меркаторской карты. Главным масштабом μ_0 карты называется масштаб по главной параллели φ_0 . Для проекции на «касательном цилиндре» это будет масштаб вдоль экватора, а для проекции на «секущем цилиндре» – масштаб по какой-либо параллели φ .

Этот масштаб показывает, во сколько раз уменьшено изображение земной поверхности вдоль конкретной параллели при ее проектировании на карту.

Численное значение главного масштаба записывается так:

$$\mu_0 = \frac{1}{C_0} \quad (3.26)$$

где C_0 – знаменатель главного масштаба.

Знаменатель главного масштаба всегда написан в заголовке карты. Для оптимальной стыковки карт главные параллели определяют для каждого моря и все карты данного бассейна имеют одну главную параллель φ_0 .

Например, для Балтийского моря $\varphi_0 = 60^\circ$; для Белого моря $\varphi_0 = 66^\circ$; для Черного моря $\varphi_0 = 44^\circ$ и т.д. Для открытых частей океанов и морей введены широтные полосы с главными параллелями $0, 25, 40^\circ$ и т. д.

Из полученных формул становится ясно, что масштабы m и n являются функциями географической широты. Они остаются постоянными на одной параллели. Масштаб μ на какой-либо параллели φ называется частным масштабом меркаторской карты.

Соответственно, формула увеличения масштаба для меркаторской карты ничем не отличается от формулы, записанной в начале параграфа:

$$c = \frac{\mu_0}{\mu}$$

Величина c показывает, во сколько раз отличается масштаб на какой-либо параллели от масштаба на главной параллели.

Запишем c через знаменатели масштабов:

$$c = \frac{C}{C_0} = \frac{N \cos \varphi}{N_0 \cos \varphi_0} \quad (3.27)$$

Таким образом, имеем возможность написать выражение для частного масштаба по параллели через знаменатель главного масштаба, коэффициент c и радиусы соответствующих параллелей r и r_0 :

$$C = C_0 \frac{N \cos \varphi}{N_0 \cos \varphi_0} = C_0 \frac{r}{r_0} \quad (3.28)$$

Радиусы параллелей (в минутах) будут следующие:

$$C = C_0 \frac{r * 1' \text{arcl}'}{r_0 * 1' \text{arcl}'} = C_0 \frac{p}{p_0} \quad (3.29)$$

где p и p_0 — длина одной минуты дуги параллели на широте φ и φ_0 , значения p в миллиметрах даются в Картографических таблицах.

Отношение частного масштаба к главному называется в картографии модулем параллели v :

$$v = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{p_0}{p} \quad (3.30)$$

Единицей карты e называется длина одной минуты дуги параллели, выраженная в миллиметрах в масштабе карты:

$$e = \frac{p_\varphi}{C_\varphi} \quad (3.31)$$

В Картографических таблицах приведены готовые значения единиц карты, вычисленные для всех стандартных масштабов.

Единица карты может быть вычислена через приведенную широту главной параллели u_0 по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi &= 5.76' \sin 2\varphi_0 \\ u_0 &= \varphi_0 - \Delta\varphi \\ p_0 &= \alpha \cos u_0 \text{arcl}' \\ e &= \frac{p_0}{C_0} \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

Для эллипсоида Красовского $a = 6\,378\,245$ м.

Проводя измерения расстояний по вертикальной рамке меркаторской карты, мы пользуемся минутами дуги меридиана, которые изображаются на карте меркаторской проекции в изменяющемся в зависимости от широты масштабе. Сама по себе длина минуты дуги эллиптического меридиана, как вам известно, уже является функцией широты. Получается довольно сложная геометрическая картина, и если длины дуг минут эллипсоида различаются незначительно, то их изображения на меркаторских картах сильно зависят от широты места, особенно при приближении к полюсам.

Меркаторской милей называется длина изображения одной минуты дуги меридиана $\Delta\varphi$, в проекции Меркатора, выраженная в линейных единицах в масштабе карты:

$$1_{\text{меркат.миля}} = \frac{\Delta\varphi}{C_\varphi} \quad (3.33)$$

где C_φ — знаменатель частного масштаба на данной широте.

С практической точки зрения переменную длину минуты дуги меридиана можно заменить постоянным значением стандартной морской мили в сантиметрах. Тогда формула (3.33) запишется так:

$$1_{\text{меркат.миля}} \frac{1852 * 10^2}{C_\varphi} \quad (3.34)$$

Линейный морской масштаб l_φ показывает, сколько морских миль содержится в одном сантиметре карты, и представляет величину, обратную меркаторской миле:

$$l_\varphi = \frac{C_\varphi}{1852 * 10^2} \quad (3.35)$$

При расчете и построении картографической сетки возникает вопрос, в каких пределах по широте длину минуты дуги меридиана следует считать постоянной, т.е. какие широтные интервалы можно делить на равные части.

Формула промежутков практически постоянного масштаба получена В.В.Каврайским:

$$\Delta\varphi' = \sqrt{\frac{C_N \operatorname{ctg} \varphi_N}{674}} \quad (3.36)$$

где C_N — знаменатель частного масштаба ближайшей к полюсу рамки карты с широтой φ_N .

Полагая, что в пределах указанного интервала длина минуты дуги меридиана практически постоянна, т.е. разбивая интервал на равные промежутки, мы получаем графическую погрешность, не превосходящую 0,1 мм.

Теперь становится понятным, что измерения расстояний на картах меркаторской проекции по вертикальной рамке карты в минутах меридиана, т.е. в морских милях, необходимо осуществлять в широтном диапазоне плавания.

Для получения достаточно точных измерений с помощью измерителя нужно, чтобы угол между его ножками не превышал 90° . В противном случае надо измерять расстояние по частям в своих широтных диапазонах или пользоваться милями средней широты плавания. Особенно внимательно необходимо работать с меркаторскими картами в высоких широтах, где масштабы m и n быстро изменяются.

Учитывая, что в высоких широтах часто приходится пользоваться мелкомасштабными картами, следует признать, что меркаторская проекция южнее $82...83^\circ$ становится непригодной для морской навигации.

3.4. Построение меркаторской карты

Для построения меркаторской карты необходимо знать ее границы, главную параллель и масштаб по главной параллели. Таким образом, должны быть известны: φ_N — широта северной рамки карты, φ_S — широта южной рамки карты, λ_E — долгота восточной рамки карты, λ_W — долгота западной рамки карты, φ_0 и C_0 , а также интервалы нанесения параллелей $\Delta\varphi$ и меридианов $\Delta\lambda$

Тогда для расчета карты используют следующие простые формулы (рис. 3.5)

$$\alpha = e(\lambda_E - \lambda_W); b = e(D_N - D_S) \quad (3.37)$$

где e — единица карты, рассчитываемая по формулам (3.32) или с помощью Картографических таблиц; D_N , D_S — меридиональные части северной и южной рамки карты, выбираемые из Картографических или Мореходных таблиц.

изображение экватора

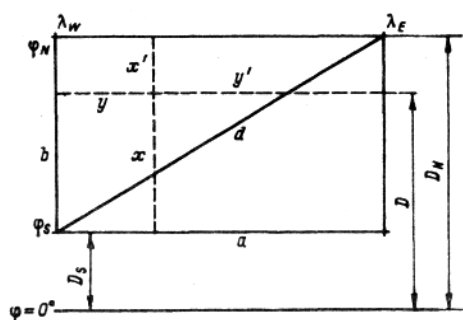


Рис. 3.5

Для проверки графических построений может быть вычислена диагональ d рамки карты

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.38)$$

Для контроля рассчитывают от северной и южной рамок карты положение параллелей:

$$x_i = e(D_i - D_S); x'_i = e(D_N - D_i) \quad (3.39)$$

С той же целью определяют от восточной и западной рамок карты положение меридианов:

$$y_i = e(\lambda_i - \lambda_w); y'_i = e(\lambda_E - \lambda_i) \quad (3.40)$$

$$x_i + x'_i = b; y_i + y'_i = a \quad (3.41)$$

В случае, когда интервал между параллелями, полученный по формуле (3.36), не превышает $\Delta\phi'$, разбивку сторон рамки между ними можно производить путем линейной интерполяции.

В равноугольной цилиндрической проекции Меркатора составлено большинство морских навигационных карт, что объясняется свойствами *локсодромичности* и *конформности*. Общий вид такой карты представлен на рис. 3.6.

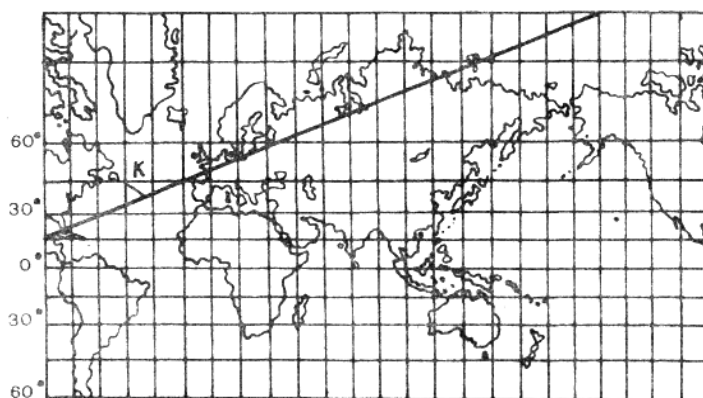


Рис. 3.6

Если точку М переместить на поверхности в направлении, перпендикулярном радиусу-вектору ρ , то такое перемещение на плоскости вызовет смещение точки М' на величину ρdA (рис. 4.2). Частный масштаб n в этом случае будет равен

$$n = \frac{\rho dA}{R \sin z dA} = \frac{\rho}{R \sin z} \quad (4.4)$$

Продифференцируем выражение (4.2) и подставим значение dp в формулы для m и n :

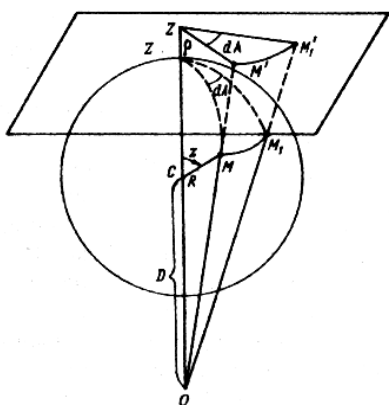


Рис. 4.2

$$m = (D + R) \frac{R + D \cos z}{(D + R \cos z)^2} \quad (4.5)$$

$$n = \frac{D + R}{D + R \cos z} \quad (4.6)$$

Формулы (4.5) и (4.6) дают основание заключить, что масштаб перспективных проекций изменяется от точки к точке и что, изменяя значение D можно получать различные виды проекций. Так, при $D=0$, когда точка зрения находится в центре, проекция будет называться центральной или *гномонической*.

При $D = R$ (точка зрения помещена в антипод точки касания) проекция называется *стереографической*.

При $R < D < \infty$ будем иметь внешнюю проекцию, при $D=\infty$ – ортографическую. Две последние проекции в судоководении не используются. Гномоническая и стереографическая находят применение при составлении специальных карт.

4.2. Гномоническая проекция

В гномонической проекции $D = 0$, поэтому величина радиуса-вектора равна

$$\rho = R \operatorname{tg} z \quad (4.7)$$

Значения масштаба m и n получим, если подставим в формулы (4.5) и (4.6) $D=0$:

$$m = \sec^2 z \quad (4.8)$$

$$n = \sec z \quad (4.9)$$

Гномоническая проекция не равноугольна, так как $m \neq n$, и не эквивалентна: $m n \neq \text{const}$.

Из анализа формул гномонической проекции видно, что при $z=90^\circ$ величины $m = n = \infty$, это означает, что невозможно изобразить на карте целое полушарие.

Величину mn можно выразить через n , тогда

$$m = n \sec z \quad (4.10)$$

Это означает, что фигуры будут вытягиваться по направлению радиуса-вектора от центральной точки пропорционально $\sec z$.

В зависимости от положения точки касания картинной плоскости различают *нормальную* (полярную), *поперечную* (экваториальную) и *косую* гномонические проекции.

На полярной проекции все параллели имеют вид окружностей с радиусом $R \operatorname{ctg} \varphi$, на поперечной сетке параллели изображаются гиперболами, а на косой - эллипсами, гиперболами и параболами.

Все дуги больших кругов, в том числе экватор и меридианы, в гномонической проекции всегда изображаются прямыми линиями, так как проектирование ведется «как бы из центра глобуса». Это свойство, называемое ортодромичностью, является особенно ценным для судовождения и авиации, так как позволяет прокладывать прямыми линиями кратчайшие расстояния между точками. На картах такой проекции можно прокладывать прямыми линиями ортодромические радиопеленги, взятые со станции. Так как гномоническая проекция не равноугольна, то углы на карте не будут равны углам на местности. Азимут большого круга на карте преобразуется в A'_0 . Принимая во внимание то, что для центральной точки отношение наибольшего значения к наименьшему равно $\sec z$, можно написать

$$\operatorname{tg} A'_0 = \operatorname{tg} A_0 \sec z$$

Измерив A'_0 на карте и зная z , можно рассчитать A_0 .

Такой путь трудоемок и для его облегчения созданы Таблицы для перевода истинных направлений в гномонические. На картах последних изданий таблицы для перевода гномонических углов в истинные помещены в нижней части карты. Карты в гномонической проекции для расчетов плавания по дуге большого круга издаются в России, Англии и США. Кроме таблиц для расчета курса, на этих картах даны пояснения методики расчета ортодромических расстояний между двумя точками и начальных ортодромических курсов при плавании по дуге большого круга. Наиболее просто расчет плавания по дуге большого круга выполняется при совместном использовании карт гномонической и меркаторской проекций. На карту в гномонической проекции по координатам наносят начальную и конечную точки плавания, которые соединяют прямой.

Точки дуги большого круга по координатам переносятся на карту в меркаторской проекции, с которой затем снимают локсодромические курсы для плавания из одной точки в другую, наперед заданную.

4.3. Стереографическая проекция

Формулы стереографической проекции выводятся на основе общих формул перспективных проекций при условии, что картинная плоскость является касательной к шару, а $D=R$ (рис. 4.3).

Тогда

$$\rho = 2R \frac{\sin z}{1 + \cos z} = 2R \operatorname{tg} \frac{z}{2} \quad (4.11)$$

Значения m и n получим после подстановки p и dp в формулы (4.5) и (4.6):

$$m = \frac{dp}{Rdz} = \sec^2 \frac{z}{2} \quad (4.12)$$

$$n = \frac{\rho dA}{R \sin dA} = \sec^2 \frac{z}{2} \quad (4.13)$$

Равенство m и n показывает, что проекция равноугольная.

Помимо равноугольности проекция обладает еще одним важным свойством — изображать всякую окружность поверхности шара окружностью на плоскости проекции, кроме тех, которые проходят через точку зрения. Эти окружности будут изображаться прямыми. Обоснование этого свойства можно получить, рассмотрев рис. 4.4. Пусть MM_1 — малый (в частном случае большой) круг, произвольно выбранный на шаре, $M'M'_1$ — его изображение на плоскости.

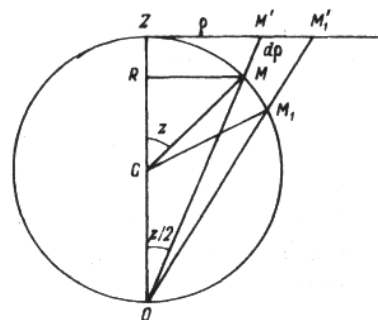


Рис. 4.3

Угол $M'M'_1O$ равен углу M_1ZO , поскольку оба составлены взаимно перпендикулярными линиями. Угол M_1ZO равен углу M_1MO так как они вписаны в окружность и опираются на одну и ту же дугу. Следовательно, $\angle M_1MO = \angle M'M'_1O = \alpha$, т.е. картинная плоскость и плоскость сечения сферы по изображаемой окружности составляют с образующими проектирующего конуса один и тот же угол. Раз плоскость MM_1 пересекает конус по кругу, то и картинная плоскость дает в сечении с конусом круг.

Равноугольность стереографической проекции и ее свойство изображать сферические окружности на сфере также окружностями на плоскости позволило найти применение этой проекции при дальномерных определениях, когда изолинией равного расстояния является окружность.

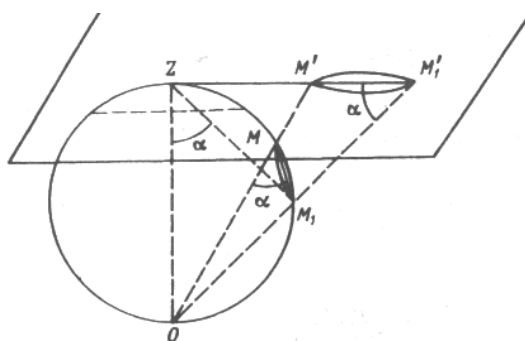


Рис. 4.4

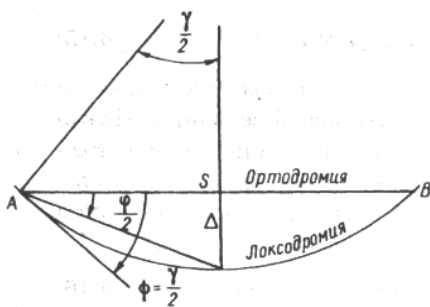


Рис. 4.5

Для изображения сравнительно большой области, ограниченной альмукантаратом ZM_1 и для получения наименьшего искажения длин проектирование производится на картинную плоскость, секущую шар по некоторому альмукантарату ZM_0 , который можно подобрать при условии $m = n = 1$ для параллели сечения.

Минимальный масштаб в центре проекции делает ее выгодной для изображения шарового сегмента, ограниченного заданной параллелью, когда $z = PNM_0 = \varphi_0$. При этих условиях стереографическая проекция может быть

использована для составления путевых карт полярной области, где меркаторская проекция вследствие быстрого изменения масштаба становится непригодной. При пользовании путевой картой, построенной в стереографической проекции с центральной точкой в середине карты, искажения не превышают ошибок графических построений, т.е. такие карты используются как планы. Локсодромия на нормальной стереографической проекции имеет вид логарифмической спирали. На путевых картах (планах) кривизна ортодромии настолько незначительна, что поправка на кривизну не превышает $0,2^\circ$ и кратчайшим расстоянием между двумя точками может считаться прямая.

Масштаб в пределах такого плана можно считать постоянным. Недостаток этой проекции в том, что линия постоянного курса — локсодромия — представляет собой кривую линию. Однако это будет кривая малой кривизны и ее можно считать совпадающей с дугой окружности. Эта кривая образует со своей хордой (изображением ортодромии) (рис. 4.5) угол ψ , равный половине угла схождения меридианов и называемый ортодромической поправкой:

$$\psi = \frac{1}{2} \gamma = \frac{1}{2} \Delta \lambda \sin \varphi_m = \frac{1}{2} S \sin K \operatorname{tg} \varphi \quad (4.14)$$

где $\Delta \lambda$ — разность долгот двух точек; γ — угол схождения меридианов (разность азимутов ортодромии в двух точках).

Наибольшее расхождение между изображением локсодромии и ее хордой (в середине дуги локсодромии) найдем из прямоугольного треугольника

$$\Delta = \frac{S}{2} * \frac{\psi}{2} \operatorname{arcl}' = \frac{S}{8} \Delta \lambda \sin \varphi_m \operatorname{arcl}' \quad (4.15)$$

При плавании в приполюсных районах разность между длиной ортодромии и локсодромии достигает наибольшей величины. Поэтому использование карт в стереографической проекции позволяет совершать плавания по ортодромии, но для этого необходимо часто изменять курс.

Для плавания по локсодромии следует снятый с карты курс по ортодромии перевести в локсодромический:

$$ИК_{лок} = ИК_{орт} + \psi \quad (4.16)$$

Этот локсодромический курс необходимо корректировать в связи с изменением ортодромической поправки.

4.4. Поперечная цилиндрическая проекция

Для построения карт на приполюсные районы используется поперечная цилиндрическая проекция. В этой проекции на карту наносится квазигеографическая² система координат, которая получается следующим образом (рис. 4.6).

Северный полюс P_N условно помещается в точку с координатами $\varphi = 0^\circ$, $\lambda = 180^\circ$, а южный PS – в точку $\varphi = 0^\circ$, $\lambda = 0^\circ$. Полученные точки называются северным (P_{Nq}) и южным (P_{Sq}) квазиполюсами. Проведя квазимеридианы и квазипараллели относительно квазиполюсов, получим новую систему координат, повернутую на 90° относительно географической.

Координатными осями этой системы будут:

начальный квазимеридиан – большой круг, проходящий через северный географический полюс P_N и квазиполюсы P_{Nq} и P_{Sq} ; он совпадает с географическим меридианом ($\lambda = 0$ и 180°);

квазиэкватор – большой круг, проходящий через географический полюс P_N и точки на экваторе с долготами $\lambda = 90^\circ E$ и $\lambda = 90^\circ W$.

Координатными линиями являются:

квазимеридианы – большие круги, проходящие через квазиполюсы;

Положение точки определяется квазиширотой – углом при центре Земли (шара) между плоскостью квазиэкватора и радиусом, проведенным в данную точку земной поверхности, и квазидолготой – двугранным углом при квазиполюсе между плоскостями начально квазимеридиана и квазимеридиана данной точки. Северные квазишироты и восточные квазидолготы положительны, южные и западные – отрицательны.

Основные уравнения поперечной равноугольной проекции имеют вид

$$x = R \int g(45^\circ + \frac{\varphi_q}{2}); y = R \lambda_q; m = n = \sec \varphi_q \quad (4.17)$$

где $R = \sqrt{MN}$ – радиус Земли (шара), м; m и n – частные масштабы по квазимеридиану и квазипараллели.

² Квази (лат.) – как бы.

Переход от географических координат к квазикоординатам выполняется по формулам

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi_q &= -\cos \varphi \cos \lambda \\ \operatorname{tg} \lambda_q &= \operatorname{ctg} \varphi \sin \lambda \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

обратный переход – по формулам

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi &= -\cos \varphi_q \cos \lambda_q \\ \operatorname{tg} \lambda &= \operatorname{ctg} \varphi_q \sin \lambda_q \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

Общий вид картографической сетки вблизи географического полюса показан на рис. 4.7. Прямой линией на такой карте изображается квазиллоксодромия, пересекающая квазимеридианы под одним и тем же квазикурсом K_q .

Локсодромия, вследствие кривизны географических меридианов, сходящихся на полюсе, будет изображаться кривой линией, обращенной выпуклостью к экватору. Ортодромия же представит собой кривую малой кривизны, обращенную выпуклостью в сторону ближайшего квазиполюса.

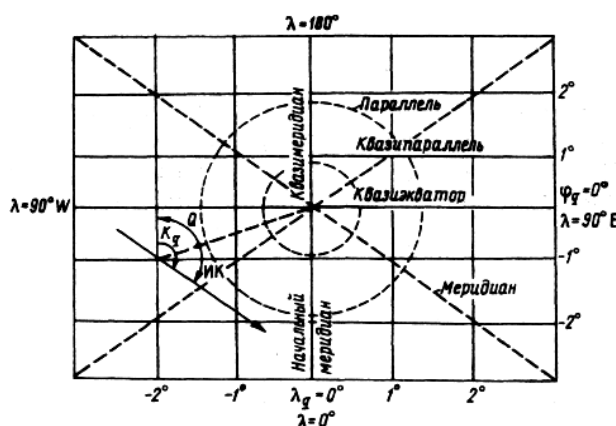


Рис. 4.6

Для перехода от географических направлений к направлениям в квазигеографической системе координат используется угол перехода Q – угол между меридианом и квазимеридианом, значение которого можно получить из треугольника $AP_N P_{Nq}$ (см. рис. 4.6):

$$\frac{\sin Q}{\sin 90^\circ} = \frac{\sin(180^\circ - \lambda)}{\sin(90^\circ - \varphi_q)}; \sin Q = \frac{\sin \lambda}{\cos \varphi_q} \quad (4.20)$$

В широтах более 80° , когда $\cos \varphi_q \approx 1$, получим, $\sin Q = \sin \lambda$.

В высоких широтах угол перехода практически равен долготе данной точки ($Q \approx \lambda$).

Прокладка курса на такой карте относительно географических или квазигеографических меридианов (см. рис. 4.7) осуществляется по формуле

$$\left. \begin{aligned} \text{ИК} &= K_q + \lambda \\ K_q &= \text{ИК} - \lambda \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

где K_q — квазикурс, угол, между квазисеверным направлением квазимеридиана и диаметральной плоскостью судна.

Для прокладки расстояний необходимо пользоваться специальными вертикальными шкалами с линейным масштабом в морских милях, находящимися за боковыми рамками карт.

Для приполюсных районов Северного Ледовитого океана издаются карты-сетки в масштабе 1:500 000, на которых красным цветом нанесены квазипараллели, а черным цветом — географические меридианы и параллели с двойной оцифровкой красным и зеленым цветом. Это позволяет карту-сетку использовать в двух районах, симметричных относительно географических меридианов $0...180^\circ$ и $90^\circ\text{E}...90^\circ\text{W}$.

Глава 5

МОРСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ КАРТЫ

5.1. Классификация морских карт

Морские карты и другие навигационные пособия на все районы океанов и морей издаются Главным управлением навигации и океанографии (ГУНиО), а в зарубежных странах – гидрографическими службами (департаментами). Суда транспортного флота снабжаются картами и пособиями через базовые радионавигационные камеры (БРНК) пароходств, а в иностранных портах – через агента.

Морские карты издаются главным образом в меркаторской проекции и по своему назначению подразделяются на три вида.

1. *Навигационные*, предназначенные для ведения счисления пути и определения места судна в море. К морским навигационным картам относятся общенавигационные, радионавигационные, навигационно-промысловые и навигационно-тактические, карты внутренних водных путей.

Радионавигационные карты представляют собой навигационные карты с дополнительной нагрузкой в виде сеток изолиний и имеют соответствующие индексы, например ДК – «Декка», ЛС – «Лоран-С».

2. *Специальные*, предназначенные для решения ряда задач судовождения при использовании особых технических средств (например, при плавании в узкостях на быстроходных судах). К специальным относятся рулонные и маршрутные карты, бланковые, обзорные, геофизические, карты с сетками квадратов.

3. *Вспомогательные и справочные* морские карты, под названием которых объединены различные картографические издания ГУНиО. В эту группу входят: карты-сетки, карты в гномонической проекции для прокладки дуги большого круга, радиомаяков и радиостанций, часовых поясов, сборные листы, батиметрические, шлюпочные, грунтов, рекомендованных путей и др.

Общенавигационные карты являются основной подгруппой морских карт, обеспечивающих безопасность мореплавания. На них наиболее полно отражаются рельеф дна, характер берегов и вся навигационная обстановка (огни, знаки, буи, фарватеры и др.).

Выбор масштаба карты зависит от расстояния до берега или навигационных опасностей.

При плавании вблизи берегов надо подбирать те карты, на которых изображение района наиболее подробное.

В зависимости от масштаба общенавигационные морские карты подразделяются на:

- генеральные, имеющие масштаб от 1:1 000 000 до 1:5 000 000;
- путевые, имеющие масштаб от 1:100 000;
- частные в масштабе 1:25 000 до 1:100 000;

планы, имеющие масштаб от 1:1000 (при производстве различных гидротехнических работ) до 1:25 000.

Чтобы обеспечить переход с карты на карту (перенос прокладки), а также склейку карт одного и того же масштаба в одну, для всех путевых и генеральных карт морей, омывающих берега России, установлены стандартные главные параллели: для Баренцева моря – 69°, для Белого – 66°, Балтийского – 60°, Охотского – 52°, Черного – 42°. Чем меньше масштаб карты, тем она менее подробна.

На планы наносят все, что имеет хоть какое-либо отношение к мореплаванию, начиная с навигационной обстановки и кончая различными портовыми сооружениями.

Частные карты содержат все навигационные подробности.

На путевых картах небольшие прибрежные опасности обобщаются, невидимые с моря огни и знаки, как правило, не наносятся, плавучие ограждения, за исключением тех, которые выставлены для ограждения навигационных опасностей, могут быть нанесены не полностью.

На генеральных картах указываются лишь важнейшие маяки и знаки, прибрежные районы имеют только обобщенную характеристику. Вот почему всегда для каждого района плавания следует пользоваться картой самого крупного масштаба. Если участки моря или океана не перекрываются путевыми картами, могут быть использованы карты-сетки. Шкала долгот на них наносится карандашом в зависимости от района плавания, что позволяет одним комплектом карт-сеток обеспечить плавание во многих районах земного шара.

Комплект судовых карт определяется районом плавания. Следует помнить, что нельзя выходить в рейс, не имея полного комплекта карт. Отсутствие на судне даже одной карты может привести к вынужденному заходу в промежуточный порт.

Чтобы карты не устаревали, еженедельно издаются Извещения мореплавателям (ИМ) ГУНиО, наиболее важные навигационные извещения и предупреждения мореплавателям передаются по радио. Для этих целей создана Всемирная служба радионавигационных предупреждений (НАВАРЕА). Морская акватория разделена на 16 районов, назначены страны-координаторы, которые собирают и передают по радио важные навигационные извещения. На судах устанавливаются автоматические приемники такой информации «Навтекс».

По этим извещениям ведется регулярная корректура карт в соответствии со специальными правилами.

Кроме этого, радиостанции страны передают по радио навигационные предупреждения (НАВИП), в которые включается информация, не вошедшая в НАВАРЕА. Прибрежные предупреждения на русском (ПРИП) и английском (COASTAL WARNING) языке содержат информацию об изменении обстановки на ограниченных прибрежных участках.

Вспомогательные и справочные карты используются при выборе пути, для производства расчетов плавания по дуге большого круга и для различных справок.

Все же навигационные карты не могут дать всех сведений, необходимых для проведения судна по наивыгоднейшему и безопасному пути. На них не отражены гидрометеорологические факторы, не показан внешний вид знаков и характерных участков берега, не указаны данные различных радиотехнических средств, нет специальных правил, установленных в тех или иных районах плавания. Поэтому в дополнение к картам издаются различные пособия и справочники, из которых можно почерпнуть много полезных, необходимых сведений. К таким пособиям можно отнести руководства для плавания (лоции), в которых собраны все необходимые для мореплавателя сведения, включая рекомендованные пути и советы по ориентировке при плавании вблизи берегов. В книгах «Огни и знаки» дано подробное описание маяков, огней и знаков.

Сведения о радионавигационном оборудовании приведены в руководстве «Радиотехнические средства навигационного оборудования». Данные о приливо-отливных колебаниях уровня моря даны в Таблицах приливов. Для районов с сильно выраженными приливо-отливными течениями (например, прол. Ла-Манш) издаются Атласы приливо-отливных течений. Большой физико-географический справочный материал, охватывающий все районы мира, помещен в Морском атласе.

Для подбора карт и пособий издается специальный «Каталог карт и книг». Все карты и пособия имеют свой номер, который называется адмиралтейским.

Номера карт состоят из пяти цифр, которые означают:

первая – океан или его часть (1 – Северный Ледовитый; 2 и 3 – Северная и Южная части Атлантики; 4 – Индийский океан; 5 и 6 – Южная и Северная части Тихого океана);

вторая – масштаб карты (каждой группе масштаба соответствует цифра от 0 до 9);

третья – район моря, в пределах которого находится карта;

четвертая и пятая – порядковый номер карты в данном районе.

Ненавигационные морские карты и карты-сетки имеют номера, первой цифрой которых является 9. Вторая цифра обозначает океан или его часть; третья цифра – масштаб; последние две являются порядковыми номерами карты в океане.

5.2. Степень доверия к морским навигационным картам

Критериями качества карты служит, в первую очередь, источник, по которому она составлена. Техника гидрографических работ и методы геодезических наблюдений позволяют производить определение координат опорных пунктов с точностью до десятых долей метра. Поэтому карты, составленные по работам более поздних гидрографических экспедиций, являются более точными.

При их составлении используются все современные данные, полученные с помощью точных инструментов и приборов и более совершенными методами.

Ошибки нанесения знаков и береговой черты иногда могут иметь место на островах, где визуальная привязка к материку невозможна. Астрономические и радиотехнические методы определения могут дать погрешность, превышающую 1 кб. Степень доверия к карте определяется также и полнотой нанесенной нагрузки. С помощью специальных условных знаков на картах указаны:

- **рельеф и грунт морского дна.** О рельефе можно судить по густоте нанесенных изобат, т. е. линий, соединяющих точки с равными глубинами. Погрешность нанесенной глубины составляет около 2%. Недостоверные изобаты показаны пунктиром. Густота нанесения глубин может быть критерием для оценки качества промера. Следует считать, что в районе, где глубины не нанесены, можно встретить сколь угодно малую глубину и поэтому плавание в районе с такими «белыми пятнами» сопряжено с опасностью. Достоверные и частые отметки грунтов повышают ценность карты, особенно при выборе места якорной стоянки. Необходимо помнить, что на картах показывают только поверхностные грунты, которые могут покрывать каменистую основу;

- **береговая зона и элементы суши.** Береговая линия в зависимости от назначения и масштаба изображается с различной подробностью. Элементы суши, не выражающиеся в масштабе карты, показывают с помощью условных знаков;

- **средства навигационного оборудования.** Береговые средства навигационного оборудования, плавучие маяки и навигационные ориентиры наносят на карту с точностью, отвечающей предельной точности масштаба. Плавучие знаки не служат опорными пунктами для определения по ним места судна, и их наносят с меньшей точностью.

Чем сложнее район плавания, тем больше будет показано приметных с моря объектов для ведения визуальных наблюдений. Использование для ориентировки вершин гор, характерных скал должно быть проконтролировано наблюдениями по маякам и знакам. Чем мельче масштаб карты, тем меньше сведений помещается около маяков;

- **прочие элементы нагрузки и надписи.** На картах наносятся государственные границы и демаркационные линии, элементы земного магнетизма, сведения о приливо-отливных течениях, границы опасных и запретных районов, фарватеры и др.

Морская карта требует критического подхода к ее изучению. Слепое доверие к ней может привести к неверным выводам и даже к ошибкам. Большим доверием должна пользоваться карта более крупного масштаба, составленная по материалам отечественных гидрографических исследований и откорректированная по последним извещениям мореплавателям. Если сведения, указанные на карте и приведенные в лоции, расходятся, предпочтение, при прочих равных условиях, отдается карте.

При плавании в узкостях или вблизи берега часто оказывается целесообразно сделать карту более наглядной и удобной, или, как принято говорить, произвести подъем карты.

Подъем карты может включать в себя нанесение на карту следующих необходимых сведений: дальность видимости маяков — дугами окружностей; опасные секторы, закрашиваемые красным цветом; ограждающие линии положения. Изучив лоцию, можно выбрать и отметить на карте наиболее приметные мысы, здания, вершины гор. Около радиомаяков целесообразно сделать надписи, характеризующие их работу. Особенно полезным является выделение на карте тех участков береговой черты и приметных ориентиров, которые хорошо видны на экранах РЛС (это следует делать только на основании многократных наблюдений). Из лоций и атласов можно нанести элементы постоянных течений или приливоотливных течений на ориентировочное время прихода в данный район. Работа по подъему карты трудоемка, но может значительно облегчить работу штурмана при плавании в сложных условиях. Непосредственно перед выходом в море штурман обязан выяснить номер последнего вышедшего в свет и последнего объявленного по радио извещения мореплавателям и позаботиться об их приобретении.

Необходимо помнить, что ссылка на незнание об опубликованных в извещениях или переданных по радио сведениях не освобождает мореплавателя от ответственности за аварию или любое другое происшествие, вызванное несоблюдением объявленных в этих документах правил или пренебрежением к приведенным в них сведениям.

5.3. Использование для судовождения карт других стран

В каждой стране при составлении морских навигационных карт в качестве их математической основы выбирается референц-эллипсоид, т.е. эллипсоид, имеющий наилучшее приближение к размерам на территории данной страны. Принятие референц-эллипсоида характеризует определенную систему геодезических координат, к которой приводятся координаты всех опорных пунктов.

Так, в США до недавнего времени использовалась Северо-Американская система координат 1927г., отнесенная к референц-эллипсоиду Кларка (1886 г.). Японские морские карты составлены на эллипсоиде Бесселя в Токийской системе координат. Английские морские карты побережья Британских островов составлены главным образом на основе эллипсоидов Эри и Кларка, а на иностранные воды — на основе эллипсоидов Бесселя, Эвереста, Кларка и др. Использование такого большого количества референц-эллипсоидов для карт, издаваемых одним учреждением, объясняется тем, что на многие районы мира морские английские карты составлялись по иностранным источникам без приведения к единой геодезической основе. Кроме того, многие из существующих английских карт составлены по материалам гидрографических исследований XIX века. Хотя общегеографическое и специальное содержание этих карт и приведено на современный уровень, геодезическая основа их остается прежней и во многих случаях недостаточно точна.

К началу 80-х годов страны региона Юго-Восточной Азии и Тихого океана использовали 10 различных эллипсоидов, ориентированных в каждой стране по своим исходным данным. В странах Африки также насчитывалось около 50 самостоятельных координатных систем.

В России при составлении морских навигационных карт на отечественные воды в качестве единой основы принимается Пулковская система геодезических координат 1942 г., отнесенная к референц-эллипсоиду Красовского и отсчитываемая от центра Круглого зала Пулковской обсерватории

$$(\varphi = 59^{\circ}46'18,55''N, \lambda = 30^{\circ}19'42,09''E).$$

Отечественные карты на иностранные воды могут либо приводиться к Пулковской системе, либо иметь геодезическую основу оригинала. Например, морские навигационные карты на район японских островов ранее издавались в Пулковской системе координат, а в настоящее время издаются в Токийской системе.

Таким образом, морские навигационные карты разных государств (или одного государства, но разных лет издания) могут иметь различную геодезическую основу.

Это приводит к тому, что для одного и того же района рамки карты и географическая сетка [рассчитываемые по формулам (3.37)...(3.40)] не совпадают, а одни и те же опорные пункты [наносимые по формулам (3.39) и (3.40)] на разных картах будут иметь различные координаты.

Имеются формулы, по которым можно рассчитать поправки к географическим координатам для перехода с одной карты на другую. Анализ этих формул показывает, что величина поправок не особенно значительна: например, при переходе от Европейской геодезической системы к WGS-72 (Международная геодезическая система 1972г.) поправка будет составлять 80...85м, а от Токийской системы к WGS-72 – 300...350м по каждой координате для районов Северного моря и Токио соответственно. В пределах обширных районов такие поправки практически постоянны, что облегчает их учет. Сведения о геодезической основе карты обычно приводятся под ее нижней рамкой.

С повышением точностных характеристик технических средств навигации, развитием радионавигационных систем дальнего действия (включая спутниковые) различие геодезической основы карт становится все более недопустимым, так как иногда не обеспечивается необходимая точность обсерваций, допускаются ошибки при переходе с одной навигационной карты на другую. В интересах унификации геодезической основы морских навигационных карт сопредельные государства переходят на единые геодезические основы (европейские государства – на единую Европейскую систему координат). С внедрением спутниковых радионавигационных систем резко возросла геодезическая изученность земного шара, появились связи между национальными геодезическими сетями, а это привело к широкому распространению в мире единой координатной системы WGS-84, которая используется при расчете обсервованных координат в спутниковых РНС «Транзит» и НАВСТАР.

Возникла реальная возможность составления морских навигационных карт на единой для всего мира геодезической основе. В рамках Международной гидрографической организации, членом которой является Россия, в 70-е годы создана международная коллекция мелкомасштабных карт (1:10 000 000 и 1:3 500 000) на весь Мировой океан, а также коллекция карт среднего и крупного масштаба на районы Северного моря; начата работа по созданию международной коллекции карт среднего и крупного масштаба на все прибрежные районы Мирового океана (около 3 тыс. номеров). Таким образом, первый источник погрешностей – различие геодезической основы морских навигационных карт – в перспективе будет устранен.

Второй источник погрешностей – сравнительно невысокая точность определения геодезических координат самих опорных пунктов, относительно которых на карту наносятся остальные участки побережья. При этом на карте сохраняется верная картина взаимного расположения изображенных на ней объектов, однако все эти объекты одинаково смещены по широте и долготе на величину погрешности, допущенной при первоначальном определении геодезических координат опорных пунктов. К аналогичному результату приводит часто наблюдающийся сдвиг координатной сетки крупномасштабных карт и планов портов. На конференции ООН в 1979 г. было выявлено отсутствие современных гидрографических съемок побережья большинства развивающихся стран. В первую очередь, это касается многочисленных островов в океане, положение которых определялось и наносилось на карту в результате астрономических и навигационных определений еще в прошлом веке и ранее. Так, весь архипелаг Самоа был нанесен на карты с ошибкой в 3...4 мили; такого же порядка ошибки нанесения на карты островов Буве, Франклина, Скотта, Бофора, Баунти, Антиподов и др., выявленные советской кругосветной антарктической экспедицией 1982... 1983 гг. На одном из оживленнейших морских путей – в Красном море – береговая линия и навигационные опасности местами нанесены на карты с ошибками до 4...5 миль.

До последнего времени таким погрешностям не придавали особого значения, так как место судна определялось относительно береговых ориентиров навигационными или радиолокационными методами, и для судоводителей была важна не столько абсолютная точность координатной системы карты, сколько верная взаимосвязь изображенных на ней объектов. Положение изменилось с появлением на судах высокоточных приемоиндикаторов, с которых штурман снимает непосредственно широту и долготу судна и по этим координатам наносит обсервованную точку на карту. Пользуясь современной спутниковой и радионавигационной аппаратурой, можно получить место по неверной карте на берегу, в то время как фактически судно будет находиться от берега на значительном расстоянии, либо, что гораздо опаснее, получить обсервованную точку на карте в открытом море, в то время как фактически навигационные опасности будут на 3...4 мили ближе к судну.

На навигационных картах и в лоциях часто указывают, что «положение опасностей может отличаться от указанного на картах», однако исследования показывают, что такое предупреждение дается далеко не во всех случаях, когда имеет место ошибка в нанесении ориентиров или опасностей на карту либо сдвиг координатной сетки карты.

В отличие от ошибок первого типа – расхождения геодезической основы морских навигационных карт – ошибки второго типа носят совершенно случайный характер и не поддаются предварительному вычислению: наличие ошибок местных геодезических съемок или сдвиг координатной сетки карты можно установить только экспериментально. На практике ошибки обоих типов действуют совместно, и судоводитель обязан учитывать это при работе с морскими навигационными картами других стран. Основные принципы такого учета сводятся к следующему.

Во-первых, с приближением к побережью необходимо своевременно переходить на определение места судна по береговым ориентирам визуальными или радиолокационными методами; систематические невязки между определениями по береговым ориентирам и с помощью высокоточных РНС (типа «Транзит») могут быть сигналом о наличии в данном районе ошибок рассматриваемых типов и необходимости их учета.

Направление и величину этих ошибок для конкретных районов плавания можно определить методом «привязки». Например, во время стоянки судна в порту у причала необходимо снять с карты с максимальной точностью координаты судна (φ_k, λ_k). С приемоиндикатора высокоточной РНС надо снять серию отсчетов обсервованных координат и определить их средние значения (φ_0, λ_0). Суммарная ошибка координат пунктов на карте будет

$$\begin{aligned}\sigma_{\varphi} &= \varphi_k - \varphi_0 \\ \sigma_{\lambda} &= \lambda_k - \lambda_0\end{aligned}\tag{5.1}$$

В дальнейшем при использовании данной навигационной карты эту величину можно будет учитывать как поправку для перехода от отсчетов приемоиндикатора к координатной системе карты. Полученные поправки будут достоверными только в том случае, если их величина в несколько раз больше предельной ошибки определения координат судна с помощью РНС.

Во-вторых, вероятность наличия ошибок обоих типов всегда следует иметь в виду при переходе с одной навигационной карты на другую. В принципе, независимо от проекции используемых карт перенос заданной точки с одной карты на другую может быть выполнен либо по координатам, либо по направлению и расстоянию до ориентира, имеющегося на обеих картах. Переносить точку с одной карты на другую по координатам можно только в тех случаях, когда обе карты имеют одну и ту же геодезическую основу, т.е. выбранный опорный пункт имеет на обеих картах одни и те же координаты.

В противном случае место судна, перенесенное по координатам с одной карты на другую, изменит свое положение относительно береговых ориентиров и навигационных опасностей, что может дезориентировать судоводителя и повлечь за собой ошибочное решение по управлению судном. По этой причине при плавании вблизи побережья или навигационных опасностей всегда следует неукоснительно соблюдать требования хорошей морской практики - переносить точку с одной карты на другую только по пеленгу и расстоянию до берегового ориентира, имеющегося на обеих картах, с контролем переноса точки по географическим координатам. При этом независимо от наличия и значения ошибок рассматриваемого типа положение судна относительно береговых ориентиров и опасностей сохраняется неизменным. Кроме того, перенос точки по пеленгу и расстоянию более прост и нагляден, чем по координатам, и при его применении вероятность промахов значительно ниже. Следует особо подчеркнуть, что промахи при переносе точки с карты на карту не раз являлись причинами серьезных навигационных аварий, поэтому всякий перенос должен быть обязательно проверен, желательно - другим штурманом.

Аналогичным образом при корректуре отечественных навигационных карт по иностранным корректурным документам и иностранным карт по российским также необходимо обращать внимание на то, что карты могут быть изданы в разных системах координат. И в этом случае нанесение объектов на карты наиболее надежно выполняется по объявленным пеленгам и дистанциям от приметных точек местности. Нанесение объектов по их географическим координатам допустимо, лишь когда сдвиг координатной сетки не выражается в масштабе карты либо когда известны поправки к координатам. Поэтому, если даются лишь географические координаты объектов, отечественные корректурные издания не всегда пригодны для корректуры иностранных карт, а иностранные — для корректуры отечественных карт из-за возможных различий в геодезической основе. Данное обстоятельство следует иметь в виду и при использовании информации Всемирной службы навигационных предупреждений.

В последние годы на многих судах стали использоваться электронные карты³, английское название которых — ECDIS (Electronic chart display system). Понятие «электронная карта» подразумевает навигационную систему, имеющую в своем банке данных всю основную гидрографическую информацию для целей навигации, способную сопоставить эту информацию с реальными навигационными данными судна (курсом, скоростью, местонахождением) и информацией от РЛС, РНС или ИСЗ.

³ Об использовании электронных карт рассказано в п. 16.8.

Электронная карта позволяет с достаточной точностью определить где находятся берег и средства навигационного ограждения, встречные суда, каковы координаты своего судна. Карта, изображенная на экране дисплея, – это интегрированная информационная система, в которой имеется подсистема, содержащая данные морской карты в цифровом виде. Международная морская организация (ИМО) и международная гидрографическая организация (ИГО) в 1986 г. рассмотрели и утвердили требования к системам отображения электронных карт. Основное требование состоит в том, что любая электронная карта должна содержать по крайней мере столько же информации, сколько и обычная, а судоводитель должен сам решать, какую информацию отбросить. На экране дисплея должны отображаться берег и береговая черта, отмели, изобаты, маяки, буи, границы фарватеров, рекомендованные пути, схемы систем разделения движения, запрещенные районы, визуальные и радиолокационные ориентиры.

По запросу судоводителя должна быть выдана информация о курсе судна, границах якорных стоянок, о положении лоцманских станций, мест рыбной ловли, о поворотных точках и другие дополнительные сведения: географические названия, государственные границы, кабели и трубопроводы, характеристики огней, сведения о приливах и др. На электронной карте имеется координатный маркер, который позволяет получить всю необходимую дополнительную информацию.

При изменении масштаба осуществляется генерализация изображения в случае уменьшения и ввод дополнительных деталей при увеличении. Техничко-эксплуатационные характеристики существующих систем очень разнообразны, начиная от видеопрокладчиков до САРП и индикаторов навигационных комплексов. В качестве примеров можно привести данные Японской электронной карты: экран – 51 см; количество цветов – 7; масштаб – от 1:10 000 до 1:1 000 000; радиус зоны от 1,5 до 96 миль.

Внедрение электронных карт – это длительный процесс, и на первом этапе внедрения они будут сосуществовать с традиционными картами в качестве меры предотвращения нежелательных последствий из-за возможного сбоя в работе электроники.

Раздел III

СЧИСЛЕНИЕ ПУТИ СУДНА

Глава 6

**Графическое счисление
(прокладка).**

Глава 7

Аналитическое счисление.

Глава 6

ГРАФИЧЕСКОЕ СЧИСЛЕНИЕ (ПРОКЛАДКА)

6.1. Элементы счисления и их характеристика. Прокладка при отсутствии дрейфа и течения

Счислением координат судна (счислением) называется вычисление текущих координат судна от известных координат по времени, курсу и скорости с учетом влияния ветра и течения. Счисление, выполняемое непосредственно на морской навигационной карте с использованием штурманских прокладочных инструментов, называется графическим или прокладкой. *Навигационной прокладкой* называется графическое изображение на морской карте пройденной судном части или всего маршрута, выполненное автоматически или вручную на основе измерений и вычислений. Если счисление выполняется по формулам или таблицам, оно называется аналитическим. Прокладка может быть *предварительной* и *исполнительной*. Предварительной прокладкой называется навигационная прокладка маршрута судна, выполненная предварительно, исходя из намеченного маршрута, отвечающего требованиям плавания, поставленным задачам и экономической целесообразности.

Предварительную прокладку осуществляет капитан при выборе пути судна, который определяется двумя основными условиями: безопасностью плавания и экономичностью перехода, т. е. с наименьшей затратой времени. Эти два условия часто противоречат друг другу, и поэтому выбор пути является одной из важнейших и сложных задач судовождения. Правильно решить эту задачу можно только на основе тщательного анализа всех условий плавания. Выбранный маршрут наносится на карты с указанием курсов, точек или ориентиров для поворота. Все это – элементы предварительной прокладки.

Дальнейшая задача судоводителя сводится к обеспечению движения судна по намеченному пути и контролю за этим движением (исполнительная прокладка). Основным методом непрерывного учета положения судна является графическое счисление. Оно заключается в систематическом нанесении положения судна на карту по направлению его движения и пройденному расстоянию на основе показаний компаса и лага, а также данных о течении и дрейфе. Начальная точка счисления должна быть известна. Место судна, координаты которого получены по счислению, называется *счислимым*.

Контроль прокладки производится путем измерения различных навигационных параметров (расстояний, пеленгов, разностей расстояний, радиопеленгов, высот светил) и получения обсерваций по двум, трем и более линиям положения. Место судна, координаты которого получены пересечением двух и более линий положения, называется *обсервованным*.

В практике судовождения используются различные специальные автоматические устройства, ведущие счисление. Они называются счислителями или автопрокладчиками. Такие автоматические устройства могут вести корректируемое счисление, при котором координаты судна получаются на основе объединения счислимой информации и эпизодически поступающей обсервованной информации с учетом точности счисления и обсерваций.

Счисление пути судна должно быть непрерывным, наглядным и точным, т. е. оно должно давать штурману возможность в любой момент видеть нанесенное на карту положение судна относительно окружающей обстановки с точностью, обеспечивающей безопасность плавания.

Условием обеспечения непрерывности счисления является автономность и непрерывность работы технических средств, используемых для прокладки. При ведении счисления следует строго руководствоваться правилом, что графическое изображение пути судна должно давать полное представление о местонахождении судна в любой момент времени. Все надписи на карте должны быть сделаны четким чертежным шрифтом так, чтобы любая из них могла быть прочитана при слабом освещении. Никаких посторонних записей и расчетов на карте не должно быть.

Все графические работы, выполняемые на карте, состоят из отдельных элементарных задач, выполнение которых должно быть отработано у штурманов до автоматизма. К таким задачам относятся: снятие координат точки и нанесение ее на карту, расчет и прокладка направлений курсов и пеленгов, измерение расстояний между точками.

Начало ведения счисления (прокладки) определяется условиями плавания. Прокладка начинается с момента выхода судна с акватории порта или съёмки с якоря и заканчивается в момент прихода судна в порт или постановки на якорь. Штурман обязан в каждый момент времени знать место судна с наибольшей при данных условиях точностью. Наличие на борту лоцмана не снимает с судоводителя обязанности вести прокладку. Начальная точка счисления должна быть обсервованной.

При ведении прокладки решаются задачи двух видов: прямая и обратная. Первая предусматривает только учет движения судна, когда курс рулевому уже задан. В этом случае по формуле $ИК = КК + \Delta К$ рассчитывается ИК судна и линия курса в виде прямой прокладывается на карте от исходной точки.

При отсутствии сноса от течения и дрейфа линия пути судна, если пренебречь случайными рысканиями судна и считать ее безошибочной, совпадает с линией проложенного курса, и, следовательно, судно будет перемещаться по этой линии. Как правило, до прихода судна в начальную точку должен быть включен лаг. На карте у точки, принятой исходной для ведения счисления, надписывается время с точностью до минут и отсчет лага (ол) с точностью до 0,1. При скорости судна более 15 уз в прибрежных районах время замечается с точностью до 0,5 мин. Дальнейшее нанесение положения судна на любой момент времени производится по расстоянию, пройденному судном от исходной точки.

Откладываемые расстояния, полученные по разности отсчетов лага, должны исправляться поправкой лага, а отсчеты лага пишутся фактические, т.е. прямо со счетчика, без сотен миль. Положение судна на линии проложенного курса отмечается в зависимости от надобности: вблизи берегов – каждый час, в открытом море – каждую вахту и обязательно при любом изменении курса и скорости. Если лаг не включен, то пройденное расстояние рассчитывается по времени и скорости судна. Каждую счислимую точку обозначают в виде черты длиной около 5 мм, перпендикулярной предшествующему курсу, каждую наблюдаемую точку – специальным знаком, присвоенным данному виду наблюдения. При переносе счисления в наблюдаемую точку наблюдаемые и соответствующие им счислимые места связываются знаком невязки (рис. 6.1). *Невязкой* места судна называется расхождение одномоментных счислимых и наблюдаемых мест. Невязка имеет направление и величину. Направление невязки считается от счислимой точки к наблюдаемой, а величина измеряется в милях. Обозначается невязка так: $C=153^\circ - 3,5$ мили.

В практике судовождения обратная задача встречается гораздо чаще и состоит в том, что судну необходимо следовать заданным ИК. В этом случае рулевому должен быть задан предварительно рассчитанный КК:

$$\left. \begin{array}{l} \text{ГКК} = \text{ИК} - \Delta \text{ГК} \\ \text{КК} = \text{ИК} - \Delta \text{МК} \end{array} \right\} \quad (6.1)$$

Если необходимо рассчитать отсчет лага на момент прихода в заданную точку, то предварительно снимают с карты S – плавание расстояние, пройденное судном и рассчитывают разность отсчета лага (РОЛ):

$$\text{РОЛ} = \frac{S}{1 + \frac{\Delta L \%}{100}} = S \frac{S}{K_L} \quad (6.2)$$

Момент прихода в заданную точку лучше фиксировать по заранее рассчитанному отсчету лага в этой точке, так как скорость судна при одних и тех же оборотах винта зависит от ветра и волнения.

Вместо расчета по формуле (6.2) можно воспользоваться табл. 28 МТ-75. Таблица предназначена для нахождения S по $\Delta L \%$. Если в нее войти прямым входом, взяв для поправки обратный знак, мы получим РОЛ. Такое допущение может дать ошибку до 0,1 мили.

Время прихода в заданную точку определится по формуле

$$t_2 = t_1 + \Delta t = t_1 + \frac{S}{V}. \text{ Значение } \Delta t = \frac{S}{V}$$

можно получить, пользуясь табл. 27 МТ-75.

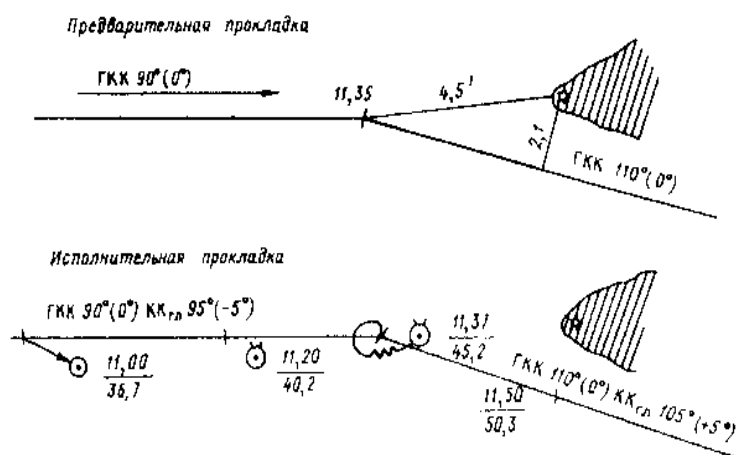


Рис. 6.1

6.2. Циркуляция судна.

Учет циркуляции судна при прокладке

Циркуляция судна – кривая, описываемая центром массы судна при руле, положенном на какой-либо угол.

Если переложить руль судна на определенное число градусов, то судно постепенно начнет изменять курс. Центр вращения судна (он расположен на расстоянии $0,2...0,3 L$ от носа судна; L – длина судна) будет перемещаться по дуге окружности, а диаметральная плоскость будет составлять с ней некоторый угол Θ_{Π} (рис. 6.2), называемый углом дрейфа на циркуляции.

Такое допущение справедливо для судов небольшого и среднего тоннажа, для крупнотоннажных судов характер кривой может значительно отличаться от окружности.

Рассмотрим основные элементы циркуляции, методы их определения и способы учета.

Если в точке А начали переключать руль «право на борт», то некоторое время судно будет продолжать следовать прежним курсом и только в точке В начнет поворачиваться, причем в первый период центр тяжести судна смещается в сторону, обратную повороту, на величину l , называемую обратным смещением. Величина l обычно не превышает половины ширины судна и в практике судовождения не учитывается. В дальнейшем центр массы судна начинает перемещаться в сторону переключки руля по кривой, радиус которой постепенно уменьшается до момента, когда угловая скорость изменения курса достигнет своего наибольшего значения.

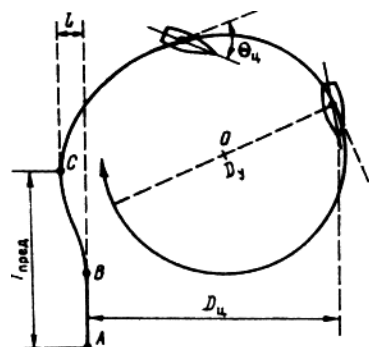


Рис. 6.2

Это происходит при угле поворота на $120...180^\circ$, после чего движение центра массы будет совершаться по окружности. Время от начала перекладки руля до момента начала поворота судна в сторону перекладки называется предварительным периодом циркуляции. Величина этого периода зависит от типа судна, его инерции, наличия ветра и волнения и достигает на современных крупнотоннажных судах 1 мин, что необходимо учитывать при поворотах, а особенно при маневрировании. После этого начинается период неустановившейся циркуляции, который продолжается до тех пор, пока циркуляция не станет близка к окружности.

Дальнейшая циркуляция называется установившейся и характеризуется диаметром установившейся циркуляции D_y . Расстояние между линией первоначального курса и диаметральной плоскостью судна в момент поворота на обратный курс называется *тактическим диаметром* циркуляции D_T , а время, за которое судно повернется на обратный курс, называется *эволюционным периодом* циркуляции T_{180}° .

Когда разница между D_y и D_T незначительна для решаемой задачи, говорят просто о диаметре циркуляции $D_{ц}$ (см. рис. 6.2).

Половина диаметра циркуляции называется радиусом циркуляции

$$R_{ц} = \frac{D_{ц}}{2}$$

Величина радиуса циркуляции для каждого судна является функцией угла перекладки руля, загрузки судна и незначительно зависит от скорости судна.

Для учета циркуляции составляется специальная таблица или диаграмма, из которой получают следующие элементы циркуляции: d_1 – расстояние до нового курса; d – промежуточное плавание; q – курсовой угол промежуточного плавания; S_a – расстояние, пройденное на циркуляции (плавание по окружности); t_a – время поворота на заданный угол.

Аргументами для входа в таблицу или диаграмму является угол поворота $\alpha = \text{ИК}_0 - \text{ИК}_1$, град, и угол перекладки руля. Значения основных элементов циркуляции получим из рассмотрения рис. 6.3.

Из $\triangle M_1OB$ имеем
$$d_1 = R_{ц} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{D_{ц}}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (6.3)$$

Из $\triangle BM_1A$ получим
$$d = 2 R_{ц} \sin \frac{\alpha}{2} = D_{ц} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (6.4)$$

Величина
$$S_a = \frac{\pi R_{ц}}{180^\circ} \alpha, t_a = \frac{T_{180^\circ}}{180^\circ} \alpha$$

Существует несколько способов определения тактического диаметра циркуляции. Величина $D_{Ц}$ является функцией многих переменных, и определить ее для всех условий плавания трудно. Поэтому значения $D_{Ц}$ и T_{180}° определяют для трех положений отклонения руля (на 10, 20, 30°), двух видов загрузки судна (в грузу и балласте) и иногда для трех режимов работы двигателей (полный, средний, малый ход). Изменение $D_{Ц}$ и T_{180}° вследствие волнения, ветра и течения должно учитываться дополнительно.

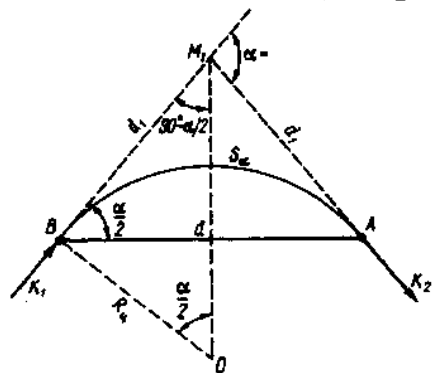


Рис. 6.3

$$\alpha = \text{ИК}_2 - \text{ИК}_1$$

Определение $D_{Ц}$ с помощью судовой РЛС. Одним из наиболее распространенных способов определения диаметра циркуляции является способ с использованием РЛС по бую в районе, где нет течения. Для этого в момент прохождения траверза бую измеряют расстояние до него, руль переключают на заданный угол и пускают секундомер.

Когда судно изменит курс на 180°, вновь замечают время, а в момент траверза — расстояние до бую. Разность измеренных расстояний будет равна $D_{Ц}$. Попутно может быть определена и инерционная задержка, измеряемая расстоянием, пройденным судном за время между подачей команды рулевому и действительным началом циркуляции. По измеренным $R_{Ц}$ и T_{180}° рассчитывается таблица циркуляции. РЛС позволяет не только определить $D_{Ц}$, но и построить фактическую кривую циркуляции. Для этого с момента подачи команды на руль через каждые 10...15с берут ГКП и D до выбранного ориентира (бую, вехи, шлюпки). После окончания маневра на листе миллиметровки в произвольном масштабе наносятся положения судна для различных положений руля (на 10, 20, 30°), что позволяет создать диаграмму циркуляции (см. п. 20.3). Наличие на судне такой диаграммы помогает судоводителю точно решать различные задачи по учету циркуляции, особенно при плавании в узкостях на крупнотоннажных судах.

Определение $D_{Ц}$ навигационными способами.

Одним из наиболее простых навигационных способов определения $D_{Ц}$ является способ с использованием створа и ориентира. В момент пересечения линии створа берется пеленг на ориентир или измеряется горизонтальный угол α_1 (рис. 6.4). В этот момент подается команда на руль и пускается секундомер.

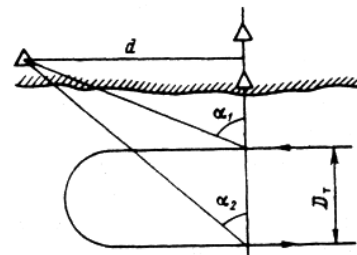


Рис. 6.4

В момент, когда судно, следуя обратным курсом, снова придет на линию створа, измеряется второй горизонтальный угол α_2 второй пеленг. Нанеся на крупномасштабную карту пеленги, снимем расстояние между наблюдениями, равное $D_{Ц}$. При использовании горизонтальных углов значение $D_{Ц}$ можно вычислить по формуле

$$D_{Ц} = d(ctg\alpha_2 - ctg\alpha_1)$$

где d – расстояние от ориентира до линии створа.

Показания секундомера, остановленного в момент выхода на контркурс, дадут T_{180}^0 .

Кривая циркуляции и ее элементы могут быть получены методом последовательных наблюдений с помощью точных радионавигационных гиперболических систем, таких как «Декка» и некоторые другие.

Определение $D_{Ц}$ по углу снижения. В открытом море $D_{Ц}$ может быть с достаточной точностью определен по углу снижения.

Углом снижения называется вертикальный угол, измеренный секстаном между ватерлинией плавающего предмета и линией видимого горизонта (рис. 6.5). Следуя заданной скоростью, сбрасывают за борт какой-либо плавающий хорошо видимый предмет и подают команду на руль. В момент, когда на контркурсе предмет окажется на траверзе, измеряют секстаном угол α . Зная высоту глаза e и наклонение видимого горизонта d , вычисляют $D_{Ц}$:

$$D_{Ц} = e \operatorname{ctg} \beta \quad (6.5)$$

где $\beta = \alpha + d$

Формула (6.5) является приближенной, так как не учитывает кривизну нижнего зрительного луча и кривизну земной поверхности, однако на расстояниях до 1 мили дает результаты, сравнимые с точностью измерения расстояний по РЛС.

Для повышения точности графического счисления, особенно при плавании в узкостях, при ведении прокладки на крупномасштабных картах и при проработке прохода в стесненных водах, необходимо учитывать циркуляцию.

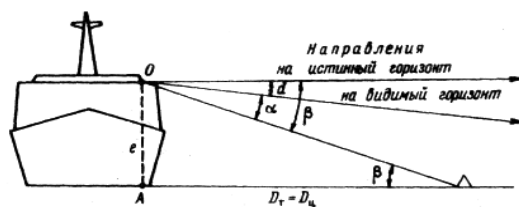


Рис. 6.5

Если $R_{Ц}$ известен, то циркуляция может быть учтена несколькими методами: графическим, табличным, с использованием диаграммы. Во всех случаях приходится решать две задачи: прямую и обратную.

Графический метод учета циркуляции. При прямой задаче, когда после окончания поворота нужно найти положение точки A (рис. 6.6), из которой будет проложен новый курс, достаточно из известной точки начала поворота B отложить перпендикулярно первому курсу величину $R_{ц}$ и провести из полученной точки O , как из центра, окружность циркуляции.

Если необходимо знать время поворота, то его приближенно можно найти по формуле

где a – угол поворота, град.; T_{180} – время циркуляции на 180° .

90

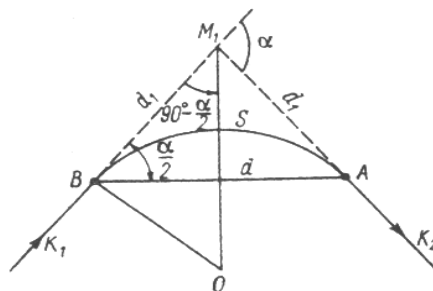


Рис. 6.8

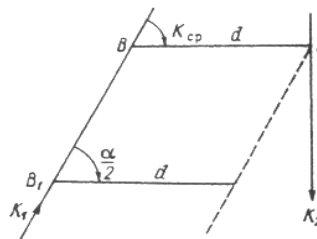


Рис.6.9

Точка их пересечения будет центром окружности циркуляции, а перпендикуляры из нее на линии обоих курсов определяют точки B и A – начало и конец поворота. Команда рулевому о перекладке руля должна быть дана несколько раньше прихода судна в точку B , с учетом предварительного периода циркуляции.

Табличный метод учета циркуляции. Прямая и обратная задачи решаются с использованием величин d_1 или d , выбираемых из таблицы циркуляции. Если из точки M_1 – точки пересечения старого и нового курса – отложить отрезки $M_1A = M_1B = d_1$ то получим точку B – начала поворота – и точку A – окончаний поворота. При прямой задаче из точки B откладывают d_1 получают точку M_1 , а затем, отложив по новому курсу d_1 – точку A (рис. 6.8). Так как с приближением к 180° $\text{tg}(\alpha/2)$ быстро увеличивается, в таблице циркуляции величина d_1 дана для углов, меньших 150° . В случае, если $\alpha > 150^\circ$, следует использовать величины $q = \alpha/2$ и d .

При прямой задаче из точки B прокладывают K_{cp} – промежуточный курс, а по нему откладывают величину d :

$$K_{cp} = \frac{K_1 + K_2}{2} = K_1 \pm q = K_1 \pm \frac{\alpha}{2}$$

Где K_1 и K_2 – курсы судна до поворота и после него.

При обратной задаче угол $\alpha/2$ и d откладываются из любой произвольной точки B_1 (рис. 6.9). Через конец отрезка d проводят линию, параллельную K_1 , пересечение ее с линией нового курса даст точку A и соответственно точку B – начало поворота.

6.3. Дрейф судна. Учет дрейфа при прокладке

Дрейфом судна называется отклонение движущегося судна с линии намеченного курса под воздействием ветра и ветрового волнения. Направление ветра определяется по той точке горизонта, откуда дует ветер (ветер дует в компас) и выражается в румбах или градусах. Дрейф возникает под действием силы давления набегающего потока воздуха на надводную часть судна.

Скорость и направление этого потока соответствуют вектору скорости кажущегося (наблюдаемого) ветра (рис. 6.10).

$$\bar{U} = \bar{V} + \bar{W}$$

где $\bar{U}$ – вектор скорости истинного ветра; $\bar{V}$ – вектор скорости судна; $\bar{W}$ – вектор скорости кажущегося ветра.

Несимметричные отклонения от курса под действием порывов ветра, ударов волн, отклонения руля вызывают зарыскивание судна, которое может быть как под ветер, так и на ветер (при кормовых курсовых углах или при больших кормовых надстройках). Зарыскивание отдельно не определяется из-за сложности решения задачи и считается неотъемлемой частью дрейфа.

Следовательно, говоря об определении и учете дрейфа, под термином «дрейф» будем понимать результирующее отклонение судна с линии истинного курса.

Если машины застопорены, то под дрейфом понимается общее смещение судна под ветер. В общем случае ветер, кроме бокового смещения судна, создает усилие и вдоль диаметральной плоскости движущегося судна, увеличивая или уменьшая его скорость. Эти изменения скорости учитываются лагом, поэтому нет необходимости учитывать их отдельно. Полная сила A давления кажущегося ветра приложена к центру парусности надводной части судна и направлена всегда под ветер (рис. 6.11). Ее направление может не совпадать с направлением кажущегося ветра, т. е. углы q и γ не равны.

В общем виде сила A определяется равенством

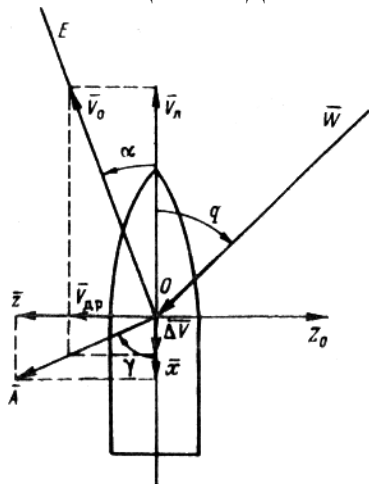


Рис. 6.11

где C_q – коэффициент сопротивления надводной части судна, зависящий от



Рис. 6.10

$$A = C_q W^2 \frac{\rho}{2} S_q$$

обтекаемости корпуса

судна и его надстроек (этот коэффициент изменяет свое значение в зависимости от курсового угла кажущегося ветра q по закону, близкому к синусоидальному) ρ – плотность воздуха, зависящая от атмосферного давления, температуры и влажности; W – скорость кажущегося ветра; S_q – площадь проекции надводной части судна на вертикальную плоскость, перпендикулярную

направлению кажущегося ветра. Разложим силу $\bar{A}$ на две составляющие – продольную $\bar{x}$ и поперечную $\bar{A}$. Продольная составляющая вызывает изменение скорости судна относительно воды. Это изменение учитывается лагом. Под влиянием силы $\bar{z}$ судно получит боковое перемещение, скорость которого обозначим через $\bar{V}_{др}$.

Под действием двух скоростей – направленной по диаметральной плоскости $\bar{V}_л$ и перпендикулярной к ней $\bar{V}_{др}$ – судно будет перемещаться относительно воды по линии пути со скоростью $\bar{V}_0$, направленной под углом α к диаметральной плоскости (см. рис. 6.11).

Угол α между линией истинного курса и линией пути судна называется углом дрейфа. На рис. 6.12 показано движение судна при направлении ветра в левый борт.

Под действием силы ветра центр массы судна будет смещаться под ветер и двигаться относительно дна моря по направлению линии OB , которая называется линией пути при дрейфе. Угол между северной частью истинного меридиана и линией *пути при дрейфе* называется путем ($ПУ_\alpha$).

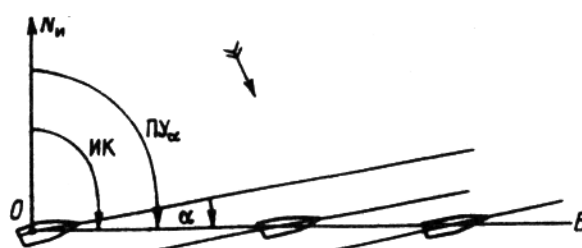


Рис. 6.12

Связь между ИК и $ПУ_\alpha$ выражается формулами

$$ПУ_\alpha = ИК + \alpha; ИК = ПУ_\alpha - \alpha.$$

Угол α имеет знак «плюс», если ветер дует в левый борт, и «минус» – если в правый.

Большие трудности вызывает определение величины угла дрейфа, который зависит от многих факторов:

- осадки, размеров и формы обводов подводной части судна. При прочих равных условиях у коротких судов с малой осадкой угол дрейфа больше, чем у длинных с большой осадкой;
- размеров и форм надводной части корпуса и надстроек. Чем выше борт и больше парусность надстроек, тем больше угол дрейфа;
- курсового угла и скорости кажущегося ветра. Угол дрейфа равен нулю при КУ = 0 или 180° и достигает максимума при ветре с траверза;
- скорости судна. Чем меньше скорость судна, тем больше угол дрейфа, при прочих равных условиях.

Для учета дрейфа при прокладке необходимо знать угол дрейфа. Угол дрейфа можно определить из наблюдений или предвычислить по формулам, специально составленным таблицам или номограммам.

Определение угла дрейфа по кильватерной струе. Кильватерная струя хорошо видна за кормой и представляет собой след на воде перемещающегося судна. Определение угла дрейфа производят с помощью компаса.

Взяв несколько отсчетов курсового угла (ОКУ) или отсчетов компасного пеленга (ОКП) отдаленной точки кильватерной струи, получают значение α , град, по формуле

$$\alpha = \text{ОКУ} - 180^0 = \text{ОКП} - \text{КК}$$

Метод прост, но недостаточно точен и может применяться как ориентировочный при больших углах дрейфа.

Определение угла дрейфа по створу. Если при плавании в узкостях при отсутствии течения судно следует по створу, то угол дрейфа может быть определен как разность между истинным пеленгом створа и истинным курсом судна. Такой метод определения угла дрейфа позволяет управлять движением судна и является контролирующим.

Определение угла дрейфа из обсерваций. Широко распространенный и наиболее надежный метод, сущность которого сводится к получению угла между линией ИК и линией, соединяющей серию из трех-четырех и более обсерваций, полученных достаточно точными методами (фазовые РНС, пеленга, расстояния). Определения места судна абсолютно точными не бывают, вследствие чего обсервованные точки могут располагаться не на прямой линии. В этом случае за направление линии пути принимается направление осредняющей линии и определяется суммарный угол сноса. Угол дрейфа можно определить и по ориентиру, положение которого неизвестно. Если предположить, что в районе плавания есть течение, то предмет должен быть свободноплавающий, не имеющий значительного дрейфа. В этом случае необходимо измерить до него ряд расстояний и пеленгов в секторе курсовых углов $50...60^0$. Затем на планшете или карте сделать построение: от произвольно выбранной точки провести пеленги и отложить расстояния. Соединить полученные точки прямой линией. Направление этой прямой относительно истинного меридиана даст ПУ α .

Определение угла дрейфа по пеленгам свободноплавающего ориентира. Необходимо взять три пеленга, при разностях пеленгов около 30^0 , и зафиксировать секундомером промежутки времени t_1 и t_2 между наблюдениями. Если движение судна было равномерным и прямолинейным, то отрезки пройденных расстояний, пропорциональные промежутками времени, должны вмещаться между линиями соответствующих пеленгов. На карте из любой точки О проводим 3 пеленга и линию ИК (рис. 6.13).

От точки пересечения первого пеленга с линией ИК (точка А) откладываем два отрезка $S_1=kt_1$ и $S_2=kt_2$ (k – произвольно выбранный коэффициент: 0,5; 1; 2 и т. д.). Через концы отрезков S_1 и S_2 проводим прямые, параллельные первому пеленгу.

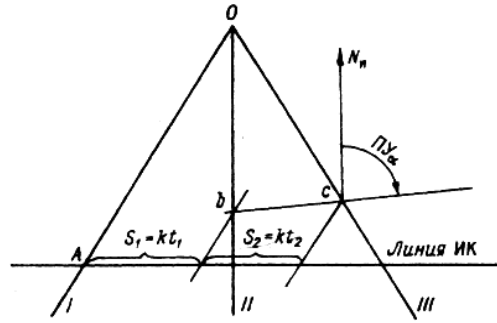


Рис. 6.13

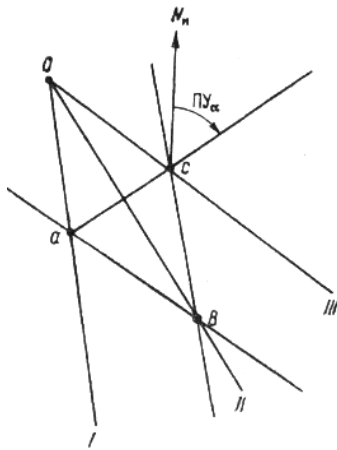


Рис. 6.14

Прямая bc будет линией, параллельной линии пути судна. При равенстве промежутков t_1 и t_2 на втором пеленге выбирают произвольную точку B и через нее проводят прямые, параллельные первому и, третьему пеленгам. Искомый ПУ_α будет соответствовать углу между $N_{\text{и}}$ и направлением прямой ac (рис. 6.14).

Определение угла дрейфа по курсовым углам на ориентир.

При следовании судна постоянным ИК трижды измеряют курсовые углы на ориентир. При этом $q_1 < 90^\circ$, $q_2 = 90^\circ$, $q_3 > 90^\circ$.

Значения вычисляются как разность пеленгов и курса $q_1 = \text{ИП}_1 - \text{ИК}$; $q_3 = \text{ИП}_3 - \text{ИК}$. Тогда угол α , град, рассчитывается по формуле

$$\alpha = 57.3^\circ \left[\frac{t_{\text{тр}}}{t} (\text{tg} q_1 - \text{tg} q_3) + \text{tg} q_3 \right]$$

где $t_{\text{тр}}$ — промежутки времени между первым и траверзным пеленгами; t — промежуток между первым и третьим пеленгами.

Полученный такими методами угол дрейфа может быть учтен при дальнейшем плавании при условии сохранения постоянства окружающей обстановки, но в целом он дает информацию о прошлом, т.е. о том, каков был угол дрейфа до последней обсервации или наблюдения. Для систематического определения угла дрейфа служит прибор дрейфометр.

Определение дрейфа с помощью дрейфометра. Дрейфометр — прибор, в основе которого могут быть чувствительные элементы двух индукционных лагов, один из которых измеряет скорость $V_{\text{л}}$ по направлению диаметральной плоскости судна, а другой $V_{\text{др}}$ — скорость движения в перпендикулярном направлении. Геометрическая сумма $V_{\text{л}}$ и $V_{\text{др}}$ дает угол дрейфа

$$\alpha = \text{arctg} \frac{V_{\text{др}}}{V_{\text{л}}}$$

и скорость судна по линии пути

$$V = \sqrt{V_{\text{д}}^2 + V_{\text{др}}^2}$$

Возможны другие варианты дрейфометров. Такие приборы позволяют автоматизировать счисление судна.

Кроме определения угла дрейфа существуют приемы вычисления угла дрейфа. Применяемые способы вычисления основываются на анализе модельных испытаний и статистических материалов, получаемых во время плавания судна. Собранные статистические данные о дрейфе должны учитывать скорость ветра и судна, курсовые углы наблюдаемого ветра и осадку. Результаты наблюдений сводятся по группам, учитывающим основной признак – осадку судна. В настоящее время теоретически обосновано несколько способов вычисления угла дрейфа: способы Н. Н. Матусевича, С. И. Демина и др.

Способ Н. Н. Матусевича. Способ основан на предположении, что величина угла дрейфа α , град, может быть выражена формулой

$$\alpha = K \left(\frac{W}{V} \right)^2 \sin q \quad (6.6)$$

где W – скорость кажущегося ветра, м/с; V – скорость судна, м/с; q – курсовой угол кажущегося ветра, град; K – коэффициент дрейфа, град.

Для получения угла дрейфа необходимо знать величину коэффициента дрейфа.

Его вычисление производится на основании обработки достаточно большого числа (не менее 30) значений угла дрейфа, определенных навигационным методом, при условии, что в момент определения были замерены q , V , W с достаточной точностью (скорость – до 0,1 уз, q – с точностью $\pm 5^\circ$).

Обозначим $c = (W/V)^2 \sin q$, тогда можно написать

$$\alpha = Kc. \quad (6.7)$$

Таблица 6.1

№ набл.	W, м/с	V, м/с	q, град.	α , град.	W/V	$(W/V)^2$	c	c^2	$c\alpha$
1	16	14	60	3,5	1,14	1,30	1,13	1,28	3,95
2	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...									
n	12	8	45	2,8	1,50	2,25	1,59	2,53	4,45
								[cc]	[cα]

Значение K может быть получено решением по способу наименьших квадратов нормального уравнения

$$[c\alpha] = K[\alpha\alpha] \quad (6.8)$$

где $[c\alpha] = c_1\alpha_1 + c_2\alpha_2 + \dots + c_n\alpha_n$; $[\alpha\alpha] = \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2$

Из уравнения (6.8) коэффициент дрейфа вычисляется по формуле

$$K = \frac{[c\alpha]}{[\alpha\alpha]} \quad (6.9)$$

Схема для вычисления может иметь вид табл.6.1. Таких вычислений необходимо выполнить несколько, как минимум, хотя бы для двух вариантов загрузки: в грузу и в балласте. Исследование способа Н.Н. Матусевича показало, что формула (6.6) справедлива для углов дрейфа до 10° . Коэффициент дрейфа K не является постоянной величиной, а является функцией $(W/V)^2$, т.е.

$$K = f\left(\frac{W}{V}\right)^2$$

и только при больших отношениях $(W/V) \geq 6$ его можно считать постоянным. Чтобы повысить точность, необходимо для каждого значения (W/V) 8...10 раз определить K .

Способ С.И.Демина. Для того чтобы учесть различные факторы, влияющие на дрейф судна, С.И.Демин предложил метод вычисления угла дрейфа α , град, по формуле

$$\alpha = \arctg\left(ce^{-bT} \frac{W}{V} \sqrt{\sin q} - 0.064\right) \quad (6.10)$$

где c , b – коэффициенты; T – осадка судна, м; q – курсовой угол, град; V – скорость судна, уз; W – скорость кажущегося ветра, уз.

Коэффициенты c и b различны для каждого судна и зависят от значения S_H/S_{Π} – отношения площади надводной части судна к площади подводной части для различных осадок судна T .

Коэффициенты вычисляются предварительно следующим образом. Задаваясь осадкой с интервалом в 1м, выбирают из чертежа значения L – длины судна, B – ширины, S_H/S_{Π} – отношения площадей и φ – коэффициента продольной полноты. Для различных значений T , вычисляют

$$K_{\partial p_i} = \left[0.04177 - 0.22144 \frac{T}{L} + 0.00174\left(7 - \frac{L}{B}\right) + 0.06257(\varphi - 0.66)\right] \quad (6.11)$$

затем, зная S_H/S_{Π} вычисляют K_i : $K_i = K_{\partial p_{ii}} \sqrt{S_H / S_{\Pi}}$

Значение K_i получается в функции T и обычно имеет вид

$$K_i = ce^{-bT} \quad (6.12)$$

Построив график, необходимо выбрать два значения K , например для $T_1=5$ м и $T_2 = 10$ м. Прологарифмировав выражение (6.12), получим два уравнения

$$\left. \begin{aligned} \ln K_1 &= \ln c - bT_1 \\ \ln K_2 &= \ln c - bT_2 \end{aligned} \right\} \quad (6.13)$$

Решив уравнения, получим значения c и b , что позволяет вычислять угол дрейфа по формуле (6.10) в функции осадки судна, измеряя W и q . Для облегчения вычисления могут быть составлены таблицы или номограммы.

Учет дрейфа при прокладке. При наличии дрейфа на карте прокладывают две линии: линию ИК в виде небольшого отрезка и линию $ПУ_\alpha$, являющуюся линией, по которой перемещается судно (рис. 6.15) и над которой делаются записи ГКК, Δ ГК и α . Расстояние, пройденное по лагу, откладывается по линии $ПУ_\alpha$, так как лаг учитывает изменение скорости судна под действием ветра. Если лаг не работает, на судне должны быть таблица и график, характеризующие потерю скорости в зависимости от силы и курсового угла ветра. При больших углах дрейфа ($\alpha > 10^\circ$) обычные гидродинамические лаги учитывают только составляющую скорости судна относительно воды, направленную по диаметральной плоскости судна. В этом случае расстояние, пройденное по линии пути, будет равно $S = \text{РОЛ } K_{\text{Л}} \sec \alpha$.

Счислимые точки наносятся на линии пути. При учете дрейфа различают прямую и обратную задачи. При прямой задаче, зная ИК, рассчитывают $ПУ_\alpha$ и прокладывают линию $ПУ_\alpha$ на карте. В этом случае $ПУ_\alpha = \text{ГКК} + \Delta\text{ГК} + \alpha$.

При обратной задаче требуется рассчитать ГКК и задать его рулевому:

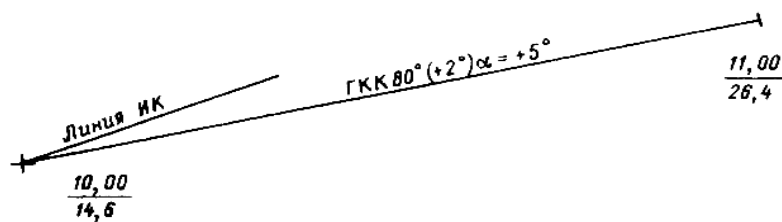


Рис. 6.15

$$\text{ГКК} = \text{ПУ}_\alpha - \alpha - \Delta\text{ГК}$$

Для расчета точки в момент нахождения судна на заданном КУ следует рассчитать $\text{ИП} = \text{ИК} + \text{КУ}$ и линию пеленга провести от маяка до пересечения с линией $ПУ_\alpha$.

Учет дрейфа при использовании автоматического счислителя координат сводится к введению дополнительной поправки курса, равной углу дрейфа. Для этого на приборе устанавливается поправка курса ΔK_α , равная алгебраической сумме поправки компаса и угла дрейфа:

$$\Delta K_\alpha = \Delta\text{ГК} + \alpha.$$

При каждом изменении курса или скорости судна, скорости и направления ветра поправка курса должна вычисляться и устанавливаться заново.

Определение и учет дрейфа с застопоренными машинами. Судно в этом случае перемещается по направлению ветра со скоростью:

$$V_{др} = K_v W$$

где K_v – коэффициент дрейфа без хода; W – скорость наблюдаемого ветра, уз.

Для определения скорости дрейфа рекомендуется произвести испытание. При различных скоростях W с помощью РЛС по измеренным расстояниям до объекта и замеченному промежутку t рассчитать

$$V_{др} = 3600 \frac{S_{др}}{t}$$

Расстояние может быть дважды измерено до буйка с помощью секстана по углу снижения.

При наличии многократных наблюдений (30...40) коэффициент дрейфа без хода вычисляется по формуле:

$$KV = \frac{[V_{др}W]}{[WW]} \quad (6.14)$$

$$[V_{др}W] = V_{др1}W_1 + V_{др2}W_2 + \dots + V_{дрn}W_n$$

$$\text{где } [WW] = W_1^2 + W_2^2 + \dots + W_n^2$$

Зная KV , вычисляют $V_{др}$, а затем и расстояние $S_{др} = V_{др}t$, которое откладывают от исходной точки по направлению ветра

Судоводитель обязан использовать приведенные методы для регулярного определения угла дрейфа и коэффициента дрейфа без хода, чтобы накопить опытные данные о дрейфе своего судна при различных условиях плавания.

6.4. Учет постоянного течения при прокладке

Поступательное движение водной массы в морях и океанах называется *течением*. Элементами течения являются его скорость v_t и направление K_t . Направление течения получает свое название по той точке горизонта, к которой оно движется (течение идет из компаса). Направление течения принято выражать в градусах, а иногда и в румбах.

В зависимости от устойчивости морские течения бывают постоянными (элементы течения устойчивые в течение длительного времени), периодическими (элементы течения изменяют направление и скорость в зависимости от приливообразующих сил) и временными (течения, образованные ветром, разностью температур и другими причинами). Сведения об элементах временных течений обычно только ориентировочные.

Рассмотрим плавание на постоянном течении. Под действием упора движителя судно получает движение относительно воды по направлению диаметральной плоскости. Если вода имеет движение относительно Земли, то скорость судна относительно Земли определяется геометрической суммой

$$\bar{V} = \bar{V}_Л + \bar{v}_т$$

и судно будет перемещаться по направлению вектора $\bar{V}$ (рис. 6.16). Если $\bar{V}_Л$ и $\bar{v}_т$ постоянны по величине и направлению, то $\bar{V}$ также будет постоянен и судно будет двигаться по прямой АС. Угол ПУ_β между северной частью истинного меридиана и направлением движения судна называется путем.

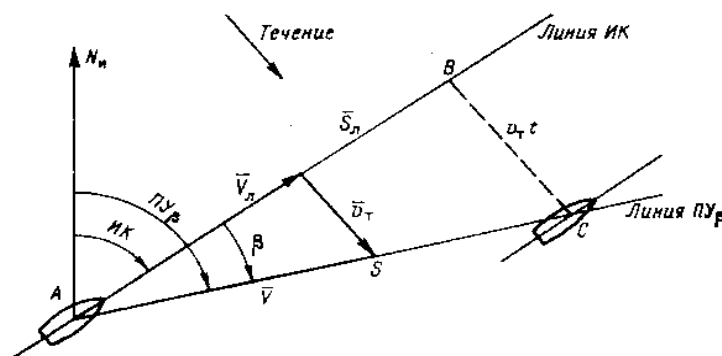


Рис. 6.16

Линия АС называется линией пути на течении, а угол β между линией ИК и линией пути называется углом сноса от течения. Скорость V будет являться абсолютной (истинной) скоростью судна (относительно дна).

Из рис. 6.16 видно, что $\text{ПУ}_\beta = \text{ИК} + \beta$.

Знак β зависит от направления сноса. Если течение направлено в левый борт, то β будет иметь знак «плюс», при течении в правый борт — знак «минус». Учет течения сводится к решению треугольника АВС (см. рис. 6.16), который часто называют навигационным. Так же как и при учете дрейфа, различают прямую и обратную задачи. Кроме нахождения угла β необходимо рассчитать пройденное расстояние S .

Прямая задача. В этом случае по заданным ИК, $\bar{V}_Л$, K_T и $\bar{v}_T$ требуется рассчитать β , ПУ_β и $\bar{V}$. Для получения линии пути из точки А прокладываем линию ИК и по ней откладываем скорость судна V_L (скорость, с которой предполагаем следовать данным ИК) в условном масштабе. Обычно берется количество миль в масштабе карты, проходимое за час или полчаса. Из конца вектора $\bar{V}$ проводим вектор $\bar{v}_T$, в том же масштабе и, соединив точку А с концом вектора $\bar{v}_T$, получим линию пути судна. Угол β снимается непосредственно с карты.

Величину вектора $\bar{V}$ (истинная скорость) также можно снять с карты. Для получения счислимой точки необходимо отложить исправленную разность отсчета лага по линии ИК и переместить ее по направлению течения на линию пути (точки В и С на рис. 6.17). При длительных переходах, когда курс и скорость судна, а также иных переходах, когда курс и скорость судна, а также элементы течения не меняются, можно вычислять $S=Vt$ (истинное расстояние) и откладывать его по линии пути.

Для расчета отсчета лага или времени прохода судном заданной точки, например точки F (см. рис. 6.17), следует поступить так. Из точки F (судно всегда находится на линии пути) провести линию, параллельную течению, до пересечения с линией истинного курса (точка E). Снять с карты расстояние AE , т.е. расстояние, которое судно должно пройти относительно воды.

Тогда отсчет лага в точке E будет равен

$$ОЛ_E = ОЛ_A + \frac{S_L}{K_L}, \text{ а время } t_E = t_A + \frac{S_L}{V_L}$$

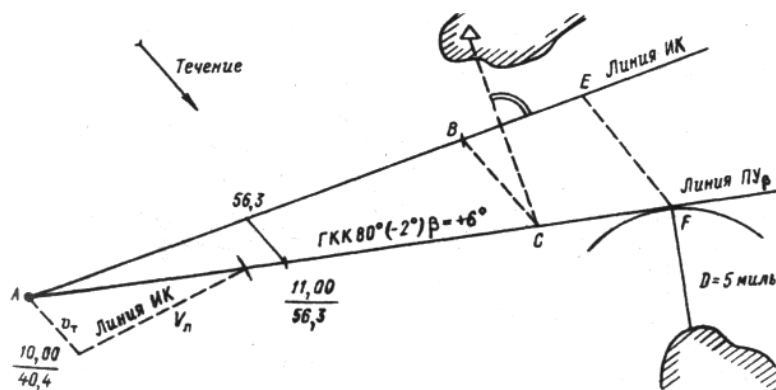


Рис. 6.17

Аналогично поступают, когда требуется рассчитать время прихода судна на траверз (или заданный КУ) маяка. Рассчитанный ИП=ИК+КУ проводят до пересечения с линией пути (точка С), затем точку эту по направлению, обратному направлению течения, переносят на линию ИК (точка В). Надписи на карте производятся над линией пути и параллельно ей (см. рис. 6.17). Порядок записи таков: пишется ГКК, в скобках указывается значение принятой поправки компаса, затем значение угла β с его знаком. Таким образом, направление линии пути равно алгебраической сумме цифр, написанной над линией пути судна. У счислимого места на линии пишется время и отсчет лага. Значение отсчета лага пишется и на линии истинного курса.

Обратная задача. Необходимо по заданным $ПУ_\beta$, $\bar{V}_Л$, K_T и $\bar{V}_T$ рассчитать и ИК.

Задача решается следующим образом. Пусть на карте проложена линия пути судна (см. рис. 6.17). Из начальной точки А прокладываем вектор скорости течения $\bar{V}_T$, выраженный количеством миль за полчаса или час. Из конца этого вектора раствором циркуля, равным по абсолютной величине скорости судна $\bar{V}_Л$ за тот же промежуток времени, делаем засечку на линии пути судна. Соединив полученную точку на линии пути с концом вектора течения, получим направление линии ИК судна.

Полученную линию переносим параллельно в начальную точку А. Если изменятся скорость судна или элементы течения, то построение надо делать заново. В этом случае угол β носит название *поправки на течение*.

Кроме изложенного графического учета течения существует *аналитический* учет течения, который принимается при использовании автоматических счислителей координат.

В этом случае угол β , выбранный из таблиц вводится как дополнительная поправка курса, а пройденное расстояние получается путем введения дополнительного коэффициента k , т.е. $S=S_Лk=РОЛ K_Лk$. Получим формулы для β и k прямой задачи (рис. 6.18).

Прямая задача. Даны ИК, $V_Л$, K_T , и v_T , требуется найти β , $ПУ_\beta$ и V . Построим треугольник скоростей и спроектируем его на линию ИК:

$$\begin{aligned} V \cos \beta &= V_Л + v_T \cos q_T \\ V \sin \beta &= v_T \sin q_T \end{aligned} \quad (6.15)$$

Разделим оба выражения на $V_Л$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{V}{V_Л} \cos \beta &= 1 + \frac{v_T}{V_Л} \cos q_T \\ \frac{V}{V_Л} \sin \beta &= \frac{v_T}{V_Л} \sin q_T \end{aligned} \right\}$$

Введем обозначения $V/V_Л = k$, $v_T/V_Л = m$ и получим два уравнения:

$$\begin{aligned} k \cos \beta &= 1 + m \cos q_T \\ k \sin \beta &= m \sin q_T \end{aligned} \quad (6.16)$$

Чтобы получить β , разделим первое выражение на второе:

$$\operatorname{ctg} \beta = \frac{\cos q_T}{m} + \operatorname{ctg} q_T \quad (6.17)$$

и окончательно получаем

$$ПУ_\beta = ИК + \beta$$

Для получения значения k возведем каждый член уравнения (6.16) в квадрат и сложим:

$$k = \sqrt{1 + 2m \cos q_T + m^2} \quad (6.18)$$

По формулам (6.17) и (6.18) составляются таблицы, прилагаемые к автосчислителю.

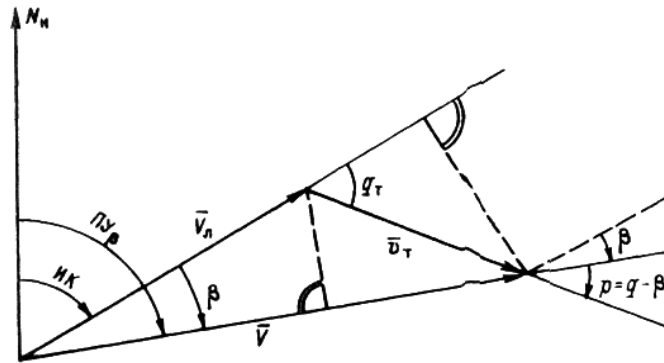


Рис. 6.18

Обратная задача. Даны ПУ_β , $V_\text{л}$, $K_\text{т}$ и $v_\text{т}$. Требуется найти β , ИК и V . Спроектируем треугольник скоростей на линию, перпендикулярную линии пути. Общий катет позволяет написать равенство

$$V_\text{л} \sin \beta = v_\text{т} \sin p$$

где p — угол между направлением течения и направлением линии пути.

Разделив обе части на $V_\text{л}$, получим

$$\sin \beta = m \sin p \quad (6.19)$$

Коэффициент k получается по формуле (6.18) после предварительного расчета $q = p + \beta$. И окончательно

$$\text{ИК} = \text{ПУ}_\beta - \beta; S = S_\text{л} k$$

Иначе обе задачи могут быть решены так: в соответствии с рис. 6.16, запишем векторное уравнение сложения скоростей $\bar{V}_\text{л}$ и $\bar{v}_\text{т}$ через проекции векторов на меридиан ($V_\text{Нл}$, $v_\text{Нт}$, $V_\text{Н}$), и параллель ($V_\text{Ел}$, $v_\text{Ет}$, $V_\text{Е}$). Тогда будем иметь следующую систему уравнений:

$$V_\text{Нл} + v_\text{Нт} = V_\text{Н} \quad (6.19a)$$

$$V_\text{Ел} + v_\text{Ет} = V_\text{Е}$$

Иллюстрация связи векторов в координатах показана на рис. 6.19:

Тогда задачи формулируются следующим образом:

Прямая задача:

Дано: $\bar{V}_\text{л} (V_\text{Нл}, V_\text{Ел})$, $\bar{v}_\text{т} (v_\text{Нт}, v_\text{Ет})$

Определить: $V (V_\text{Н}, V_\text{Е})$

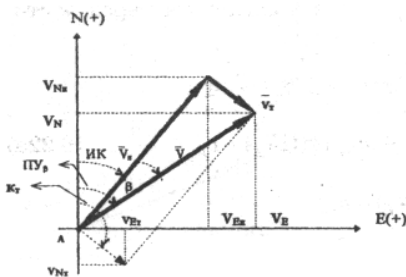


Рис. 6.19

Решение:

В соответствии с (6.19а) находим координаты известных векторов $\bar{V}_L(V_{N_L}, V_{E_L}), \bar{v}_T(v_{N_T}, v_{E_T})$

$$V_{N_L} = V_L \cos(ИК)$$

$$V_{E_L} = V_L \sin(ИК)$$

$$v_{N_T} = v_T \cos(K_T)$$

$$v_{E_T} = v_T \sin(K_T)$$

Затем определяем составляющие путевой скорости V_N и V_E по (6.19а) и модуль V по теореме Пифагора:

$$V = \sqrt{V_N^2 + V_E^2}$$

ПУ_β и β находятся по известным соотношениям:

$$\text{ПУ}_\beta = \arctg \frac{V_E}{V_N}, \beta = \text{ПУ}_\beta - ИК$$

Обратная задача:

Дано: ПУ_β, $V_L, \bar{v}_T(v_{N_T}, v_{E_T})$

Определить: ИК, V, β

Решение:

В соответствие с рисунком 6.19, имеем:

$$V_{N_L} + v_{N_T} = \cos(\text{ПУ}_\beta) \quad (6.20a)$$

$$V_{E_L} + v_{E_T} = V \sin(\text{ПУ}_\beta) \quad (6.21a)$$

Заменим в (6.21а) V_{E_L} через V_{N_L} и разделим (6.21а) на (6.20а) почленно:

$$\frac{\sqrt{(V_{N_L}^2 - V_L^2)} + v_{E_T}}{V_{N_L} + v_{N_T}} = \text{tg}(\text{ПУ}_\beta)$$

Перейдем к записи в строку, оставив в левой части выражение с радикалом а сумму известных величин обозначим через постоянную В.

$$\begin{aligned} \sqrt{(V_L^2 - V_{N_L}^2)} + v_{E_T} &= (V_{N_L} + v_{N_T}) \text{tg}(\text{ПУ}_\beta) \\ \sqrt{(V_L^2 - V_{N_L}^2)} &= V_{N_L} \text{tg}(\text{ПУ}_\beta) + v_{N_T} \text{tg}(\text{ПУ}_\beta) - v_{E_T} \\ B &= v_{N_T} \text{tg}(\text{ПУ}_\beta) - v_{E_T} \end{aligned} \quad (6.22a)$$

Пусть $x = V_{N_L}$, тогда

$$\sqrt{(V_L^2 - x^2)} = x \text{tg}(\text{ПУ}_\beta) + B$$

Теперь возведем обе части (6.22а) в квадрат для освобождения от квадратного корня и запишем полученное квадратное уравнение в стандартной форме:

$$V_{\text{Л}}^2 - x^2 = x^2 \operatorname{tg}^2(\Pi Y_{\beta}) + B^2 + 2B \operatorname{tg}(\Pi Y_{\beta})x$$

$$[1 + \operatorname{tg}^2(\Pi Y_{\beta})]x^2 + 2B \operatorname{tg}(\Pi Y_{\beta})x + (B^2 - V_{\text{Л}}^2) = 0$$

Появление квадратного уравнения формально оправдано, из-за периодичности тригонометрической функции $\operatorname{tg}(\Pi Y_{\beta})$. Из практики известно, что для движущегося судна значение угла β обычно не велико и составляет несколько градусов, а поэтому величина x должна быть близка к V_N т.е. ИК не должен намного отличаться от ΠY_{β} . Исходя из этого предположения и выбирается корень уравнения. После определения x , находим остальные неизвестные

$$V_{E_{\text{Л}}} = \sqrt{(V_{\text{Л}}^2 - V_N^2)}, \text{ИК} = \operatorname{arctg} \frac{V_{E_{\text{Л}}}}{V_{N_{\text{Л}}}}$$

Из (6.20а) или (6.21а) получаем две эквивалентные формулы для V :

$$V = \frac{V_{N_{\text{Л}}} + V_{N_T}}{\cos(\Pi Y_{\beta})}, V = \frac{V_{E_{\text{Л}}} + v_{E_T}}{\sin(\Pi Y_{\beta})}$$

Затем рассчитываем угол сноса от течения $\beta = \Pi Y_{\beta} - \text{ИК}$

6.5. Учет приливо-отливного течения

Направление и скорость приливо-отливного течения меняются от места к месту, а также с течением времени, и поэтому при счислении приходится делать допуск на их постоянство на протяжении некоторого промежутка времени. За такой промежуток времени условно принимают 1 ч.

Таблица 6.2

Время плавания T_i	Время полной воды в основном пункте $T_{\text{ПВ}}$	Водный час $T_i - T_{\text{ПВ}}$	Направление течения K_T	Скорость течения v_T
T_1	$T_1 - T_{\text{ПВ}}$		K_{T_1}	v_{T_1}
T_2	$T_2 - T_{\text{ПВ}}$		K_{T_2}	v_{T_2}
T_3	$T_3 - T_{\text{ПВ}}$		K_{T_3}	v_{T_3}
...	...		...	...
T_i	$T_i - T_{\text{ПВ}}$		K_{T_i}	v_{T_i}

В открытых морях приливо-отливные течения характеризуются малыми скоростями, замкнутыми орбитами, как правило, при ведении счисления не учитываются. Вблизи берегов и в узкостях приливо-отливные течения могут достигать 6...8 и даже 10 уз, и поэтому они непременно должны учитываться, особенно при обратной задаче, т.е. при выборе и расчете ИК.

Хотя при плавании в узкостях счисление тщательно контролируется наблюдениями, необходимо так рассчитать ИК, чтобы предотвратить снос течением в опасные для плавания районы. Сведения о приливо-отливных течениях помещаются непосредственно на навигационных картах, в специальных атласах или приводятся в таблицах. Во всех случаях элементы течения приведены к моменту наступления полной воды в основном пункте. Поэтому для выборки данных о течении необходимо знать с достаточной точностью (30 мин) время прохождения конкретного района. Это является одной из особенностей учета приливо-отливного течения. В атласах и таблицах приводят две скорости течения – сизигийную и квадратурную.

Приближенно сизигийными считаются течения за два дня до новолуния и полнолуния и два последующих дня, квадратурными – за два дня до первой и третьей фазы Луны и два последующих дня. В остальные дни течения считаются промежуточными: скорость их берется как средняя арифметическая. Для учета течений необходимо составить таблицу (табл. 6.2).

При составлении таблицы интерполяция по времени должна составлять 30 мин, т. е. если, например, $T_{ПВ} = 10 \text{ ч } 20 \text{ мин}$, то 1 ч после наступления воды будет приходиться на промежуток времени от 10 ч 50 мин до 11 ч 50 мин ($T_{СР} = 11 \text{ ч } 20 \text{ мин}$).

После того как будут найдены элементы приливо-отливного течения на каждый час плавания, его учет выполняется способами, изложенными выше. Вместо того чтобы откладывать течение каждый час, можно найти геометрическую сумму векторов течения за 2, 3, 4 ч и выполнить прокладку построением двух линий: линии ИК и линии ПУ (рис. 6.20). Аналогично можно поступить в случае обратной задачи, когда требуется рассчитать ИК.

При значительных скоростях течения может оказаться, что необходимо будет сделать второе приближение. Сделав прокладку ИК и составив таблицу элементов течения, делаем прокладку линии ПУ. Координаты судна и моменты времени могут существенно отличаться от полученных при предварительной прокладке без учета течения. В этом случае корректируются элементы течения в таблице и построение линии пути повторяется.

Надо иметь в виду, что элементы приливо-отливных течений могут под влиянием ветра существенно отличаться от выбранных из пособий. Поэтому штурман всегда должен при плавании в таких районах чаще определять место судна, уточняя из наблюдений действительные элементы приливо-отливных течений.

Скорость и направление временного (ветрового) течения выбирают из специальных карт, составленных для типовых полей ветра. Если таких пособий нет, то за основу для расчета скорости и направления течения принимают сведения об истинном ветре, скорость и направление которого должны определяться 1...2 раза каждый час.

Для вычисления скорости ветрового течения, уз, используется формула

$$v_T = 0.136 \sqrt{\frac{U}{\sin \varphi}} \quad (6.20).$$

где U – скорость истинного ветра, м/с; φ – широта места судна.

Направление ветрового течения в северном полушарии отклоняется вправо от направления ветра на величину около 45° , в южном полушарии – влево. В мелководных районах этот угол равен приблизительно 25° . Время, за которое течение приобретает скорость, соответствующую вычисляемой по формуле, называется временем развития и зависит от широты места и глубины моря.

Так, при глубинах 25м ветер силой 4...5 баллов образует течение через 1...2ч, а при глубинах 250м – через 10...12ч. При длительных ветрах скорость ветрового течения достигает 0,5...0,8уз и его необходимо учитывать при ведении счисления и при анализе невязок счисления.

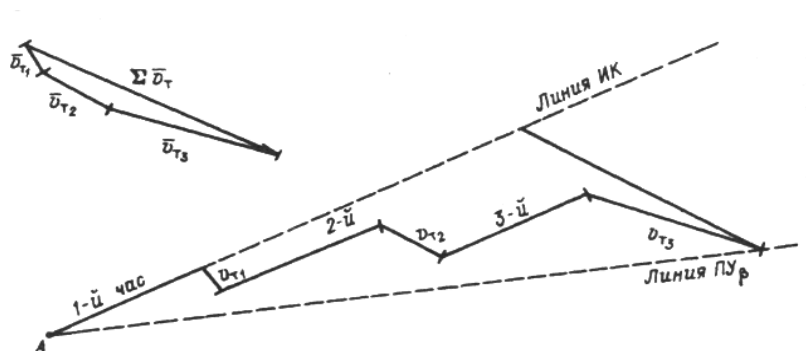


Рис. 6.20

6.6. Совместный учет дрейфа и течения

В практике судовождения часто случается, что течение и ветер действуют на судно одновременно. При совместном учете дрейфа и течения следует различать два случая:

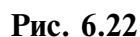
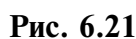
известны угол дрейфа и элементы течения;

известен только суммарный угол сноса, равный алгебраической сумме $c = \alpha + \beta$ (рис. 6.21).

В первом случае при решении прямой задачи производится последовательный учет сначала дрейфа, а затем течения.

На карте прокладывается коротким отрезком линия ИК, затем линия ПУ_α, по которой следовало бы судно, если бы не было течения. На ней откладывается вектор скорости судна по лагу $\bar{V}_Л$ в выбранном масштабе (см. рис. 6.21).

При обратной задаче поступают наоборот. Сначала учитывают течение, затем дрейф. Для этого из начальной точки А откладывают вектор течения, из конца этого вектора радиусом, равным скорости судна по лагу, делают засечку на линии ПУс (рис. 6.22). Сняв с карты значение $ПУ_{\alpha}$ рассчитывают $ИК = ПУ_{\alpha} - \alpha$.



Кратчайшее расстояние $D_{кр}$ откладывается до линии $ПУ_C$, а полученная точка C переносится на линию $ПУ_\alpha$ в точку B по направлению, обратному направлению течения. Отрезок AB равен $S_{л}$, пройдя его, судно окажется в точке C . При нахождении маяка на траверзе (D) следует восстановить перпендикуляр к линии ИК (провести $ИП = ИК \pm 90^\circ$), а затем полученную точку F следует перенести на линию $ПУ_\alpha$ в точку E . Угол между $D_\perp$ и $D_{кр}$ будет равен углу ς . Разность $D_\perp - D_{кр}$ может быть обнаружена радиолокатором при углах $\varsigma > 7...10^\circ$.

6.7. Навигационные методы определения пути судна

Изложенные в п. 6.3 методы определения угла дрейфа по пеленгам плавающего ориентира могут быть использованы и для нахождения суммарного угла сноса, но объект в этом случае должен быть неподвижен. Кроме того, судоводителю часто не обязательно знать элементы сноса ветром, и течением, гораздо важнее знать элементы движения судна относительно Земли под совокупным действием машины, течения, ветра и волнения.

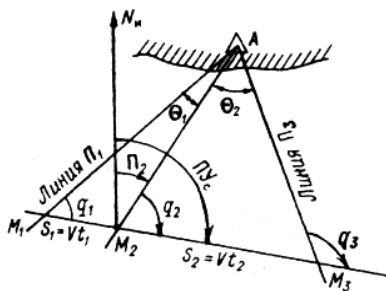


Рис. 6.23

Поэтому во всех случаях, когда это возможно, штурман обязан определять элементы движения судна (путевой угол и истинную скорость) из наблюдений и принимать их в расчет при дальнейшем счислении. Наиболее надежно это можно сделать после получения ряда последовательных определений места судна по береговым ориентирам при постоянных курсе и скорости. Если элементы сноса постоянны, то прямая, соединяющая эти точки, будет линией пути, а угол

между ней и линией ИК – суммарным углом сноса ς . В тех случаях, когда выполнить обсервацию нельзя, например в видимости находится объект, положение которого не определено, можно найти линию, параллельную линии пути, а следовательно, и угол ς по пеленгам неподвижного ориентира и промежуткам времени.

Пусть судно следует постоянным курсом и скоростью по линии пути (рис. 6.23), направление которой неизвестно. В произвольные, но фиксированные с точностью до секунды моменты времени взяты три пеленга $П_1$, $П_2$, $П_3$ неподвижного ориентира A . Если элементы сноса за период наблюдений постоянны, то положение линии пути будет определяться отрезками расстояний, пройденных судном за время между первым и вторым пеленгами ($S_1 = Vt_1$) и между вторым и третьим пеленгами ($S_2 = Vt_2$).

Иными словами, любая прямая, пересекающая все три пеленга так, что ее отрезки между пеленгами относятся как

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{POL_1}{POL_2}$$

будет параллельна линии пути судна. Из рис. 6.23 видно, что

$$ПУ_c = П_2 + q_2 \quad (6.21)$$

где $П_2$ – второй пеленг ориентира А; q_2 – угол между вторым пеленгом и линией пути судна.

Величина $П_2$ известна из наблюдений, а угол q_2 можно вычислить по формуле, полученной при решении двух треугольников. Из треугольников M_1AM_2 и M_2AM_3 найдем значение AM_2 :

$$\frac{AM_2}{\sin(q_2 - \Theta_1)} = \frac{Vt_1}{\sin \Theta_1}; AM_2 = \frac{Vt_1 \sin(q_2 - \Theta_1)}{\sin \Theta_1}$$

$$\frac{AM_2}{\sin(q_2 + \Theta_1)} = \frac{Vt_2}{\sin \Theta_2}; AM_2 = \frac{Vt_2 \sin(q_2 + \Theta_2)}{\sin \Theta_2}$$

следовательно,
$$\frac{Vt_1 \sin(q_2 - \Theta_1)}{\sin \Theta_1} = \frac{Vt_2 \sin(q_2 - \Theta_2)}{\sin \Theta_2}$$

после преобразования получим
$$ctgq_2 = \frac{t_1 ctg\Theta_1 - t_2 ctg\Theta_2}{t_1 + t_2}$$

или, введя обозначение отношений промежутков времени $\tau = \frac{t_1}{t_2}$

$$ctgq_2 = \frac{\tau_1 ctg\Theta_1 - ctg\Theta_2}{1 + \tau} \quad (6.22)$$

В формулу (6.22) не входит скорость судна, так как было принято, что она постоянна, поэтому путь судна может быть определен независимо от того, известна ее величина или нет. Необходимо только помнить, что таким методом мы находим направление движения судна, а не линию действительного пути и место судна на ней.

Решение задачи можно упростить, если взять пеленги через равные промежутки времени ($t_1 = t_2$)- При $\tau = 1$ получим

$$ctgq_2 = \frac{ctg\Theta_1 - ctg\Theta_2}{2} \quad (6.23)$$

По этой формуле можно легко составить таблицу, из которой по аргументам Θ_1 и Θ_2 выбирается значение q_2 .

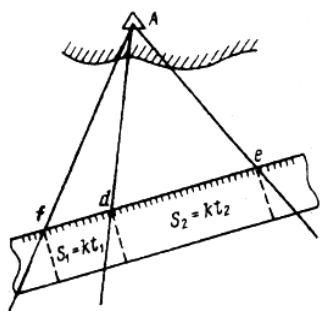


Рис. 6.24

Данная задача может быть решена либо с помощью графических методов, изложенных в п.6.3, либо с использованием кальки или линейки (рис. 6.24). Отложив на кальке или линейке два отрезка $S_1 = kt_1$ и $S_2 = kt_2$ (где k – произвольный коэффициент) или же плавание по лагу S_1 и S_2 , накладываем кальку (линейку) на проложенные на карте линии пеленгов и, двигая ее, находим такое положение, при котором точки f , d , e будут лежать соответственно на первом, втором и третьем пеленгах. Прямая, проведенная

через эти точки, будет параллельна линии пути судна.

Для повышения точности все графические построения рекомендуется делать в возможно более крупном масштабе. Основное достоинство этого способа заключается в том, что путь можно определить по любому неподвижному ориентиру (буй, маяк, камень, дерево, вершина) независимо от того, нанесен он на карту или нет.

Рассмотрим основные источники погрешностей при определении суммарного угла сноса по пеленгам неподвижного ориентира.

Погрешностями, в отсчетах времени t_1 и t_2 при использовании секундомера можно пренебречь.

В погрешности поправки компаса, как видно из формул для расчета q_2 , входят только углы θ_1 и θ_2 , представляющие собой разности пеленгов. Поэтому систематическая погрешность принимаемой поправки компаса на вычисление угла q_2 влияния не оказывает.

При определении $ПУ_C = П_2 + q_2$, если пеленг будет содержать погрешность в поправке компаса $\varepsilon_{\Delta K}$, то полученное направление пути также будет содержать эту погрешность. На определение суммарного угла сноса эта погрешность влиять не будет, так как полученные $ПУ_C$ и ИК будут ошибочными на одну и ту же величину $\varepsilon_{\Delta K}$, а угол сноса определяется как разность $ПУ_C - ИК = c$.

Случайные погрешности пеленгования скажутся при расчете q_2 , так как углы θ_1 и θ_2 рассчитываются по значениям пеленгов.

Расчеты показывают, что при достаточно больших углах θ_1 , θ_2 , и $m_{\Pi} = \pm 0,3^\circ$ случайные погрешности в определении угла q_2 находятся в пределах $\pm 1^\circ$. Практические наблюдения подтверждают этот вывод.

Если за время наблюдений элементы сноса могут измениться, рассмотренным способом пользоваться не следует.

6.8. Точность графического счисления

Возможные погрешности в значениях элементов счисления, угла дрейфа, поправок компаса и лага, а также погрешности графических построений

на карте, постепенно накапливаясь, приводят к тому, что действительное место судна не совпадает с нанесенным на карту.

Штурман должен уметь произвести оценку точности графического счисления. Будем считать, что все погрешности малы, тогда их можно разбить на две группы: погрешности, допущенные при определении пути судна, и погрешности, допущенные при расчете пройденного расстояния (погрешностями графических построений пренебрегаем ввиду их малости).

На рис. 6.25 показано перемещение судна из точки А в точку В. Погрешности первой группы вызовут смещение на величину b , погрешности второй группы вызовут смещение на величину a . Величины a и b будут являться средними квадратичными продольными и поперечными погрешностями счисления, так как они вызваны средними и квадратичными погрешностями $m_{пу}$, $m_{\Delta I\%}$ и m_s .

Зная значения a и b , можно вычислить величину M_c – среднюю квадратичную погрешность счисления.

При больших разностях a и b площадь возможного нахождения места судна будет характеризоваться эллипсом с полуосями a и b , который можно от руки описать вокруг фигуры CDEF.

В общем виде значение b равно

$$b = \frac{m_{пу} S}{57.3^0} \approx \frac{m_{пу} S}{60^0} \quad (6.24)$$

где $m_{пу}$ – средняя квадратичная погрешность путевого угла, град.

При отсутствии дрейфа и течения $m = m_k$ – средней квадратичной погрешности курса. Для гирокомаса $m_k = 1...1,5^0$. При учете дрейфа эта погрешность квадратически складывается со средней квадратичной погрешностью в учете дрейфа α , которая может достигать значения $\alpha/3$.

При наличии течения средняя квадратичная погрешность в учете угла сноса от течения $m_\beta = f(V, m_v, p, v_T)$ и может достигать нескольких градусов. Целесообразно учитывать ее максимальное значение. Величина a зависит от погрешностей в принятом значении поправки лага, а также от погрешностей в пройденном расстоянии, вызванных неучетом течения или учетом недостоверного течения. Можно написать, что

$$a = \sqrt{\left(\frac{S}{100} m_{\Delta I\%}\right)^2 + m_s^2} \quad (6.25)$$

Для случая, когда течение отсутствует, формула для M_c будет иметь вид

$$M_c = \sqrt{b^2 + a^2} = \sqrt{\left(\frac{S}{60} m_{пу}\right)^2 + \left(\frac{S}{100} m_{\Delta I\%}\right)^2} = \frac{S}{600} \sqrt{100m_{пу}^2 + 36m_{\Delta I\%}^2}$$

$$\text{или } M_c = \frac{S}{100} \sqrt{2.8m_{\text{ПУ}}^2 + m_{\Delta L\%}^2}$$

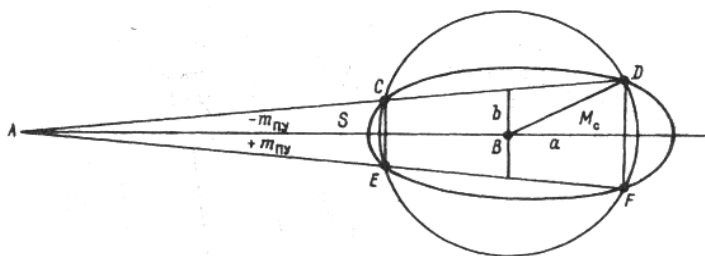


Рис. 6.25

Формулы для вычисления погрешностей m_β и m_s от действия течения могут быть получены из формул аналитического учета течения:

$$\sin \beta = \frac{v_T}{V} \sin p; V = V_L \cos \beta + v_T \cos p$$

После дифференцирования, считая, что $\sin \beta \approx \beta \text{arc1}^0$, получим:

$$m_{\beta \text{ max}} = \frac{57.3^0 m_{v_T}}{V_L} \text{ при } p=90^0$$

$$m_{s \text{ max}} = \frac{S m_{v_T}}{V_L} \text{ при } p=0^0$$

Среднее значение скорости неизвестного течения принимается равным: при плавании в районах со значительными приливо-отливными течениями 0,5...1,0 уз; в районах открытого моря, где, по данным пособий, течение отсутствует, 0,3...0,5 уз; в прибрежной зоне 0,2...0,3 уз; ветровое течение обычно не превышает 0,3 уз.

На основании многолетних наблюдений получены следующие приближенные значения радиуса M_c для нормальных условий плавания в зависимости от пройденного расстояния: без ветра и течения $M_c = 0,02S$; с учетом дрейфа $M_c = 0,03S$; с учетом дрейфа и течения $M_c = (0,03...0,07)S$.

При плавании переменными курсами решение задачи по оценке точности счислимого места в конечной точке сводится к расчету M для каждого курса и их квадратичного суммирования (рис. 6.26):

$$M_K = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_i^2}$$

где M_K – средняя квадратичная погрешность счисления в конечной точке; M_1, M_2, M_i – средние квадратичные погрешности на каждом курсе.

Единственной независимой переменной при оценке точности счисления надо считать время, а все другие параметры, определяющие точность счисления, – его случайными функциями.

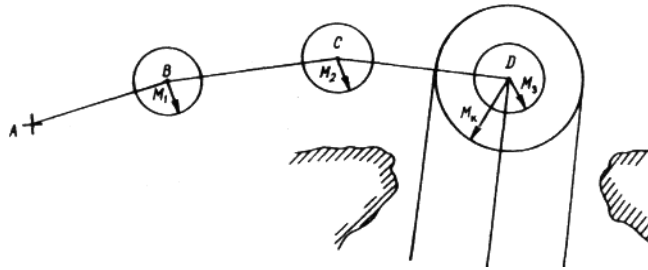


Рис. 6.26

Если в течение ряда рейсов по одному маршруту собрать данные о невязках и по ним построить график точности счисления в зависимости от времени (рис.6.27), то осреднение всех полученных точек позволит получить согласную кривую, близкую к параболе и описываемую уравнениями

$$M_c = \frac{K_c t}{2^{1-\theta}} \quad \text{при } t < 2\text{ч.}$$

$$M_c = K_c t \theta \quad \text{при } t > 2\text{ч}$$

где t — интервал счисления, ч; θ — коэффициент, характеризующий степень линейности изменения M_c с течением времени; K_c — коэффициент счисления, зависящий от района плавания, точности учета течения и гидрометеоусловий и др.

Если обсервации были равноточные и производились через примерно равные интервалы времени, то значения K_c можно получить по формулам

$$K_c = \frac{1.6}{n_1} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{t_i} \quad \text{при } t \leq 2\text{ч} ; \quad K_c = \frac{1.13}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{C_j}{t_j} \quad \text{при } t > 2$$

При $\theta = 0,5$ для расчета M_c используют формулы

$$M_c = 0.7 K_c t \quad \text{при } t < 2\text{ч}$$

$$M_c = K_c \sqrt{t} \quad \text{при } t > 2\text{ч} \quad (6.26)$$

При вычислении K_c нельзя использовать невязки, полученные при недостаточно достоверных определениях места судна.

Коэффициент счисления может быть предвычислен априорно по формуле

$$K_c = 1.4 \sqrt{\left(\frac{m_{\text{ПУ}} V}{57.3^\circ}\right)^2 + \left(\frac{m_V V}{100}\right)^2 + \left(2v_T \sin \frac{m_{KT}}{2}\right)^2} + m_{v_T}^2 \quad (6.27)$$

где $m_{\text{ПУ}}$, m_V , m_{KT} , v_T — предполагаемые средние квадратичные погрешности в пути судна, его скорости и элементах течения.

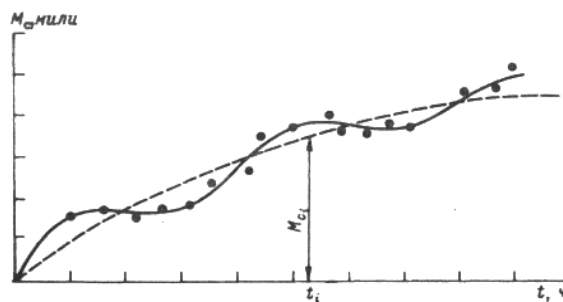


Рис. 6.27

Если после длительного перехода потребуется рассмотреть возможность прохода какого-либо пролива по счислению, необходимо проложить три вероятных линии курса: из двух точек окружности M_K (см. рис. 6.26) и точки D. До получения надежной обсервации следует вести такую «тройную» прокладку, причем для получения вероятности $P = 99,0\%$, соответствующей предельной погрешности, следует взять M_K , увеличенную в 3 раза.

Рассмотренные формулы для оценки точности не могут гарантировать надежность результата, они позволяют штурману только ориентировочно оценить возможные погрешности счисления. Поэтому следует периодически осуществлять контроль счисления, используя для этого все имеющиеся в распоряжении судоводителя средства.

В зависимости от допустимой погрешности счислимого места для конкретных условий плавания можно рассчитать необходимую периодичность выполнения обсерваций:

$$t \leq 1.4 \frac{\sqrt{M_D^2 - M_0^2}}{K_c} \quad \text{при } t \leq 2ч$$

$$t \leq \frac{(M_D^2 - M_0^2)}{K_c^2} \quad \text{при } t > 2ч$$

где t — промежуток времени между обсервациями, ч; M_D — допустимая при данных условиях плавания средняя квадратичная погрешность определения места судна, мили; M_0 — средняя квадратичная погрешность определения места судна, используемого для коррекции счисления, мили.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ СЧИСЛЕНИЕ

7.1. Основные формулы аналитического счисления

Кроме графического счисления, учет движения судна может производиться по формулам аналитическим методом. Аналитическим счислением называется вычисление приращений к исходным координатам, обусловленным движением судна, с помощью которых определяются счислимы координаты на заданный момент времени.

Аналитическое счисление может быть табличным, когда задачи счисления решают с использованием таблиц и автоматизированным, когда решение получают с помощью вычислительных машин. Аналитическое счисление применяется при плавании вдали от берегов на океанских переходах, когда ведение прокладки на картах мелкого масштаба становится неточным из-за больших погрешностей графических построений. Кроме того, аналитическое счисление применяется при решении астрономических задач, когда вычисляются координаты счислимых мест. Оно может применяться при вычислении обсервованных координат при разновременных линиях положения для приведения наблюдений к одному моменту и, наконец, формулы аналитического счисления заложены во все автоматические счислители координат и путепрокладчики.

Получим основные формулы аналитического счисления. Предположим, что судно находилось в точке отшествия A (рис. 7.1) с известными координатами φ_1, λ_1 и, следуя постоянным курсом по локсодромии, пришло в точку пришествия B с координатами φ_2, λ_2 . Если будут известны сделанные судном РШ и РД, то координаты точки B легко получить из соотношений

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \text{РШ}; \lambda_2 = \lambda_1 + \text{РД}$$

Значения РШ и РД, входящих в эти формулы, можно рассчитать по известным элементам движения: K – курсу судна и S – расстоянию, пройденному судном. Для вывода основных зависимостей обратимся к элементарному треугольнику $Aa'b'$ (см. рис. 7.1), считая Землю за сферу.

В этом треугольнике

$$Ab' = d\varphi; b'a' = d\lambda \cos \varphi = d\omega; Aa' = dS$$

где $d\omega$ – расстояние между меридианами по параллели от точки a' до b' , мор. мили; dS – расстояние, пройденное судном по локсодромии между точками A и a' , мор. мили; $d\varphi$ – разность широт, мор. мили.

Если принять $\Delta Aa'b'$ за плоский, можно написать дифференциальные уравнения $d\varphi = dS \cos K$; $d\lambda \cos \varphi = dS \sin K$.

В результате интегрирования, учитывая что $K = const$, получим

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi = \cos K \int_0^S dS$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = S \cos K, \text{ или } \text{РШ} = S \cos K \quad (7.1)$$

Для интегрирования $d\lambda \cos \varphi$ необходимо использовать теорему о среднем, вынеся $\cos \varphi$ за знак интеграла и отнеся его к параллели некоторой промежуточной широты φ_n :

$$\cos \varphi_n \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda = \sin K \int_0^S dS$$

Обозначим $(\lambda_2 - \lambda_1) \cos \varphi_n$ через w и назовем эту величину отшеством (ОТШ). Тогда

$$\text{ОТШ} = w = S \sin K \quad (7.2)$$

Геометрический смысл состоит в том, что ОТШ представляет собой длину отрезка параллели некоторой промежуточной широты φ_n , заключенной между меридианами пункта отхода и пункта прихода.

Единицей измерения отшества является морская миля.

Для вычисления РД воспользуемся известным соотношением между длиной дуги экватора и параллели:

$$d\lambda = \frac{d\omega}{\cos \varphi}$$

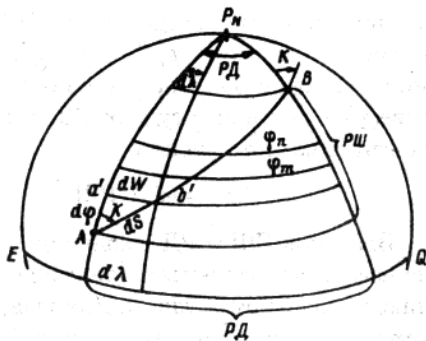


Рис. 7.1

Умножим числитель и знаменатель на $d\varphi$ и, принимая зависимость из $\Delta Aa'b'$,

$$\frac{d\omega}{d\varphi} = \operatorname{tg} K \quad \text{будем иметь} \quad d\lambda = \operatorname{tg} K \frac{d\varphi}{\cos \varphi}$$

Решение этого уравнения приводит к известному интегралу

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \operatorname{tg} K \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\varphi}{\cos \varphi}$$

который представляет собой разность меридиональных частей (РМЧ) в дуговых минутах:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\varphi}{\cos \varphi} = D_2 - D_1 = PMЧ$$

В результате получим

$$РД = PMЧ \operatorname{tg} K \quad (7.3)$$

Для вывода прямой связи между ОТШ и РД используем теорему о среднем значении определенного интеграла, которая дает

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\varphi}{\cos \varphi} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\cos \varphi_n} = \frac{PШ}{\cos \varphi_n}$$

где φ_n – промежуточное значение широты в интервале между φ_1 и φ_2 . Тогда для разности долгот можно написать другое выражение:

$$РД = \operatorname{tg} K \frac{PШ}{\cos \varphi_n}$$

Приравняв эти два значения РД, получим значение φ_n :

$$PMЧ \operatorname{tg} K = \operatorname{tg} K \frac{PШ}{\cos \varphi_n} ; \cos \varphi_n = \frac{PШ}{PMЧ}$$

Подставим значение $\cos \varphi_n$ в формулу для РД и, учитывая, что ОТШ = РШ $\operatorname{tg} K$, получим окончательно

$$РД = \frac{ОТШ}{\cos \varphi_n} OTШ \frac{PMЧ}{PШ} \quad (7.4)$$

в которой ОТШ и РШ должны быть даны в морских милях.

Таким образом, отстояние w , вычисленное по формуле (7.2), представляет собой длину параллели в морских милях между меридианами точек A и B в промежуточной широте, которая определяется соотношением

$$\varphi_n = \arccos \frac{PШ}{PMЧ} \quad (7.5)$$

На практике при ведении аналитического учета на коротких расстояниях можно положить, что в интервале от φ_1 до φ_2 значение $\cos \varphi$ изменяется линейно, тогда

$$\varphi_n \approx \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} = \varphi_m$$

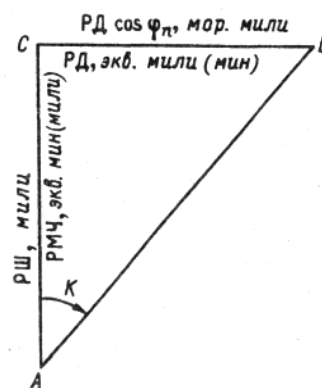
и приближенная формула для вычисления РД будет иметь вид

$$РД = \frac{ОТШ}{\cos \varphi_m} \quad (7.6)$$

Разность между средней параллелью с широтой φ_m и промежуточной φ_n показана на рис. 7.1.

По формулам (7.1) и (7.2) составлена табл. 24 «Разности широт и отшествия», помещенные в МТ-75. В ней по пройденному расстоянию от 0 до 100 миль и курсу через 1° можно получить готовые значения РШ и ОТШ. Курсы первой четверти (NE) выделены и напечатаны жирным шрифтом, а рядом даны три курса остальных четвертей, которым соответствуют синусы и косинусы первой четверти. Значения РШ и ОТШ даны в таблице до сотых долей мили и поэтому могут быть использованы с достаточной точностью для плаваний в 10 и 100 раз больших чем S. Таблица дает решение прямоугольного треугольника по гипотенузе и прилежащему к ней углу; она может применяться также для решения различных других задач, основанных на соотношениях, связывающих элементы прямоугольного треугольника на меркаторской карте (рис. 7.2).

В МТ-75 помещена также специальная таблица для нахождения разности долгот (табл. 25-а), составленная по формуле $РД = ОТШ \sec \varphi_m$. Если в таблицу войти с приближенным значением



$$\varphi_m = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

Рис. 7.2

то получится приближенная величина РД, если с точным значением φ_n , то получится точное значение РД (принимая Землю за шар). В этой таблице даны результаты вычислений для отшествия в 1, 2, ..., 9 и 100 миль и для широт от 0 до 90° .

Чтобы получить РД двух пунктов для десятков или сотен миль отшествия, просто переносят запятую, отделяющую целую часть от дробной в найденных табличных значениях. Для учета сфероидичности Земли при ведении аналитического счисления составлены табл. 25-6 «Коэффициенты для учета сфероидичности Земли при счислении пути корабля». В этом случае надо пользоваться средней широтой.

Формулы для вычисления счислимых координат для эллипсоида на ЭВМ будут иметь вид:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{1}{60} [Vt \cos(ИК + \alpha) + v_T t \cos K_T] \left(1 + \frac{f}{100}\right)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \frac{1}{60} [Vt \sin(ИК + \alpha) + v_T t \sin K_T] \frac{1 + \frac{g}{100}}{\cos \varphi_m}$$

где t – промежуток времени, ч; f, g – коэффициенты для учета сфероидичности Земли.

7.2. Использование аналитического счисления в судовождении

Табличное аналитическое счисление принято подразделять на три вида: простое, составное и сложное.

Простое *аналитическое счисление* выполняется, когда судно следует одним курсом. В этом случае по формулам или таблицам вычисляют РШ и РД и получают конечные координаты. Порядок решения задачи будет следующий.

1. Пусть φ_1 и λ_1 – координаты начальной точки; ИК – истинный курс, которым шло судно, S – пройденное расстояние по курсу от начальной точки до точки пришествия в морских милях. Необходимо найти координаты точки пришествия. Из табл. 24 МТ-75 по аргумент там ИК и S выбираем РШ и ОТШ.

Если S более 100 миль, то его значение разделяют на несколько слагаемых, равных или менее 100 миль каждое, для которых и выбирают значение РШ и ОТШ. При наличии дрейфа вместо ИК аргументом для входа в таблицу служит $ПУ = ИК + \alpha$. При дробном значении ИК ($ПУ_\alpha$) необходимо произвести интерполяцию.

2. Рассчитывается средняя широта (с точностью до $0,1^\circ$):

$$\varphi_m = \varphi_1 + \frac{РШ}{2}$$

3. По аргументам φ_m и ОТШ из табл. 25-а МТ-75 выбирается РД.

4. При необходимости учесть сфероидичность Земли выбираются значения коэффициентов f и g из табл. 25-б по аргументам: для f по φ_m , для g по φ_m РШ. Вычисляются поправочные члены $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$, которыми исправляются начальные значения РШ и РД:

$$\Delta\varphi = \frac{РШ}{100} f; \Delta\lambda = \frac{РД}{100} g$$

5. Вычисляются координаты точки пришествия φ_2 и λ_2 по формулам

$$\varphi_2 = \varphi_1 + РШ; \lambda_2 = \lambda_1 + РД$$

Если возникает необходимость по известным координатам точки отшествия и точки пришествия вычислить курс и расстояние между точками, то целесообразно использовать формулы

$$\operatorname{tg} K = \frac{РД}{РМЧ} = \frac{ОТШ}{РШ}; S = РШ \sec K$$

Для отсчета отшествия по РД можно применить формулы:

$$\text{точную } \omega = ОТШ = РД \frac{РШ}{РМЧ}, \text{ (РМЧ для шара);}$$

$$\text{приближенную } \omega = ОТШ \approx РД \cos \varphi_m$$

Составным счислением будет называться счисление, когда судно совершает плавание несколькими курсами, но штурману не нужно знать координаты всех промежуточных точек, а необходимо лишь вычислить координаты точки пришествия. В этом случае следует подсчитать алгебраическую сумму разностей широт на каждом отдельном курсе, называемую *генеральной разностью* широт (Ген РШ) и алгебраическую сумму отшествий, называемую *генеральным отшествием* (Ген ОТШ) (рис. 7.3):

$$\begin{aligned} \text{ГенРШ} &= \sum РШ_{N(S)} - \sum РШ_{S(N)} \\ \text{ГенОТШ} &= \sum ОТШ_{E(W)} - \sum ОТШ_{W(E)} \end{aligned}$$

РД находится из табл. 25-а по аргументам φ_m и Ген ОТШ. Координаты точки пришествия найдутся из соотношений:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \text{ГенРШ}; РД = \frac{\text{ГенОТШ}}{\cos \varphi_m}; \lambda_2 = \lambda_1 + РД$$

$$\text{средняя широта берется как } \varphi_m = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

т.е. предполагается, что все отдельные отшествия сделаны на одной и той же широте φ_m . Такое допущение для большинства практических случаев заметных ошибок не дает. Если же необходимо исключить погрешность от замены промежуточной широты средней широтой, то следует воспользоваться сложным счислением.

Сложным счислением называется такое счисление, при котором для каждого курса в точке поворота рассчитываются не только РШ и ОТШ, но и РД. Алгебраическая сумма РД называется *генеральной разностью долгот* (ГенРД):

$$\text{Ген РД} = \sum РД_{E(W)} - \sum РД_{W(E)}, \text{ тогда } \lambda_2 = \lambda_1 + \text{Ген РД}.$$

Курс, рассчитанный по Ген РШ и Ген ОТШ, ведущий непосредственно в точку пришествия, называется *генеральным курсом*, а расстояние по генеральному курсу между этими точками называется *генеральным плаванием*.

Метод составного (сложного) счисления позволяет вести учет постоянного и приливо-отливного течения, а также учет циркуляции.

При учете течения его направление принимается за отдельный дополнительный курс, а произведение скорости течения на время его действия – за плавание. По этому отдельному курсу выбирают РШ и ОТШ. При учете циркуляции за курс судна принимается промежуточный курс $ИК_{пр} = ИК_1 + q$, а за плавание – величина d (плавание по промежуточному курсу на циркуляции).

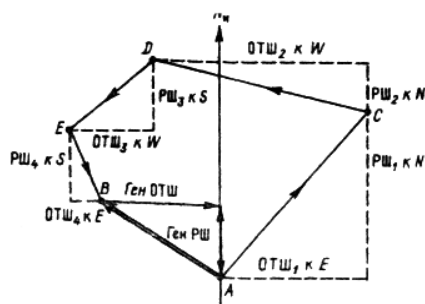


Рис. 7.3

При использовании на судне автосчислителя координат α (угол дрейфа), β (угол сноса от течения) и γ (суммарный угол сноса) вводятся как поправки компаса. Для получения истинной скорости коэффициент k , выбранный из таблиц аналитического учета течения, вводится как дополнительный коэффициент лага.

Когда аналитическое счисление производится с помощью вычислительных машин, сопряженных с датчиками курса и относительной скорости, счисляемые координаты рассчитываются непрерывно.

В этом случае

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \frac{1}{M} \int_0^t V_N dt; \lambda_{i+1} = \lambda_i + \frac{1}{N \cos \varphi} \int_0^t V_E dt \quad (7.8)$$

где M и N – главные радиусы кривизны; V_N и V_E – составляющие путевой скорости по меридиану и параллели соответственно. Значения V_N и V_E определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} V_N &= VK_L \cos(ИК + \alpha) + v_T \cos K_T \\ V_E &= VK_L \sin(ИК + \alpha) + v_T \sin K_T \end{aligned} \quad (7.9)$$

В современных ПИ спутниковых и радионавигационных систем выполняется автоматическое обсервационное счисление, основанное на непрерывном уточнении счисляемых координат по результатам обсерваций. Из высокоточных обсерваций вычисляется путь судна, его скорость, а затем эти данные используются для счисления. Точность такого счисления высока: погрешность составляет десятые доли мили.

7.3. Точность аналитического счисления

Аналитическое вычисление координат по формулам или таблицам исключает погрешности графических построений на карте, но не исключает влияния погрешностей в поправках компаса или лага, влияния погрешностей, вызванных учетом дрейфа и течения. Поэтому все, что было сказано выше о точности графической прокладки, полностью относится и к аналитическому счислению. Среднюю квадратичную погрешность счисления можно вычислить по формуле

$$M_c = \sqrt{m_{PШ}^2 + m_{ОТШ}^2} \quad (7.10)$$

где $m_{PШ}$ – средняя квадратичная погрешность в разности широт; $m_{ОТШ}$ – средняя квадратичная погрешность в разности долгот.

Обе эти погрешности зависят от погрешностей курса ($m_{ИК}$) или путевого угла ($m_{ПУ}$), а также от погрешности в пройденном расстоянии (m_s) и получаются путем дифференцирования основных формул (7.1) и (7.2):

$$\begin{aligned} M_{PШ} &= m_s \cos K + S \sin K m_{ИК(ПУ)} \\ M_{ОТШ} &= m_s \sin K + S \cos K m_{ИК(ПУ)} \end{aligned} \quad (7.11)$$

Кроме того, на точность аналитического счисления могут оказывать влияние погрешность от замены промежуточной широты φ_n средней φ_m и погрешность от пренебрежения учетом сфероидичности Земли.

Погрешность долготы, обусловленная заменой промежуточной широты средней арифметической широтой, выражается формулой

$$\Delta = \omega \operatorname{tg} \varphi_m \sec \varphi_n \sin (\varphi_n - \varphi_m).$$

Расчеты по этой формуле показывают, что для $\omega = 100$ миль и разности широт 8° на широтах до 50° погрешность долготы не превышает $1'$. При плавании в высоких широтах замена промежуточной широты средней допускается при $S < 100$ миль.

Для учета сфероидичности Земли при аналитическом счислении следует воспользоваться табл. 25-6 МТ-75. Для вычисления $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ с учетом сфероидичности Земли служат формулы

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \Delta\varphi_{табл} + \frac{\Delta\varphi_{табл}}{100} f \\ \Delta\lambda &= \Delta\lambda_{табл} + \frac{\Delta\lambda_{табл}}{100} g \end{aligned} \quad (7.12)$$

где $\Delta\varphi_{ТАБЛ}$ и $\Delta\lambda_{ТАБЛ}$ – разности широт и долгот, выбираемые из табл. 24 и 25-а.

Коэффициенты f и g рассчитаны по формулам

$$f = -0.0018 + 0.0067 \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 \varphi_m \right)$$

$$g = -0.0018 - 0.0034 \sin^2 \varphi_m + 0.0000127 \Delta \varphi^2 (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi_m) \quad (7.13)$$

Для удобства вычислений поправочных членов

$$\frac{\Delta \varphi_{\text{табл}}}{100} \text{ и } \frac{\Delta \lambda_{\text{табл}}}{100}$$

коэффициенты f и g , приведенные в табл. 25-6 МТ-75, увеличены в 100 раз. Аргументами для входа в табл. 25-6 служат: для получения коэффициента f — средняя широта φ_m , для получения коэффициента g — средняя широта φ_m и разность широт $\Delta \varphi$.

Практика мореплавания обязывает вахтенного штурмана использовать любую возможность для определения места судна и на основе выполненного анализа счисления и обсервации докладывать капитану о необходимости изменения курса и переноса счисления в обсервованную точку. Вопрос о коррекции счисления должен приниматься на основе штурманского правила: «Считай себя ближе к опасности».

Раздел IV

ВИЗУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА СУДНА В МОРЕ

Глава 8

Изолинии и линий положения.

Глава 9

Определение места судна по пеленгам и горизонтальным углам.

Глава 10

Определение места судна по расстояниям.

Глава 11

Определение места судна по разновременным линиям положения.

Глава 12

Комбинированные и частные случаи определения места судна.

Глава 8

ИЗОЛИНИИ И ЛИНИИ ПОЛОЖЕНИЯ

8.1. Общие понятия

Как бы тщательно ни велось счисление пути судна, оно не может обеспечить безопасность плавания. Возможные ошибки в поправках компаса и лага, недостаточное знание элементов течения, трудности в учете дрейфа – все это приводит к значительным отклонениям судна от заданного пути.

Опыт мореплавания подтверждает, что ошибки в счислении пути, когда ориентировка по берегу была затруднена или ею пренебрегали, нередко приводили к тяжелым последствиям, вплоть до гибели судна. Поэтому нахождение места судна в море по ориентирам с известными координатами (определение места) является необходимым условием безопасности в современном судовождении.

С развитием мореплавания улучшились методы счисления, но особенно развились методы и средства определения места судна, которые служат также для уточнения элементов пути судна. Некоторые способы определения позволяют проконтролировать работу компаса, лага, рассчитать действительные значения элементов течения и дрейфа.

Все визуальные способы определения места судна в море основаны на измерении расстояния и направления (или их комбинаций) до объектов, координаты которых известны. Применение того или иного способа определения места судна оценивается двумя факторами: обеспечением необходимой точности и простотой проведения наблюдений и обработки результатов. Основные методы обработки наблюдений, нашедшие широкое распространение, – графический или графоаналитический, основанные на понятии об изолинии и линии положения.

При визуальных способах определения места судна, используемых на сравнительно небольших расстояниях до ориентиров, будем пренебрегать кривизной земной поверхности, т. е. решать задачу на плоскости.

8.2. Изолинии и линии положения

Измеряемые для определения места судна направления и расстояния или их производные (углы, разность расстояний) до объектов с известными координатами называются *навигационными параметрами*. Геометрическое место точек, отвечающее постоянному значению навигационного параметра, называется *навигационной изолинией*. В навигации для определения места судна используются следующие навигационные параметры и соответствующие им изолинии.

Пеленг. На судне измерен истинный пеленг (ИП) предмета A (рис. 8.1, а), равный α . Проложив на карте линию пеленга AD , можно утверждать, что судно в момент взятия пеленга находилось на этой линии, так как в противном случае значение пеленга было бы отличным от измеренного. Однако неизвестно, в какой точке (B , C , D) на линии пеленга находится судно. Прямая линия AD , отвечающая условию $ИП = \alpha$, на которой находилось судно в момент наблюдения, будет называться изолинией пеленга или изопеленгой (изоазимутой на сфере).

Расстояние. Измерено расстояние D между судном и ориентиром A (рис. 8.1, б). В этом случае судно будет находиться на окружности радиусом D с центром в точке A . Эта окружность будет называться изолинией расстояния или изостадией.

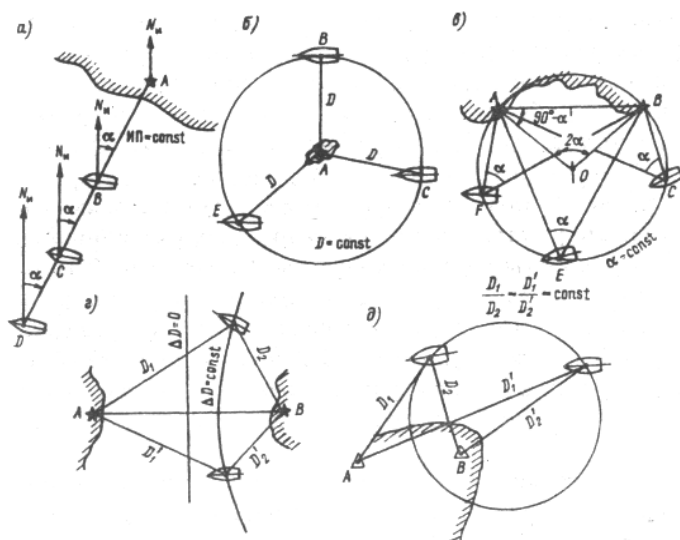


Рис. 8.1

Горизонтальный угол. Если измерен горизонтальный угол между предметами A и B (рис. 8.1, в) равный α , или этот угол вычислен как разность двух пеленгов $\alpha = ИП_2 - ИП_1$, то вершина горизонтального угла будет лежать на окружности, проходящей через точки A и B , а центр окружности O будет находиться на перпендикуляре к линии AB в точке его пересечения с линией, проведенной под углом $90^\circ - \alpha$ к линии AB (рис. 8.1, в). Эта окружность называется изолинией горизонтального угла а или изогоной.

Разность расстояний. В некоторых радионавигационных системах измеряется разность расстояний до двух ориентиров. Тогда изолинией разности расстояний будет гипербола (рис. 8.1, г).

Можно представить и другие виды изолиний. Например, если измерить отношение расстояний до двух ориентиров, то изолинией равных отношений расстояний будет окружность Аполлония (рис. 8.1, з). В астронавигации используют изолинии равной высоты светила, равной скорости изменения высоты и др.

В радионавигации, при решении навигационной задачи на сфере, кроме изоазимуты, используются изолинии в виде сферической гиперболы и ортодромии.

Пространство около каждого ориентира или ориентиров, нанесенных на карту, можно рассматривать как поле, характеризующееся изолиниями. Например, маяк, который можно пеленговать из любой точки, определяет поле направлений с бесконечно большим числом изолиний – прямых (на плоскости), отвечающих постоянному значению пеленга. Измерив пеленг, можно сказать, на какой из изолиний находится судно. Определение места судна сводится к нахождению точки пересечения изолиний от двух или более ориентиров. Если координаты точки получены без ввода элементов счисления пути судна, то они называются обсервованными (φ_0, λ_0). Если при определении места использовались элементы счисления (курс и скорость), то такие определения называют счислимо-обсервованными.

На сравнительно небольших расстояниях, например при визуальных определениях места судна, изолинии прокладываются непосредственно на карте (выполняется графическое решение). При больших расстояниях, когда необходимо учитывать сфероидичность Земли, непосредственная прокладка изолиний на карте становится затруднительней. В этом случае отрезок изолинии заменяется прямой линией.

Профессор В.В. Каврайский дал этому методу более широкое теоретическое обобщение, введя термин «линия положения» для касательной или секущей к изолинии в небольшой области.

Линией положения называется прямая, заменяющая участок навигационной изолинии вблизи счислимого места судна.

Обобщенная теория линий положения позволила расширить методы получения обсервованных координат, которые можно подразделить на три группы: графические (использование карт с сетками изолиний и непосредственная прокладка изолиний); графоаналитические (обобщенный метод линий положения и использование специальных таблиц определяющих точек для построения линий положения); аналитические (прямые алгебраические методы решения уравнений и численные с использованием метода хорд или касательных).

8.3. Градиенты навигационных параметров. Смещение изолиний

Любые измерения содержат ошибки, поэтому измерив пеленг, дистанцию или угол и проложив на карте соответствующую изолинию, нельзя считать, что судно будет находиться на этой изолинии. Вычислить возможное смещение изолинии из-за ошибок наблюдений можно, используя понятие градиента функции.

Размерность модуля градиента равна размерности параметра U на линейную

Изобразим две изолинии, соответствующие значениям навигационных параметров U и $U + \Delta U$ (рис. 8.2).

На всей изолинии значение функции навигационного параметра остается постоянным, но оно изменится при переходе на другую изолинию. Чем теснее расположены изолинии друг к другу, тем меньше расстояние Δn между ними при заданном приращении функции ΔU , тем быстрее меняется функция в данном районе. Это изменение удобно характеризовать отношением $\Delta U/n$ или вектором $\bar{g}$, направленным в сторону возрастания функции по нормали к изолинии. Вектор $\bar{g}$ называется градиентом. Таким образом, градиентом навигационного параметра называется вектор,

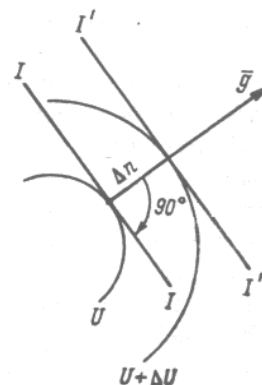


Рис. 8.2

направленный по нормали к навигационной изолинии в сторону ее смещения при положительном приращении параметра, причем модуль этого вектора характеризует наибольшую скорость изменения параметра в данном месте. Этот модуль равен

$$g = \lim \frac{\Delta U}{\Delta n} = \frac{dU}{dn}$$

Размерность модуля градиента равна размерности параметра U на линейную

величину. Направления вектора градиента и линии положения взаимно перпендикулярны, обозначается направление градиента символом τ .

Если при измерении навигационного параметра U допущена ошибка ΔU и известен градиент, то смещение линии положения параллельно самой себе определяется формулой

$$\Delta n = \frac{\Delta U}{g} \quad (8.2)$$

Чем больше величина градиента g , тем меньше смещение линии положения при той же ошибке ΔU , тем точнее будет определение места судна.

Получим значение градиента для пеленга, расстояния, горизонтального угла и гиперболы.

Пеленг. Предположим, что наблюдатель, находившийся в точке C , переместился так, что пеленг получил приращение $\Delta \Pi$, град. (рис. 8.3). Следовательно, $\Delta U = \Delta \Pi$. Из треугольника ACC_1 имеем

$$\Delta n = \frac{D \Delta \Pi}{57,3^0}$$

Значение модуля градиента тогда равно, град, /миля,

$$g = \frac{\Delta U}{\Delta n} = \frac{\Delta \Pi * 57,3^0}{D \Delta \Pi^0} = \frac{57,3^0}{D} \quad (8.3)$$

Направление градиента $\tau = \text{ИП} - 90^\circ$.

Если при измерении навигационного параметра имела место случайная погрешность m_{Π} , град, то погрешность линии положения найдется по формуле

$$m_{\text{лп}} = \frac{m_{\Pi}}{g} = \frac{m_{\Pi} D}{57.3^0}$$

Проведенные соответствующие линии положения ограничат среднюю квадратичную полосу положения. Полоса положения, ширина которой в три раза больше средней, захватывает место судна с вероятностью 99,7%.

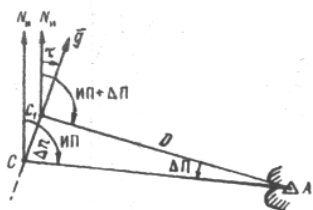
Такую полосу называют *предельной полосой положения*.

Расстояние. При измерении расстояния $\Delta U = \Delta D$, смещение изолинии $\Delta n = \Delta D$.

Следовательно,

$$g = \frac{\Delta U}{\Delta n} = \frac{\Delta D}{\Delta D} = 1 \quad (8.4)$$

Рис. 8.3



будет совпадать с направлением из ориентира А на точку Z, в которой находится судно (рис. 8.4). Смещение линии положения, полученной по измеренному расстоянию, зависит только от ошибки в измеренном расстоянии.

Горизонтальный угол. Значение модуля градиента можно получить, предварительно вычислив значение градиента функции, если рассмотреть угол как разность двух направлений (пеленгов) и использовать теорему о том, что градиент разности двух функций равен геометрической разности градиентов этих функций. На рис. 8.5 вектор $\bar{cb}$ представляет геометрическую разность двух векторов градиентов направлений $\bar{ab}$ и $\bar{ac}$, т.е. $\bar{g} = \bar{g}_1 - \bar{g}_2$ где $\bar{g}$ – градиент горизонтального угла α .

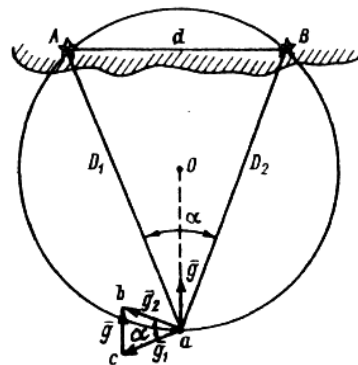


Рис. 8.4

Модуль градиента определяется из Δacb : $g = \sqrt{g_1^2 + g_2^2 - 2g_1g_2 \cos \alpha}$

Подставляя значения градиентов $g_1 = \frac{1}{D} u g_2 = \frac{1}{D_2}$, получим

$$g = \sqrt{\frac{1}{D_1^2} + \frac{1}{D_2^2} - \frac{2 \cos \alpha}{D_1 D_2}} = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2 - 2 D_1 D_2 \cos \alpha}{D_1^2 D_2^2}} = \frac{d}{D_1 D_2} \quad (8.5)$$

где d – расстояние между ориентирами А и В. Направлен градиент по нормали к изолинии (окружности) в сторону возрастания угла α , т. е. к центру окружности.

Аналитически вычисляется по формуле $\tau = \Pi_1 + \delta \pm 90^0$, где δ – вспомогательный угол.

Значение угла δ получается вычислением $\operatorname{tg} \delta$:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{D_1 \cos \alpha - D_2}{D_1 \sin \alpha}$$

Смещение линии положения в милях равно

$$\Delta n = \frac{\Delta U}{g} = \frac{m\alpha}{g} = \frac{3438 m'_a D_1 D_2}{d}$$

где m'_a - погрешность угла в дугowych минутах.

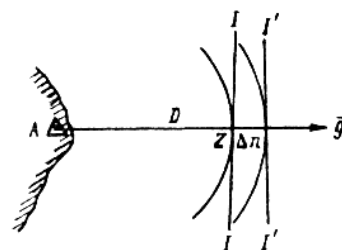


Рис. 8.5

Разность расстояний. Для получения градиента разности расстояний рассмотрим треугольник градиентов abc (рис. 8.6). В нем вектор $\overline{ac} = \overline{g}_1$ – градиент расстояния D_1 , вектор $\overline{ab} = \overline{g}_2$ – градиент расстояния D_2 . Треугольник abc – равнобедренный, так как $g_1 = g_2 = 1$.

Модуль градиента разности расстояний равен $\overline{g} = \overline{g}_1 - \overline{g}_2$ или из треугольника abc

$$\frac{g}{2} = g_1 \sin \frac{\omega}{2}; g = 2 \sin \frac{\omega}{2} \quad (8.7)$$

где ω – базовый угол, или разность азимутов на станции А и В. Направление градиента разности расстояний совпадает с нормалью к гиперболе в точке а и перпендикулярно биссектрисе угла ω в сторону увеличения навигационного параметра. Направление биссектрисы равно

$$A_{cp} = \frac{A_1 + A_2}{2}$$

Следовательно, $\tau = A_{cp} \pm 90^\circ$

Смещение линии положения в общем виде равно

Для получения Δn . в милях каждая РНС («Декка», «Омега», «Лоран») имеет переходный коэффициент для пересчета единицы радионавигационного параметра в мили.

8.4. Требования к точности навигационных обсерваций

Для предотвращения навигационных аварий, связанных с посадкой на мель, наряду с другими мероприятиями предпринимались попытки нормировать требования к точности и частоте обсерваций в зависимости от условий плавания. Неоднократное обсуждение этих вопросов в подкомитете по безопасности мореплавания Международной морской организации (ИМО) привело к созданию стандарта точности судовождения, принятому в 1983 г. на 13-й Ассамблее ИМО в резолюции А.529 (табл. 8.1).

Цель принятого стандарта – обеспечение руководства различного рода администраций стандартами точности судовождения, которые должны применяться при оценке эффективности работы систем, предназначенных для определения места судна, в том числе радионавигационных систем, включая спутниковые. От судоводителя требуется знать свое место на любой момент времени. Для этого необходимы точные наблюдения или счисление пути для вычисления координат места в промежутках между ними, если наблюдения нельзя получать непрерывно. В стандарте указаны факторы, влияющие на требования к точности судовождения. К ним относятся: скорость судна; расстояние до ближайшей навигационной опасности, которой считается всякий признанный или нанесенный на карту элемент; граница района плавания.

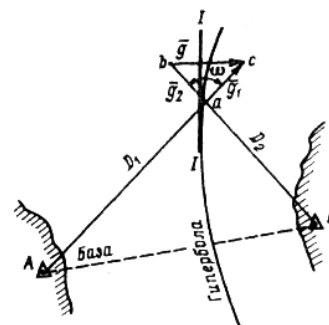


Рис. 8.6

Рейс судна подразделяется на две стадии:

- 1) плавание на входе в гавань и подходах к ней, а также в водах, в которых ограничена свобода маневра;
- 2) плавание в других водах.

В районах первой стадии рейса место судна контролируют с помощью визуальных методов, с использованием радиолокатора и радионавигационных систем. Требования к точности судовождения зависят от местных обстоятельств.

Таблица 8.1

Кратчайшее расстояние до опасности	Допустимая погрешность определения места судна мили	Погрешность определения места судна, мили					
		<0.1	0.1	0.25	0.5	1	2
		Допустимое время плавания по счислению, мили					
10	0,4	12	12	9	-	-	-
20	0,8	28	28	27	22	-	-
30	1,2	48	48	47	44	27	-
40	1,6	72	72	71	68	56	-
50	2,0	100	100	99	97	87	-
60	2,4	132	132	131	129	120	73
70	2,8	168	168	167	165	157	118
80	3,2	208	208	207	206	198	162
90	3,6	252	252	251	250	242	210
100	4,0	300	300	300	298	291	260

При плавании в других водах со скоростью до 30 уз текущее место судна должно быть известно с погрешностью не более 4% расстояния до ближайшей опасности. При этом точность места должна оцениваться фигурой погрешностей с учетом случайных и систематических ошибок с вероятностью 95%. В стандарт ИМО включена таблица, которая содержит требования к точности места, а также допустимое время плавания по счислению при условии, что гирокомпас и лаг соответствуют требованиям ИМО, счисление не корректировалось, погрешности имеют нормальное распределение, а течение и дрейф учитываются с возможной точностью. Например, если до ближайшей опасности 20 миль, то допустимая погрешность определения места (4% этого расстояния) равна 0,8 мили. Обеспечение такой точности по счислению от последней обсервации возможно в течение 27 мин, если погрешность обсервации не более 0,25 мили. Если погрешности обсервации превышают допустимую (в примере – более 0,8 миль), то даже непрерывные обсервации не будут удовлетворять требованиям стандарта точности ИМО (в табл. 8.1 проставлены прочерки). Следует иметь в виду, что таблица и построенные по ней графики имеют ориентировочный характер, так как основаны на усредненных оценках точности счисления.

Внедрение в практику судовождения рекомендаций ИМО позволило реализовать единый подход к определению требований к точности плавания и способствовало повышению безопасности мореплавания.

8.5. Оценка точности навигационных обсерваций

Рассматривая в предыдущем параграфе вопрос о смещении линии положения, мы не придавали значения характеру ошибки, допущенной при наблюдении. Действительно, для одной линии положения это вполне справедливо, так как ее смещение в направлении градиента зависит от величины результирующей ошибки ΔU .

При оценке точности обсерваций, полученных по линиям положения, характер ошибок часто имеет существенное значение. Рассмотрим кратко характеристику ошибок наблюдений.

Все ошибки, возникающие при наблюдениях (включая и их обработку), подразделяются на случайные, промахи (грубые ошибки) и систематические ошибки.

Случайные ошибки образуются от совместного действия многочисленных причин, прямо или косвенно влияющих на результаты измерений. Эти ошибки принимают в отдельных измерениях значения, предсказать или предвычислить которые принципиально невозможно. Точность измерения навигационного параметра оценивают:

статистической обработкой серии измерений;

расчетом средних статистических значений ошибок измерения на основе обобщения опыта плавания (априорно);

принятием значений ожидаемых ошибок в измерении навигационных параметров по данным технических условий на приборы или системы. Например, если провести серию измерений пеленга по гирокомпасу, то обработка серии даст ошибку в пределах $\pm 0,3...0,8^\circ$.

Таковую же ошибку штурман может принять исходя из опыта плавания (при тихой воде $\pm 0,3^\circ$, при качке $\pm 0,6...0,8^\circ$). И, наконец технические возможности гирокомпаса предполагают получение пеленга (при нормальных условиях эксплуатации) с суммарной средней квадратичной ошибкой $\pm 0,6...1,0^\circ$. Случайные погрешности измерений обычно подчиняются закону нормального распределения вероятностей, это означает, что погрешность не выходит за пределы $\pm m$ с вероятностью 68,3%.

Наиболее простым способом расчета m – средней квадратичной ошибки измерения при равнооточных наблюдениях – является способ с использованием коэффициента размаха k . Значения коэффициента приведены ниже

Число наблюдений	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Коэффициент	0,59	0,48	0,43	0,39	0,37	0,35	0,34	0,32	0,31

Для вычисления m необходимо найти разность между максимальным и минимальным значениями навигационного параметра и умножить ее на коэффициент k :

$$m = (U_{\max} - U_{\min})k$$

Вероятность того, что погрешность не превышает по абсолютной величине $\pm 2m$, составляет 95,4%. В стандарте судовождения для характеристики точности обсервации требуется использовать 95% уровня вероятности, что соответствует $1,96m$, или приблизительно $2m$. Вероятность погрешностей, не выходящих из интервала $\pm 3m$, равна 99,7%. Такую погрешность принимают за предельную.

Все погрешности, выходящие за пределы $3m$, относят к грубым погрешностям, или промахам. Лучший способ избежать промахов – регулярно повторять измерения и тщательно контролировать отсчеты.

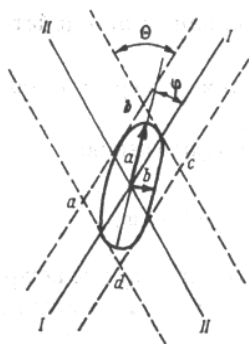


Рис. 8.8

Систематические ошибки – это ошибки, величина и направления которых постоянны или изменяются по определенному закону. Систематические ошибки, как правило, должны исключаться введением поправок или специальной организацией наблюдений и их обработкой. Однако действие по определению поправки сопровождается появлением случайных ошибок, которые затем проявляются как остаточные систематические. Кроме того, эти ошибки могут быть следствием влияния переменчивых факторов, действие которых оценивается статистически.

Поэтому следует различать воздействие систематической ошибки, если она не исключена, и ее проявление, как остаточной ошибки, после исключения.

В этом случае она алгебраически складывается со случайной, и такая итоговая ошибка будет называться полной или суммарной.

Если на измерения двух навигационных параметров влияют какие-то общие факторы, то ошибки таких измерений оказываются взаимозависимыми. Эта зависимость характеризуется коэффициентом корреляции r . Для независимых наблюдений $r = 0$, при функциональной линейной зависимости $r = 1$. Оценки точности измерений, полученные по результатам тех измерений, для характеристики точности которых они служат, называются апостериорными. Для вывода такой оценки необходима серия из 9...11 измерений. В практике судовождения такие наблюдения практически невозможны, поэтому здесь широко применяются априорные оценки, полученные на основе обобщения ранее накопленного опыта. Числовые значения априорных оценок точности навигационных приборов приводятся в Рекомендациях по организации штурманской службы (РШС-89). Так, например, ожидаемая средняя квадратичная ошибка в поправке гирокомпаса равна $\pm 0,3...0,4^\circ$.

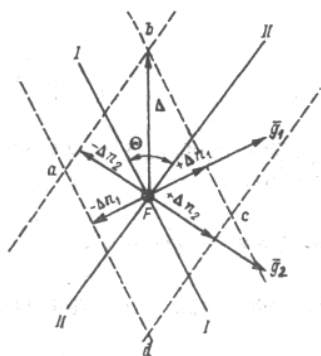


Рис. 8.7

Оценка точности определения места судна по двум линиям положения.

При воздействии случайных ошибок измерений смещение каждой линии положения характеризуется линейной величиной Δn , которое характеризуется средней квадратичной ошибкой линии положения $m_{лп}$, а ошибка определения места, являющаяся результатом случайных ошибок в обеих линиях положения, характеризуется площадью параллелограмма, образованного двумя полосами положения.

Порядок проведения оценки точности обсервации при действии случайных ошибок таков:

задаются средними квадратичными ошибками измерений для конкретных условий плавания m_{U1} и m_{U2} ;
вычисляют возможное смещение каждой линии положения:

$$m_{лп_1} = \frac{\pm m_{U1}}{g_1}; m_{лп_2} = \frac{\pm m_{U2}}{g_2}; \Delta n_1 = m_{лп_1}; \Delta n_2 = m_{лп_2}$$

откладывают от полученной обсервации по нормали к линии положения (по направлению градиентов) полученные смещения и строят параллелограмм $abcd$ (рис. 8.7). Вероятность нахождения судна в площади параллелограмма около 50%; если взять для расчета $2m$, то вероятность увеличится до 95%, а если принять предельную ошибку $3m$, то вероятность повышается до 99%.

Следует указать, что такое рассмотрение является только ориентировочным, так как нет достаточной достоверности в принятом значении случайной ошибки.

Для более строгой оценки точности обсервованного места следует построить эллипс ошибок – кривую равной вероятности (рис. 8.8).

Расчет суммы и разности полуосей эллипса, а затем величины осей эллипса (a – большой, b – малой) выполняется по формулам:

$$a \pm b = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{m_{\text{ЛП}_1}^2 + m_{\text{ЛП}_2}^2 \pm 2m_{\text{ЛП}_1}m_{\text{ЛП}_2} \cos \Theta} \quad (8.9)$$

$$a = \frac{\sum +\Delta}{2}; b = \frac{\sum - \Delta}{2} \quad (8.10)$$

где Θ – острый угол пересечения двух линий положения.

Большую полуось эллипса проводят под углом φ относительно второй (более точной) линии положения:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\sin 2\Theta}{(m_{\text{ЛП}_1}^2 / m_{\text{ЛП}_2}^2) + \cos 2\Theta} \quad (8.11)$$

В приложении 5 МТ-75 приведена таблица для решений этой задачи. Из табл. 5 выбирают K_a , K_b , φ по аргументам

$$\lambda = \frac{m_{\text{ЛП}_1}}{m_{\text{ЛП}_2}} > 1 \text{ и острому углу } \Theta \text{ между линиями положения.}$$

Теоретическая вероятность нахождения места судна внутри эллипса ошибок около 39%.

Для удобства анализа точность обсервованного места целесообразнее оценить не площадью, а одним числом. За среднюю квадратичную ошибку обсервованного места M принимают радиус круга, охватывающий эллипс погрешности. Этот радиус равен

$$M = \sqrt{a^2 + b^2} = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\Delta n_1^2 + \Delta n_2^2} \quad (8.12)$$

Вероятность того, что место судна находится внутри радиуса круга, M изменяется от 63,2 до 68,3% и зависит от соотношения полуосей a и b . Для более строгого оценивания места судна одним числом в качестве стандартной характеристики рекомендуется 95%-й круг погрешностей места с центром в оцениваемой точке, который захватывает действительное место с вероятностью 0,95.

Влияние систематических ошибок. Если при изменении навигационных параметров имела место не исключенная систематическая ошибка o , то каждая линия положения сместится параллельно самой себе на величину Δn_1 для первой линии положения и Δn_2 – для второй.

Обозначим угол между направлениями градиентов через Θ и получим формулу для расчета смещения наблюдаемого места F в точки b и d (см. рис. 8.7):

$$\Delta = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\Delta n_1^2 + \Delta n_2^2 - 2\Delta n_1 \Delta n_2 \cos \Theta} \quad (8.13)$$

или

$$\Delta = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{\sigma_1^2}{g_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2^2}{g_2}\right)^2 - 2 \frac{\sigma_1 \sigma_2}{g_1 g_2} \cos \Theta} \quad (8.14)$$

В формулах (8.13) и (8.14) угол Θ может изменяться от 0 до 180°, при $\Theta > 90^\circ$ появится знак «+». Поэтому величина линейного смещения места судна под действием систематических ошибок будет меньше при острых углах Θ , чем при тупых.

Таким образом, можно сделать вывод, что действие случайных ошибок приводит к понятию о площади возможного места, а действие систематических ошибок характеризуется линейной величиной, направление которой может быть известно. Периодические проверки приборов позволяют исключить систематические ошибки. Так, например, согласно правилам РШС-89, если величина постоянной (имеется в виду систематическая ошибка) поправки гирокомпаса превышает 0,5°, она исключается из показаний гирокомпаса вводом коррекции.

Глава 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА СУДНА ПО ПЕЛЕНГАМ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ УГЛАМ

9.1. Определение места по двум пеленгам

Способ определения места судна по двум пеленгам — один из наиболее распространенных при плавании в узкостях или вдоль берега, вблизи навигационных опасностей.

Это объясняется еще и тем, что часто в видимости судна большого количества ориентиров одновременно не бывает. Сущность способа состоит в следующем. В быстрой последовательности берут пеленги двух объектов (маяков, знаков, мысов и др.). Рассчитывают истинные пеленги, если имеется поправка компаса, и прокладывают их на карте. В точке пересечения пеленгов будет obserвованное место судна F (рис. 9.1). Этот способ имеет ряд преимуществ (простота и быстрота определения), но и ряд недостатков, главным из которых является полное отсутствие контроля при единичном определении. Поэтому критический анализ полученного места имеет решающее значение для принятия обсервации за достоверную. Что необходимо иметь в виду при анализе обсервации? Во-первых, достоверность поправки компаса, затем порядок пеленгования; во-вторых, неодновременность взятия пеленгов; в-третьих, возможность ошибки в опознании объекта и, в-четвертых, влияние случайных ошибок пеленгования.

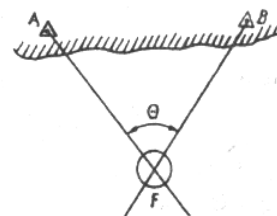


Рис. 9.1

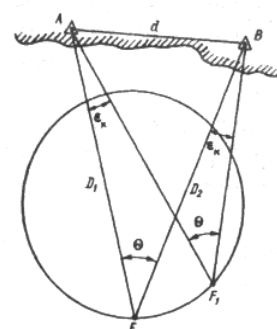


Рис. 9.2

1. Влияние ошибки в поправке компаса. Если при использовании пеленгов допущена ошибка в принятом или неучтенном значении поправки компаса ϵ_K , град., то вместо истинного места судна (точка F) будет получена точка F_1 (рис. 9.2).

Величину линейной ошибки obserвованного места можно получить по формуле для систематической ошибки ϵ , град. Подставляя в нее значения градиентов

$$g_1 = \frac{57.3^0}{D_1}; g_2 = \frac{57.3^0}{D_2} u \Delta U = \epsilon_K, \text{ град, получим}$$

$$FF_1 = \frac{\epsilon_K}{57.3^0 \sin \Theta} \sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1 D_2 \cos \Theta} = \frac{\epsilon_K d}{57.3^0 \sin \Theta} \quad (9.1)$$

где d — расстояние между ориентирами А и В.

Из этой формулы видно, что величина FF_1 будет увеличиваться с уменьшением Θ (при постоянных d и ϵ_K). Поэтому при $30^\circ > \Theta > 150^\circ$, когда $\sin \Theta$ уменьшается особенно быстро, определение места по двум пеленгам нельзя считать надежным.

2. Порядок пеленгования объектов. При больших скоростях судна, когда расстояния до объектов небольшие, пеленги должны быть приведены к одному моменту. Измеряют пеленги на ориентиры А и В, затем снова на ориентир А. Для ориентира А рассчитывают средний пеленг, который будет соответствовать пеленгу А на момент пеленгования ориентира В. Порядок пеленгования двух ориентиров зависит от их курсовых углов. Первым нужно пеленговать предмет, расположенный ближе к диаметральной плоскости судна. На рис. 9.3 А и В – ориентиры, KK_1 – линия пути судна. За промежуток времени между моментами взятия пеленгов судно пройдет отрезок пути MM_1 . Тогда, если первым пеленговать объект А, место судна будет в точке F' , при обратном порядке пеленгования – в точке F .

Исходя из практических соображений всегда желательно получить обсервацию в момент последнего наблюдения. Поэтому сравним линейные ошибки в полученных местах судна $F'M$ и FM_1 .

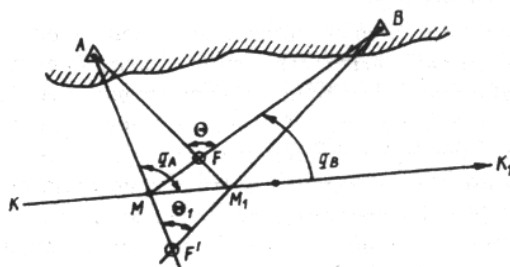


Рис. 9.3

Из треугольника MM_1F имеем
$$\frac{FM_1}{\sin q_B} = \frac{MM_1}{\sin \Theta}$$

Из треугольника MM_1F' -
$$\frac{F'M}{\sin q_A} = \frac{MM_1}{\sin \Theta_1}$$

Считая, что пеленги взяты достаточно быстро, можно положить, что $\Theta \cong \Theta_1$. Тогда

$$F'M_1 = FM_1 \frac{\sin q_A}{\sin q_B}$$

Отсюда понятно, что $F'M_1 > FM_1$, так как $q_A > q_B$, и первым нужно пеленговать предмет, расположенный ближе к диаметральной плоскости.

При ночном пеленговании порядок будет зависеть от характеристики огня. Первым пеленгуем огонь, у которого более длительные проблески, или тот, который пеленгуется с трудом из-за плохой видимости или удаленности.

3. Влияние случайных ошибок пеленгования. Пеленгованию, как любому измерению, сопутствуют случайные ошибки, к которым можно отнести ошибки из-за неточности наведения, колебаний в момент качки, отсутствия стабилизации в вертикальной плоскости и др. Это приводит к тому, что любому измеренному пеленгу соответствует ошибка m_n , град. Если такую ошибку подставить в формулу для оценки точности обсервованного места, то получим формулу для средней квадратичной погрешности обсервации по двум пеленгам

$$M = \frac{m_n}{57,3^\circ \sin \Theta} \sqrt{D_1^2 + D_2^2} \quad (9.2)$$

Формула (9.2) показывает, что при малых и близких к 180° углах Θ ошибки увеличиваются. Следовательно, место будет получаться точнее при $\Theta=90^\circ$. Точность определения зависит также от расстояния до ориентиров.

При определении места судна по двум пеленгам ошибка в принятой поправке компаса может быть значительно больше случайных ошибок. По этой причине на практике происходили тяжелые аварии. Эти аварии, случающиеся при образовании ошибки в поправке компаса в $3...5^\circ$, выглядят следующим образом. Судну необходимо пройти между банками C и D , используя для определения места объекты A и B (рис. 9.4). Когда судно находилось в точке F_1 , были взяты пеленги на A и B , но из-за ошибки ϵ_K , град в принятой поправке компаса вместо истинной точки F_1 была получена ошибочная точка M_1 . Когда судно находилось в точках F_2 и F_3 , были получены еще две обсервации: M_2 и M_3 . Эти обсервации показали, что судно чисто проходит между банками. Между тем оно с полного хода село на мель (точка F_4).

Для того чтобы своевременно обнаружить ошибку в поправке компаса при определении по двум пеленгам, необходимо получить несколько обсервованных точек и внимательно проанализировать их расположение. В общем случае обсервованные точки, полученные по пеленгам двух предметов, когда принимаемая поправка компаса ошибочна, будут располагаться на кривой второго порядка – гиперболе, переходящей в частных случаях через прямую в параболу.

Приведем некоторые практические рекомендации по обнаружению ошибки в принимаемой поправке компаса, когда получен ряд обсервованных точек.

1. Если obserвованные точки располагаются на некоторой кривой и через них нельзя провести прямую линию. Это особенно заметно при малых или близких к 180° углах между пеленгами.

2. Если линия, соединяющая две obserвованные точки, составляет угол с линией проложенного на карте ИК или пути, то поправка компаса неверна. Однако следует учитывать, что этот угол может образоваться из-за неправильного учета суммарного угла сноса, поэтому его необходимо определить как можно точнее.

3. Если принятая поправка компаса верна, то независимо от действия дрейфа или течения расстояния на карте между наблюдениями будут пропорциональны соответствующим промежуткам времени или плавания по лагу. При ошибке в поправке компаса этих соотношений не будет.

4. Если после нескольких obserваций по двум предметам через небольшой промежуток времени получены obserвованные точки по двум другим предметам, то при наличии ошибки в поправке компаса будет наблюдаться разрыв между сериями полученных определений.

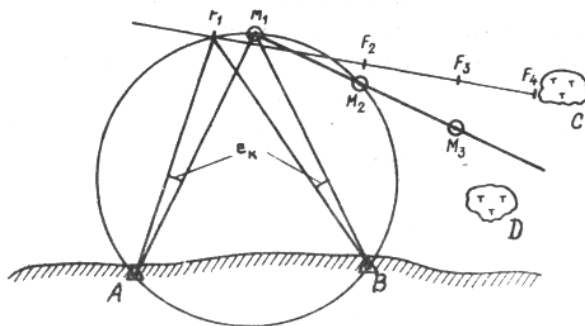


Рис. 9.4

Наличие такого разрыва, если предметы хорошо опознаны и карты точны, указывает ошибку в принимаемой поправке компаса (рис. 9.5).

Для определения правильного значения поправки компаса по пеленгам двух предметов достаточно найти величину ее ошибки, а затем алгебраически вычесть эту ошибку из принятого значения поправки компаса:

$$\Delta K = \Delta K_{\text{пр}} - \epsilon_k \quad (9.3)$$

где ΔK — поправка компаса; $\Delta K_{\text{пр}}$ — принятое значение поправки компаса; ϵ_k — ошибка принятого значения с ее знаком.

Можно рекомендовать метод определения ΔK , который заключается в следующем.

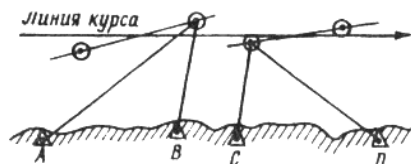


Рис. 9.5

При постоянном курсе и скорости судна следует трижды взять пеленги предметов А и В, зафиксировав моменты или отсчеты лага. Первоначально на карте надо проложить только три пеленга предмета А с принимаемой $\Delta K_{пр}$ и затем определить линию abc (рис. 9.6), параллельную пути, для чего следует вставить между линиями пеленгов предмета А отрезки S_1 и S_2 , пропорциональные Δt_1 и Δt_2 или $\rho_{ол1}$ и $\rho_{ол2}$. Из полученных точек a, b, c нужно проложить пеленги предмета В с принимаемой $\Delta K_{пр}$. Эти пеленги, если пренебречь случайными ошибками пеленгования, пересекутся в точке B' . Угол между линией, соединяющей предметы А и В, и линией AB' будет равен ошибке в принимаемой поправке компаса ϵ_K , так как вся фигура $AabcB$ повернется на угол ϵ_K относительно линии АВ.

Знак ϵ_K определяется по правилу: если точка В лежит правее линии АВ, то ϵ_K имеет знак «+», если левее, то знак «-».

Точность определения или проверки ΔK рассмотренным методом $\pm 1^\circ$.

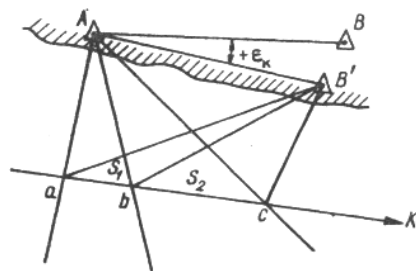


Рис. 9.6

9.2. Определение места по трем пеленгам

При определении места по трем пеленгам в быстрой последовательности берут пеленги трех предметов А, В, С. Переводят их в истинные и прокладывают на карте. Если бы наблюдения не содержали ошибок и пеленги были взяты одновременно, то все три пеленга пересеклись бы в одной точке F , представляющей собой место судна.

Однако из-за неизбежного действия ряда факторов пеленги обычно не пересекаются в одной точке, а образуют так называемый треугольник погрешности. Его появление может быть вызвано различными видами ошибок:

- промахами при снятии отсчета и при исправлении компасных пеленгов;
- ошибками в опознавании ориентиров;
- ошибками в принятой поправке компаса;
- не одновременностью взятия пеленгов;
- случайными ошибками пеленгования и прокладки.

Промах во взятии отсчета можно обнаружить повторным наблюдением и проверкой расчетов, так как чаще всего в этом случае треугольник получается очень большим.

Действие систематической ошибки в принимаемой поправке компаса показано на рис. 9.7. В связи с тем что пеленги отягощены одной и той же ошибкой ϵ_K , все они повернутся на одинаковый угол в одну сторону. Пусть точка F — истинное место судна, полученное по пеленгам предметов А, В и С при безошибочной поправке компаса. Если три пеленга будут иметь ошибку, равную ϵ_K , то получится треугольник погрешности abc . Вершина угла α , образованная пеленгами предметов А и В, будет лежать на окружности AFB , а вершина угла β — на окружности BFC .

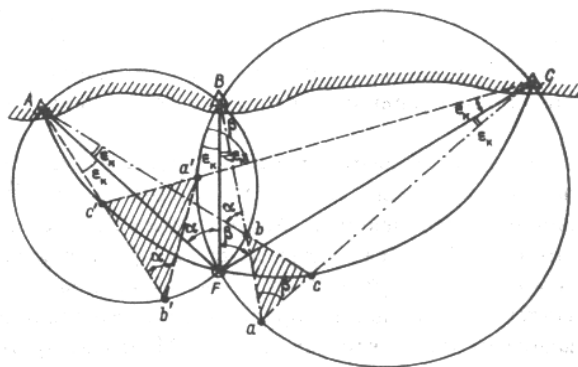


Рис. 9.7

Вершина суммарного угла $(\alpha + \beta)$ – на окружности AFC. Если ошибка ϵ_K будет иметь иной знак, то все пеленги повернутся в другую сторону, образовав треугольник погрешности $a'b'c'$.

Таким образом, вершины треугольника погрешности, вызванного ошибкой в поправке компаса, лежат на окружностях, вмещающих углы между пеленгами. Это важное положение можно использовать для получения истинного места судна и поправки компаса следующим образом.

1. По известным пеленгам предметов А, В и С (компасным или исправленным любой ΔK) можно рассчитать углы между пеленгами и по двум углам получить место судна. Сняв с карты истинные пеленги предметов А, В и С и зная компасные пеленги этих же предметов, легко рассчитать значение поправки компаса, осреднив снятые значения:

$$\Delta K = \frac{\Delta K_1 + \Delta K_2 + \Delta K_3}{3} \quad (9.4)$$

2. Изменив ΔK на $3...5^\circ$, можно получить второй треугольник погрешности. Если затем соединить соответственные вершины обоих треугольников прямыми линиями, то в точке их пересечения будет место судна. Хотя замена окружностей прямыми приводит к ошибкам, но при небольшой величине сторон треугольника это можно допустить.

Наиболее характерное расположение треугольника погрешности с, полученное первоначально, и $a'b'c'$, полученное после прокладки пеленгов с измененным значением ΔK , показано на рис. 9.8. Когда $\Delta a'b'c'$ будет меньше Δabc и не изменит своей ориентировки, измеренная поправка компаса будет ближе к истинному значению ΔK , чем первоначальная. Изменение ориентировки треугольника погрешности указывает на то, что измененная ΔK имеет другой знак, чем принятая раньше. Если три пеленга пересекутся в одной точке, это значит, что измененная ΔK оказалась правильной.

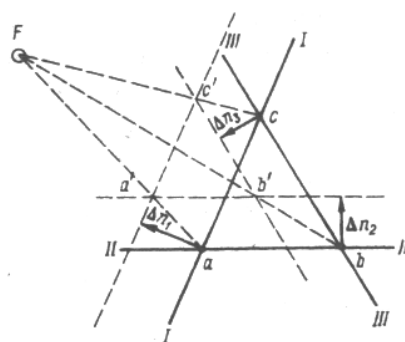


Рис. 9.8

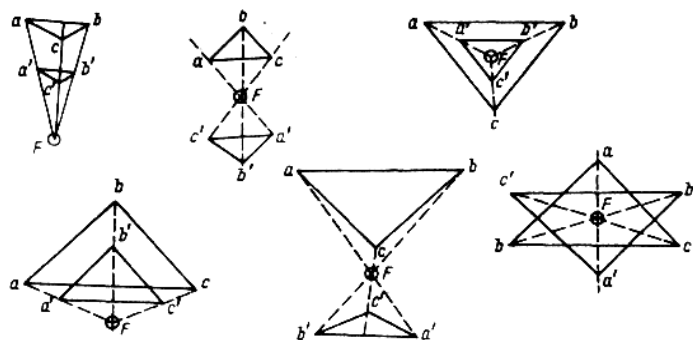


Рис. 9.10

Чтобы избежать графических ошибок при построении, можно рассчитать параллельное смещение каждой линии положения при изменении поправки на $3...5^0$ и построить новый треугольник погрешности, перенеся все линии положения в сторону увеличения или уменьшения (рис. 9.9). Для расчета смещения необходимо снять с карты расстояния до каждого из трех предметов. Тогда

$$\Delta n_1 = \frac{\Delta U_1}{g_1} = \frac{\varepsilon_k}{57.3^0} D_A; \Delta n_2 = \frac{\varepsilon_K}{57.3^0} D_B; \Delta n_3 = \frac{\varepsilon_K}{57.3^0} D_C$$

3. Если один из пеленгуемых предметов находится намного дальше двух других, то место судна и ΔK можно определить последовательным приближением (рис. 9.10). Считая место судна, определенное по ближайшим предметам, достаточно точным даже при неправильной ΔK , из полученной точки F' можно снять ИП отдаленного предмета C . Зная его компасный пеленг, рассчитать ΔK , а затем уточнить место, положив повторно пеленги ближайших ориентиров A и B , исправленные новой ΔK . При необходимости можно это действие повторить.

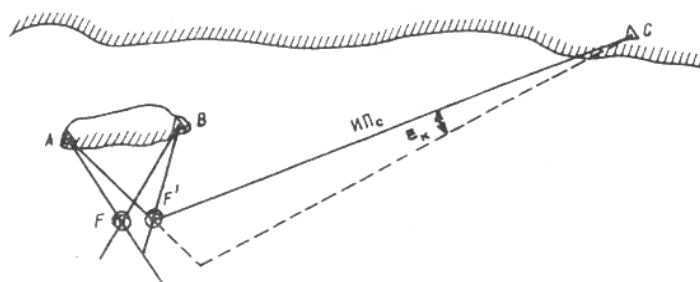


Рис. 9.9

Следует отметить, что при расположении всех трех ориентиров и судна на одной окружности будет иметь место случай неопределенности, так как окружности, вмещающие углы $\alpha, \beta, \text{и} (\alpha + \beta)$ сливаются в одну. В этом случае все три пеленга пересекутся в одной точке, даже если они будут ошибочны, и не представляется возможным определить место судна и проверить наличие ошибки в поправке компаса.

Действие случайных ошибок пеленгования отличается от действия систематической ошибки в поправке компаса тем, что ошибка каждого пеленга может иметь различное значение. В общем случае такие ошибки тоже могут вызвать появление треугольника погрешности. Исключить их действие при ограниченном числе наблюдений невозможно из-за неопределенности их индивидуальных значений. Поэтому необходимо выбрать точку, которую следует принять за обсервованное место судна. Для этого может быть использован общий принцип нахождения места судна при избыточных наблюдениях, или в центре треугольника (при малом треугольнике) или на пересечении антимедиан (при большом треугольнике).

Для каждой линии положения рассчитывают величину смещения под действием случайных ошибок:

$$\Delta n_1 = \frac{m_{\Pi}}{57,3^0} D_A, \Delta n_2 = \frac{m_{\Pi}}{57,3^0} D_B, \Delta n_3 = \frac{m_{\Pi}}{57,3^0} D_C$$

Строят полосы положения (рис. 9.11) и находят место судна в центре площади, образованной перекрытием всех трех полос смещения линий положения.

Влияние ошибки, вызванной неодновременным взятием пеленгов можно исключить несколькими способами. Один из них – правильный выбор очередности взятия пеленгов. Первым нужно пеленговать объекты, расположенные ближе к диаметральной плоскости судна. Пеленги этих ориентиров изменяются медленнее. Если берутся пеленги огней маяков, то наблюдения надо так организовать, чтобы не пришлось долго ждать проблеска огня, если он

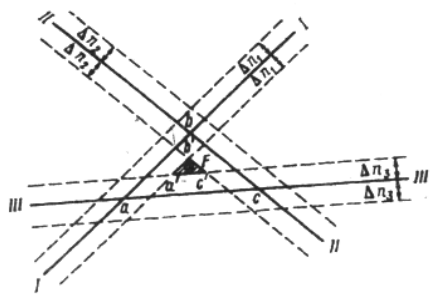


Рис. 9.11

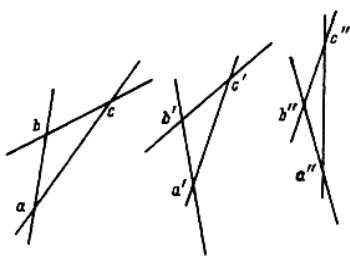


Рис. 9.12

проблеска огня, если он пеленгуется не первым. При скорости до 15 уз, когда прокладка ведется на путевых картах, этого достаточно для исключения ошибки от не одновременности пеленгования. При больших скоростях или при ведении прокладки на крупномасштабных картах или планах для уточнения следует привести пеленги к среднему моменту. Для этого берут пять пеленгов в следующем порядке: пеленгуют ориентиры A, B и C , а затем еще повторно пеленги B и A в обратном порядке.

Считая, что пеленги изменяются линейно, рассчитывают средние значения пеленгов объектов А и В

$$П_A = \frac{П_1 + П_5}{2}, П_B = \frac{П_2 + П_4}{2}$$

Время и показания лага следует заметить на момент пеленгования предмета С.

Получив одно определение, нельзя решить вопрос о выборе вероятного места судна, так как значения случайных ошибок в каждом пеленге и систематической ошибки в поправке компаса неизвестны. Небольшой анализ может оказать помощь в решении этого вопроса.

1. Если при построении получен большой треугольник погрешности, следует повторить наблюдения, чтобы выяснить, какие ошибки преобладают. При большой систематической ошибке по сравнению со случайными в повторных, близких друг к другу, определениях размер и ориентировка треугольника погрешности заметно не изменятся (рис. 9.12). Тогда для нахождения места судна и величины ΔK нужно считать ошибку систематической.

2. Если размеры и особенно ориентировка треугольника погрешности в нескольких близких определениях меняются, то можно предполагать, что основное влияние оказывают случайные ошибки.

3. Если углы между пеленгами близки к 120° и получается равносторонний треугольник погрешности, то местом судна явится его центр, так как и при случайных, и при систематических ошибках вероятное место судна будет в этой точке.

4. При небольшом треугольнике погрешности (со сторонами менее 0,5 см) место судна можно принять в его центре, так как различные графические построения вряд ли приведут к улучшению результата.

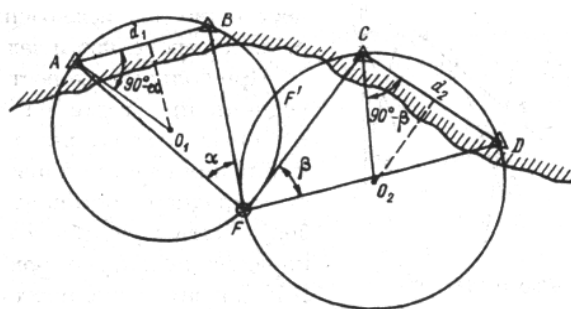


Рис. 9.13

9.3. Определение места судна по двум горизонтальным углам

Способ определения места судна по двум горизонтальным углам можно применить, когда имеется сомнение в поправке компаса или когда требуется повышенная точность обсервации, например при ведении дноуглубительных работ, прокладке кабеля и др.

Горизонтальный угол можно измерить секстаном или получить как разность измеренных компасных пеленгов.

На карте место судна можно получить несколькими методами: графически, с использованием кальки или с использованием протрактора.

Графическое решение. Если для определения места судна использованы четыре предмета (рис. 9.13), то строятся обе окружности. Чтобы найти центры и радиусы окружностей, вмещающие измеренные углы α и β при ориентирах A и B строятся углы $90^\circ - \alpha$, при ориентирах C и D – углы $90^\circ - \alpha$. Если углы α и β меньше 90° , то разности будут положительны и углы откладывают в сторону судна. Если α и β больше 90° , то эта разность будет отрицательна и углы откладывают в сторону от судна. Решение может получиться двузначным, так как окружности пересекаются в двух точках. Однако на практике счислимое место судна бывает известно и устранить двузначность нетрудно.

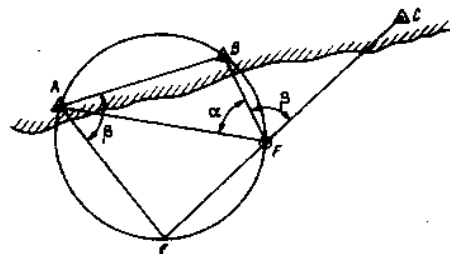


Рис. 9.14

Если место судна определяется по трем смежным предметам, то построение упрощается (рис. 9.14).

Пусть построена окружность, вмещающая угол α между предметами A и B . При точке A отложим угол β и найдем вспомогательную точку f . Соединив эту точку с предметом C , получим место в точке F , так как углы $fAB + BFf = 180^\circ$, угол $BFf = 180^\circ - \beta$ а угол $BFC = \beta$. Этот прием лучше использовать тогда, когда предмет C находится далеко.

Решение с использованием кальки. Из произвольной точки O на кальке следует провести прямую Oa и относительно этой линии построить углы α и β (рис. 9.15). Накладывая кальку на карту и перемещая ее, нужно добиться такого положения, при котором прямые Oa , Ob , Oc проходили бы через предметы A , B , C на карте.

Место судна отмечается уколom циркуля в точке O . Если углы не смежные, этим приемом воспользоваться нельзя.

Использование протрактора. Протрактор имеет одну неподвижную линейку (центральную) и две подвижных.

Необходимо установить на протракторе отсчеты углов α и β , а центральную линейку направить на предмет B (средний). После того как линейки протрактора совместятся с предметами A , B и C , находят место судна в центре протрактора.

Выше предполагалось, что оба угла измерены одновременно. На практике это можно сделать только при наличии двух наблюдателей. Если наблюдатель один, то измерять углы необходимо одновременно. Для этого сначала измеряют один угол, например α , затем угол β и опять угол α .

Предполагая, что за небольшой промежуток времени угол α изменяется линейно, можно принять для момента измерения угла β среднее значение

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

Показания лага и время замечают на момент измерения угла β . Этот метод имеет смысл применять только при использовании карт крупного масштаба или при производстве высокоточных обсерваций.

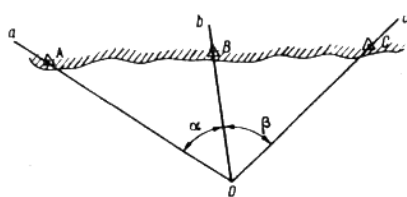


Рис. 9.15

Обычно для уменьшения ошибок от неодновременности измерений достаточно первоначально измерить тот угол, смещение линии положения которого за время движения судна между наблюдениями будет наименьшим. Если трудность измерения углов различна, то сначала лучше произвести более трудоемкое наблюдение, тогда время и отсчет лага должны

быть отнесены к моменту второго наблюдения.

Анализ точности. Случайные ошибки в измерении горизонтальных углов секстаном равны 1...2', систематические могут быть учтены с такой же точностью. Графические ошибки при построении места судна на карте в 3...4 раза превышают ошибки наблюдений. Поскольку ошибки прокладки носят случайный характер, то при анализе точности ограничимся рассмотрением лишь случайных ошибок.

Для вычисления смещений воспользуемся формулами

$$\Delta n_1 = \frac{D_1 D_2 \Delta \alpha}{3438 d_1}; \Delta n_2 = \frac{D_2 D_3 \Delta \beta}{3438 d_2}$$

где D_1, D_2, D_3 – расстояния до предметов А, В и С, снятые с карты; d_1 и d_2 – расстояния между предметами А и В, В и С. Подставляя значения Δn_1 и Δn_2 в формулу для средней квадратичной ошибки обсервованного места и принимая $\Delta \alpha = \Delta \beta = m\alpha$, угл. мин, получим

$$M = \frac{m_\alpha}{3438 \sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{D_1 D_2}{d_1}\right)^2 + \left(\frac{D_2 D_3}{d_2}\right)^2} = \frac{m_\alpha D_2}{3438 \sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{D_1}{d_1}\right)^2 + \left(\frac{D_3}{d_2}\right)^2} \quad (9.5)$$

где Θ – угол пересечения линий положения.

Значение угла Θ можно получить из рис. 9.16. Обозначим углы между касательными и хордой через X и Y . Тогда угол $A = Y$, угол $B = X$. В четырехугольнике $ABCF$ сумма углов равна 360° , а $\Theta = X + Y$, тогда $360^\circ = X + Y + B + \alpha + \beta$ и, следовательно, $\Theta = 360^\circ - (B + \alpha + \beta)$, где B – угол, при предмете B .

Случай неопределенности возникает при $\Theta = 180^\circ$, тогда судно и все предметы располагаются на одной окружности.

При $\Theta = 0^\circ$ все предметы и судно будут располагаться на одной прямой. Из рис. 9.17 видно, что в какой бы точке ни находилось судно (F или F'), значения углов α и β будут одинаковыми.

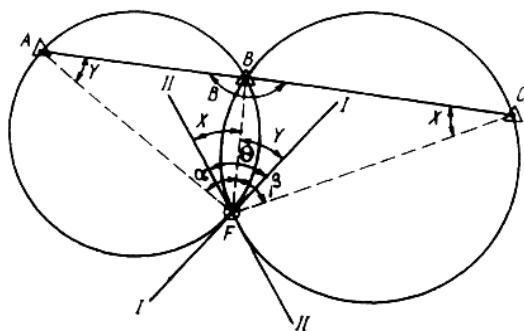


Рис. 9.16

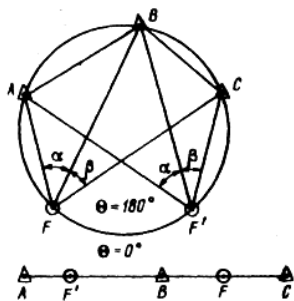


Рис. 9.17

Для избежания случая неопределенности надо подбирать ориентиры так, чтобы $B + \alpha + \beta > 180^\circ$. Это условие будет соблюдаться в случаях:

- а) если ориентиры располагаются на одной прямой (рис. 9.18, а)
- б) если судно находится внутри треугольника, образованного ориентирами (рис. 9.18, б);
- в) если средний ориентир расположен ближе к судну, чем крайние (рис. 9.18, в).

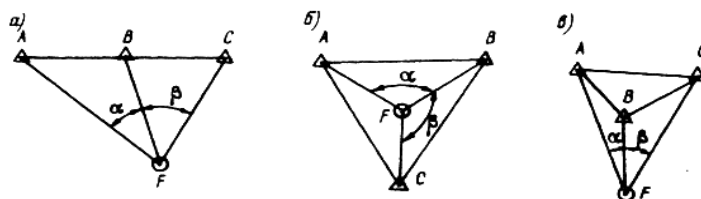
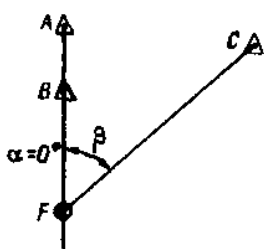


Рис. 9.19

Предположим, что один из измеренных углов, например β равен нулю, это не влияет на решение задачи, важно, чтобы сумма $B + \alpha + \beta \neq 360^\circ$ или 180° . Это видно из рис. 9.19, когда место судна определяется по створу и углу.

Точность места, полученного по двум горизонтальным углам, в общем случае повышается при приближении наблюдателя к среднему предмету.

Достоинство способа в том, что он не зависит от знания поправки компаса. Если одновременно с измерением углов взять КП одного из ориентиров, то, получив место судна по двум углам и сняв с карты ИП того же ориентира, можно рассчитать поправку компаса по формуле $\Delta K = \text{ИП} - \text{КП}$



Недостатки способа — наличие случая неопределенности, отсутствие контроля и необходимость иметь в видимости, как минимум, три ориентира.

9.4. Требования к определению поправки компаса

Рис. 9.18

Поправкой компаса называется величина навигационного параметра (курса или пеленга),

компенсирующая систематическую ошибку его измерения. В общем виде поправка — это систематическая ошибка, взятая с обратным знаком. Выше были изложены некоторые навигационные методы проверки наличия систематической ошибки в поправке компаса и методы ее определения. Поскольку поправка компаса определяется с некоторой случайной погрешностью, то к учету может быть принята поправка, величина которой, как минимум, вдвое превышает величину случайной ошибки при ее определении. В противном случае учет поправки теряет смысл. Например, поправку гирокомпаса, если она имеется, следует учитывать, когда ее значение не менее 1° , так как случайная ошибка определения лежит в пределах $\pm 0,3 \dots 0,6^\circ$. В наше время, согласно требованиям РШС-89, следует стремиться к уменьшению систематической ошибки, а следовательно, и поправки до пренебрежимо малой величины.

Поправку гирокомпаса следует определять на стоянке судна после ремонта гирокомпаса и в том случае, если было выявлено ее изменение. В рейсе, т. е. на ходу судна, все навигационные способы предназначены для ее контроля. Если в процессе контроля выясняется, что поправка гирокомпаса изменилась и превышает $0,5^\circ$, она исключается из показаний вводом коррекции. После этого выполняется контрольное определение остаточной постоянной поправки гирокомпаса, которую в дальнейшем можно принять к учету. Результаты определения постоянной поправки гирокомпаса записывают в формуляр прибора.

Все вышесказанное относится и к работе магнитного компаса. Систематическое сличение показаний гирокомпаса и магнитного компаса позволяет контролировать на судне таблицу девиации. Капитан судна может продлить срок действия штатной таблицы девиации на срок до 3 месяцев, если в результате сличения компасов значения полученной девиации не отличаются от табличных более чем на 2° . Систематический контроль за работой компасов – одна из основных обязанностей штурмана.

Рекомендуется следующая методика определения поправки гирокомпаса на стоянке. С возможно более высокой точностью определяют место пелоруса без использования пеленгов (по расстояниям, относительно причала и др.). Полученную обсервацию наносят на план или карту наиболее крупного масштаба.

В пределах визуальной видимости выбирают на местности и опознают на карте 3...4 точечных ориентира (навигационные знаки, мачты, шпили и др.), находящиеся на расстоянии не менее 200 м от судна.

Это обеспечит снятие ИП с достаточной точностью, со средней квадратичной ошибкой менее $\pm 0,5^\circ$. Выполняют три серии последовательных измерений гирокомпасных пеленгов (ГКП) на выбранные ориентиры. Интервалы между измерениями в серии и между сериями должны быть постоянными и не превышать 2 мин с тем, чтобы весь период измерений составлял 20...25 мин. Постоянную поправку гирокомпаса $\Delta ГК$ по каждому ориентиру определяют как разность истинного и среднего из измеренных пеленгов:

$$\Delta ГК = ИП - ГКП_{ср}.$$

Затем вычисляют среднюю по всем ориентирам постоянную поправку гирокомпаса, (если она превышает $0,5^\circ$, ее корректируют), после чего выполняют определение остаточной постоянной поправки гирокомпаса.

Способ определения места судна по трем пеленгам в хорошую погоду дает примерно такие же результаты, как определение по двум углам.

Глава 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА СУДНА ПО РАССТОЯНИЯМ

10.1. Определение расстояний в море

Расстояние в море можно определить несколькими методами: с использованием дальномеров, по вертикальному углу, измеренному секстаном, по данным РЛС и глазомерно.

Дальномеры представляют собой оптические приборы, измеряющие расстояния до видимого предмета на основе различных принципов. Так, например, горизонтально-базисные дальномеры автоматически решают треугольник по известному основанию (базе прибора) и противоположному углу, измеряемому оптическим устройством. Стереоскопические дальномеры основаны на свойстве человеческого глаза различать глубину пространства. В них решается вертикальный прямоугольный треугольник по известной высоте предмета и измеренному противоположному углу. Точность измерения расстояний дальномерами зависит от базы прибора и измеряемого расстояния. На судах морского флота дальномеры не нашли применения и расстояния измеряются с помощью РЛС или, когда возникает необходимость, с помощью секстана, позволяющего измерять угол с высокой точностью.

Задача определения расстояния до предмета, расположенного ближе видимого горизонта, может быть решена двумя путями – измерением вертикального угла между вершиной предмета и его основанием или между вершиной предмета и урезом воды у береговой черты. В последнем случае в расчет вводится высота предмета над уровнем моря. В морях с приливами необходимо учитывать высоту прилива, так как высота объекта в пособиях приводится, как правило, от среднего уровня полных сизигийных вод.

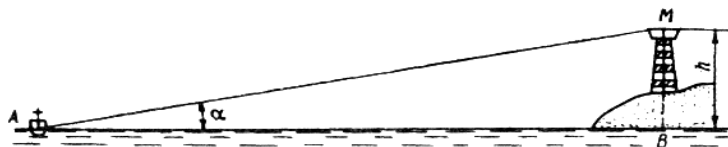


Рис. 10.1

При измерении вертикального угла от основания объекта возникают затруднения, так как не всегда возможно распознать основание на фоне береговой черты или строений.

При измерении вертикального угла следует различать три случая:

а) основание предмета находится ближе видимого горизонта и высота предмета известна. Тогда, измерив вертикальный угол α , можно рассчитать расстояние до предмета (рис. 10.1).

Принимая участок моря за плоскость, из $\triangle ABM$ получим

$$D = h \operatorname{ctg} \alpha = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha}$$

Для получения D в морских милях необходимо h выразить в морских милях, а $\operatorname{tg} \alpha$ заменить углом, тогда

$$D = \frac{h}{1852 \alpha \operatorname{arc} 1'} = \frac{3438 h}{1852 \alpha} \approx 1.86 \frac{h}{\alpha} \quad (10.1)$$

$$\text{Если } h \text{ выражена в футах, то } D = 0,57 \frac{h}{\alpha}$$

При обработке наблюдения необходимо учитывать поправку индекса i и инструментальную поправку s секстана, т. е.

$$\alpha = oc + i + s$$

где oc — отсчет секстана.

Земная рефракция для основания и вершины будет примерно одинаковой, поэтому ее можно не учитывать.

Формула (10.1) получена из предположения, что высота глаза равна нулю и предмет находится непосредственно у уреза воды. На практике эти условия выполняются редко, поэтому в расчетах бывают ошибки.

1. Ошибки из-за пренебрежения высотой глаза наблюдателя.

Пусть из точки O , находящейся от уровня моря на высоте e , измерен вертикальный угол α между вершиной и основанием предмета MB с высотой h . Как видно из рис.10.2, применение формулы (10.1) вызовет ошибку, равную AC , так как вместо $D = AB$ будет получено CB . Величину AC найдем, основываясь на свойстве секущих, проведенных из точки A к окружности $OCBMF$. Получим, что $AB \cdot AC = AO \cdot AF$, отсюда, учитывая, что $AF = h - e$,

$$AC = \frac{e(h - e)}{D}$$

Формула показывает, что если $h - e < D$, то ошибка в определении расстояния будет меньше высоты глаза наблюдателя. В практике обычно $D > h - e$, поэтому никаких поправок вводить не нужно.

2. Ошибки при измерении вертикального угла ориентира, удаленного от береговой черты на расстояние l .

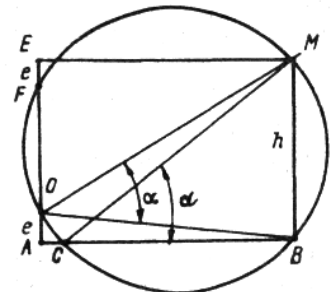


Рис. 10.2

Из рис. 10.3 следует, что для определения расстояния до ориентира по формуле (10.1) необходимо вместо высоты h ввести высоту $h-e$ и использовать исправленный угол $\beta = \alpha - d_{\Pi}$. В этой формуле d_{Π} – наклонение угла зрительного луча, выбираемое из табл. 11-6 МТ-75 по аргументам e – высота глаза и D_{Π} – расстояние до предмета

Так как D_{Π} неизвестно, то для его расчета можно использовать приближенную формулу

$$D_{\Pi} \approx 1,86 \frac{h}{\alpha} - l \quad (10.2)$$

где l – расстояние от уреза воды до предмета, снятое с карты. По D_{Π} выбираем d_{Π} , рассчитываем β утл. мин, и затем вычисляем

$$D = 1.86 \frac{h - e}{\beta} \quad (10.3)$$

Практически формулу (10.2) следует применять только в случае, если $l > h$; если $l < h$, можно пользоваться формулой (10.3).

При измерении вертикального угла, когда основание предмета скрыто за горизонтом, необходимо учесть рефракцию r и наклонение видимого горизонта.

На рис.10.4 измеренный угол α – это угол между касательными к зрительным лучам, идущим из глаза наблюдателя A' к вершине ориентира B' и видимому горизонту.

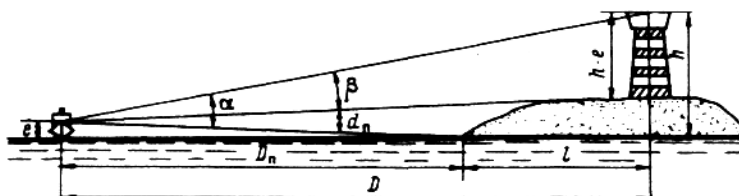


Рис. 10.3

Приводим измеренный угол α к истинному горизонту: $\beta = \alpha - d$, где d – наклонение видимого горизонта, выбираемое из табл. 11-а МТ-75. Проведем хорду AB и прямую $A'B''$, параллельную этой хорде. Угол между хордой и касательной к земной поверхности в точке A равен $D/2$, следовательно, угол между истинным горизонтом и прямой $A'B''$ также равен $D/2$. Рассмотрим $\Delta A'B'B''$ (см. рис. 10.4):

$$\angle B'A'B'' = \beta - r + \frac{D}{2} = \beta - 0.08D + 0.5D$$

где r – угол земной рефракции,

Принимая коэффициент земной рефракции равным 0,16, получим значение $r = 0,08D$. Окончательно получим,

$$\angle B'A'B'' = \beta + 0.42D$$

Примем $\triangle A'B'B''$ за прямоугольный и воспользуемся формулой для определения расстояния по вертикальному углу с видимым основанием

$$D = \frac{3438 (h - e)}{1852 (\beta + 0.42 D)} \approx 1.856 \frac{h - e}{\beta + 0.42 D}$$

Проведем дальнейшее преобразование:

$$D\beta + 0.42D^2 = 1.856 (h - e); D^2 + 2.38D\beta - 4.42 (h - e) = 0.$$

И окончательно имеем

$$D = -1.19\beta + \sqrt{(1.19\beta)^2 + 4.42(h - e)} \quad (10.4)$$

При решении квадратного уравнения знак «-» опущен, так как отрицательных расстояний быть не может.

Ошибка, которая происходит из-за принятия $\triangle A'B'B'$ за прямоугольный, не превышает нескольких метров.

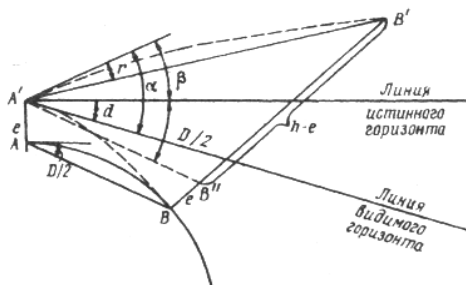


Рис. 10.4

По формуле (10.4) расстояние до объекта вычисляется достаточно просто, кроме этого расчета можно воспользоваться табл. 29 МТ-75. Эта таблица рассчитана по формуле

$$D = \sqrt{\left(\frac{\operatorname{tg} \beta}{0.000245}\right)^2 + \frac{h - e}{0.02679}} - \frac{\operatorname{tg} \beta}{0.000245} \quad (10.5)$$

Если в формуле (10.5) $\operatorname{tg} \beta$ заменить на $\operatorname{tg} \beta = \beta \operatorname{arc} 1'$, мы получим формулу (10.4).

При расчете D по формуле (10.1) могут возникнуть погрешности в расстоянии из-за ошибок в высоте предмета и ошибок в измерении угла α . Дифференцируя формулу по L и α и переходя к ошибкам, получим

$$m_D = \sqrt{\left(\frac{m_\alpha}{\alpha}\right)^2 D^2 + m_h^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha} \quad \text{или, введя} \quad D = h \operatorname{ctg} \alpha$$

$$m_D = \sqrt{\left(\frac{m_\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{m_h}{h}\right)^2} \quad (10.6)$$

Из этой формулы видно, что выгоднее определять расстояние по более близким предметам с большой высотой h , так как тогда измеряемый угол будет больше, а оба члена под корнем меньше.

При измерении угла секстаном m_a , утл. мин, может достигать $\pm 2'$. Ошибки высоты предмета могут быть различными. В районах без приливов $m_h = \pm 0,5$ м. В морях с приливами необходимо рассчитывать высоту прилива и учитывать ее при выборе h .

Если измерения производятся в момент малой воды, ошибка высоты объекта может быть равна высоте прилива. Если берется высота гор, сопок, то возможная ошибка в высоте предмета может достигать нескольких метров.

Во время плавания по фарватерам, маневрировании в порту, расхождении судов друг с другом очень часто используют глазомерную оценку расстояния. Точность глазомерного определения расстояний достаточно высока при небольших расстояниях до предметов и резко падает с увеличением расстояния. Так, расстояние до предмета в 30...50 м днем можно определить с точностью ± 5 м, и притом мгновенно. Однако когда предмет находится на расстоянии нескольких - миль, ошибки сильно возрастают. Ночью расстояние до огней, даже близких, определить еще сложнее. Поэтому глазомерное определение нужно считать приближенным. Расстояние, определенное на глаз, носит название *антретного расстояния*. Большое значение в глазомерной ориентировке играет опыт, накопленный путем сравнения определений расстояний на глаз с инструментальными.

10.2. Определение места судна по измеренным расстояниям

Если в видимости судна имеются два ориентира, до которых измерены расстояния (по вертикальному углу или по данным РЛС), то обсервованное место судна можно получить по двум расстояниям. Пусть А и В – два объекта, до которых измерены расстояния DA и DB . Известно, что измеренному расстоянию соответствует изолиния – окружность радиусом, равным этому расстоянию, и с центром в точке расположения ориентиров. Если оба наблюдения сделаны одновременно, то, проложив две окружности, в одной из точек получим место судна (рис. 10.5). Вопрос о том, какую из двух точек считать обсервованным местом, легко решается путем сопоставления со счислимым местом.

Ошибки в определении места судна по двум расстояниям зависят от трех факторов: неодновременности измерения расстояний, ошибок измерений и угла пересечения линий положения. Чтобы уменьшить влияние неодновременности измерения расстояний, нужно первым измерять расстояние до предмета, который находится ближе к траверзу, так как смещение линии положения из-за движения судна в этом случае будет меньше (рис. 10.6).

Пусть А и В – два ориентира, по которым определяется место судна. Если первым, когда судно находится в точке М, измерить расстояние до ориентира А, вторым, когда судно находится в точке М₁, – до ориентира В, то получим место в точке F. При обратном порядке измерения расстояний место судна получается в точке F'. Поскольку всегда целесообразно определять место судна в момент последних наблюдений, сравним отрезки FM₁ и F'M₂.

Из ΔFM₁M, пренебрегая кривизной сторон MF и FM₁ имеем

$$\frac{MM_1}{\sin \Theta} = \frac{M_1 F}{\cos q_A}$$

где Θ – угол пересечения линий положения; q_A – курсовой угол предмета А. Из ΔMF'M₁

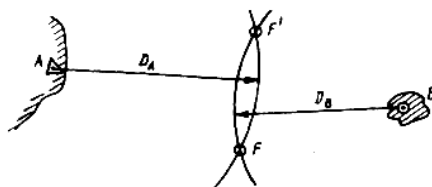


Рис. 10.5

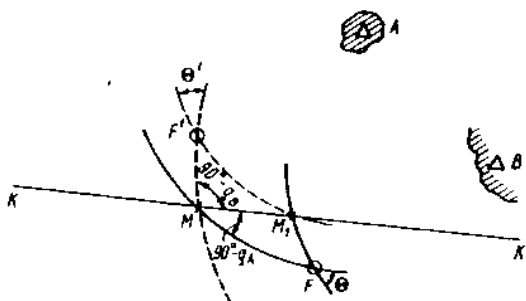


Рис. 10.6

$$\frac{M_1 M}{\sin \Theta'} = \frac{F' M_1}{\sin q_B}$$

Допустим, что расстояния были измерены быстро, поэтому $\Theta = \Theta'$. Тогда

$$\frac{M_1 F}{F' M} = \frac{\cos q_A}{\cos q_B} \quad (10.7)$$

Из равенства (10.7) видно, что для уменьшения ошибки, вызванной неодновременным измерением расстояний, первое наблюдение нужно делать до ориентира, расположенного ближе к траверзу.

Для исключения ошибки от неодновременности измерения расстояний можно произвести осреднение первого наблюдения, если его повторить после второго.

Если между измерениями расстояний промежуток времени составляет несколько минут, то выполняется графическое приведение линий положения к одному моменту. Для этого вторая линия положения смещается по курсу на величину пройденного расстояния, за данный промежуток времени.

Средняя квадратичная погрешность обсервованного места по двум расстояниям получается, если в общую формулу (8.12) подставить значения ошибок линий положения, помня, что градиент расстояния равен единице:

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\Delta n_1^2 + \Delta n_2^2} = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{m_{D_1}^2 + m_{D_2}^2}$$

Если допустить, что $m_{D_1} \approx m_{D_2}$, получим

$$M = \frac{1.4m_D}{\sin \Theta} \quad (10.8)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА СУДНА ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ ЛИНИЯМ ПОЛОЖЕНИЯ

11.1. Определение места судна по крьюйс-пеленгу

Если в видимости судна имеется только один ориентир, который можно использовать для взятия пеленга, наблюдатель, находящийся на стоящем судне, получит одну линию положения. Место в этом случае определить нельзя. Положение меняется, если наблюдатель находится на движущемся судне и элементы движения известны.

Обозначим через KK_1 линию пути судна (рис. 11.1). Когда судно находилось в точке F , был взят первый пеленг ориентира A . Через некоторое время из точки F_1 взят второй пеленг того же ориентира. Если путь судна и пройденное расстояние известны, то, вычислив угол Θ – разность пеленгов и угол q – курсовой угол предмета A в момент первого измерения пеленга, можно рассчитать D – расстояние до предмета A в момент второго измерения пеленга. Из $\triangle FAF_1$,

$$D = \frac{S \sin q}{\sin \Theta} \quad (11.1)$$

При определении по крьюйс-пеленгу место судна будет в точке пересечения двух линий положения: второго пеленга и окружности радиусом D с центром в точке A . Так как вторая линия положения получается через элементы счисления (S и q) то место, найденное этим методом, называется *счислимо-обсервованным*.

На практике для нахождения места судна вместо расчетов A пользуются графическим решением (рис. 11.2).

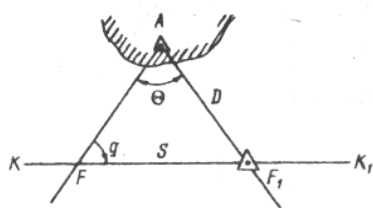


Рис. 11.1

пересечения со вторым.

Это будет приведенная линия положения; в точке пересечения этой линии со вторым пеленгом будет место судна (точка F на рис. 11.2).

По линии пути судна KK_1 или по линии пути K_1 , проложенной на карте от предмета A , откладывают от точки пересечения с линией первого пеленга n пройденное судном расстояние S за время между пеленгами и из полученной точки m прокладывают прямую, параллельную первому пеленгу, до

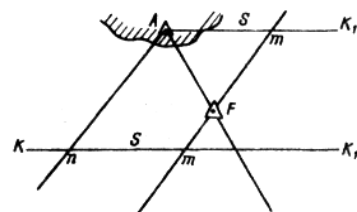


Рис. 11.2

Определение места судна по крьюйс-пеленгу может быть еще истолковано как перенос первой линии положения по счислению параллельно самой себе к моменту получения второй линии положения.

Если нет дрейфа и течения, пройденное судном расстояние по показаниям лага, исправленное его поправкой, откладывают на линии ИК, а при дрейфе — на линии пути судна. Причем для лагов, жестко скрепленных с корпусом судна, необходимо откладывать не просто $S_{\text{л}}$, а $S_{\text{л}} \sec \alpha$ (α — угол дрейфа).

При наличии течения, когда элементы его известны, плавание судна между пеленгами нужно проложить с учетом действующего течения. Для этого (рис. 11.3) из произвольной точки n на первом пеленге прокладываем линию ИК судна и плавание его по лагу за время между пеленгованиями. Из полученной точки m прокладываем отрезок, равный сносу от течения за тот же промежуток времени $mf = v_T t$, и через точку f проводим прямую, параллельную первому пеленгу.

При аналитическом учете течения на линии пути необходимо отложить расстояние, пройденное судном относительно грунта:

$$S = S_{\text{л}} k \quad (11.2)$$

$$k = \frac{V}{V_{\text{л}}}$$

Если за время определений судно меняло курс, то между пеленгами необходимо отложить все отрезки ИК и $S_{\text{л}}$ (рис. 11.4).

Способ крьюйс-пеленга можно использовать и для определения места судна по разновременным пеленгам двух предметов, причем решение в этом случае существенных отличий не имеет.

Рассматривая способ крьюйс-пеленга как определение места судна по двум линиям положения (первой приведенной и второй линией положения), напишем формулу для средней квадратичной ошибки obserвованного места

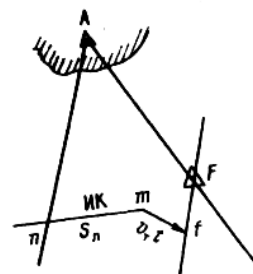


Рис. 11.3

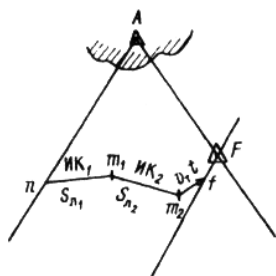


Рис. 11.4

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{m_{\text{ЛП}_1}^2 + m_{\text{ЛП}_2}^2 + m_p^2} \quad (11.3)$$

где $m_{\text{ЛП}_1}$ и $m_{\text{ЛП}_2}$ — средние квадратичные ошибки первой и второй линий положения; m_p — средняя квадратичная ошибка приведенной линии положения, обусловленная ошибками в направлении и величине перемещения судна, средние квадратичные ошибки которых равны m_K и m_S ,

$$m_p = \sqrt{(m_s \cos q)^2 + (m_k^2 \sin q S)^2}$$

$q = \text{ПУ-ИП}_1$ – угол между линией пути и первым пеленгом.

Подставим значение m_p в формулу (11.3) и получим значение средней квадратичной ошибки счислимо-обсервованного места, приняв

$$m_{\text{ЛП1}} = \frac{m_{\text{П}} D_1}{57.3^0}; m_{\text{ЛП2}} = \frac{m_{\text{П}} D_2}{57.3^0}$$

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{m_{\text{П}} D_1}{57.3^0}\right)^2 + \left(\frac{m_{\text{П}} D_2}{57.3^0}\right)^2 + (m_s \cos q)^2 + (m_k \sin q S)^2} \quad (11.4)$$

Из формулы (11.4) следует, что место точнее определяется при уменьшении расстояния до предмета и при значениях углов q и Θ , близких к 90° . Однако эти условия несовместимы, так как с увеличением q и Θ увеличивается расстояние. В общем случае место судна наиболее точно получается при $q = 50 \dots 80^\circ$, $\Theta = 50 \dots 70^\circ$.

Рассматривая способ определения места судна по крьюйс-пеленгу следует отметить, что наибольшие ошибки возможны при неверном учете течения. Поэтому пренебрежение к учету течения недопустимо.

Рассмотрим влияние ошибок элементов течения (или ошибок из-за неучтенного течения) на получение счислимо-обсервованного места. На рис. 11.5 точка F' – место судна, полученное по крьюйс-пеленгу без учета течения, а F – действительное место судна.

Из $\triangle FF'e$ имеем

$$\frac{FF'}{\sin \alpha} = \frac{v_T t}{\sin \Theta}$$

Отсюда ошибка в определении места из-за того, что не было учтено течение, определится из выражения

$$FF' = \frac{v_T t \sin \alpha}{\sin \Theta} \quad (11.5)$$

где α – угол между первым пеленгом и направлением течения; t – промежуток времени между пеленгованиями; v_T – скорость течения.

Из формулы (11.5) видно, если $\alpha = 0^\circ$, то FF' также равно нулю, а следовательно, течение не вызовет ошибки в полученном месте судна. Поэтому, если взять первый пеленг по направлению течения, то место судна, полученное по крьюйс-пеленгу, будет свободно от ошибки в учете течения.

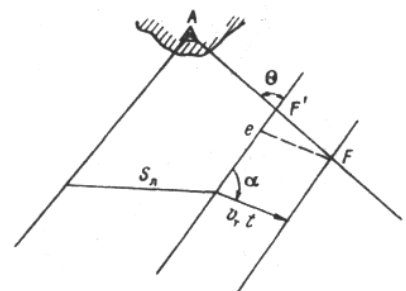


Рис. 11.5

11.2. Определение места судна по крьюйс-расстоянию

Если в видимости судна имеется один ориентир и представляется возможным дважды измерить расстояние до него (по вертикальному углу или по РЛС), то место судна можно получить способом крьюйс-расстояния (рис. 11.6). Пусть MM_1 – линия пути судна

Когда оно находилось в точке F_1 , было измерено расстояние D_1 до ориентира, а через некоторое время из точки F_2 – расстояние D_2 . Полагая, что путь судна и пройденное расстояние $S_{\text{л}}$ между наблюдениями известны, место судна можно получить несколькими способами, но самым простым является геометрический. От ориентира A по направлению, параллельному линии пути судна, следует отложить пройденное расстояние $S_{\text{л}}$. Тогда точка F_2 , представляющая собой место судна в момент наблюдений, может быть найдена как место пересечения двух окружностей радиусами D_1 и D_2 с центрами в точках A' и A .

Этот метод можно применить, когда трудно запеленговать объект, с целью уменьшения влияния случайных ошибок пеленгования.

Точность способа зависит от ошибок в измерении расстояния ошибок счисления за время плавания между наблюдениями и угла между линиями положения.

Влияние ошибок счисления будет таким же, как и в способе крьюйс-пеленга.

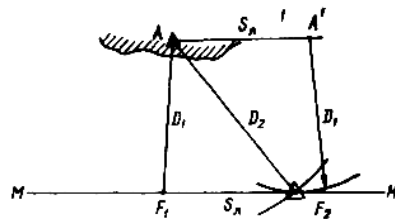


Рис. 11.6

11.3. Методы повышения точности определения места судна по разновременным линиям положения

Как было показано выше, основной причиной невысокой точности счислимо-обсервованного места является неточное знание пройденного расстояния. Для повышения точности обсервованного места были предложены методы, в основе которых лежит принцип вмещения между пеленгами отрезков, пропорциональных промежуткам времени или разностям отсчетов лага. К таким методам следует отнести метод исправленного крьюйс-пеленга и метод исправленного крьюйс-расстояния.

Исправленный крьюйс-пеленг. Впервые был предложен гидрографом Н. Н. Струйским. Идея метода сводится к следующему. Как известно, если взять три пеленга одного ориентира, то можно получить линию, параллельную пути судна, $n_1 n_2 n_3$ (рис. 11.7).

Исправленное крьюйс-расстояние. Бели имеется надежная обсервация, полученная по двум или более ориентирам, ее можно использовать, как и в способе исправленного крьюйс-пеленга, для повышения точности определения места судна.

Пусть точка F – надежная обсервация, A – неподвижный предмет, до которого можно измерить D_1 и D_2 – расстояния в фиксированные моменты времени (рис. 11.9). Будем полагать, что курс и скорость судна и элементы сноса на участке наблюдений постоянны и неизвестны.

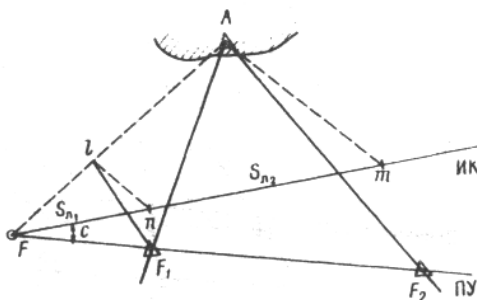


Рис. 11.8

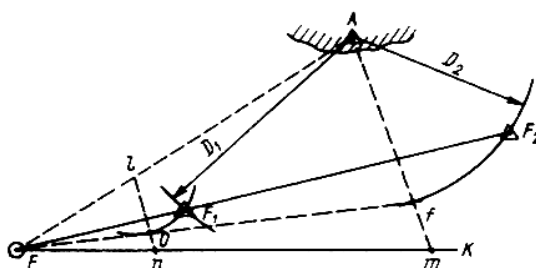


Рис. 11.9

Для решения из точки F проводим прямую FK (это может быть линия ИК) и откладываем на ней отрезки F_n и n_m , пропорциональные промежуткам времени t_1 и t_2 или плаванию по лагу S_1 и S_2 .

Соединив точки m и A , проведем линию nl , параллельную m_A . На прямой A_t от точки A отложим измеренное расстояние D_2 и полученную точку соединим с F . Затем из точки l радиусом lO делаем засечку на окружности радиусом D_1 . Полученная точка F_1 будет местом судна в момент измерения D_1 . Продолжив линию FF_1 до пересечения с окружностью радиусом D_2 , получим точку F_2 – место судна на момент измерения D_2 – на основании соотношения

$$\frac{FO}{Ff} = \frac{FF_1}{FF_2} = \frac{t_1}{t_1 + t_2}$$

Этот метод позволяет получить счислимо-обсервованное место и линию пути судна. Ошибка в поправке лага, если она постоянная, на точность результата не влияет. Метод позволяет вести прокладку при неизвестных показаниях лага.

Точность результата зависит от того, насколько точно измерены расстояния, а также от постоянства курса, скорости и элементов сноса.

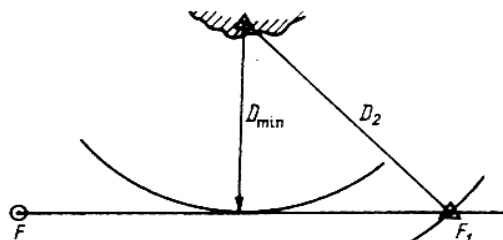


Рис. 11.10

Можно использовать частный случай, когда $D_1 = D_{min}$, т.е. измеряется минимальное расстояние до предмета. Проложив окружность радиусом D_{min} , следует провести линию пути, касательную к этой окружности. Сделав засечку на этой линии радиусом, равным D_2 (т.е. расстоянием, измеренным повторно), получим точку F_1 — счислимо-обсервованное место (рис. 11.10).

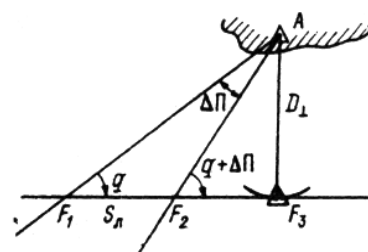


Рис. 11.11

Способ траверзных расстояний. Если с судна в моменты T_1 и T_2 взять пеленги ориентира A и рассчитать $q = \text{ИК} - \Pi_1$ и $\Delta\Pi = \Pi_2 - \Pi_1$ (рис. 11.11), то можно найти $D_{\perp}$ — расстояние в момент траверза. Из $\triangle AF_1F_2$ по формуле синусов получим

$$\frac{F_2A}{\sin q} = \frac{S_L}{\sin \Delta\Pi} \text{ откуда}$$

$$F_2A = S_L \sin q \cos \text{ec} \Delta\Pi \quad (11.6)$$

Из прямоугольного треугольника F_2AF_3

$$D_{\perp} = F_2A \sin (q + \Delta\Pi), \text{ или}$$

$$D_{\perp} = S_L \sin q \cos \text{ec} \Delta\Pi \sin (q + \Delta\Pi) \quad (11.7)$$

Или $D_{\perp} = S_L M$.

Значение коэффициента M приведено в табл. 30 МТ-75.

Выбрав M по аргументам q и $\Delta\Pi$, рассчитывают траверзное расстояние. В момент прохождения траверза величину D , откладывают от ориентира A и получают точку F_3 — счислимо-обсервованное место судна. Способ удобен тем, что пеленгование можно производить до и после прохождения траверза, а также в момент траверза. При хорошей работе лага способ дает достаточно точные результаты.

11.4. Общее графическое решение задачи определения места судна по разновременным линиям положения

При отсутствии обсерваций, чтобы исключить ошибки счисления при определении места судна по разновременным линиям положения, необходимо произвести четыре наблюдения и проложить полученные линии положения на карте.

Тогда для определения места судна, если оно в период наблюдений шло равномерно и прямолинейно, достаточно вставить между линиями положения отрезки пути пройденные судном по прямой, так, чтобы они относились как соответствующие промежутки времени или пройденные судном расстояния по лагу (рис. 11.12):

$$S_1:S_2:S_3=S_{Л1}:S_{Л2}:S_{Л3}$$

Чтобы выполнить это, на кальке проводим произвольную прямую и на ней откладываем отрезки $S_{Л1}$, $S_{Л2}$ и $S_{Л3}$ (рис. 11.13). Можно отложить любые отрезки, пропорциональные промежуткам времени t_1 , t_2 , и t_3 . Через полученные на прямой точки m , n , f , h и произвольно выбранную точку O проводим четыре луча OM , ON , OF и OH , а вблизи линии $mnfh$ – серию параллельных прямых. Наложив кальку на карту и двигая ее, можно найти такое положение, когда все четыре точки одной из прямых, параллельных линии $mnfh$, будут лежать на соответствующих линиях положения и одновременно на лучах OM , ON , OF и OH . Место судна на любой из линий положения на соответствующий момент помечаем уколом циркуля.

Показать, что вложение выполнялось правильно, можно, вспомнив теорему об отрезках параллельных линий, пересекающих пучок прямых. Число прямых параллельных линии $mnfh$, которые нужно провести, определяется требуемой точностью построения, и предполагаемыми расхождениями в значениях $S_{Л}$ и S , проходимых судном за одинаковые промежутки времени.

Из построения понятно, что метод вложения не зависит от вида линий положения и от того, по наблюдениям одних и тех же или различных личных ориентиров они были получены.

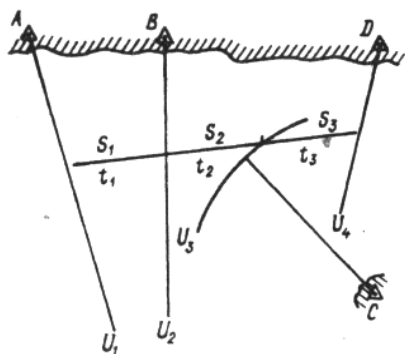


Рис. 11.12

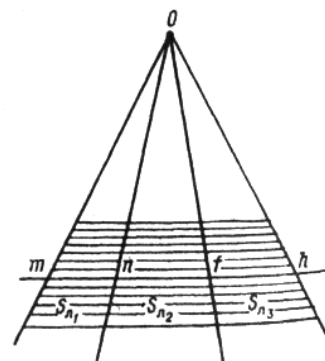


Рис. 11.13

Следует лишь иметь в виду, что по четырем пеленгам и четырем расстояниям до одного ориентира или при параллельности всех четырех линий решение задачи становится неопределенным. Если для определения использовано несколько ориентиров, задача решается всегда. В отдельных случаях может иметь место неопределенность, когда решений будет несколько, но выбрать из нескольких решений правильное обычно не представляется трудным, учитывая дополнительную информацию (глубины, счисление, гидрометеорологические данные).

Изложенный метод вмещения может быть применен и к определению места способами крьюс-пеленга и крьюс-расстояния, для этого первую линию положения следует провести через точку F – исходную обсервацию, а пеленги и расстояния измерять до различных ориентиров.

Впервые эта задача для четырех прямых была графически решена англичанином Реном, графоаналитически – академиком А. Н. Крыловым и М. Н. Андреевым. Приведенное выше графическое решение предложено проф. М. М. Лесковым, оно является наиболее простым.

Глава 12

КОМБИНИРОВАННЫЕ И ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА СУДНА

12.1. Определение места судна по пеленгу и расстоянию

Определение места судна по пеленгу и расстоянию – способ, наиболее часто употребляемый при использовании радиолокатора. Обычно пеленг и расстояние измеряют до одного ориентира, однако бывает целесообразнее измерить пеленг на светящийся маяк по компасу, а расстояние измерить до берега. В первом случае угол пересечения линий положения будет равен 90° , а во-втором – разности пеленгов, снятых с карты. Расстояние может быть измерено с помощью секстана по вертикальному углу либо получено приближенно по открытию маяка или глазомерно, при плавании по фарватеру или в узкостях. Чтобы уменьшить ошибки одновременности наблюдения, вначале измеряется расстояние, а затем берется пеленг при положении предмета ближе к траверзу и в обратной последовательности – при острых курсовых углах. Обсервованное место получается на линии ИП на расстоянии от предмета, равном D .

Известно, что ошибки линии положения пеленга и расстояния

$$m_{ЛП_1} = \frac{m_{\Pi} D}{57.3^0} \text{ и } m_{ЛП_2} = m_D$$

При измерении пеленга и расстояния до одного ориентира средняя квадратичная ошибка места судна равна (угол $\Theta = 90^\circ$).

$$M = \sqrt{m_{ЛП_1}^2 + m_{ЛП_2}^2} = \sqrt{\left(\frac{m_{\Pi} D}{57.3^0}\right)^2 + m_D^2} \quad (12.1)$$

При измерении пеленга и расстояния до разных объектов требуется знать угол пересечения. Тогда

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{m_{\Pi} D}{57.3^0}\right)^2 + m_D^2} \quad (12.2)$$

Из формул (12.1) и (12.2) видно, что с увеличением расстояния точность определения понижается. Поэтому при выборе ориентиров следует отдавать предпочтение ближайшим из них.

Кроме того, точность определения понижается с увеличением ошибок в измерении пеленга и расстояния. Способ имеет достоинство в том, что для определения места судна достаточно иметь в видимости один предмет. Этот способ хорошо использовать при плавании по створу. Недостаток способа в невозможности выявить промах в опознании ориентира измерениях.

12.2. Другие комбинированные способы определения места судна

В условиях морского плавания можно предположить создание условий, когда измерение двух навигационных параметров затруднительно. К таким условиям можно отнести выход из строя РЛС или гирокомпаса, невозможность пеленгования из-за закрытия объектов надстройкой или палубным грузом, малое количество объектов для пеленгования, штормовые условия или плохая видимость. Учитывая эти обстоятельства, штурман должен владеть различными комбинированными способами определения места судна.

1. Определение по пеленгу и горизонтальному углу.

Если предположить, что один из двух предметов закрыт для обзора, то, измерив пеленг одного предмета, можно секстаном измерить горизонтальный угол с другой точки на судне. Для получения места на карте прокладываем ИП

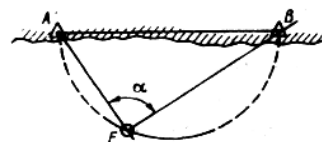


Рис. 12.1

предмета А (рис. 12.1) и затем пеленг предмета В, рассчитанный по формуле $ИП_В = ИП_А + \alpha$.

Метод сводится к определению места по двум пеленгам.

Если необходимо, то наблюдения следует привести к одному моменту. Хотя измерение угла секстаном дает высокую точность, из-за неизбежных графических ошибок при прокладке этот способ можно считать для хорошей погоды приблизительно равноценным способу. Двух пеленгов. Если в пеленге большие случайные ошибки, то место судна, определенное по пеленгу и углу, оказывается более точным, особенно при малых углах между ориентирами, так как в этом случае угол между линиями положения будет близок к 90° . В частном случае вместо пеленга может быть створ.

Для оценки точности данного способа может быть применена формула

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{m_{II} D_1}{57.3^\circ}\right)^2 + \left(\frac{m_\alpha D_1 D_2}{3438d}\right)^2} \quad (12.3)$$

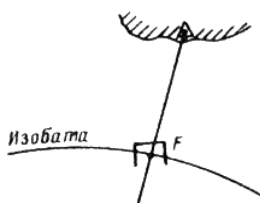


Рис. 12.2

где m_α – средняя квадратичная ошибка измеренного угла, утл. мин; D_1 и D_2 – расстояния до объектов, мили; d – расстояние между объектами, мили; Θ – угол между пеленгом и касательной к окружности.

2. Определение по пеленгу и высоте светила. Если в момент взятия пеленга или радиопеленга измерить высоту светила, то место судна определяется в точке пересечения круга равных высот и линии пеленга. На практике круг равных высот заменяют высотной линией положения. Угол пересечения линий положения будет равен углу между пеленгом и направлением линии положения.

Средняя квадратичная погрешность обсервованного места может быть вычислена по формуле

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{m_{\Pi} D}{57.3^{\circ}}\right)^2 + m_h^2} \quad (12.4)$$

где m_h – средняя квадратичная ошибка измерения высоты, утл. мин.

3. Определение по расстоянию и горизонтальному углу.

В тех случаях, когда в видимости имеются два объекта, но есть сомнение в поправке компаса, можно применить способ определения по расстоянию и горизонтальному углу. Этот способ позволяет не только определить место, но и проверить правильность поправки компаса. Может использоваться при длительных стоянках на рейде при выключенном гирокомпасе. Измерив горизонтальный угол с помощью секстана или как разность двух КП, определим расстояние до одного ориентира (по вертикальному углу или с помощью РЛС). Обсервованное место судна найдется в точке пересечения окружностей – изолиний горизонтального угла и расстояния. Если затем снять с карты ИП на предметы и сравнить их с компасными, можно проверить поправку гирокомпаса. Среднюю квадратичную ошибку обсервованного места получим по формуле

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{m_{\alpha} D_1 D_2}{57.3^{\circ} d}\right)^2 + m_D^2} \quad (12.5)$$

где Θ – угол между линиями положения (снимается с карты).

Для повышения точности следует расстояние измерять до более близкого объекта, так как в этом случае угол пересечения линий положения будет больше.

4. Опознание места по изолинии пеленга или расстояния глубине. Если в какой-то момент получения линии положения по наблюдению береговых ориентиров измерена глубина, то место судна можно получить как точку пересечения полученной линии положения и соответствующей изобаты (рис. 12.2). Таким образом, место судна можно считать на пеленге, где глубина соответствует измеренной. Точность такого определения зависит от рельефа дна и будет тем выше, чем равномернее и ближе друг к другу проходят изобаты в районе пеленга. В морях с приливами должна быть учтена высота прилива и измеренная глубина приведена к нулю глубины, от которого отмечаются глубины на карте.

Если линия курса проходит через отличительную глубину или безопасную банку, то пеленг или расстояние следует измерить в момент прохождения этой отличительной глубины, отмеченной эхолотом.

Место судна, найденное таким способом, следует считать приближенным.

12.3. Использование одной линии положения. Связь между счислением и обсервацией

Судоводитель всегда должен помнить, что счисление и обсервация – это единый процесс решения основной задачи навигации – обеспечения движения судна по выбранному маршруту. Поэтому во всех условиях плавания нельзя пренебрегать ни тем, ни другим, а следует использовать взаимный анализ для контроля и повышения надежности плавания. Если нет полноценной обсервации, а имеется одна линия положения, то штурман обязан проанализировать расположение линии положения по отношению к счислимому месту. Здесь возможны несколько вариантов:

а) полоса положения лежит внутри площади окружности, проведенной радиусом средней квадратичной ошибки счислимого места M_c и захватывает счислимую точку (рис. 12.3,а). Это подтверждает правильность счисления и надежность обсервованной линии положения. При необходимости можно подправить счисление, перенеся его в точку F . Так же поступают и в том случае, если полоса положения не захватывает счислимую точку, но полностью проходит через площадь счислимого места;

б) линия положения пересекает или касается площади счислимого места, но часть полосы лежит за пределами этой площади (рис. 12.3,б). В этом случае место судна будет находиться между счислимой точкой и линией положения в пределах той полосы, которая находится внутри площади счислимого места (точка F);

в) площадь счислимого места и полоса положения не пересекаются (рис.12.3,в). В этом случае счисление подправить нельзя, так как возможная ошибка в линии положения или ошибки счисления превысили допустимые пределы. В это случае необходимо усилить контроль за счислением и получить надежную обсервацию.

При получении невязки необходимо выполнить анализ обсервованной и счислимой точек. Если квадратичные ошибки обсервации (M_o) и счисления (M_c) примерно одинаковы и не превышают величину невязки, нет оснований переносить счислимое место в обсервованное. Когда средние квадратичные ошибки обсервованного места и счисления различны, а величина невязки больше меньшей из них, можно, используя идею способа наименьших квадратов, перенести счисление в точку F (рис. 12.4) на линии, соединяющей счислимое и обсервованное места, причем положение точки F определяется соотношением

$$\frac{d_c}{d_o} = \frac{M_c^2}{M_o^2}$$

где M_c и M_o – средние квадратичные ошибки счислимого и обсервованного места; d_c и d_o – отрезки расстояния от точки F до счислимого и обсервованного места.

Если соотношение

$$\frac{M_c}{M_0} > 2$$

то счисление можно перенести в более точную обсервованную точку.

Отсутствие переноса счисления в обсервованную точку не является признаком сомнения в обсервации или признаком ее неучета. Обсервация считается принятой, если ее обозначение на карте не сопровождается знаком вопроса.

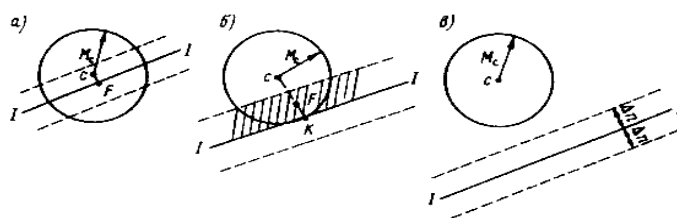


Рис. 12.3

Счисление должно переноситься в принятую обсервацию:

а) перед входом в узкость, портовые воды, систему разделения движения судов или СУДС;

б) если обсервация показала заметные смещения в сторону навигационной опасности;

в) если величина накопленной невязки достигла большого значения, препятствующего оценке навигационной ситуации;

г) в других случаях по указанию капитана.

Если при навигационной прокладке возникают сомнения, к какой из счислимых точек относится обсервация, счислимая точка соединяется с соответствующей обсервацией стрелкой.

Конечно, формальный анализ полученных счислимых и обсервованных мест правомерен при достаточной уверенности в отсутствии промахов и больших систематических ошибок как в счислении, так и при выполнении обсерваций. Лучшее средство контроля — получение нескольких обсерваций, по возможности различными способами и по другим ориентирам, а также использование дополнительной информации (глубины, проверка опознавания ориентиров, проверка поправки гирокомпас).

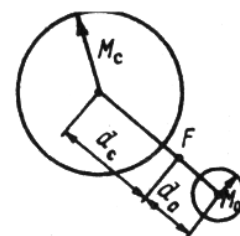


Рис. 12.4

Раздел V

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В НАВИГАЦИИ

Глава 13

Определение места судна по радиопеленгам.

Глава 14

Использование радиомаяков направленного действия.

Глава 15

Использование гиперболических радионавигационных систем.

Глава 16

Определение места судна с помощью навигационных спутников.

Глава 17

Использование судовых радиолокационных станций в навигации.

Глава 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА СУДНА ПО РАДИОПЕЛЕНГАМ

13.1. Общие понятия

Радиотехнические средства (РТС) навигации позволяют определять место судна, пользуясь результатами измерений различных геометрических величин (навигационных параметров): пеленгов, расстояний, разностей расстояний.

По виду навигационного параметра РТС подразделяют на:

азимутные, или угломерные, позволяющие измерять пеленги с судна на радиомаяк и с радиомаяков направленного действия на судно;

дальномерные, дающие возможность измерять расстояния или изменение расстояний;

разностно-дальномерные, или гиперболические, измеряющие разность расстояний до двух станций;

радиально-скоростные, измеряющие скорость сближения (или удаления) источника радиоволн с приемником;

комбинированные, позволяющие измерять разнородные навигационные параметры, например пеленг и расстояние.

Радиотехнические средства различают также и по другим признакам, например по дальности действия (глобальные, дальней, средней и ближней навигации, лоцманской проводки), по измеряемым радионавигационным параметрам (амплитудные, фазовые, времяизмерительные, частотные, корреляционные).

Радиотехнические средства навигации, состоящие из опорных передающих станций (береговой аппаратуры), излучающих взаимно синхронизированные сигналы на определенных частотах и в определенном порядке, и судовых приемоиндикаторов, получили название радионавигационных систем (РНС). По РНС навигационная информация передается непрерывно.

Для получения обсервованного места по измеренным значениям навигационных параметров используют следующие способы: графический (прокладка), картографический, таблично-графический, графоаналитический, аналитический.

Применение этих способов будет показано при рассмотрении соответствующих РТС.

Графическим способом (или прокладкой) называется непосредственное графическое построение изолинии на карте. Это наиболее простой способ определения места. Прокладка возможна в том случае, когда изолинии можно заменить линиями, имеющими более простую геометрическую форму (прямая линия или окружность). Применение этого способа требует высокой точности, и поэтому он используется на сравнительно небольших расстояниях от радиостанций.

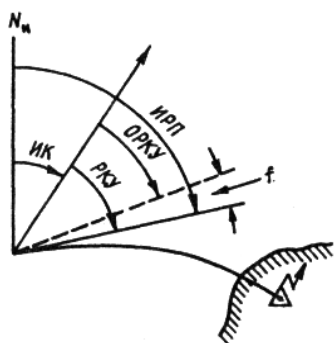


Рис. 13.1

Графический способ используют при определении места с помощью судового радиопеленгатора и радиолокатора.

Картографическим способом называется определение места с помощью сеток изолиний, нанесенных типографским способом на карты. Такие карты называются радионавигационными. Определение места на этих картах сводится к нахождению точки пересечения изолиний, соответствующих измеренным значениям навигационного параметра. Недостаток способа — понижение точности обсервации из-за мелкомасштабности ряда радионавигационных карт

и графической интерполяции, когда находят изолинию для измеренного значения навигационного параметра. При использовании почти всех гиперболических РНС чаще всего применяют картографический способ.

Таблично-графическим способом называется определение места с помощью специальных таблиц координат точек изолиний. Из таблиц для соответствующей изолинии, определяемой значением радиотехнического параметра, выбирают координаты двух точек около счислимого места, наносят их на карту и соединяют прямой линией. При этом изолиния заменяется хордой. Происходящая от этого ошибка невелика и не имеет в большинстве случаев практического значения. Место получается сразу на путевой карте. Таблично-графический способ применяют при определении места по гиперболическим РНС.

Графоаналитический способ (способ линий положения) может применяться при определении места судна с помощью любой РНС, если отсутствуют соответствующие таблицы или радионавигационные карты. Сущность способа заключается в том, что изолиния около счислимого места заменяется касательной к ней — линией положения.

Для ее построения вычисляют длину переноса n и его направление τ . Величину n находят по формуле

$$n = \frac{U_0 - U_c}{g}$$

где U_0 — измеренное значение навигационного параметра; U_c — счислимое значение параметра.

Направление переноса τ совпадает с направлением градиента, если $U_0 > U_c$, и отличается на 180° , если $U_0 < U_c$.

Расчет n и τ проводится как вручную, так и с помощью ЭВМ.

В аналитическом способе координаты обсервованного места получают непосредственно по формулам или находят поправки $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ к счислимым координатам: $\varphi_0 = \varphi_c + \Delta\varphi$; $\lambda_0 = \lambda_c - \Delta\lambda$.

Так как вычисление поправок $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ довольно трудоемко, особенно при большом числе линий положения, то для их расчета используют ЭВМ.

Аналитический способ является наиболее точным, так как позволяет применять строгие формулы сферической тригонометрии и учитывать сфероидичность Земли. Этот способ свободен от ошибок графических построений, неизбежно появляющихся при использовании других способов. Его применяют при определении места по гиперболическим и спутниковым РНС.

13.2. Радиокурсовой угол. Истинный радиопеленг

На судах морского флота применяют радиопеленгаторы двух типов: со слуховым приемом и автоматические визуальные. Оба типа радиопеленгаторов позволяют определить угол между диаметральной плоскостью судна и направлением распространения радиоволн от радиомаяка. Этот угол называют радиокурсовым (РКУ) (рис. 13.1). Однако радиопеленгатор, как и магнитный компас, из-за влияния на них металлических конструкций подвержен девиации и дает искаженное значение направления на радиомаяк. Поэтому отсчет радиокурсового угла (ОРКУ), полученный непосредственно с лимба радиопеленгатора, нужно исправить поправкой f , называемой радиодевиацией: $РКУ = ОРКУ + f$.

Она вызывается электромагнитными полями, создаваемыми токами высокой частоты, индуктируемыми в корпусе и других металлических частях судна.

РКУ отсчитывают от носовой части диаметральной плоскости судна по часовой стрелке от 0 до 360°.

Если принимать Землю за шар, то направление распространения радиоволн будет совпадать с дугой большого круга, соединяющей место радиомаяка и судна, — кратчайшим расстоянием между двумя точками на шаре. Зная истинный курс судна в момент пеленгования, можно рассчитать пеленг на радиомаяк.

Угол между нордовой частью истинного меридиана и направлением распространения радиоволн называют истинным радиопеленгом (ИРП). Этот угол отсчитывается от 0 до 360° по часовой стрелке. Из рис. 13.1 видно, что

$$\text{ИРП} = \text{ИК} + \text{РКУ} \quad (13.1)$$

или

$$\text{ИРП} = \text{КК} + \Delta\text{ГК} + \text{ОРКУ} - f \quad (13.1a)$$

Найденный таким образом ИРП будет ортодромическим пеленгом, так как он определяет направление дуги большого круга.

Многие современные радиопеленгаторы имеют встроенный репитер гирокомпаса, так что можно по нему непосредственно определить отсчет радиопеленга (ОРП). В этом случае ИРП определяют по формуле

$$\text{ИРП} = \text{ОРП} + \Delta\text{ГК} + f \quad (13.1б)$$

При этом одновременно приводится замечать и ОРКУ, так значение радиодевиации выбирается из таблицы по ОРКУ.

13.3. Определение радиодевииации

Для получения истинного радиопеленга необходимо определить радиодевииацию f . Радиодевииация зависит от РКУ и длины приходящей радиоволны, от осадки судна, изменения положения стрел, шлюп-балок и т. п. Под действием металлических масс радиоволна отклоняется от своего первоначального направления.

Для уменьшения радиодевииации следует устанавливать антенну радиопеленгатора возможно выше и так, чтобы крупные металлические части судна были расположены симметрично относительно антенны (рамки). Кроме того, существуют механические и электрические способы компенсации радиодевииации, описание которых дается в курсе радионавигационных приборов. Остаточная радиодевииация не должна превышать нескольких градусов. Ее следует определять в светлое время суток визуальными способами, сравнивая измеренные по азимутальному кругу компаса КУ на источник радиоволн и ОРКУ с лимба радиопеленгатора. КУ и ОРКУ надо определять одновременно и отсчитывать от 0 до 360°. Радиодевииацию рассчитывают по формуле.

$$F = \text{КУ} - \text{ОРКУ}$$

Визуальные способы определения радиодевииации.

1. По радиостанции плавучего маяка. Судно описывает плавную циркуляцию в пределах видимости плавучего маяка (не вокруг маяка), но не подходя к нему на расстояние ближе двух длин волн. Через каждые 10 или 15° изменения КУ на маяк замечают КУ на снижение маячной антенны по азимутальному кругу компаса и делают отсчет РКУ.

2. По радиостанции вспомогательного судна. Можно поставить на якорь вспомогательное судно и определять по нему радиодевииацию, так же как по плавучему маяку. Для определения радиодевииации больших судов, маневрирование которых затруднено, следует поступать иначе. Судно, определяющее радиодевииацию, само встает на якорь, а вспомогательное — описывает вокруг него циркуляцию.

3. По береговой радиостанции. Район маневрирования судна выбирают с таким расчетом, чтобы радиоволна пересекала береговую черту под углом, близким к 90°. Наблюдения ведут одновременно у компаса и радиопеленгатора. По полученным на разных КУ значениям остаточной радиодевииации составляют таблицу или непосредственно, или с помощью вычисленных коэффициентов радиодевииации, подобно тому как вычисляется таблица девиации магнитного компаса.

Радиодевииация зависит от длины принимаемых радиоволн и осадки. Поэтому ее следует определить хотя бы для трех длин волн и для различных осадок (в полном грузу и балласте).

Рекомендуется иметь таблицы радиодевииации для следующих длин волн: 600 м, принимаемой для сигналов о бедствии; 800 м, используемой судовыми радиостанциями; 1000 м, на которой обычно работают радиомаяки. Радиодевииация складывается из четвертой (преобладающей), полукруговой и других составляющих.

13.4. Изолинии при радиопеленговании

При измерении с помощью судового радиопеленгатора пеленга на радиомаяк изолинией будет линия равных пеленгов (изоазимута) — геометрическое место вершин сферического угла постоянной величины A , стороны которого проходят через две точки земного шара — полюс PN и место береговой станции M (рис. 13.2).

Как видно, сферический угол A между истинным меридианом и дугой большого круга, соединяющей место судна и радиомаяка, является ИРП. В какой бы точке линии равных пеленгов судно ни находилось, в любой из них будет измерен один и тот же ИРП станции M , равный A .

Уравнение линии равных пеленгов можно получить из сферического ΔKPN , применив к нему формулу четырех рядом лежащих элементов, считая φ и $\Delta\lambda$ текущими координатами. Оно имеет вид

$$ctg A \sin \Delta\lambda = tg \varphi_M \sin \varphi - \sin \varphi \cos \Delta\lambda \quad (13.2)$$

где A , φ_M , $\Delta\lambda$, — параметры линии равных пеленгов.

Задаваясь различными значениями φ и используя уравнение (13.2), можно находить для заданной величины A соответствующие значения $\Delta\lambda$ и наносить линии равного пеленга по точкам.

Дальность действия морских радиомаяков сравнительно невелика (не более 200 миль), поэтому прокладывать линии равных пеленгов на большом расстоянии нет необходимости. Обычно рассматривается лишь небольшая часть этой кривой вблизи счислимого места, которую можно заменить отрезком касательной в качестве линии положения.

На сравнительно небольших расстояниях от радиомаяков (несколько десятков миль) можно принимать линию равного пеленга за прямую. Действительно, на небольших расстояниях можно ограничиться первыми членами разложения в ряд тригонометрических функций

$$\operatorname{cosec} \Delta\lambda = ctg \Delta\lambda = \frac{1}{\Delta\lambda}$$

Тогда выражение (13.2) примет вид

$$ctg A = \frac{\sin \varphi_M \sin \varphi - \cos \varphi_M \sin \varphi}{\cos \varphi_M \Delta\lambda}$$

Так как выражение в числителе $\sin(\varphi_M - \varphi) = \sin \Delta\varphi \cong \Delta\varphi$, а в знаменателе $\cos \varphi_M \Delta\lambda = \omega$ — отстояние, то получаем:

$$tg A = \frac{\omega}{\Delta\varphi} \quad (13.3)$$

Как видно из уравнения (13.2), линия равных пеленгов принимает вид прямой линии (13.3), проходящей через радиомаяк под углом A к меридиану места судна.



Рис. 13.2

элементов прямоугольного сферического треугольника. Оно будет иметь вид

$$\operatorname{tg} \varphi = \sin(\lambda - \lambda_0) \operatorname{ctg} U_0 \quad (13.4)$$

где U_0 и λ_0 – параметры дуги большого круга. Они определяются из прямоугольного сферического $\triangle OMK$ по формулам

$$\sin U_0 = \sin U \cos \varphi_M; \operatorname{tg}(\lambda_0 - \lambda_M) = \sin \varphi_M \operatorname{tg} U$$

С геометрической точки зрения рассмотренные случаи совершенно различны: на меркаторской карте дуга большого круга изображается кривой линией, обращенной своей выпуклостью к ближайшему полюсу, линия равных пеленгов – кривой, обращенной вогнутостью к ближайшему полюсу. На небольших расстояниях (до 200...300 миль) дуга большого круга и линия равных пеленгов симметричны относительно локсодромии и составляют с ней в точках, между которыми они проложены, углы, называемые ортодромической поправкой ψ (рис. 13.3). Это свойство линии равного пеленга и дуги большого круга позволяет применять для их прокладки единообразные приемы.

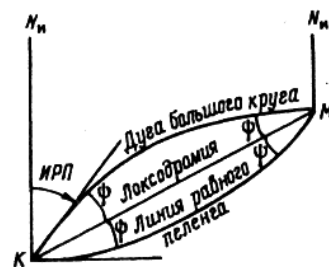


Рис. 13.3

13.5. Ортодромическая поправка

При определении ИРП измеряют угол, между истинным меридианом и дугой большого круга, по которой распространяется радиоволна от источника ее излучения М до места приема К на сфере (рис. 13.4). Измеренный угол является ортодромическим пеленгом.

Если на меркаторской карте от места радиомаяка М отложить, как это обычно делается, линию обратного ИРП (ОИРП) то место судна получится не в направлении МК, а в направлении МК₁.

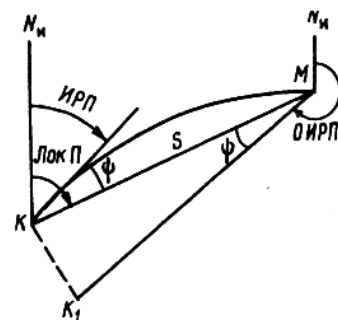


Рис. 13.4

Для того чтобы линия пеленга, проложенная на меркаторской карте, прошла через место судна К, измеренный ортодромический пеленг должен быть переведен в локсодромический пеленг (Лок П) путем прибавления к нему угла ψ , называемого ортодромической поправкой:

$$\text{Лок П} = \text{ИРП} + \psi \quad (13.5)$$

Ортодромическая поправка является поправкой за кривизну изображения дуги большого круга на меркаторской карте. Найдем величину этой поправки по рис. 13.5, изображающему Северное полушарие Земли с проведенной на нем через точки К и М дугой большого круга. Эта дуга составляет с меридианами точек К и М соответственно углы A_1 и A_2 . Эти углы не равны между собой, так как дуга большого круга пересекает меридианы под разными углами.

Разность двух сферических углов, под которыми дуга большого круга пересекает меридианы двух заданных точек, называется сходимением меридианов. Величину схождения меридианов точек К и М можно найти, если применить к треугольнику $KP_N M$ аналогию Непера. На основании ее можно написать

$$\operatorname{tg} \frac{A_1 + (180^\circ - A_2)}{2} = \frac{\cos \frac{(90^\circ - \varphi_1) - (90^\circ - \varphi_2)}{2}}{\cos \frac{(90^\circ - \varphi_1) + (90^\circ - \varphi_2)}{2}} \operatorname{ctg} \frac{\Delta \lambda}{2}$$

После преобразований имеем

$$\operatorname{ctg} \frac{A_2 - A_1}{2} = \frac{\cos \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}}{\sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}} \operatorname{ctg} \frac{\Delta \lambda}{2}$$

Так как $A_2 - A_1 = \gamma; \frac{1}{2} PIII$; $\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} = \varphi_M$; $\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, то

$$\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \sin \varphi_M \sec \frac{1}{2} PIII \quad (13.6)$$

Выражение (13.6) является точной формулой для вычисления γ на сферической поверхности.

При решении практических задач навигации РШ, $\lambda_2 - \lambda_1$ и γ обычно невелики, поэтому можно принять

$$\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \operatorname{arc} 1^\circ$$

$$\operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \operatorname{arc} 1^\circ$$

$$\sec \frac{1}{2} PIII = 1 \text{ Тогда}$$

$$\gamma = (\lambda_2 - \lambda_1) \sin \varphi_M \quad (13.7)$$

Из формулы (13.7) видно, что γ не может быть больше РД. С увеличением широты схождение меридианов увеличивается. Наибольшего значения, равного разности долгот, схождение меридианов достигает при $\varphi_m = 90^\circ$.

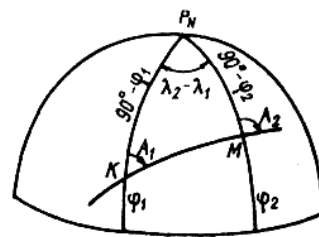


Рис. 13.5

Значение ортодромической поправки можно найти по сходимости меридианов на рис. 13.6, изображающем в меркаторской проекции часть земного шара с точками К и М, через которые проходит дуга большого круга, составляющая с меридианами данных точек углы A_1 и A_2 . На меркаторской проекции дуга большого круга изобразится кривой, обращенной своей выпуклостью к ближайшему полюсу. Локсодромия, проходящая через точки К и М, пересекает их меридианы под одним и тем же углом K .

Предположим, что расстояние между точками К и М сравнительно невелико, вследствие чего можно считать, что дуга большого круга, проходящая через эти точки, изображается дугой окружности. Это предположение будет верным с достаточной для практики точностью для расстояний до нескольких сотен миль. Тогда дуга большого круга будет составлять с локсодромией в точках К и М равные углы ψ .

Из рис. 13.6 видно, что в точке К поправка $\psi = K - A_1$, в точке М поправка $\psi = A_2 - K$. Суммируя эти равенства, получаем

$$2\psi = A_2 - A_1; \psi = \frac{A_2 - A_1}{2}$$

Так как $A_2 - A_1 = \Delta\lambda \sin \varphi_M$, то

$$\psi = \frac{1}{2} \Delta\lambda \sin \varphi_M \quad (13.8)$$

Формула эта является приближенной потому, что при выводе ее мы допустили равенство ортодромических поправок в точках К и М. В действительности ортодромические поправки в этих точках не равны.

Формулу (13.8) можно представить в другом виде, если вспомнить, что $\Delta\lambda = OTШ \sec \varphi_M$ и $OTШ = S \sin K$, где S — расстояние по локсодромии между точками К и М; K — локсодромический пеленг; $OTШ$ — отстояние.

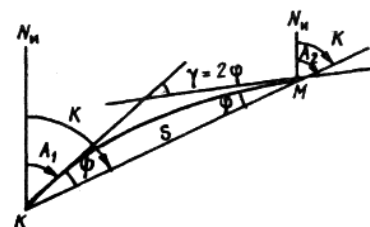


Рис. 13.6

Подставляя эти данные в формулу (13.8), получаем

$$\psi = \frac{1}{2} S \sin K \operatorname{tg} \varphi_M \quad (13.9)$$

При решении различных задач навигации чаще всего приходится находить локсодромический пеленг в данной точке при известном ортодромическом пеленге. Эту задачу решают по алгебраической формуле (13.5).

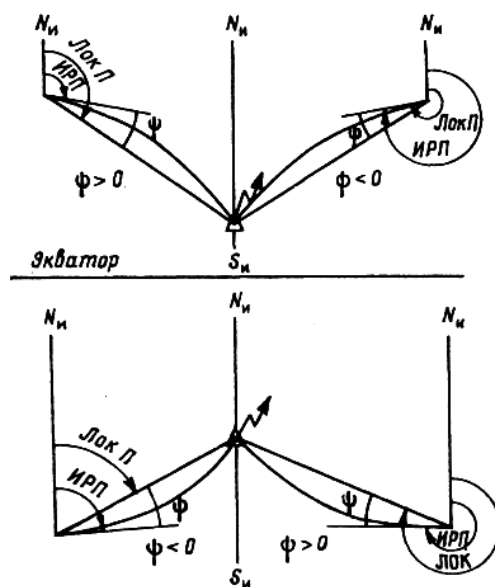


Рис. 13.7

Знак ортодромической поправки зависит от взаимного расположения судна и пеленгуемой им радиостанции и определяется по следующему правилу: если в Северном полушарии судно расположено к западу от радиостанции (величина пеленга в круговом счете от 0 до 180°), ортодромическая поправка имеет знак «+»; если судно находится к востоку от радиостанции (величина пеленга от 180 до 360°), ортодромическая поправка имеет знак «-». В южном полушарии правило знаков будет обратным (рис. 13.7).

При выводе приближенной формулы ортодромической поправки было сделано предположение, что дуга большого круга, изображается на меркаторской карте дугой окружности, вследствие чего ортодромическая поправка у обоих ее концов будет одинакова. Более строгое исследование вопроса об ортодромической поправке показывает, что дуга большого круга на меркаторской карте изображается кривой, не являющейся окружностью, и ортодромическая поправка у разных концов дуги большого круга будет разной.

На больших расстояниях, когда $\Delta \lambda > 10^\circ$, следует использовать точное значение ортодромической поправки.

Точное значение ортодромической поправки можно найти с помощью табл. 23-6 МТ-75, составленной по формуле⁴

$$\psi = K_1 - A_1$$

где K_1 – локсодромическое направление, определяемое из выражения

$$\operatorname{tg} K_1 = \frac{PД}{PМЧ}$$

A_1 – ортодромическое направление, определяемое из выражения (13.2).

Повысить точность нахождения ортодромической поправки (при $\varphi > 35^\circ$), можно, пользуясь обычной таблицей, составленной по приближенной формуле (13.8). Входить в эту таблицу следует не со средней широтой, а с широтой точки, для которой находится ортодромическая поправка. Ортодромическую поправку следует учитывать во всех случаях, когда ее величина больше случайных погрешностей прокладки, (их обычно принимают равными $\pm 0,3^\circ$).

13.6. Способы прокладки радиопеленгов на морских навигационных картах

Место судна по измеренным с него радиопеленгам и радиомаякам определяют графически. Так как дальность действия морских радиомаяков сравнительно невелика, то не приходится прокладывать линии равных пеленгов на большом расстоянии. Обычно рассматривают небольшую часть этой кривой вблизи счислимого места, которую можно заменить отрезком касательной в качестве линии положения.

При прокладке радиопеленгов используют ортодромическую поправку, рассчитанную по приближенной формуле (13.8). Способ прокладки зависит от величины ψ . Если ортодромическая поправка мала (меньше ошибок прокладки, принимаемых $\pm 0,3^\circ$), то ее можно не учитывать.

В этом случае отрезок линии равных пеленгов или дуги большого круга на меркаторской карте имеет столь небольшую кривизну, что практически изображается прямой линией, и его принимают совпадающим с локсодромией.

Предельные расстояния S , на которых возможно прокладывать линии радиопеленгов без учета ортодромической поправки, находят по формуле

$$S = 36 \operatorname{ctg} \varphi \operatorname{cosec} A \quad (13.10)$$

полученной из выражения (13.9) в предположении, что допустимая ошибка прокладки $\psi = 0,3^\circ = 18'$. Из формулы (13.10) видно, что наименьшее расстояние получается при пеленге 90° (270°). Расчеты показывают, что в этом худшем случае в арктических морях ($\varphi \approx 70^\circ$) можно не учитывать ψ на расстояниях порядка 10 миль; в северной части Атлантики и Тихого океана ($\varphi \approx 55^\circ$) – на расстояниях до 25 миль; в Черном море ($\varphi \approx 45^\circ$) – на расстояниях до 35 миль и т. д.

⁴Используем обозначения, принятые в МТ = 75.

На малых расстояниях прокладка линий радиопеленгов на карте производится так же, как и при визуальных наблюдениях, — в виде прямых линий.

На расстояниях, превышающих указанные выше, кривизной линий равных пеленгов пренебрегать нельзя. Прокладываемые на карте радиопеленги в этом случае надо исправить ортодромической поправкой. На расстояниях до 200...300 миль для расчета поправки можно использовать приближенную формулу (13.8) или рассчитанную по ней табл. 23-а МТ-75.

При этом ошибка в ортодромической поправке (от пользования приближенной формулой, а не точной) не будет больше ошибки прокладки ($0,3^\circ$).

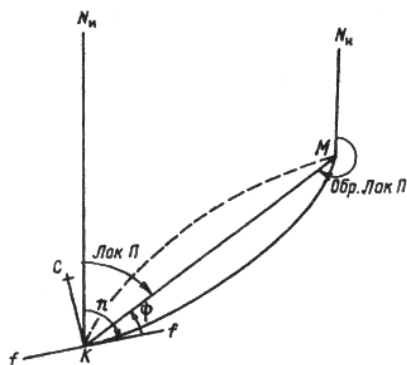


Рис. 13.8

Заменяем линию равных пеленгов около счислимого места линией локсодромического пеленга. Для ее построения необходимо рассчитать локсодромический пеленг и от пеленгуемого радиомаяка М проложить линию обратного локсодромического пеленга (рис. 13.8).

Если берутся пеленги двух радиомаяков, то, построив, как указано, две линии положения, отвечающие взятым пеленгам, в точке пересечения получают место судна.

В том случае, когда промежутки времени между моментами радиопеленгования велики, а скорость судна значительна, пеленги необходимо приводить к одному (последнему) месту путем смещения первой линии положения по курсу на величину пройденного судном расстояния за соответствующий промежуток времени.

13.7. Точность радиопеленгования и определения места по радиопеленгам

Место судна обычно определяется по двум-трем радиопеленгам. Рассмотрим ошибки определения ИРП с помощью судового радиопеленгатора, работающего на принципе приема минимума сигнала.

Из формулы (13.1) следует, что точность определения ИРП зависит от ошибок в истинном курсе, РКУ и в радиодевиации. Средняя квадратичная ошибка ИРП может быть найдена по формуле

$$m_{\text{ИРП}} = \sqrt{m_{\text{ИК}}^2 + m_{\text{РКУ}}^2 + m_f^2} \quad (13.11)$$

где $m_{\text{ИК}}$, $m_{\text{РКУ}}$, m_f — средние квадратичные ошибки величин, отмеченных индексами.

При благоприятных условиях плавания и при определении ДК по наблюдениям небесных светил ИК обычно известен с ошибкой $m_{\text{ИК}} \pm 0,8^\circ$. На качке эта ошибка может быть значительно больше.

На точность определения РКУ влияют угол молчания (в благоприятных условиях ошибка по этой причине порядка $\pm 0,6^\circ$, погрешность отсчета радиопеленга по лимбу гониометра ($\pm 0,3^\circ$), инструментальные ошибки радиопеленгатора ($\pm 0,5^\circ$).

Радиодевиация выбирается из таблицы, которая составляется по данным определения остаточной радиодевиации через каждые 10...15° изменения РКУ. Средняя квадратичная ошибка определения радиодевиации визуальным способом $\pm 0,5^\circ$.

Все рассмотренные ошибки являются случайными и независимыми. Подставляя их в формулу (13.11), получаем суммарную ошибку $m_{\text{ИРП}} = \pm 1,3^\circ$.

Вычисленная ошибка радиопеленгования довольно хорошо согласуется с данными о точности радиопеленгования, полученными на практике. Установлено, что на расстояниях до 100 миль $m_{\text{ИРП}} = \pm 1...1,5^\circ$, на расстояниях 100..200 миль $m_{\text{ИРП}} = \pm 2^\circ$.

Ночью ошибки радиопеленгования значительно больше из-за ночного эффекта, проявляющегося в увеличении угла молчания, смещении минимума и колебаниях силы сигнала.

Ночной эффект особенно сильно проявляется на расстояниях более 30...40 миль, где ошибка радиопеленгования может достигать нескольких градусов.

Точность определения ИРП с помощью двухканального визуального радиопеленгатора (ДВРП) также зависит от ошибок определения ИК, РКУ и радиодевиации. Ошибка определения РКУ обусловлена следующими факторами:

- неравенство коэффициентов усиления каналов и различие фазовых сдвигов ($\pm 0,8^\circ$);

- ошибка установки визира по оси эллипса ($\pm 0,2^\circ$);

- погрешность отсчета РКУ по шкале ($\pm 0,3^\circ$);

- инструментальные ошибки радиопеленгатора ($\pm 0,5^\circ$).

Кроме того, дополнительная ошибка в радиопеленге может возникнуть от помех других станций.

Сложение всех составляющих ошибок и практика показывают, что ДВРП позволяет определить ИРП примерно с такой же точностью, что и слуховой радиопеленгатор, т.е. порядка $1...2^\circ$. Преимущество ДВРП заключается лишь в упрощении процесса радиопеленгования.

Кроме случайных ошибок, рассмотренных выше, в радиопеленгах могут быть систематические ошибки. Одна из них возникает из-за изменения радиодевиации от изменения осадки судна. Радиодевиация определяется в большинстве случаев при одной осадке судна. Значительное изменение осадки во время плавания может вызывать изменение радиодевиации на $2...3^\circ$.

Другая систематическая ошибка может возникать при радиопеленговании на близком расстоянии от берега (рис. 13.9).

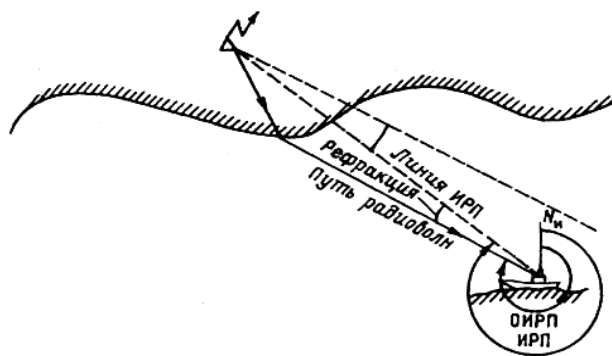


Рис. 13.9

Она называется береговой рефракцией или радиосклонением. Причиной ее возникновения является искажение электромагнитного поля на границе вода – суша. При радиопеленговании вблизи берега, когда радиоволна пересекает береговую черту под углом меньше 20° , в радиопеленгах могут быть ошибки порядка $2...3^\circ$, и к ним следует относиться с осторожностью. С удалением от земли береговая рефракция уменьшается и на расстояниях $D > 10\lambda$ практически отсутствует.

Для получения места на карте проводят линии локсодромических пеленгов, рассчитываемые по формуле (13.6). Поэтому некоторое влияние на точность определения места будут оказывать ошибки прокладки и ошибка от неточного нахождения ортодромической поправки. Последняя, как следует из формулы (13.8), зависит главным образом от ошибки счисления по долготе. Поэтому при большой ошибке в разности долгот определять место по радиопеленгам необходимо с приближением, т.е., получив обсервованное место, следует принять его за счисляемое, найти новую ψ и решить задачу вторично.

Точность определения места по двум радиопеленгам можно оценивать средней квадратичной ошибкой места или эллипсом ошибок. Средняя квадратичная радиальная ошибка M рассчитывается по формуле (8.12).

Третий радиопеленг несколько повышает точность обсервации (на 15...20%) и позволяет контролировать правильность радиопеленгования. Поэтому нужно стремиться по возможности брать три радиопеленга.

Когда необходимо знать ошибки по направлениям, строят эллипс ошибок. При двух линиях положения для этого можно применить таблицу из прил.5 МТ-75.

Для оценки точности обсерваций по трем радиопеленгам можно рекомендовать сперва построить средний эллипс ошибок для двух линий положения, обладающих меньшими ошибками и пересекающихся под более благоприятным углом, а затем уменьшить его полуоси на 10...15 % (за счет третьей линии положения). Центр эллипса Должен находиться в обсервованной точке.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОМАЯКОВ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

14.1. Принцип действия секторного радиомаяка

Секторный радиомаяк состоит из передатчика и трех антенн, расположенных одна от другой на расстоянии двух-трех длин излучаемой волны. Во время работы радиомаяка в окружающем пространстве создается диаграмма направленности излучения, состоящая из поворачивающихся чередующихся секторов тире и точек (рис. 14.1).

Сигналы радиомаяка принимаются на судне при помощи радиоприемника. При этом в зависимости от положения судна относительно радиомаяка наблюдатель будет слышать либо точки (положения P_1', P_1', P_1'') либо тире (положения P, P', P''). На линиях пересечения секторов точек и тире вместо них будет слышен непрерывный звук (положения P_2, P_3, P_4) - Эти линии называются равносигнальными зонами. Направление зон относительно нормали к базе радиомаяка в момент начала работы точно известно.

Равносигнальные зоны периодически равномерно поворачиваются в одну сторону (по часовой стрелке с одной стороны базы, против часовой - с другой) на углы, величина которых равна угловым величинам соседних секторов точек и тире, так что секторы точек занимают места секторов тире и наоборот. Определив время, прошедшее с момента, когда маяк начал работать, до момента прохождения равносигнальной зоны через место судна, можно определить соответствующий угол поворота равносигнальной зоны, а затем и ее направление относительно нормали к базе в момент приема сигналов.

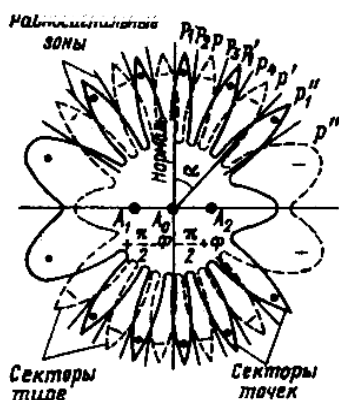


Рис. 14.1

Это время измеряется путем подсчета точек и тире, подаваемых секторным радиомаяком равномерно в течение 30 с.

Если обозначить угол сектора через B , град, число прослушанных знаков (точек и тире) с момента начала их передачи до момента прохождения равносигнальной зоны через место судна - через N , то угол, на который повернется эта зона, определится выражением $BN/60$, град. Так как первоначальное направление равносигнальной зоны известно, то, прибавив к нему этот угол, получают направление равносигнальной зоны в момент прохождения ее через место наблюдателя. Равносигнальная зона является на сфере дугой большого круга, поэтому это направление будет ортодромическим пеленгом наблюдателя с маяка.

Из рис. 14.1 видно, что вблизи продолжения базы существуют нерабочие секторы, в которых определение пеленга невозможно. Для определения пеленга с помощью секторных радиомаяков в любом направлении в некоторых отечественных секторных радиомаяках предусмотрена работа на дополнительную систему антенн, расположенных перпендикулярно линии основных. Такие радиомаяки получили название ВРМ-5 (вращающийся радиомаяк с пятью антеннами). Они работают поочередно на два антенных устройства из трех мачт, образующих взаимно перпендикулярные базы.

При этом обеспечивается круговая рабочая зона радиомаяка, так как нерабочие секторы одной базы перекрываются рабочими секторами второй,

Для определения пеленга при помощи секторного радиомаяка нужно:

настроить на волну радиомаяка судовой приемник связи или приемник радиопеленгатора, переключив последний на вертикальную антенну;

подсчитать число знаков N_1 , следующих за длинным тире, до появления равносигнальной зоны, а затем число знаков N_2 до конца передачи;

откорректировать сосчитанное число знаков N_1 на «потери»:

$$N = N_1 + 60 - \frac{(N_1 + N_2)}{2} \quad (14.1)$$

определить при помощи карты-схемы (образец ее приведен на Рис. 14.2) сектор нахождения судна, руководствуясь счислимым местом, а также тем, что вид сектора (точки или тире) одинаков с видом тех знаков, с которых начиналась передача сигналов;

выбрать из специальных таблиц значение пеленга по числу знаков, сосчитанных до равносигнальной зоны, и сектору нахождения судна

Если специальных таблиц на судне нет, то пеленг можно рассчитать по формулам

$$\sin \alpha = \frac{N + 60 K}{120 Z} \quad (14.2)$$

$$U_0 = U_H \pm \alpha$$

где U_H — направление нормали к базе радиомаяка (рис. 14.3); α — направление равносигнальной зоны относительно нормали; K — номер сектора (выбирается с карты-схемы); Z — отношение половины длины базы к длине волны; N — число сосчитанных знаков (точек или тире) до равносигнальной зоны.

Если необходимо получить более точное значение пеленга, то штурман может это сделать, определив положение равносигнальной зоны с помощью секундомеров. Для этого штурман после подачи первого сигнала радиомаяка одновременно включает два секундомера. Один он останавливает в момент потери слышимости сигналов, т.е. с началом равносигнальной зоны, второй — в момент появления слышимости сигналов, т.е. с окончанием равносигнальной зоны.

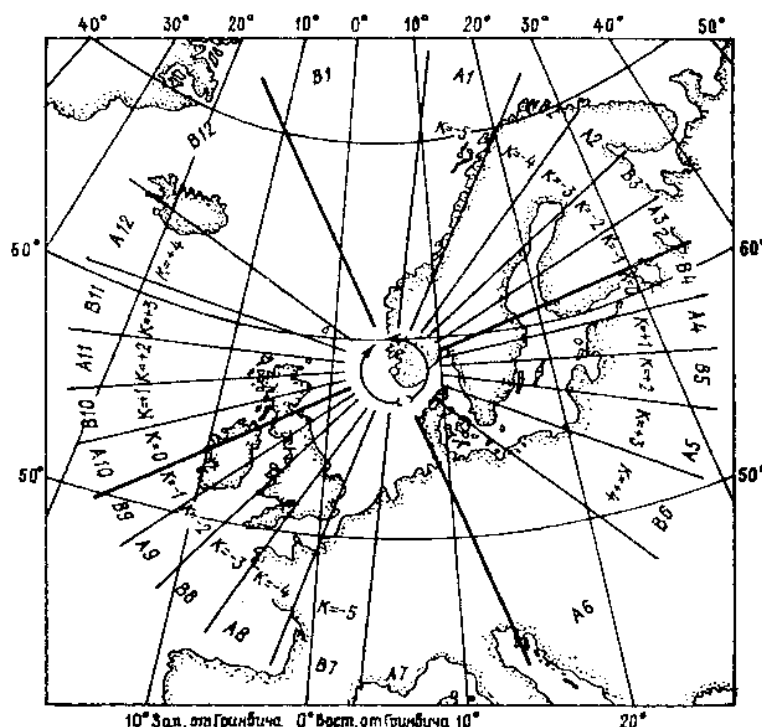


Рис. 14.2

Среднее из показаний двух секундомеров будет равно моменту прохождения равносигнальной зоны. Умножив это среднее на число знаков, подаваемых каждую секунду, можно получить точный отсчет, соответствующий моменту прохождения равносигнальной зоны через место наблюдателя.

У всех секторных радиомаяков каждую секунду передается два знака. Поэтому число знаков, соответствующих середине равносигнальной зоны,

$$N = \frac{2(t_1 + t_2)}{2} = t_1 + t_2 \quad (14.3)$$

По этому отсчету можно найти пеленг из таблиц или линию положения на карте с нанесенными изолиниями (дугами больших кругов). Для уменьшения влияния случайных ошибок полезно наблюдения провести несколько раз.

Если длительность передачи знаков t не равна 30 с, то отсчет знаков N должен определяться по формуле

$$N = \frac{30(t_1 + t_2)}{t}$$

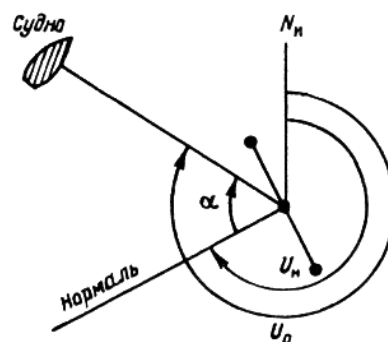


Рис. 14.3

Если на судне имеется автоматический визуальный радиопеленгатор, то можно полностью отказаться от слухового метода приема сигналов секторных радиомаяков и определять момент прохождения равносигнальной зоны визуально. Во время приема сигналов фигура на экране индикатора пульсирует в такт с подачей точек и тире. В момент прохождения равносигнальной зоны через место наблюдателя пульсация прекращается, что может быть легко замечено и зафиксировано с помощью секундомера, пущенного в момент начала работы радиомаяка.

Визуально принимать сигналы секторных радиомаяков можно также с помощью обычного тестера, подключив его к выходу приемника вместо головного телефона. Во время подачи точек и тире стрелка тестера будет колебаться около среднего положения в такт принимаемым сигналам. В момент прохождения равносигнальной зоны, когда колебания стрелки прекращаются, необходимо остановить секундомер, пущенный с началом подачи сигналов. Количество знаков, соответствующих равносигнальной зоне, определяется по формуле $N = 2t$.

Сигналы секторных радиомаяков с пятью антеннами принимаются точно так же, как и сигналы обычного секторного радиомаяка. Каждая из групп антенн работает поочередно в течение 3 мин. За это время пеленг по данной базе может быть определен три раза. Затем пеленг определяют по другой базе. Определить, какая база работает, можно по позывным, которые предшествуют подаче сигналов (точек и тире).

14.2. Основные эксплуатационные данные секторных радиомаяков

Точность пеленгования секторного радиомаяка зависит от инструментальных ошибок самого радиомаяка (наличия угла равносигнальной зоны, колебаний направления равносигнальной зоны), случайных ошибок наблюдателя в подсчете знаков и ошибок, вызываемых

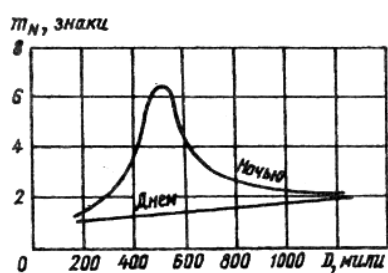


Рис. 14.4

условиями распространения радиоволн (ночные ошибки).

Инструментальные ошибки незначительны и у современных радиомаяков не превышают $0,1^\circ$. Основное влияние на точность пеленгования оказывают случайные ошибки наблюдателя в счете знаков ($\pm 2...6$ знаков). График средних квадратичных ошибок m_N в счете знаков приведен на рис. 14.4.

Средняя квадратичная ошибка пеленгования днем может быть определена по формуле

$$m_U = a \sec \alpha \quad (14.4)$$

получившейся путем дифференцирования выражения (14.2) по переменным α и N . В формуле (14.4) a представляет собой ошибку пеленгования на нормали к базе.

Например, для радиомаяка Ставангер $\alpha = 0,3^\circ$, для радиомаяка Канин $\alpha=0,2^\circ$.

Из формулы (14.1) видно, что секторные радиомаяки обладают свойством направленности точности: ошибка пеленгования увеличивается с возрастанием угла (рис. 14.5). За пределами угла в 70° от (нормали ошибки достигают значительных величин. Поэтому здесь пользоваться секторными радиомаяками не рекомендуется (исключение составляют радиомаяки ВРМ-5 с двумя взаимно перпендикулярными базами).

Ночью ошибки пеленгования больше, чем днем, и особенно велики на расстоянии 350...450 миль от радиомаяков, где наиболее сильно сказывается ночной эффект. В секторе $40...60^\circ$ от нормали эти ошибки достигают $\pm 2^\circ$ и более.

На точность определения пеленга некоторых секторных радиомаяков значительно влияют береговой эффект и подстилающая поверхность. Они создают систематические ошибки. Береговой эффект наблюдается в Белом море для радиопеленгов радиомаяка Канин и Рыбачий, в восточной части Норвежского моря для радиопеленгов радиомаяка Ставангер. Искажения вызывает влияние скалистых берегов, вдоль которых распространяются радиоволны. Однако ошибки уменьшаются по мере удаления от береговой черты и на расстояниях 400...450 миль от нее не превышают обычных.

Значительные систематические ошибки обнаружены у радиомаяков ВРМ-5 Терпения и Шумшу. В некоторых секторах зафиксированы ошибки до 16 знаков. Эти ошибки должны учитываться путем ввода в отсчеты знаков поправок. Поправки приводятся на радионавигационных картах с сетками изолиний.

Дальность действия секторных радиомаяков для умеренного пояса днем – 1000 миль, ночью – 1500 миль. Точность определения места по пеленгам секторных радиомаяков можно оценивать теми же методами, какими пользуются при обычном радиопеленговании см. формулу (8.12)].

Однако при наличии на судне радионавигационных карт более удобна для расчета радиальной средней квадратичной ошибки M формула

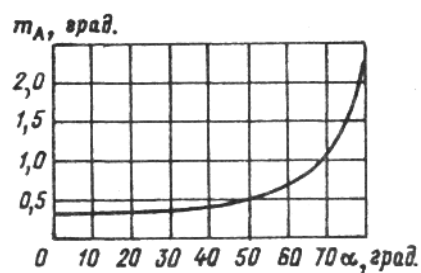


Рис. 14.5

$$M = \frac{m_N}{\sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{d_1}{\Delta N_1} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{\Delta N_2} \right)^2} \quad (14.5)$$

где d_i – расстояние между оцифрованными изолиниями на радионавигационной карте; ΔN_i – разность оцифровки.

Пример. Определили место по секторному радиомаяку. Ошибка в счете знаков $m_N = \pm 1$ знак, с радионавигационной карты расстояние между оцифрованными изолиниями $d_1 = 10$ миль, $d_2 = 20$ миль, разность оцифровки изолиний $\Delta N_1 = 10$ знаков, $\Delta N_2 = 5$ знаков, $\Theta = 52^\circ$. Найти М, мили.

Решение:

$$M = \frac{1}{0.79} \sqrt{\left(\frac{10}{10}\right)^2 + \left(\frac{20}{5}\right)^2} = 5.2$$

Исследования показывают, что днем в большей части обслуживаемого маяком района место судна определяется со средней квадратичной ошибкой 3...5 миль. Ночью ошибки определения места возрастают более чем в два раза.

14.3. Способы получения места судна

Изолиниями, отвечающими пеленгам секторных радиомаяков, являются дуги больших кругов. Для получения места судна обычно при меняют радионавигационные карты с нанесенными на них изолиниями. По картам место судна находят как точку пересечения двух линий пеленгов, помеченных данными счета точек и тире. Получив obserвованное место судна на такой карте, переносят его на путевую карту.

Если специальных радионавигационных карт на судне нет, то на расстояниях от радиомаяков до 300 миль obserвованное место можно найти приемами, аналогичными тем, которые применялись для определения места на таких расстояниях по радиопеленгам. При этом ψ , должна выбираться на широту радиомаяка.

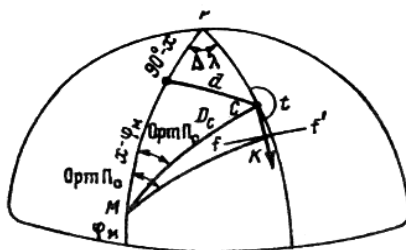


Рис. 14.6

Если секторными радиомаяками пользуются на больших расстояниях (более 300 миль), то при отсутствии радионавигационных карт место судна может быть рассчитано с помощью способа линий положения.

Обратимся к рис. 14.6, на котором М – секторный радиомаяк; С – счислимое место судна; Орт П₀ – obserвованный ортодромический пеленг, определяющий место судна на дуге большого круга МК; Орт П_с – счислимый ортодромический пеленг; Д_с – расстояние между маяком и счислимым местом судна.

Небольшую часть дуги большого круга МК, на которой находится действительное место судна, можно около счислимого места заменить касательной к ней ff' , называемой линией положения. Для ее построения на карте необходимо знать элементы линии положения: перенос n и его направление τ из счислимого места судна в определяющую точку К на линии положения. Определяющая точка находится в основании сферического перпендикуляра СК, проведенного из счислимого места на обсервованную изолинию (дугу большого круга). Зная величины n и τ , прокладывают линию положения, соответствующую обсервованному ортодромическому пеленгу.

Элементы линий положения можно вычислить различными приемами. В их основе лежит определение счислимого расстояния D_C и счислимого ортодромического пеленга $Орт\ П_C$ на радиомаяк. Для этого могут быть применены формулы

$$\begin{aligned}\cos D_C &= \cos \varphi_C \cos \varphi_M (\operatorname{tg} \varphi_C \operatorname{tg} \varphi_M + \cos \Delta\lambda) \\ \sin ОптП_C &= \frac{\cos \varphi \sin(\lambda_C - \lambda_M)}{\sin D_C}\end{aligned}\quad (14.6)$$

Расчеты целесообразно производить на ЭВМ. Далее вычисляют перенос $n = \Delta\Pi \sin D_C$, где $\Delta\Pi = Опт\ П_O - Опт\ П_C$.

Направление переноса τ находят на основании следующих соображений. Направление дуги большого круга МК около счислимого места С отличается от такого у радиомаяка на $угол$, равный сходимости меридианов радиомаяка и счислимого места (удвоенной ортодромической поправке), т.е. равно $Опт\ П_C + 2\psi$. Так как перенос СК = n перпендикулярен линии положения ff , то его направление

$$\tau = Опт\ П_C + 2\psi \pm 90^\circ \quad (14.7)$$

где знак « + » берется при $\Delta\Pi > 0$, а знак « - » при $\Delta\Pi < 0$.

14.4. Использование других радиомаяков направленного действия

Для вождения судов по прямолинейным фарватерам используют створные радиомаяки двух видов: с восьмерочной (рис. 14.7) и кардиоидной диаграммами направленности излучения. Действие этих радиомаяков основано на использовании равносигнальной зоны. Во время работы створного радиомаяка передаются «переплетающиеся» сигналы А и Н (иногда Б и Ж, Е и Т), посылаемые таким образом, что при нахождении судна на створе будут слышны оба сигнала с одинаковой силой. Так как паузы одного сигнала заполняются вторым сигналом, то создается впечатление непрерывного звука. При выходе из равносигнальной зоны будут слышны с большой силой сигналы А или Н, в зависимости от стороны уклонения от створа.

При плавании по фарватеру с помощью створного радиомаяка задача сводится к удержанию судна в пределах равносигнальной зоны.

Для того чтобы войти в равносигнальную зону створного радиомаяка, судно должно при подходе к нему лечь на такой курс, который пересекался бы под острым углом с направлением биссектрисы этой зоны. Войдя в зону, следует изменить курс так, чтобы путь судна совпадал с направлением биссектрисы равносигнальной зоны. При выходе судна из зоны надо изменить курс таким образом, чтобы снова войти в равносигнальную зону. При этом следует избегать резких поворотов, так как в противном случае судно легко может проскочить равносигнальную зону, а на циркуляции может поставить себя в опасное положение относительно близлежащих к фарватеру опасностей. Судовождение по створному радиомаяку надо выполнять на малых скоростях.

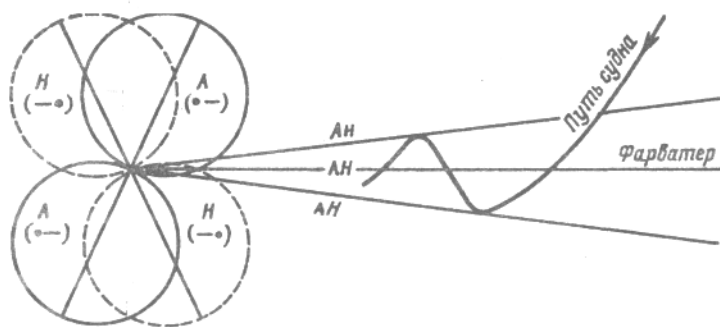


Рис. 14.7

Для того чтобы пользоваться створным радиомаяком, необходимо знать: координаты радиомаяка; длину волны, на которой он работает; направление равносигнальной зоны; величину угла равносигнальной зоны; распределение сигналов относительно оси зоны.

Сигналы створного радиомаяка можно принимать с помощью судового приемника связи или радиопеленгатора, переключенного на вертикальную антенну.

Створные радиомаяки работают по вызову. Порядок вызова радиомаяков и необходимые данные о них указаны в руководстве «Радиотехнические средства навигационного оборудования» (РТСНО) соответствующего бассейна.

Пример. Найти данные плавания по створному радиомаяку Булонь (Франция).

Решение. Из книги «Радиотехнические средства навигационного оборудования» выбираем: $\varphi_M = 50^\circ 44' N$, $\lambda_M = 1^\circ 36' E$, $f = 289,5$ кГц; направление равносигнальной зоны $281,5 - 101,5^\circ$, ее угол 5° ; к северу от равносигнальной зоны подается А (. -); к югу — Н (- .)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

15.1. Общая характеристика гиперболических РНС

Среди современных РТС навигации наиболее широкое применение на судах морского флота получили гиперболические РНС. Гиперболические РНС могут быть классифицированы по способу определения навигационного параметра (разности расстояний) и по дальности действия.

Навигационный параметр определяется не непосредственно, а через соответствующий радионавигационный параметр. По способу его определения гиперболические РНС подразделяются на:

фазовые, использующие зависимость фазы несущих колебаний от расстояния;

импульсные (временные), использующие зависимость продолжительности распространения радиоволн от расстояния;

частотные, использующие зависимость частоты несущих или модулированных колебаний от скорости изменения расстояния;

комбинированные (импульсно-фазовые).

В свою очередь, фазовые РНС подразделяются в зависимости от вида разделения (селекции) сигналов на РНС с частотной и временной селекциями сигналов. У первых каждая станция имеет собственную несущую частоту. У вторых все станции РНС работают на одной и той же частоте, но в определенной временной последовательности.

В зависимости от дальности действия гиперболические РНС подразделяются на системы:

неограниченной дальности действия, или глобальные; они позволяют определять место судна в любой точке земного шара;

дальней навигации – для плавания в океане (до 2000 миль от станции);

средней навигации – для плавания в открытом море (до 300 миль);

ближней навигации – для прибрежного плавания (до 100 миль).

В гиперболических РНС изолинией является гипербола, в фокусах которой расположены радиостанции (рис. 15.1). Для точек гиперболы разность сферических расстояний $\Delta D = D_1 - D_2 = \text{const}$.

Расстояние между фокусами называется базой; изолиния, перпендикулярная базе в ее середине (для нее $\Delta D = 0$), – нормалью.

Уравнение сферической гиперболы в прямоугольной сферической системе координат с началом O в середине базы, осью x вдоль базы и осью y по нормали к ней имеет вид

$$\frac{\text{tg}^2 x}{\text{tg}^2 a} - \frac{\text{tg}^2 y}{\text{tg}^2 b} = 1 \quad (15.1)$$

где a и b – параметры гипербола, определяемые из соотношений

$$a = \frac{\Delta D}{2}; \cos b = \frac{\sin c}{\cos a};$$

c – половина сферической базы системы.

В пределах небольших расстояний, при которых допустима замена их тангенсов самими расстояниями, уравнение (15.1) сферической гипербола превращается в уравнение плоской гипербола

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$$

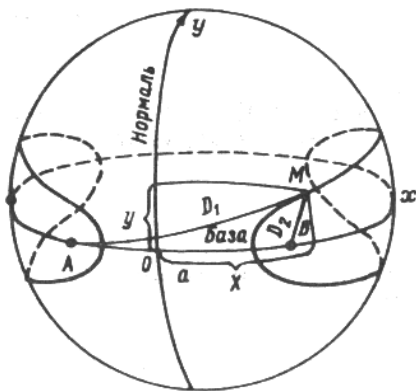


Рис. 15.1

Характерным является то, что в отличие от гипербола на плоскости гипербола на сфере являются замкнутыми кривыми, имеющими форму эллипса. В связи с этим можно сделать вывод, что на сфере нет, в сущности, разницы между сферической гиперолой и сферическим эллипсом.

На практике используют ту ветвь гипербола, которая находится в пределах дальности действия РНС.

Из уравнения (15.1) и рис. 15.1 видно, что гипербола является кривой, симметричной относительно базы (оси x) и нормали (оси y). Поэтому одной и той же разности расстояний соответствуют две ветви гипербола, т.е. имеется неоднозначность в определении изолинии. Разрешается неоднозначность с помощью счисления. Если по счислению разрешить неоднозначность невозможно, то это делается специальными техническими приемами.

Для общей характеристики точности гиперболических РНС обратимся к модулю градиента гипербола

$$g = 2 \sin \frac{\gamma}{2}$$

где γ – базовый угол (рис. 15.2).

Ошибка $m_{\Delta D}$ определения навигационного параметра приводит к смещению линий положения:

$$m_{\text{ЛП}} = \frac{m_{\Delta D}}{2 \sin \frac{\gamma}{2}} \quad (15.2)$$

Анализируя формулу (15.2), можно получить представление о точности определения линии положения гиперболической РНС в зависимости от положения наблюдателя относительно нормали к базе.

Из этого выражения видно, что когда наблюдатель находится на продолжении базы (точки K_1 и K_3), тогда $\gamma = 0^\circ$ и $m_{\text{ЛП}} = \infty$, т.е. линию положения получить нельзя. Когда наблюдатель находится на нормали к базе (точка K_2), тогда

$$\sin \frac{\gamma}{2} = \max \text{ и, следовательно, } m_{\text{ЛП}} = \min$$

т.е. точность на нормали будет выше, чем в других направлениях. Наибольшая точность будет в случае, когда $\gamma = 180^\circ$. Это возможно для наблюдателя, находящегося на базе (точка O);

$$\text{здесь } m_{\text{ЛП}} = \frac{m_{\Delta D}}{2}$$

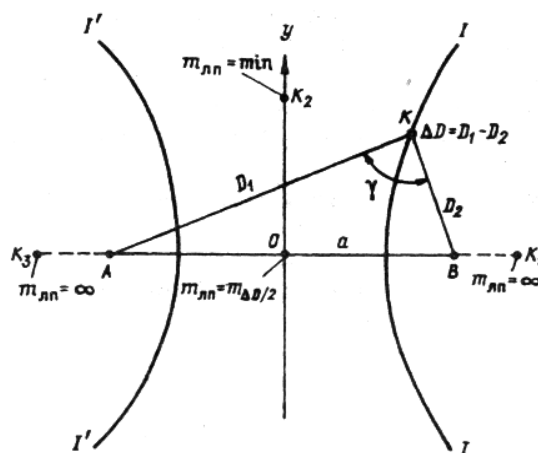


Рис. 15.2

Из сказанного выше можно заключить, что гиперболические РНС обладают свойством направленности точности. С удалением судна от нормали к базе γ уменьшается и смещение линий положения возрастает, стремясь к бесконечности на продолжении базы. Нерабочий сектор занимает угол порядка $20...30^\circ$ в сторону продолжения базы от каждой станции. Нерабочие секторы данной базы должны перекрываться рабочими секторами других баз.

15.2. Определение места с помощью фазовой РНС средней дальности действия

В морской навигации при плавании вблизи берегов и в узкостях широкое распространение получили фазовые РНС. Одной из них является РНС с частотной селекцией сигналов «Декка».

Принцип действия. РНС «Декка» основана на измерении в точке приема разности фаз взаимосвязанных (когерентных) колебаний, излучаемых береговыми радиостанциями (рис.15.3). Эти колебания принимаются на судне специальным приемоиндикаторном (НИ), имеющим прибор для измерения разности фаз – фазометр (декометр).

Здесь колебания усиливаются и поступают в умножители частоты, где они приводятся к одной частоте сравнения $f_M = M f$, на которой измеряются разности фаз. Например, если

частота станции А $f_a = 6f$, а частота станции В $f_b = 8f$, то получить частоту сравнения можно, умножив частоту станции А на 4, а частоту станции В на 3, т. е. частота сравнения будет $24f$. Из этого примера видно, что число M является наименьшим кратным для m и n .⁵

Разность фаз колебаний станции А и В, принятых в точке К, будет (после приведения к частоте сравнения)

$$\Delta\Phi = \Phi_A - \Phi_B = \omega_M \frac{D_1 - D_2}{v}$$

Так как $\omega_M = 2\pi f_M$ и $v = \lambda f_M$, то

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_M} (D_1 - D_2) \quad (15.3)$$

$$\text{Откуда } D_1 - D_2 = \frac{\lambda_M}{2\pi} \Delta\Phi \quad (15.3a)$$

Из формулы (15.3a) видно, что если $\Delta\Phi = \text{const}$, $D_1 - D_2 = \text{const}$. Как известно, изолиния, для которой разность расстояний для двух данных точек будет величиной постоянной, является гиперболой. Из выражения (15.3) следует, что для гиперболы будет иметь место постоянство разности фаз. Таким образом, изменив разность фаз колебаний сигналов станций А и В, можно найти изолинию – гиперболу с фокусами в точках А и В.

Из выражения (15.3) видно, что если $D_1 - D_2 = \lambda_M, 2\lambda_M, \dots, N\lambda_M$, то $\Delta\Phi = 2\pi, 2 \cdot 2\pi, \dots, N \cdot 2\pi$. Фазометр покажет во всех этих случаях один и тот же отсчет 2π (360 или 0°). Из этого следует, что в окружающем пространстве будет много точек, в которых показания фазометра также равны 2π (360 или 0°).

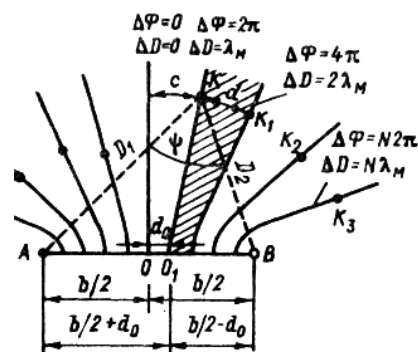


Рис. 15.3

⁵ В отечественных ПИ «Пирс-1 «частотой сравнения» является частота ведомой станции пары.

Пространство на земной поверхности, заключенное между гиперболами, проведенными через точки, для которых $D_1 - D_2$ кратно λ_M , или, что то же самое, для которых разность фаз равна 0 (2π), называется дорожкой. Таким образом, на границах дорожек фазометр покажет 0 (2π). Если же судно находится внутри дорожки, то фазометр покажет лишь дробное значение фазы φ . Сколько раз в разности фаз должно быть 2π , неизвестно.

Изменение фазы от 0 до 2π называется циклом. Разность фаз $\Delta\Phi$ нужно рассматривать как сумму некоторого числа циклов $N \cdot 2\pi$ и дробной части фазового цикла φ : $\Delta\Phi = N \cdot 2\pi + \varphi$.

Так как при единичном измерении фазометр измеряет только дробную часть цикла и не измеряет целое число циклов, то данная фазовая система обладает многозначностью. Это поясняет рис. 15.3, на котором видно, что для точек K, K_1, K_2 и K_3 отсчет фазометра будет один и тот же $\Delta\Phi = 0$ (или, что то же самое, $2\pi, 2 \cdot 2\pi, \dots, N \cdot 2\pi$ так как для всех указанных точек разность расстояний равна целому числу длин волн. Если отсчет фазометра равен φ , то этому отсчету соответствует изолиния внутри каждой дорожки. Для установления степени многозначности, т. е. числа дорожек, определим ширину дорожки $d = KK_1$. Она может быть найдена по формуле

$$d = \frac{\Delta U}{2 \sin \frac{\gamma}{2}}$$

где ΔU – изменение навигационного параметра при переходе от точки K к точке K_1 .

Для точки K $\Delta D_1 = \frac{\lambda_M}{2\pi} \Delta\Phi$, для точки K_1

$\Delta D_2 = \frac{\lambda_M}{2\pi} (\Delta\Phi + 2\pi)$ откуда $\Delta U = \Delta D_2 - D_1 = \lambda_M$ тогда

$$d = \frac{\lambda_M}{2 \sin \frac{\gamma}{2}} \quad (15.4)$$

На базе, где $\gamma = 180^\circ$, ширина дорожки минимальна и равна

$$d_0 = \frac{\lambda_M}{2}$$

т.е. половине длины волны, соответствующей частоте сравнения. Для нахождения числа дорожек N нужно разделить длину базы b на ширину дорожки на базе:

$$N = \frac{b}{d_0} = \frac{2b}{\lambda_M}$$

Так как $b > d_0$, то число N весьма велико (несколько сотен).

Среди большого числа дорожек нужно найти такую, в которой находится место судна. Ее нахождение для данной пары станции называется разрешением многозначности. Найти такую дорожку можно методом привязки и методом создания более широких промежуточных дорожек.

Сущность метода привязки состоит в следующем. Все дорожки на карте нумеруются. По точному месту судна снимают с карты номер дорожки и устанавливают его на счетчике дорожек, связанном механически со стрелкой фазометра. При дальнейшем движении судна стрелка фазометра непрерывно поворачивается в соответствии с изменением измеряемой разности фаз. Целые числа оборотов стрелки фиксируются счетчиком дорожек, так что наблюдатель может в любой момент указать дорожку, в которой находится судно.

Методом привязки многозначность разрешается очень просто. Однако этот метод имеет существенные недостатки. Во-первых, необходимо с достаточной точностью знать место судна. Ошибка в определении места в момент привязки не должна быть больше половины ширины дорожки в данном районе (2...3 кб):

$$M \leq \frac{\lambda_M}{\left(4 \sin \frac{\gamma}{2}\right)}$$

Такую высокую точность можно обеспечить только при стоянке в портах и в некоторых случаях при плавании вблизи берегов или на хорошо огражденном фарватере. При входе в район работы фазовой системы с моря, когда место судна известно недостаточно точно, разрешить многозначность методом привязки невозможно. Во-вторых, необходима непрерывная работа наземной и судовой аппаратуры. Длительное нарушение нормальной работы этой аппаратуры приведет к потере дорожек. Таким образом, методом привязки можно пользоваться не всегда. Рассмотрим сущность второго метода.

Из выражения $N = 2b/\lambda_M$ видно, что чем больше λ_M , тем меньше многозначность. В идеальном случае, когда $b = \lambda_M/2$, многозначности не будет. Таким образом, для разрешения многозначности нужно создать сетку гипербол на больших длинах волн. Этот метод применяется в системе «Декка» и в других фазовых системах.

В РНС «Декка» одновременно с «точной» сеткой на частотах сравнения $f_M = Mf$ создается «грубая» сетка на основной частоте. Для этого береговые станции работают в двух режимах: в режиме создания «точной» сетки («точных» дорожек) и в режиме создания «грубой» сетки («грубых» дорожек). В первом режиме, который длится почти непрерывно, станции излучают приписанные им частоты mf и nf . На этих частотах создается «точная» сетка с большой многозначностью. Во втором режиме, который длится не более 0,5 с, эти же станции излучают такую комбинацию частот, которые после их преобразования в приемном устройстве образуют для каждой станции частоту f .

На ней и происходит измерение разности фаз во время второго режима. Результат показывается на отдельном фазометре. Периодичность разрешения многозначности для каждой из трех пар станций «Декка» может быть различной: один раз в минуту у старых цепочек РНС «Декка» и три раза в минуту у новых цепочек. Во время второго режима работы береговых станций создание «точной» сетки прерывается. Так как перерыв небольшой, то это не вызывает заметных ошибок в показаниях «точных» фазометров, установленных на сравнительно медленно движущихся объектах – морских судах. В соответствии с формулой (15.4) ширина «грубой» дорожки на базе

$$d_{гр} = \frac{\lambda}{2}, \text{ где } \lambda - \text{длина волны, соответствующая основной частоте } f.$$

$$\text{Так как } f = \frac{f_M}{M}, \text{ то } \lambda = M\lambda_M$$

Поделив ширину «грубой» дорожки $d_{гр}$ на ширину «точной» дорожки d_0 , получаем

$$K = \frac{d_{гр}}{d_0} = M$$

Это отношение называется *коэффициентом сопряжения сеток*. Оно показывает, сколько «точных» дорожек заключается в «грубой» дорожке.

Счетчик фазометра «грубой» сетки разбит на M делений. Поэтому когда измеряют разность фаз на частоте f , получают сразу же номер «точной» дорожки (на счетчике фазометра «грубой» сетки или на табло в цифровой форме). А это означает, что многозначность разрешена.

«Грубые» дорожки, объединяющие каждая M «точных» дорожек, называют зонами. Можно также сказать, что зоной называется пространство на поверхности Земли между гиперболами, соответствующими нулевой разности фаз на основной частоте f . Число зон зависит от длины базы и основной частоты, оно обычно близко к десяти. Зоны обозначают первыми десятью буквами английского алфавита: А, В, С, ..., J. У станций РНС «Декка» $f=14,2\text{ кГц}$ чему соответствует $\lambda = 21$ тыс. м. Поэтому на базе зона имеет ширину около 10,5 км. С удалением от базы ширина зоны увеличивается. Это позволяет судоводителю уверенно определять зону местонахождения судна, пользуясь только данными счисления. Определив зону, устанавливают ее литеру на буквенном счетчике зон, механически связанном со стрелкой фазометра «точных» дорожек. Когда эта стрелка при движении судна изменит свои показания на M дорожек, литера в буквенном счетчике изменится на следующую (или на предыдущую).

Выше было рассмотрено получение линии положения и разрешение многозначности для одной пары станций. Точно так же находят линию положения и разрешают многозначность по другой паре станций. Место судна получается в точке пересечения двух гипербол.

Для контроля и повышения точности обсерваций, если имеется возможность, получают третью линию положения по третьей паре станций.

Определение места судна с помощью РНС «Декка». Совокупность станций РНС «Декка», использующихся для определения места судна, называется цепочкой. Каждая цепочка состоит из трех пар станций. Ведущая станция является общей для всех пар и располагается в центре, а ведомые — в вершинах приблизительно равностороннего треугольника (рис. 15.4). Ведомые станции называют: красной, зеленой и фиолетовой в соответствии с цветом сетки гипербол на карте, создаваемой соответствующей парой станций. С помощью каждой пары определяется одна гипербола. Все станции работают непрерывно незатухающими колебаниями. Колебания ведущей станции принимаются ведомыми станциями, трансформируются в строго определенном соотношении и излучаются в пространство. Соотношения между частотами типичной цепочки РНС «Декка» показаны на рис.15.4.

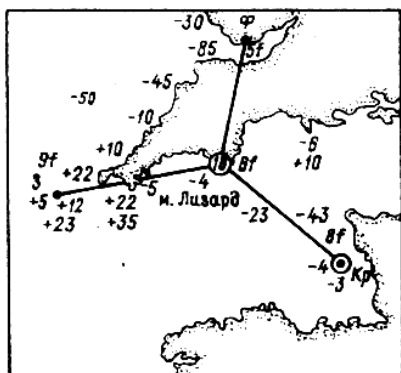


Рис. 15.4

На судне колебания сигналов ведущей и ведомых станций принимают с помощью специального четырехканального приемоиндикатора, имеющего три «точных» (по числу пар станций) фазометра и один «грубый» фазометр для опознавания дорожек, общий для всех пар станций. В приемнике колебания усиливаются, приводятся к частоте сравнения, на которой измеряют разность фаз. Из рис. 15.4 видно, что частоты сравнения равны: для красной пары $24f$, для зеленой пары $18f$ и для фиолетовой пары $30f$.

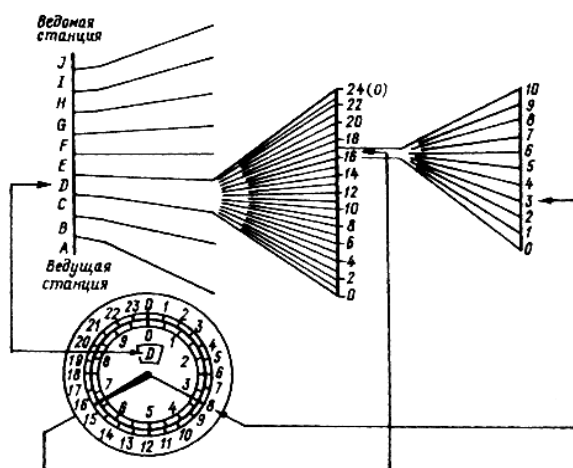


Рис. 15.5

Частоты сравнения определяют число «точных» дорожек в зонах. Поэтому в зоне красной пары содержатся 24 дорожки, в зеленой – 18 и в фиолетовой – 30 дорожек. В соответствии с этим циферблаты фазометров разбиты: красный – на 24 (0...24) деления, зеленый – на 18 (30...48), фиолетовый – на 30 (50...80). Для зеленого и фиолетового фазометров начала отсчета дорожек сдвинуты так, чтобы гиперболы разных пар отличались не только цветом, но и оцифровкой. Это избавляет штурмана от ошибок при определении места судна. Каждый из фазометров «точных» дорожек имеет буквенную шкалу зон, разбитую от А до J, и шкалу долей «точной» дорожки. Установка литер зоны и номера дорожки производится вручную при нажатии кнопки «Дорожка». Указатель долей «точной» дорожки работает автоматически от фазометра. Шкала долей «точной» дорожки разбита от 0 до 100 (рис. 15.5). Поэтому долю дорожки находят в сотых долях фазового цикла (сантициклах). Этому отсчету соответствует изолиния – гипербола, небольшой отрезок которой заменяют линией положения.

Оцифровку зон, дорожек и линий положения ведут от ведущей станции к ведомой. На рис. 15.5 показана схема оцифровки красной сетки. В качестве примера показано нахождение линии положения для отсчета D.16.33 (зона D), дорожка 16, линия положения 33).

Отсчеты вырабатываются непрерывно фазометрами при включенном приемнике. Сняв отсчеты со шкал фазометров, необходимо найти место судна на специальной карте, имеющей сетку гипербола, как точку их пересечения, соответствующую отсчетам. Пример нахождения места судна на карте показан на рис. 15.6 (отсчеты фазометров: красный J.7.20, зеленый E.33.60).

Дорожки наносятся на карту через 1...6 номеров в зависимости от масштаба карты. Для интерполяции используют специальную линейку или интерполяционную сетку, нанесенную на радионавигационную карту. Для этого можно также использовать любую линейку с равномерной шкалой.

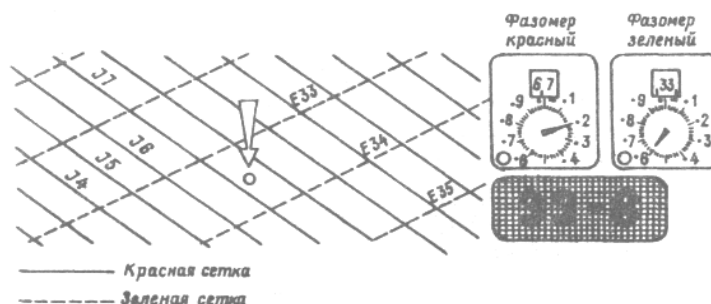


Рис. 15.6

При включенном заранее приемнике определение места судна занимает не более минуты. Если приемник не был заблаговременно включен, то определение места занимает несколько минут, так как предварительно нужно разрешить многозначность.

У большинства цепочек РНС «Декка» многозначность разрешается в последовательности: красная, зеленая и фиолетовая сетки через каждые 20 с, т.е. три раза в минуту для каждой пары станций.

Для разрешения многозначности необходимо:

найти зону, используя для этого считаемое место судна или обсервацию, полученную любым возможным способом (по радиопеленгам и т.п.). Литеру зоны установить на точном счетчике;

по «грубому» фазометру в моменты разрешения многозначности найти номер «точной» дорожки и поставить на него указатель дорожек «точного» фазометра. Для исключения ошибок эту операцию сделать несколько раз. Многозначность можно считать разрешенной, если разница между показаниями «грубого» и «точного» фазометров не будет превышать 0,5 ширины дорожки.

Операция по разрешению многозначности занимает 3...5 мин, ночью – 8...10 мин, так как из-за влияния ночного эффекта «грубый» фазометр иногда работает с большим разбросом.

Точность определения места. При определении места по РНС «Декка» обычно используют 2...3 линии положения. Точность определения места зависит от следующих факторов:

геометрического, который определяется базовыми углами;

точности измерений;

точности учета влияния подстилающей поверхности на скорость распространения радиоволн;

влияния пространственных радиоволн.

Навигационным параметром в РНС «Декка» является разность расстояний, определяемая по формуле (15.3а).

Так как разность фаз $\Delta\Phi$ измеряется целым числом и сотыми долями фазового цикла, то эта формула может быть написана в таком виде:

$$\Delta D = \lambda_M \Delta\Phi \quad (15.5)$$

Из выражения (15.5) получаем

$$m_{\Delta D} = \lambda_M m_{\Delta\Phi} \quad (15.5a)$$

Из формулы (15.5а) видно, что точность определения навигационного параметра зависит от точности измерения разности фаз.

Последняя обусловливается ошибками синхронизации в работе ведомой станции, ошибками при учете влияния подстилающей поверхности на скорость распространения радиоволн и инструментальными ошибками фазометра

Опыт использования РНС «Декка» на отечественных судах показывает, что суммарная средняя квадратичная ошибка измерения разности фаз может быть принята днем равной $\pm 0,05$ фазового цикла (ф.ц), ночью $\pm 0,10$ ф.ц. С учетом этих ошибок получаем ошибки определения навигационного параметра (табл. 15.1).

Радиальная средняя квадратичная ошибка определения места судна по двум линиям положения может быть рассчитана по формуле (8.12).

Так как место судна получают на радионавигационной карте, то можно применить более простую формулу. Подставив в формулу (8.12) выражение (15.5a) для ошибки навигационного параметра $m_{\Delta D}$, получаем

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{m_{\Delta \Phi_1} \lambda_{M_1}}{2 \sin \frac{\gamma_1}{2}} \right)^2 + \left(\frac{m_{\Delta \Phi_2} \lambda_{M_2}}{2 \sin \frac{\gamma_2}{2}} \right)^2}$$

Принимая $m_{\Delta \Phi_1} = m_{\Delta \Phi_2} = m_{\Delta \Phi}$ и используя выражение (15.4) для ширины дорожки d , находим

$$M = \frac{m_{\Delta \Phi}}{\sin \Theta} \sqrt{d_1^2 + d_2^2} \quad (15.6)$$

Пример 15.1. Определили место судна по РНС «Декка» в дневных условиях:

$m_{\Delta \Phi} = 0,03$. С карты $d_1 = 11$ кб, $d_2 = 11$ кб, $\Theta = 60^\circ$.

Найти M (в кабельтовых) по формуле (15.6).

Решение:

$$M = \frac{0.03}{0.87} * 11 \sqrt{2}$$

Таблица 15.1

Пара станций	λ_M , М	$m_{\Delta D}$, М	
		днем	ночью
Зеленая	1170	58,5	117
Красная	880	44	88
Фиолетовая	700	35	60
В среднем		46	92

При определении места по трем гиперболам ошибка обсервации будет в среднем на 10...15% меньше, чем по двум гиперболам. Поэтому нужно по возможности пользоваться всеми тремя парами станций данной цепочки.

Приведенные примеры дают представление о точности определения места судна с помощью РНС «Декка». Более полные данные о точности РНС можно получить из табл. 15.2, где приведены предельные (95%) случайные ошибки определения места судна.

Наглядное представление о точности определения места судна с помощью РНС «Декка» можно получить с помощью графиков рабочих зон-областей поверхности Земли, в пределах которых ошибка определения места не будет превосходить заданной. Рабочие зоны приведены в РТСНО.

Заметим, что ночью ошибки определения места возрастают в 3...4 раза, так как в результате воздействия пространственных радиоволн нарушается стабильность фазового поля, а это приводит к уменьшению точности измерения разности фаз и надежности устранения многозначности.

РНС «Декка», как и всякая гиперболическая система, обладает направленностью точности: наибольшая точность определений будет на нормали к базе и наименьшая – под большими (более 75°) углами к базе. Находясь на продолжении базы, получить место с использованием данной пары невозможно. Необходимо пользоваться другими парами данной цепочки РНС «Декка».

На точность определения места судна по РНС «Декка» оказывают влияние систематические ошибки, возникающие из-за несоответствия фактической скорости распространения радиоволн и скорости, принятой в расчет при составлении радионавигационных карт с сетками гипербол. Расхождение в скорости возникает из-за изменений параметров подстилающей поверхности.

Таблица 15.2

Время суток	Ошибки, кб	
	при $30^\circ < \Theta < 150^\circ$	При $\Theta = 15...30^\circ$ и $150...165^\circ$
Ночь (зимой)	1,5...3	Определение Ненадежное 4...8 1...2
Ночь (летом)	1...4	
Сумерки	0,5...2	
День	Меньше 0,25...0,5	

Местные отклонения в скорости распространения радиоволн определяют экспериментальным путем и учитывают в виде поправок к отсчетам фазометра, публикуемых в руководствах по использованию РНС Г «Декка». Поправки даны в сотых долях фазового цикла в таблицах или на картах-схемах. Поправки действительны только для того места, где они показаны на картах, и достигают наибольших значений вблизи берега. Например, при определении места по юго-западной английской цепочке (В) южнее мыса Лизард (см. рис. 15.4) надо вводить поправки к отсчетам фазометра: красному +0,22; фиолетовому +0,35; зеленому -0,05.

Следует помнить, что вблизи берега, при отсутствии поправок, возможно появление систематических ошибок.

Поправки на скорость распространения радиоволн не превышают 0,2...0,4 ширины дорожки и, как правило, являются наибольшими для фиолетовых сеток. Поправки следует учитывать при плавании вблизи берегов и в узкостях.

Как видно, место судна с помощью РНС «Декка» определяется с высокой точностью и практически непрерывно. В этом основное достоинство РНС «Декка». Недостатками системы являются большая многозначность и ненадежность ее устранения на больших расстояниях.

Место судна определяется на расстояниях 250...300 миль. На Ц больших расстояниях обсервация нецелесообразна, так как гиперболы пересекаются под очень острыми углами (меньше 15°), что приводит к большим ошибкам в определении места.

15.3. Определение маневренных элементов судна с помощью фазовых РНС

РНС «Декка» и другие фазовые РНС позволяют определять скорость, поправку лага, циркуляцию и тормозные пути. Для этого используются радионавигационные полигоны. Они представляют собой небольшие участки моря (5х6 миль) в районе действия определенной цепочки РНС «Декка» с рассчитанными для них крупномасштабными планшетами в проекции Меркатора, на которых нанесены сетки гипербол (рис. 15.7). Радионавигационные полигоны располагаются, как правило, в открытом море в местах, где достаточно большие глубины и практически отсутствует течение.

При определении скорости судна и поправки лага используется свойство гипербол сохранять в пределах ограниченного участка взаимную параллельность: в пределах радионавигационного полигона при смещении вдоль гиперболы на 250...500м ширина точной дорожки изменяется, как правило, в пределах 1...2 м.

Расстояние между гиперболами — границами дорожек — известно с высокой точностью и указано на планшете.

Пересекая гиперболы одного из семейств изолиний в пределах полосы 250...500м, судно использует рассчитанную аналитически ширину нескольких дорожек в качестве мерной линии, а пересекаемые гиперболы — в качестве секущих створов.

Отклонение курса от нормали к направлению секущих гипербол в пределах $\pm 3^\circ$ не сказывается практически на точности определения скорости и поправки лага. Точность определения скорости и поправки лага зависит при указанных условиях от инструментальной погрешности приемоиндикатора (0,01...0,02 ширины дорожки, или 5...10м). Систематические погрешности РНС практически постоянны в пределах района измерений. Они входят в начальный и конечный отсчеты разности фаз и поэтому на точность испытаний не влияют.

Чтобы исключить влияние ветра и течения при определении скорости судна и поправки лага, выполняют два-три пробега на противоположных курсах.

Для получения V с ошибкой не более 0,5% длина пробега должна быть не менее 2 миль, что соответствует ширине 4...5 дорожек. При этом отсчет лага нужно замечать с точностью до $\pm 0,002$ мили, время — ± 1 с, отсчет фазометра — $\pm 0,02$ фазового цикла.

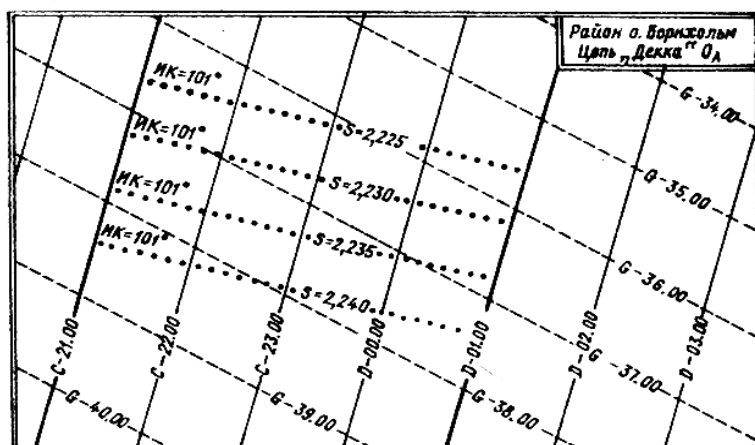


Рис. 15.7

После выполнения пробегов на радионавигационном полигоне рассчитывают скорости и поправки лага на каждом пробеге и их средние значений по формулам, приведенным в гл. 2.

Радионавигационные полигоны являются удобным местом и для определения циркуляции. При этом получают основные элементы циркуляции ($D_{ц}$, T_{180}) и формулу кривой циркуляции, что особенно важно для крупнотоннажных судов, у которых кривая циркуляции значительно отличается от окружности.

Для определения циркуляции следуют в начальную точку полигона с заданной скоростью. В момент прихода в эту точку начинают поворот, включают секундомер и замечают отсчеты двух-трех фазометров. Во время поворота через каждые 10 с замечают отсчеты этих фазометров и курс судна.

По отсчетам фазометров на планшет наносят все точки и проводят через них кривую. Нанеся у каждой точки отрезок линии курса и длину судна (в масштабе планшета), получают угол дрейфа на циркуляции и ширину полосы воды, занимаемую судном во время поворота. Преимуществом метода является возможность определения скорости, поправки лага и маневренных элементов судна на переходе при любых условиях видимости с минимальными затратами эксплуатационного времени.

15.4. Определение места с помощью импульсно-фазовых РНС

На отечественных судах широко применяются импульсно-фазовая РНС «Лоран-С» (США) и «Чайка» (Россия). Ведутся работы по объединению в северной части Тихого океана цепей РНС «Лоран-С» и «Чайка» в общую цепь.

Принцип действия. В основе работы РНС «Лоран-С» и «Чайки» лежат импульсный и фазовый методы измерения разности расстояний. Фазовый метод был рассмотрен в 15.2, а сущность импульсного метода заключается в следующем.

В точке приема (на судне) измеряют интервал времени $\Delta t = t_1 - t_2$ между моментами прихода двух коротких импульсов, посылаемых двумя береговыми станциями. Одна из станций (А) является ведущей ($B_{\text{ш}}$), другая (В) – ведомой ($B_{\text{м}}$) (см. рис. 15.2). Разность расстояний ΔD от места судна К до радиостанций находят по формуле

$$\Delta D = D_1 - D_2 = v \Delta t \quad (15.7)$$

где v – скорость распространения радиоволн.

Величину Δt определяют с помощью судового приемоиндикатора

Одной и той же разности расстояний ΔD соответствуют две изолинии (II и $I'I'$ на рис. 15.2), так как гипербола является кривой, симметричной относительно мнимой оси.

Для исключения этой неопределенности и возможности распознавания импульсов на экране индикатора одна из станций – ведомая В – передает сигналы с постоянным запаздыванием, достаточным для прохождения синхронизирующим сигналом от ведущей станции А длины базы $AB = b$ и срабатывания электрических цепей станции В. Поэтому в любую точку пространства импульсы ведущей станции будут приходить раньше, чем импульсы ведомой.

Обозначив постоянную задержку через t_s , получим формулу (15.7) в таком виде: $\Delta D = v(\Delta t - t_s)$.

Постоянная задержка представляет собой сумму следующих слагаемых:

$$t_s = t_b + t_k \quad (15.8)$$

где $t_b = b/v$ – интервал времени для прохождения синхронизирующим сигналом длины базы; t_k – кодовая задержка.

Каждому значению Δt будет соответствовать вполне определенная и только одна гипербола.

Для точки K_1 (см. рис. 15.2), находящейся на продолжении базы со стороны ведомой станции, промежуток времени между моментами прихода импульсов ведомой и ведущей станций

$$\Delta t_1 = \left(t_b + t_k + \frac{BK_1}{v} \right) - \left(t_b + \frac{BK_1}{v} \right) = t_k$$

Для точки K_2 , находящейся на нормали к середине базы, этот промежуток

$$\Delta t_2 = \left(t_b + t_k + \frac{BK_2}{v} \right) - \frac{AK_2}{v}$$

Так как $BK_2 = AK_2$, то $\Delta t_2 = t_b + t_k = t_s$.

Для точки K_3 , находящейся на продолжении базы со стороны ведущей станции, промежуток времени

$$\Delta t_3 = \left(t_b + t_k + t_b + \frac{AK_3}{v} \right) - \frac{AK_3}{v} = 2t_b + t_k$$

Таким образом, благодаря введению постоянной задержки в излучение сигналов ведомой станцией промежуток времени между моментами прихода импульсов для каждой гиперболы будет вполне определенным. Величина Δt изменяется от $\Delta t_{MIN} = t_k$ со стороны ведомой станции, до $\Delta t_{MAX} = 2t_b + t_k$ со стороны ведущей станции.

Место судна будет находиться в точке пересечения двух гипербол. Вторая гипербола получается по второй паре станций.

В чистом виде импульсный метод применялся в РНС «Лоран-А» (их широко применяли до 1980 г., сейчас они остались только у берегов Японии и Китая).

Отличие РНС «Лоран-С» от РНС «Лоран-А» в том, что она является импульсно-фазовой и работает на более низких частотах ($f = 100$ кГц). Радиоволны, соответствующие этой частоте ($\lambda = 3000$ м), хорошо распространяются вдоль земной поверхности; в ней используются базы большей длины (500...700 миль), что позволяет обслужить обширный район одной цепочкой РНС.

Работа РНС «Лоран-С» основана на измерении промежутка времени между моментами прихода импульсов от ведущей и ведомой станций (как в РНС «Лоран-А») и на измерении разности фаз высокочастотных колебаний, заполняющих импульс (как в РНС «Декка»). Благодаря этому может быть достигнута высокая точность определения места даже на очень больших расстояниях, так как фазовый метод измерения разности расстояний во много раз точнее, чем импульсный. Таким образом, в РНС «Лоран-С» используются два метода измерения разности расстояний: импульсный — для «грубого» определения места судна и устранения многозначности в отсчете и фазовый — для определения линии положения с высокой точностью.

Рассмотрим измерение интервала времени между моментами прихода сигналов импульсно-фазовым методом и особенности работы РНС «Лоран-С». Для этого обратимся к рис.15.2, на котором А — ведущая станция, В — ведомая. Измерив в точке К интервал времени между моментами прихода импульсов от этих станций, можно получить разность расстояний ΔD и найти гиперболу.

Так как ведомая станция В работает с постоянным запаздыванием $t_s = t_b + t_k$, то измеренный интервал времени

$$\Delta t_u = \frac{1}{v} (D_1 - D_2) + t_b + t_k \quad (15.9)$$

Разность Δt_u измеряется импульсным методом с невысокой точностью (грубо).

Более точно Δt_H может быть измерена фазовым методом – путем измерения разности фаз между колебаниями, заполняющими импульсы:

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{T} (t_1 - t_2) = \frac{2\pi}{T} \Delta t_H \quad (15.10)$$

где T – период несущих колебаний

Из формулы (15.10) видно, что временное запаздывание связано с разностью фаз колебаний соотношением

$$\Delta t_H = \frac{\Delta \Phi}{2\pi} T \quad (15.11)$$

Так как фазовые измерения однозначны только в пределах одного периода, то выражение (15.11) можно написать в виде

$$\Delta t_H = NT + t_\phi$$

где N – целое число периодов T несущих колебаний, неизвестное из фазовых измерений; t_ϕ – доля периода T , которая может быть измерена ($t_\phi < T$).

Дробная часть t_ϕ периода T измеряется с некоторой погрешностью (δt_ϕ , поэтому

$$\Delta t_H = NT + t_\phi + \delta t_\phi \quad (15.12)$$

Для устранения многозначности фазовых измерений параметра Δt_H , т.е. определения числа N , необходимы дополнительные измерения в РНС «Лоран-С» – это измерение Δt_H импульсным методом, т.е. по огибающей радиоимпульсов.

Измеряя Δt_H импульсным методом, получим

$$\Delta t_H = \Delta t_0 + \delta t_0 \quad (15.13)$$

где Δt_0 – отсчет интервала времени; δt_0 – погрешность измерения. Решая совместно уравнения (15.12) и (15.13), найдем неизвестное число:

$$N = \frac{\Delta t_0 - \Delta t_\phi}{T} + \frac{\delta t_0 - \delta t_\phi}{T} \quad (15.14)$$

Целое число N определяется однозначно, если погрешность измерения (второе слагаемое) будет меньше $\pm T/2$.

Таким образом, условие однозначности выражается так:

$$\delta t_0 - \delta t_\phi < \frac{T}{2} \quad (15.15)$$

Погрешность фазовых измерений δt_ϕ обычно бывает значительно меньше погрешности импульсных измерений δt_0 , поэтому условие (15.15) однозначности можно переписать в виде

$$\delta t_0 < \frac{T}{2} \quad (15.16)$$

Таким образом, для устранения многозначности фазовых измерений в РНС «Лоран-С» погрешность измерения параметра импульсным методом (по огибающим радиоимпульсов) не должна превышать половины периода несущих колебаний.

Для РНС «Лоран-С» $T = 10$ мкс ($f = 100$ кГц), и поэтому $\delta t_0 < 5$ мкс.

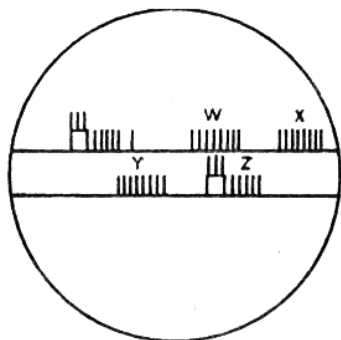


Рис. 15.8

Совместное решение уравнений (15.12) и (15.13) в современных приемоиндикаторах осуществляется автоматически с помощью схем слежения за особой точкой огибающих и периодом несущих колебаний, соответствующим этой особой точке.

Каждая следящая схема (импульсная и фазовая) связана со своим счетчиком. Импульсный счетчик дает «грубые» отсчеты навигационного параметра: N — число целых периодов T несущих колебаний, а фазовый — точные отсчеты периода T (до сотой доли).

Место судна находят как точку пересечения двух-трех гипербол.

Цепочка РНС «Лоран-С» состоит из одной ведущей станции и трех-четырех ведомых станций, расположенных в одном районе. Ведомые станции обозначаются буквами W, X, Y, Z (рис. 15.8). Береговые станции работают непрерывно на одной и той же несущей частоте и никаких позывных не излучают. Ведущая станция периодически, со строго синхронизированной частотой, излучает сигналы. Ведомые станции принимают сигналы ведущей, синхронизируют по ним с высокой точностью свои задающие генераторы и с некоторой вполне определенной задержкой излучают сигналы. Сигналы ведущей и всех ведомых станций принимаются на судне с помощью специального приемоиндикатора. Схематичное расположение сигналов цепочки РНС «Лоран-С» показано на рис. 15.9.

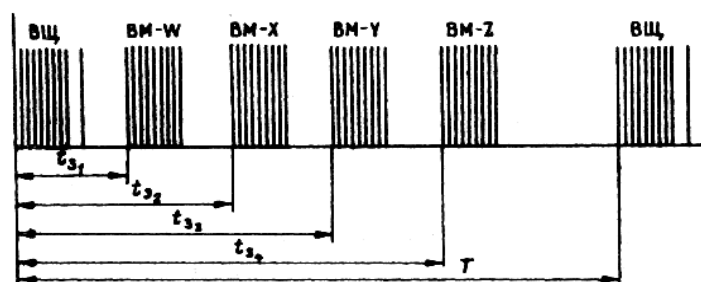


Рис. 15.9

Радиоимпульсы ведомых станций цепочки опознают визуально по их расположению на развертке электронно-лучевой трубки⁶, которое зависит от кодовых задержек.

Сигнал ведомой станции представляет собой группу (пакет) из восьми импульсов длительностью по 135 мкс с промежутками между началами импульсов в 1000 мкс. При излучении восьми импульсов общая мощность сигнала увеличивается в 4 раза по сравнению с мощностью одного импульса, что значительно увеличивает дальность действия РНС.

Ведущая станция излучает дополнительно к восьми еще один импульс, отстоящий от группы на 2000 мкс и хорошо заметный на экране индикатора. По этому дополнительному импульсу сигнал ведущей станции легко визуально опознать на экране среди всех остальных.

Благодаря большой дальности действия РНС «Лоран-С» ее цепочки расположены на больших расстояниях друг от друга и не создают значительных взаимных помех. Это позволяет использовать для всех цепочек одну несущую частоту – 100 кГц. Чтобы исключить взаимные помехи и опознать сигналы разных цепочек, в районах, где возможен прием двух-трех цепочек, их сигналы различаются между собой частотой повторения (периодом следования) импульсов. Все частоты повторения связаны в шесть групп, обозначаемых буквенным шифром (табл. 15.3).

Условное обозначение каждой пары станций РНС «Лоран-С» состоит из первых четырех цифр периода повторения импульсов и буквенного обозначения пары станций. Например, из обозначения 7990-X видно, что данная пара станций работает с периодом повторения импульсов 79900 мкс и что она обозначается буквой X. Это пара X средиземноморской цепочки. Наряду с этим используют старые буквенно-цифровые обозначения (например, SLI-X).

Такие же обозначения гиперболы соответствующих пар имеют на картах и в таблицах.

Методы получения места. После приема сигналов РНС «Лоран-С» место судна может быть получено либо с помощью радионавигационных карт, либо с помощью специальных таблиц. В последнее время стали также применять автоматические ПИ, преобразующие гиперболические координаты в географические. Автоматические приемоиндикаторы значительно облегчают работу штурмана.

Радионавигационные карты РНС «Лоран-С» представляют собой карты в меркаторской проекции с нанесенными на них сетками гипербол пар станций, сигналы которых принимаются в районе, охватываемом картой. Гиперболы оцифрованы в микросекундах и проведены через 50, 100 мкс, в зависимости от масштаба карты.

⁶ Имеются ПИ без электронно-лучевой трубки.

Обсервованное место находят как точку пересечения гипербол, соответствующих измеренным значениям промежутка времени. При необходимости гиперболы следует находить с помощью интерполяции, применяя для этого линейку с равномерной шкалой или интерполяционную сетку. Обсервованное место с радионавигационной карты переносят на путевую карту.

Если приемоиндикатор РНС «Лоран-С» одноканальный, то сигналы пар станций РНС «Лоран-С» принимаются одновременно. В этом случае необходимо первую линию положения привести к месту взятия второй, передвинув ее по курсу на расстояние, пройденное за время между наблюдениями.

Чтобы уменьшить влияние неодновременности наблюдения сигналов различных пар, следует сначала определить сигналы той пары, гипербола которой составляет более острый угол с курсом судна.

Сигнал от радиостанции до места судна может прийти вдоль поверхности Земли (поверхностная волна) или – на больших расстояниях – после отражения от ионосферы – слоя Е (пространственная волна). Разности расстояний для одной и той же точки, полученные по расстояниям вдоль поверхности Земли или по расстояниям с учетом отражения радиоволн, будут несколько отличаться друг от друга.

Гиперболы наносят на карты в соответствии с величинами навигационного параметра (разности расстояний), рассчитанного для приема сигналов на поверхностных волнах.

Таблица 15.3

Группа частот	Период повторения	Формула для вычисления периода повторения рекуррентной частоты
<i>S</i>	50000	$(500 - N) 100$
<i>SH</i>	60000	$(600 - N) 100$
<i>SHL</i>	70000	$(700 - N) 100$
<i>SL</i>	80000	$(800 - N) 100$
<i>SLS</i>	90000	$(900 - N) 100$
<i>SS</i>	100000	$(1000 - N) 100$

При приеме сигналов на пространственной волне отсчет промежутка времени, снятый с приемоиндикатора, должен быть исправлен поправкой за разность хода поверхностных и пространственных радиоволн. Поправки заранее рассчитывают и указывают на радионавигационной карте в точках пересечения координатных линий.

Дневные поправки обозначают буквой D , ночные поправки – буквой N . Дневные поправки всегда меньше ночных. Возможны три типа поправок:

SS – оба сигнала принимаются на пространственных волнах;

GS – сигнал ведущей – на поверхностной волне, сигнал ведомой – на пространственной;

SG – сигнал ведущей – на пространственной волне, ведомой – на поверхностной.

При исправлении отсчетов необходимо учитывать:

форму сигнала на экране индикатора (на второй скорости развертки сигнал имеет форму правильной синусоиды, если принимается на поверхностных волнах, и искаженной синусоиды, если принимается на пространственных волнах);

время суток (ночью на расстоянии более 1000 миль наиболее вероятно распространение сигнала на пространственных волнах);

расстояние от станций (на расстоянии более 1000 миль сигнал может приниматься на пространственных волнах);

навязки между обсервованным местом и счислимым местом (слишком большая невязка, превышающая в два раза возможную погрешность счисления).

Рассмотрим способ получения места судна по сигналам РНС «Лоран-С» с помощью таблиц содержащих координаты точек пересечения гипербол с определенными меридианами и параллелями. Способ состоит в следующем (рис. 15.10). Изолиния, соответствующая измеренному значению навигационного параметра, проходит в районе счислимого места судна C . Для получения места судна нет необходимости строить на карте всю изолинию – гиперболу. Достаточно построить часть ее, проходящую около счислимого места.

Зададимся двумя круглыми значениями долготы $\lambda_1 < \lambda_C < \lambda_2$, пересекающими изолинию в точках K_1 и K_2 , и найдем широты φ_1 и φ_2 этих точек. Имея координаты двух точек, можно нанести их на путевую карту и провести через них прямую линию – хорду, которая и будет являться линией положения, заменяющей изолинию около счислимого места судна. Аналогично находят линию положения для второй гиперболы и получают место судна в точке пересечения двух линий положения.

Если гипербола составляет с меридианом угол более 45° (этот случай показан на рис. 15.10), то для нахождения координат вспомогательных точек K_1 и K_2 целесообразнее задаться долготами и вычислять широты. Если гипербола составляет с меридианом угол менее 45° , то лучше задаться широтами и вычислять долготы. В противном случае в вычисляемых координатах точек K_1 и K_2 могут иметь место большие погрешности (из-за острого угла пересечения с выбранными координатными линиями). Кроме того, вспомогательные точки могут оказаться за пределами карты.

Чтобы избавить штурмана от трудоемких расчетов на мостике, необходимые вычисления выполняют заранее. Координаты точек гипербол определенных пар станций публикуются в таблицах, позволяющих найти место судна при помощи РНС «Лоран-С».

Таблицы, так же как и карты, составляют для случая приема сигналов на поверхностных волнах. При приеме сигналов и измерении промежутка времени на пространственных волнах отсчет должен быть исправлен поправкой за разность хода поверхностных и пространственных волн.

Эту поправку выбирают из специальной таблицы, помещенной перед таблицами координат точек гипербол. Аргументами для входа в таблицы поправок служат счислимые координаты места судна.

Сравнив рассмотренные способы получения места судна по сигналам РНС «Лоран-С», определим, что место судна с помощью радионавигационных карт можно получить быстрее, чем с помощью таблиц. Хотя таблицы позволяют найти место сразу же на путевой карте.

При использовании автоматических ПИ для определения места судна по РНС «Лоран-С» полученные обсервованные координаты могут отличаться от таких же координат, найденных по измеренным значениям радионавигационных параметров на радионавигационной карте.

Причинами этого расхождения могут быть: расхождение геодезической основы приемоиндикатора и карты; ошибки местных геодезических съемок; отклонение скорости распространения радиоволн, принятой при расчете места в приемоиндикаторе, от скорости, принятой при составлении радионавигационной карты.

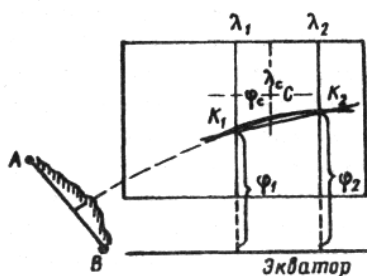


Рис. 15.10

Точность определения места. При определении места по РНС «Лоран-С» обычно используют две гиперболы. Поэтому погрешность определения места судна может быть рассчитана по формуле (8.12), из которой видно, что точность определения места зависит от погрешностей определения навигационного параметра и геометрического фактора (угла пересечения линий положения и базовых углов).

Рассмотрим эти погрешности. Навигационным параметром в «Лоран-С» является разность расстояний, определяемая по (15.7). Из нее получаем

$$m_{\Delta D} = v m_{\Delta t} \quad (15.17)$$

где $m_{\Delta t}$ – средняя квадратичная ошибка измерения интервала времени между моментами прихода импульсов от ведущей и ведомой станций.

Точность измерения интервала времени определяется погрешностью синхронизации ведомых станций ($\pm 0,03$ мкс); инструментальной погрешностью ПИ ($\pm 0,05$ мкс); погрешностью отсчета интервала времени по шкале ($\pm 0,1$ мкс); погрешностью за условия распространения радиоволн (она имеет величину 2...3 мкс и более). Как видно, погрешность за условия распространения радиоволн оказывает наибольшее влияние на точность измерения интервала времени.

Точность существенно зависит от ПИ и метода, который применяется при измерении радионавигационного параметра.

С помощью исследований было установлено, что при приеме сигналов на поверхностных волнах с фиксацией фазы в ПИ суммарная средняя квадратичная погрешность $m_{\Delta t}$ измерения интервала времени равна 0,4...0,5 мкс на расстояниях до 800...1000 миль, при приеме сигналов на пространственных волнах – 2...3 мкс на расстояниях более 1500...1800 миль от станций.

Приемоиндикаторы РНС «Лоран-С» обычно хорошо работают при отношении сигнал/шум, равном 1/3 или даже 1/10. Однако при меньшем отношении сигнал/шум точность ухудшается.

При измерении интервала времени только импульсным методом, т. е. по огибающей радиоимпульса, на поверхностных волнах получаем $m_{\Delta t} = 2...3$ мкс, на пространственных волнах $m_{\Delta t} = 4...5$ мкс и более. Используя приведенные выше значения $m_{\Delta t}$, получаем по формуле (15.17) следующие средние квадратичные погрешности измерения интервала времени импульсно-фазовым методом:

на поверхностных волнах $m_{\Delta D} = 120...150$ м,

на пространственных волнах $m_{\Delta D} = 600...900$ м.

Радиальная средняя квадратичная погрешность определения места, вычисленная по формуле (15.6) при условии

$$\gamma_1 = \gamma_2 = 60^\circ; \Theta = 60^\circ; \eta = 1.64$$

оказывается равной: на поверхностных волнах

$$M = 1.64(120...150) = 197...246 \text{ м} \approx 0.8...1.3 \text{ км}$$

на пространственных волнах

$$M = 1.64(600...900) = 984...1476 \text{ м} \approx 5...8 \text{ км}$$

(при отсутствии систематических погрешностей из-за неверного определения типа поправки за пространственные волны).

Этот пример показывает потенциальную точность РНС «Лоран-С». На границах рабочей зоны геометрический фактор η будет в несколько раз больше, во столько же раз возрастет погрешность обсервации.

Практика показывает, что обычно погрешности определения места с помощью РНС «Лоран-С» с вероятностью 0,95 составляют 0,2...0,3 мили днем на поверхностных волнах при благоприятных условиях и 0,5.. .1,0 мили ночью на предельных расстояниях.

При измерении интервала времени только импульсным методом погрешности возрастают до 2...3 миль.

РНС «Лоран-С» как система гиперболическая обладает направленностью точности, т. е. точность определения места зависит от направления на судно относительно нормали к базе, уменьшаясь с увеличением этого угла.

В судовых условиях пользоваться классической формулой (8.12) для оценки точности обсерваций затруднительно.

Удобнее применять формулу (15.6), получая необходимую геометрическую информацию с карты:

$$M = \frac{m_{\Delta t}}{\sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{d_1}{\Delta T_1}\right)^2 + \left(\frac{d_2}{\Delta T_2}\right)^2}$$

Пример. Определили место по РНС «Лоран-С». Погрешность измерения промежутка времени $m_{\Delta t} = 0,3$ мкс. С карты расстояние между оцифрованными гиперболами $d_1 = d_2 = 5$ миль; разность оцифровки $\Delta T_1 = \Delta T_2 = 10$ мкс; $\Theta = 30^\circ$. Найти M (в милях). Решение:

$$M = (0.3 / 0.5) \sqrt{(5 / 10)^2 + (5 / 10)^2} = 0.4$$

Выше были рассмотрены случайные погрешности в определении места судна.

При приеме сигналов на пространственных волнах одновременно со случайными ошибками могут иметь место систематические погрешности в измерении интервала времени. Их возникновение объясняется следующими причинами:

указанная на карте величина поправки не соответствует фактическому ее значению из-за изменения высоты отражающего слоя (изменение может достигать 5...10 мкс);

судоводитель пользуется неверным типом поправки из-за того, что на экране индикатора трудно, а часто просто невозможно определить, на каких волнах пришли сигналы (SS , GS , SG). Индикация типа сигнала в ПИ РНС «Лоран-С» отсутствует. Поэтому определение места судна по пространственным волнам в общем случае нецелесообразно, так как можно получить значительные погрешности.

15.5. Определение места с помощью сверхдлинноволновой фазовой РНС

На некоторых судах морского флота применяется фазовая гиперболическая РНС «Омега». Эта РНС предназначена для определения места судна в любой точке Мирового океана, т. е. является глобальной.

В состав РНС «Омега» входят 8 береговых станций (рис. 15.11). Все станции работают на одних и тех же частотах в определенной временной последовательности, т. е. в РНС применена временная селекция сигналов. В РНС «Омега» используются сверхдлинные волны-(СДВ) $\lambda=22...30$ км ($f=10...14$ кГц). Радиоволны этого диапазона стабильно распространяются на большие расстояния (свыше 5000 миль), они мало поглощаются в нижних слоях атмосферы и хорошо проникают под воду на глубину 10...30м, что позволяет использовать РНС для определения места подводных лодок. Длина баз достигает 5000...6000 миль.

Работа РНС «Омега» основана на измерении в точке приема разности фаз радиоколечаний одинаковой частоты, пришедших от двух береговых станций.

В судовом приемоиндикаторе осуществляется запоминание фазы колебаний, принятых раньше, на время приема колебаний от другой станции.

Измерив разность фаз $\Delta\Phi$ между этими колебаниями, определяют разность расстояний ΔD по формуле (15.3а), где $\lambda_m = \lambda_0$ – длина волны, соответствующая частоте f_0 , на которой происходят измерения разности фаз.

По разности расстояний ΔD можно получить изолинию – гиперболу. Измерив разность фаз сигналов других пар станций, получают две и более гиперболы и место судна в точке их пересечения.

В любом районе земного шара можно принимать сигналы по крайней мере от четырех станций РНС «Омега» и получать по ним гиперболы с углами пересечения не менее 60° .

Точная сетка гипербол создается на частоте $f_0 = 10,25$ кГц ($\lambda_0=29,4$ км). Ширина «точных» дорожек на базе в соответствии с выражением (15.4) равна

$$d_0 = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{29.4}{2} = 14.7 \text{ км} = 8 \text{ миль}$$

При больших базах, применяющихся в РНС «Омега» (до 6000 миль), имеет место большая многозначность.

Для разрешения многозначности в тех случаях, когда это нельзя сделать с помощью счисления, применяют тот же метод, что и в РНС «Декка», т.е. метод создания более широких дорожек, называемых «грубыми» или зонами. Для этого все станции в определенной временной последовательности излучают частоты $f_1 = 13,6$ кГц.

В приемоиндикаторе для каждой станции выделяется «грубая», разностная частота $f_1 - f_0 = 3,4$ кГц ($\lambda_{гр} = 88,2$ км) и на ней измеряется разность фаз для разрешения многозначности. Ширина «грубых» дорожек (зон)

$$d_{гр} = \frac{\lambda_{гр}}{2} = 44,1 \text{ км} = 24 \text{ мили}$$

Коэффициент сопряжения «точных» и «грубых» дорожек

$$K = \frac{d_{гр}}{d_0} = \frac{24}{8} = 3$$

означает, что в зоне находятся три точные дорожки. Нужную зону находят по счислению. Для этого ошибка счисления не должна превышать 12 миль.

Так как и такую точность счисления в океане не всегда можно обеспечить после длительных переходов, то в РНС «Омега» для устранения многозначности предусмотрена возможность использования еще более широких зон. Это достигается путем последовательного излучения станциями сигналов на частоте $f_2 = 11,33$ кГц и измерения в приемоиндикаторе разности фаз на разностной частоте $f_2 - f_0 = 1,13$ кГц. В этом случае создаются зоны шириной около 72 миль, что вполне достаточно для разрешения многозначности в море.

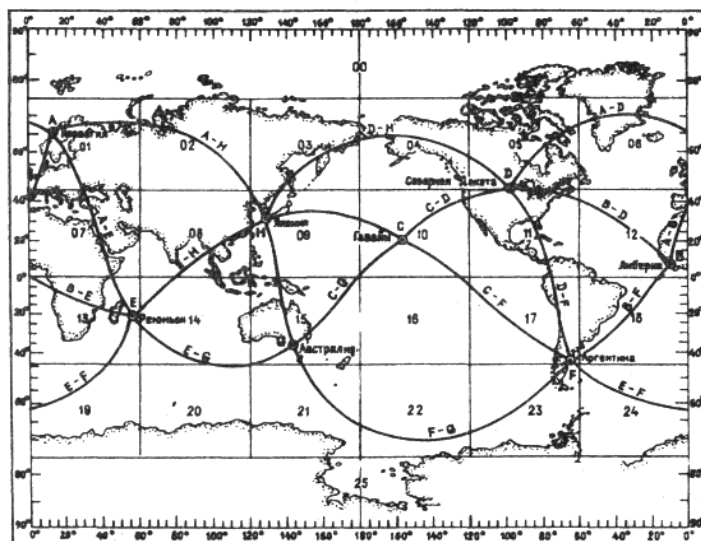


Рис. 15.11

Для разрешения многозначности в воздушной навигации станции работают также на частоте $f_3 = 11,05$ кГц это создает зоны на разностной частоте $f_2 - f_3 = 0,283$ кГц (ширина зоны 286 миль).

Таким образом, станции РНС «Омега» работают поочередно на четырех частотах: 10,25; 11,33; 13,6; 11,05 кГц. Сигналы РНС на каждой частоте представляют собой последовательность импульсных посылок радиосигналов, излучаемых поочередно каждой станцией примерно в течение 1с. Периодичность сигналов РНС – 10 с.

Временная и частотная диаграммы работы РНС «Омега» показаны на рис. 15.12. Всем станциям присвоены буквенные обозначения: А – Норвежской, В – Либерийской, С – Гавайской и т. д.

Для обозначения сигналов различных станций они имеют различную длительность и занимают разное место в десятисекундном цикле работы.

Синхронизация всех станций по фазе и времени излучения сигналов ведется относительно всемирного времени *UT-2*. Это делает все станции, находящиеся в РНС «Омега», независимыми друг от друга. Отсутствие деления станций на ведущие и ведомые является одним из существенных отличий этой системы от других фазовых РНС. Благодаря этому имеется возможность измерения разности фаз радиоколечаний любых двух станций, что значительно повышает число линий положения по сравнению с системами, имеющими ведущие станции.

Страна	Обозначение	Период передачи и частота, кГц								Период	
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2
Норвегия	А	10,2	13,6	11,33			11,05			10,2	13,6
Либерия	В		10,2	13,6	11,33			11,05			10,2
Гавайи	С			10,2	13,6	11,33			11,05		
Северная Дакота	Д	11,05			10,2	13,6	11,33			11,05	
Реюньон	Е		11,05			10,2	13,6	11,33			11,05
Аргентина	Ф			11,05			10,2	13,6	11,33		
Австралия	Q				11,05			10,2	13,6	11,33	
Япония	Н					11,05			10,2	13,6	11,33
Продолжительность передачи, с (интервал между сигналами 0,2с)		0,9	1,0	1,1	1,2	1,1	0,9	1,2	1,0		
		10									

Рис. 15.12

Для определения места судна измеряют с помощью специального приемоиндикатора разность фаз сигналов нескольких пар станций, принимающихся в данном месте. Обычно используются станции, расположенные на расстоянии до 5000...6000 миль.

Для получения места судна по измеренным значениям разности фаз применяют специальные радионавигационные карты и таблицы, содержащие координаты точек гипербол для данной пары станций. Наиболее просто место судна можно получить на радионавигационных картах. Получение места сводится к нахождению точки пересечения гипербол пар, для которых измерена разность фаз (рис. 15.13). Гиперболы имеют различный цвет и соответствуют границам дорожек на частоте $f_0 = 10,2$ кГц.

Наибольшее распространение получили мелкомасштабные карты. На этих картах оцифровываются гиперболы, номера которых кратны 3. Эти гиперболы одновременно являются границами зон, соответствующих разностной частоте 3,4 кГц. Гиперболы, кратные 9, являются границами более широких зон, соответствующих разностной частоте 1,13 кГц.

Гиперболам присваивается буквенный индекс соответствующих пар станций и трехзначный номер, получаемый по формуле

$$T = 900 + \frac{\Delta D}{\lambda_0} \quad (15.18)$$

Число 900 в формулу (15.18) введено для того, чтобы не иметь дело с отрицательными значениями разности фаз. Гиперболе, для которой $\Delta = 0$, соответствует номер 900. Очевидно, это будет нормаль к середине ее базы. Издаются и более крупномасштабные радионавигационные карты с оцифровкой гипербол через одну дорожку.

Радиоволны сверхдлинноволнового диапазона, применяющиеся в РНС «Омега», распространяются между поверхностью Земли и ионосферой, как в сферическом волноводе, испытывая многократное отражение.

Так как высота ионосферы днем меньше (70 км), чем ночью (90 км), то скорость распространения радиоволн днем больше, чем ночью.

Гиперболы на картах строят с учетом некоторой средней дневной волноводной скорости распространения радиоволн ($v = 300573,992$ км/с). Однако в реальных условиях работы РНС «Омега» скорость распространения радиоволн может отличаться (до 0,3%) от скорости, принятой при составлении карт. Поэтому отсчеты разности фаз, снятые с приемоиндикатора, всегда должны исправляться поправками за отклонение фактической скорости распространения радиоволн от средней.

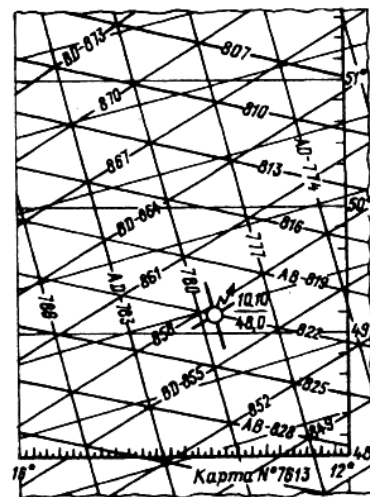


Рис. 15.13

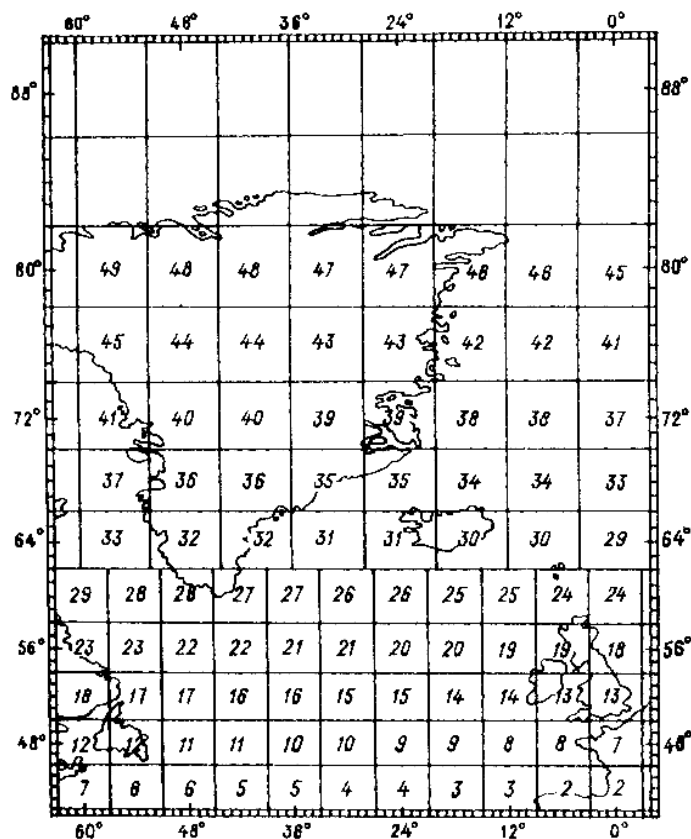


Рис. 15.14

Эти поправки зависят от многих факторов (освещенности трассы распространения, свойств подстилающей поверхности, магнитного поля Земли и др.) и достигают существенных величин. Поправки за скорость распространения радиоволн выбираются из специальных таблиц «*Omega propagation correction tables*» (for 10,2 kHz), таблицы поправок соответствующих станций составляются для 26 районов земного шара (см. рис. 15.11). В каждом районе поправки приведены для квадратов, имеющих размеры: 4...6° по широте, 6...8° по долготе. На рис.15.14 приведена карта-схема одного из таких районов (район 6 – Гренландия). Цифры в квадратах указывают страницы таблиц этого района, на которых приводятся поправки. Аргументами для входа в таблицу поправок данной станции служат $T_{гр}$ и дата. Поправки даются в сотых долях фазового цикла – сантициклах (secs). Поправка пары станций рассчитывается как разность поправок соответствующих станций:

$$\Delta_{A-B} = \Delta_A - \Delta_B$$

Таблицы поправок корректируются по Извещениям мореплавателям.

Определение места судна по трем-четырем линиям положения РНС «Омега» занимает у опытного наблюдателя 3...5 мин. Для ускорения определения места рекомендуется поправки пар станций найти заранее на весь период вахты.

Место судна на путевой карте может быть получено с помощью таблиц «*Omega tables*», содержащих координаты точек гипербол определенных пар станций. Таблицы составляют для тех же 26 районов земного шара, что и таблицы поправок (см. рис. 15.11). Для каждого района составляют несколько таблиц (4...6), соответствующих частоте $f_0 = 10,2$ кГц.

Эти же таблицы могут быть использованы для построения гиперболы при приеме других частот. Например, гипербола на $f_0 = 10,2$ кГц номер которой кратен трем, является гиперболой на $f_1 = 3,4$ кГц

Устройство таблиц и пользование ими аналогичны таблицам для РНС «Лоран-С».

Для облегчения интерполяции в таблицах приводят среднее изменение D искомой координаты в десятых долях минуты на 100 долей ф.ц (*secs*). Рекомендуется интерполяцию производить от ближайшего значения табличной разности фаз.

При отсутствии радионавигационных карт или таблиц гипербол РНС «Омега» координаты обсервованного места можно найти с помощью преобразователей координат.

С помощью РНС «Омега» возможно определение места в любой точке Мирового океана по 2...6 линиям положения. Оценка точности обсерваций при использовании только двух линий положения может производиться теми же методами, что и для вышерассмотренных гиперболических РНС.

Радиальная средняя квадратичная ошибка места может быть найдена по формуле

$$M = m_{\Delta D} \eta ; \text{ где } m_{\Delta D} = \lambda_0 m_{\Delta \phi}$$

Основная ошибка в измерении навигационного параметра вызывается суточными и сезонными вариациями фазы колебаний, которые зависят от высоты Солнца в точке наблюдений и на трассе распространения радиоволн. Днем, когда трасса полностью освещена Солнцем, средняя квадратичная ошибка $m_{\Delta \phi}$ измерения разности фаз равна порядка $\pm(0,04...0,05)$ ф.ц, ночью $\pm(0,06...0,09)$ ф.ц. Большие ошибки наблюдаются в период восхода-захода Солнца и в сумерки.

С учетом этих ошибок средние квадратичные ошибки $m_{\Delta \phi}$ определения разности расстояний по формуле (15.5а) в среднем равны днем 0,71 мили, ночью 1,19 мили.

Приняв $\gamma_1 = \gamma_2 = 60^\circ$ и $\Theta = 60^\circ$ (что имеет место для большинства районов Мирового океана), получаем днем $M = 1,2$ мили, ночью $M = 1,9$ мили.

В переходный период (между днем и ночью) ошибка измерения разности фаз возрастает и точность обсерваций будет значительно меньше.

Ошибки измерения разности фаз резко возрастают (до 0,20...0,50 ф.ц и более) при аномальных условиях распространения радиоволн. Так, например, в период высокой солнечной активности создается сильное искажение фазы в точке приема.

В полярных районах ($\varphi > 65^\circ$) СДВ могут испытывать сильное поглощение в моменты ионосферных бурь. Данный эффект возникает нерегулярно и может длиться несколько дней. О начале таких явлений судоводителей информируют в НАВАРЕА и НАВИПах.

В аномальных условиях распространения радиоволн точность обсерваций резко понижается. В такие периоды пользоваться РНС «Омега» следует с осторожностью. Распознать начало внезапных ионосферных возмущений можно, постоянно наблюдая за разностью фаз принимаемых сигналов и непрерывно их записывая с помощью самописцев.

Для повышения точности обсерваций необходимо пользоваться не менее чем тремя линиями положения.

При вычислении ошибки определения места предполагается, что измерения не коррелированы. Однако для РНС «Омега» так будет не всегда.

Если одна и та же станция используется для измерения разности фаз с двумя другими, то между ошибками измерений по двум каналам возможна корреляция, вызванная влиянием изменения условий одной и той же трассы от общей станции.

В этом случае ошибка определения места судна должна вычисляться по формуле

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{m_{\text{ЛП}1}^2 + m_{\text{ЛП}1}^2 m_{\text{ЛП}2}^2 - 2r_{xy} m_{\text{ЛП}1} m_{\text{ЛП}1} \cos \Theta} \quad (15.19)$$

где Θ — угол между градиентами; r_{xy} — коэффициент взаимной корреляции.

Величина r_{xy} для РНС «Омега» меняется в широких пределах ($0 < r_{xy} < |1|$) Однако замечены следующие закономерности:

если две пары станций не имеют общей станции (например, А - В, С - D), то $r_{xy} \approx 0$

если две пары станций имеют общую станцию, то r_{xy} тем больше, чем длиннее трасса до этой станции по отношению к другим трассам. При этом знак r_{xy} зависит от того, как входит сигнал общей станции в обе пары. Если сигнал общей станции входит с одинаковым знаком (например, А-В и А -D или А -С и D-С) , то $r_{xy} > 0$ (корреляция положительная). Если сигнал общей станции входит с разными знаками (например, А - В и В - D), то $r_{xy} < 0$ (корреляция отрицательная).

Учитывать r_{xy} при расчете М следует в случаях, когда $r_{xy} > 0,5$.

На точность определения места по РНС «Омега» значительное влияние оказывают систематические ошибки. Они могут достигать 4...5 миль и более. Основную из них вызывает неточность поправок за скорость распространения радиоволн.

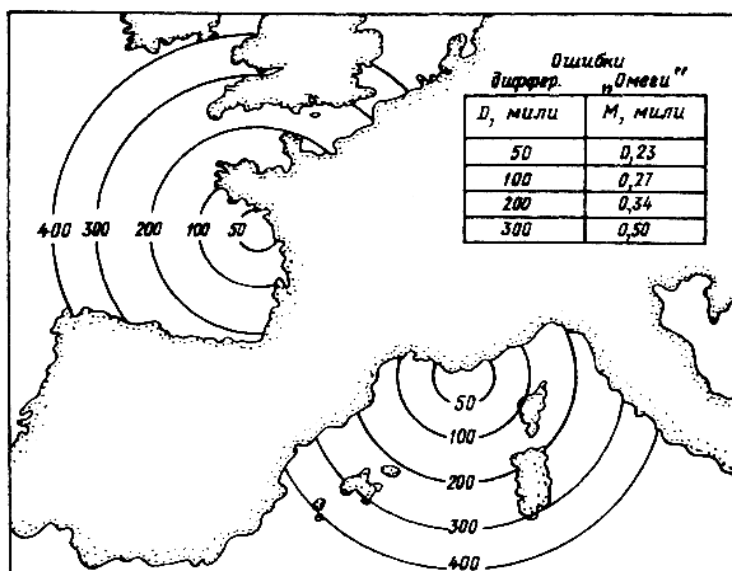


Рис. 15.15

При вычислении поправок учитывают время суток, месяц уровень солнечной активности, характер и направление трассы и т.д., задаваясь средними условиями распространения радиоволн.

Однако при определении места судна условия, определяющие скорость распространения радиоволн, могут отличаться от средних. Поэтому поправки, выбранные из таблиц могут не соответствовать действительности. Если при плавании в океане неточное значение поправок не имеет существенного значения, то этого нельзя сказать, когда судно подходит к берегу. В этих условиях на судне должно быть обеспечено оперативное определение поправок за условия распространения радиоволн. Метод определения места судна с помощью РНС «Омега», когда учитываются более точные значения поправок за условия распространения радиоволн, получил название дифференциальная или корректируемая «Омега». Поправки должны определяться с помощью контрольной станции для дифференциального района радиусом порядка 250...300 миль и оперативно передаваться на судна, входящие в этот район. Схема такого района в Бискайском заливе приведена на рис. 15.15. Точность определения места этим методом повышается до 0,2...0,4 мили.

Но для обеспечения точной навигации число контрольных станций должно быть больше, например для побережья США — 29 станции. В случае определения места по РНС «Омега» совместно с высокоточными эпизодическими наблюдениями действующие значения поправок могут быть получены непосредственно в моменты таких наблюдений, например по навигационным спутникам. Эти поправки можно применять при последующих наблюдениях. Такой метод использования РНС «Омега» получил название квазидифференциального. Однако точность этих наблюдений будет уменьшаться по мере увеличения времени после опорной спутниковой наблюдения.

Квазидифференциальный метод практически реализован в комбинированных приемоиндикаторах, принимающих сигналы СДВ РНС и спутниковой РНС. Например, в приемоиндикаторах МХ-1105 дифференциальные поправки для РНС «Омега» определяют по эпитодическим высокоточным наблюдениям спутниковой РНС «Транзит». Поправки используют в интервале между спутниковыми наблюдениями для определения места по РНС «Омега» квазидифференциальным методом.

Чем больше время счисления, тем больше ошибка наблюдения по РНС «Омега». Например, через 40 мин после наблюдения по спутниковой системе наблюдения по РНС «Омега» квазидифференциальным методом может быть получена со средней ошибкой порядка 0,5 мили, через 2ч – с ошибкой 1,5мили. При времени счисления 3...4ч ошибки стабилизируются на уровне 2 миль.

Наименьшая дальность действия сигналов станций РНС «Омега» ожидается в точке приема, расположенной к западу от станции вблизи магнитного экватора (5000...7000 миль). Это объясняется влиянием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

Сигнал также значительно ослабляется, когда трасса распространения проходит через сушу, покрытую толстым ледяным щитом. По этой причине прием сигналов в Гренландии и Антарктиде существенно хуже.

Глава 16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА СУДНА С ПОМОЩЬЮ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

16.1. Основные закономерности движения ИСЗ

Для движения ИСЗ по орбите необходимо, чтобы сила земного притяжения была скомпенсирована центробежной силой, возникающей при движении тела вокруг Земли. Это условие приводит к равенству

$$mg = m\rho_0 \omega_c^2, \quad (16.1)$$

где m – масса ИСЗ; g – ускорение свободного падения; $\rho_0 = R + H$ – радиус орбиты, т. е. расстояние от центра Земли до ИСЗ; ω – угловая скорость ИСЗ относительно центра Земли.

Так как ускорение свободного падения $g = g_0(R/p_0)^2$, угловая скорость $\omega_c = V_c/\rho_0$, то, подставив эти выражения в формулу (16.1), получим формулу для определения линейной скорости V_c движения ИСЗ по круговой орбите:

$$V_c = R \sqrt{\frac{g_0}{R + H}} \quad (16.2)$$

Используя в формуле (16.2) соотношение $H/R = K$ и подставив $R = 6371$ км; $g_0 = 9,81$ м/с², получим

$$V_1 = V_c = \frac{7.91}{\sqrt{1 + K}} \text{ км / с} \quad (16.3)$$

Скорость, при которой начинается движение ИСЗ по окружности вокруг Земли, называется круговой или первой космической скоростью. При $H=0$ она равна $V_1 = V_c = 7,91$ км/с.

Период обращения спутника, т. е. время одного его оборота вокруг Земли по круговой орбите радиуса ρ_0 ,

$$T = \frac{2\pi\rho_0}{V_1} \quad (16.4)$$



Рис. 16.1

Значения V_2 и T для круговых орбит с разной высотой H показаны в табл. 16.1. ИСЗ спутниковых РНС, нашедших применение на судах морского флота, двигаются по орбитам с высотой порядка 1000 км (в РНС «Цикада» – 1090...1100 км).

Большое значение для практического использования имеют спутники с таким периодом обращения T , при котором они за время звездных суток делают целое число оборотов вокруг Земли.

Эти спутники называются периодическими или синхронными. Они пролетают над заданными районами Земли ежедневно в одно и то же время.

Синхронный спутник на орбите с высотой $H = 35\,870$ км имеет $T = 24$ ч (точнее – 23 ч 56 мин 4с – одни звездные сутки) и называется суточным. Такие спутники нашли применение в системах связи и телевидения.

Однако ИСЗ двигаются по круговой орбите только в частном случае. В общем случае орбита ИСЗ является эллиптической, имеющей большую a и малую b полуоси. Ближайшая к центру Земли точка орбиты называется перигеем P (на рис. 16.1), наиболее удаленная – апогеем A .

Эллиптическую орбиту характеризуют 6 элементов Кеплера: наклонение i плоскости орбиты плоскости экватора; прямое восхождение Ω восходящего узла орбиты; угловое расстояние ω перигея от восходящего узла орбиты N_1 ,

$$\text{Эксцентриситет орбиты } e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \frac{H_a - H_b}{2a}$$

$$\text{Параметр орбиты } p = \frac{b^2}{a}$$

время τ прохождения спутника через перигей или восходящий узел.

Первые пять элементов характеризуют пространственное положение орбиты ИСЗ и направление его движения, шестой – положение спутника на орбите.

Таблица 16.1

Н, км	0	250	1000	20,240	35,870
Т, мин	84	89	106	12ч.	24ч.
V_1 , км/с	7,91	7,76	7,35	3,87	3,07

Для определения места судна необходимо знать координаты спутника в момент наблюдений. Исходными величинами для расчетов являются приведенные выше параметры орбиты.

Реальная орбита спутника отличается от кеплеровской, во-первых, из-за того, что реальная форма Земли (геоид) отлична от шара, и, во-вторых, из-за влияния на спутник различных возмущающих сил, таких как сопротивление земной атмосферы, притяжение Луны и Солнца, давление солнечной радиации, взаимодействие спутника с магнитным полем Земли. Поэтому кеплеровские элементы непрерывно меняются, что необходимо учитывать при расчете места ИСЗ. В связи с этим всем судам, использующим ИСЗ для определения места, должны сообщаться не только начальные параметры Кеплера, соответствующие какому-то моменту времени, но и периодически обновляемые поправки к ним. Все эти данные получили общее название орбитальной информации.

В действующих спутниковых РНС орбитальная информация считывается из запоминающего устройства спутника и используется для фазовой манипуляции несущих частот, на которых передаются сигналы от спутника.

Время существования спутника зависит от высоты орбиты, массы, размеров спутника, в частности от диаметра его поперечного сечения.

Например, спутник радионавигационной системы «Транзит» (масса 170 кг, $H = 1075$ км) может существовать несколько десятков лет.

16.2. Орбиты ИСЗ и их особенности

Орбитой спутника называется траектория его движения относительно центра Земли. Плоскость орбиты всегда проходит через центр Земли.

Особенности и методы использования ИСЗ для целей навигации и связи в значительной степени зависят от того, на какую орбиту они запущены.

Орбиты ИСЗ классифицируются по двум признакам: в зависимости от наклонения i плоскости орбиты относительно плоскости экватора и в зависимости от высоты H орбиты над земной поверхностью. По первому признаку орбиты подразделяются на

экваториальные ($i = 0^\circ$ или 180°),
полярные ($i = 90^\circ$)
и наклонные ($0^\circ < i < 90^\circ$; $90^\circ < i < 180^\circ$);

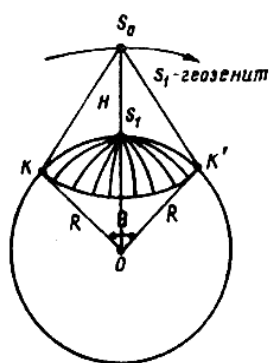


Рис. 16.2

по второму - на
низкие ($H < 5000$ км),
средние ($5000 < H < 22\,000$ км),
высокие ($H > 22\,000$ км).

Среди последних выделяются синхронные орбиты с $H = 35\,870$ км. Синхронный суточный спутник, выведенный на экваториальную орбиту, будет неподвижно «висеть» над определенной точкой земной поверхности. Такой спутник получил название стационарного. Если $i \neq 0$, то синхронный ИСЗ будет периодически смещаться в меридиональном направлении, захватывая северную и южную полярные области (квазистационарным ИСЗ).

Малый круг, в пределах которого могут приниматься радиосигналы спутника S_0 , называется зоной радиовидимости (рис. 16.2). Сферический диаметр Θ этой зоны определяется по формуле

$$\sec \frac{\Theta}{2} = 1 + \frac{H}{R} \quad (16.5)$$

Для стационарного ИСЗ при $H = 35\,870$ км; $R = 6371$ км диаметр зоны видимости $\Theta \approx 162^\circ$. Это означает, что стационарный ИСЗ будет теоретически видим в Северном и Южном полушариях до широты $\varphi = 81^\circ$ N (S) (рис. 16.3).

Для надежного приема сигналов необходимо, чтобы ИСЗ имели высоту не менее 10° над горизонтом. Это требование вызвано тем, что при малой высоте спутника будут наблюдаться высокий уровень помех и большое затухание радиоволн в атмосфере. Поэтому границы зоны радиовидимости несколько сужаются (до $\varphi = 71^\circ$). На рис. 16.4 показаны области, в пределах которых наблюдатель «видит» спутник с $h > 10^\circ$ над горизонтом.

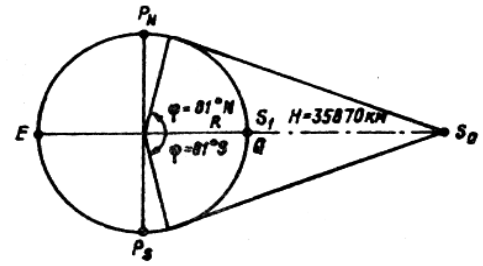


Рис. 16.3

Стационарные ИСЗ пока не нашли применения в навигации, но широко используются для связи и телевидения. Например, для обеспечения глобальной радиосвязи на стационарную орбиту выводят три ИСЗ [международная система связи INMARSAT (см.рис. 16.4), применяющаяся с 1982 г. на судах морского флота].

Для низкоорбитального ИСЗ ($H = 1000$ км; $R = 6371$ км) по формуле (16.5) получаем диаметр зоны видимости

$$\Theta \approx 60,5^\circ = 3630 \text{ миль.}$$

При условии наблюдения спутника на высоте более 10° , что необходимо для более точного определения места, получаем диаметр зоны видимости

$$\Theta \approx 50^\circ = 3000 \text{ миль.}$$

Ширина Атлантического океана в наиболее широкой его части около 3000 миль, поэтому один спутник на полярной орбите, пролетая над серединой океана, может наблюдаться во всех его точках.

Так как спутник движется, то будет перемещаться и зона видимости, образуя на поверхности Земли полосу видимости. Полоса видимости для ИСЗ на полярной орбите для одного витка показана схематично на рис. 16.5.

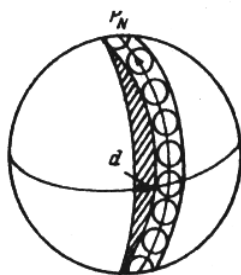


Рис. 16.5

Из-за вращения Земли полоса видимости, соответствующая каждому последующему витку, будет смещаться к западу на расстояние d (в милях):

$$d = 15 \sin i \cos \varphi T \quad (16.6)$$

Для спутника на полярной орбите, имеющего $H=1000$ км и $T = 106$ мин, получаем величину смещения полосы видимости, равную на широте $\varphi = 0^\circ$, $d = 1575$ миль, $\varphi=30^\circ$ $d = 1362$ мили, $\varphi = 60^\circ$, $d = 788$ миль.

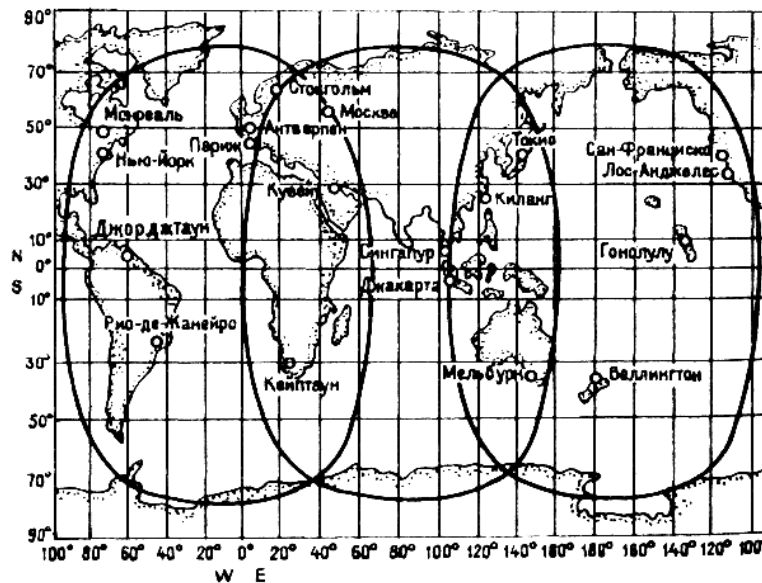


Рис. 16.4

Из этого видно, что смещение d полосы видимости к W меньше ширины полосы θ . Поэтому на каждом последующем витке будет иметь место перекрытие полосы видимости. Это перекрытие, если выразить его в процентах

$$\left(\frac{d - \theta}{\theta} 100 \right)$$

для нашего примера равно: для $\varphi = 0^\circ$ - 57%, $\varphi = 60^\circ$ - 78%, $\varphi = 90^\circ$ - 100%. Отсюда следует, что один и тот же спутник на полярной орбите может наблюдаться в одном и том же месте несколько раз подряд, например в средних широтах, по крайней мере, два раза. Это означает, что по одному и тому же спутнику в средних широтах можно определить место четыре раза в сутки: два раза подряд с интервалом, равным периоду обращения спутника, и затем через 10...12 ч еще два раза подряд, когда Земля, вращаясь с запада на восток, переместит наблюдателя под вторую половину орбиты спутника.

Изложенное показывает, что один низкоорбитальный спутник одновременно может наблюдаться только в ограниченном районе Земли. В процессе движения ИСЗ сделает несколько оборотов вокруг Земли и при $i = 90^\circ$ будет наблюдаться во всех ее точках. При $i < 90^\circ$ след (трасса) ИСЗ на земной поверхности будет доходить до $\varphi = i$.

При $H = 1000$ км суточное число оборотов ИСЗ

$$N = \frac{24 * 60}{106} \approx 14$$

Следовательно, один ИСЗ на полярной орбите может в течение суток обеспечить определение места во всех точках Земли, но таких обсерваций будет мало и они будут редки.

Минимальное число ИСЗ для определения места с требуемой дискретностью $\tau_{\text{ТРЕБ}}$ может быть определено по формуле

$$N = \frac{180T}{\Delta\lambda_{\min} \tau_{\text{треб}}}$$

где $\Delta\lambda_{\min}$ – минимальная разность долгот на данной параллели, охватываемая полосой видимости спутника за один его виток.

Например, для спутников на полярной орбите, имеющих $H = 1000$ км и $T=106$ мин, для определения места в районе экватора ($\Delta\lambda_{\min} = \Theta = 50^\circ$) с дискретностью $\tau_{\text{ТРЕБ}} = T$ получаем,

$$N = \frac{180T}{50T} \approx 4$$

т.е. заданная дискретность обеспечивается 4 спутниками. Для дискретности $\tau_{\text{ТРЕБ}} = 60$ мин требуется

$$N = \frac{180 * 106}{50 * 60} \approx 6 \text{ спутников}$$

Для обеспечения возможности непрерывного определения места судна в любое время суток и в любом месте Земли необходимо применить синхронно вращающиеся спутники, причем число их должно быть значительным.

Применение же независимо вращающихся спутников может обеспечить лишь дискретные определения места судна. Увеличение числа ИСЗ не устранил этого недостатка. Поэтому система с ограниченным числом низкоорбитальных ИСЗ может быть лишь средством дискретной навигации.

Большое значение для использования ИСЗ имеет продолжительность его наблюдения. Очевидно, она будет определяться временем прохождения зоны видимости через место наблюдателя. Для неподвижного наблюдателя, находящегося в плоскости орбиты ИСЗ, будет иметь место максимальная продолжительность наблюдения спутника, определяемая выражением

$$\Delta T_{H_{\text{MAX}}} = T_3 - T_B = \frac{\Theta T}{360} \quad (16.7)$$

где T_3 , T_B – время захода и восхода спутника соответственно. Например, для низкоорбитального спутника ($H = 1000$ км) получим

$$\Delta T_{H_{\text{MAX}}} = \frac{60.5 * 106}{360} \approx 18 \text{ мин}$$

На практике это время не более 16 мин.

Перемещение наблюдателя на таких сравнительно тихоходных объектах, как суда, не будет существенно влиять на продолжительность наблюдения спутника.

Если наблюдатель находится на некотором расстоянии a от трассы ИСЗ, то продолжительность его наблюдения будет меньше. Расстояние a при заданной H определяет максимальную угловую высоту $h_{\max}$ спутника (высоту кульминации), на которой он наблюдается в момент кульминации.

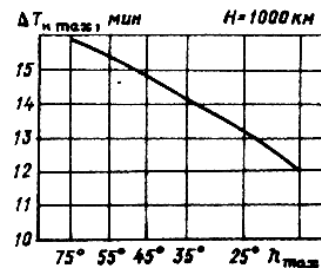


Рис. 16.6

Поэтому продолжительность наблюдения ИСЗ $T_{H_{\max}}$ можно определить в зависимости от $h_{\max}$. График такой зависимости приведен на рис.

16.6. Общее время наблюдения ИСЗ составляет примерно 16 мин, $h_{\max} > 75^\circ$, причем при углах $h_{\max} > 20^\circ$ он наблюдается в течение 12 мин.

16.3. Методы определения места судна с помощью навигационных спутников

Искусственный спутник Земли можно представлять как навигационный ориентир, поднятый на высоту нескольких сотен и даже тысяч километров над поверхностью Земли. Двигаясь по законам всемирного тяготения по заранее рассчитанной орбите и излучая радиосигналы, он является навигационным ИСЗ – космическим радиомаяком. Принципиальной основой использования ИСЗ в качестве опорных ориентиров является закономерный характер их движения вокруг Земли. Для определения места по ИСЗ применяются следующие методы: дальномерный, радиально-скоростной и разностно-дальномерный.

Дальномерный метод. В этом методе навигационным параметром является наклонная (топоцентрическая) дальность p до спутника (рис. 16.7). Ей соответствует изоповерхность в виде сферы с центром, совпадающим с ИСЗ, и радиусом, равным измеренной дальности.

При пересечении сферической изоповерхности с поверхностью Земли получим изолинию, соответствующую измеренной Дальности до спутника, – окружность сферического радиуса D . Его можно получить из ΔS_0OK :

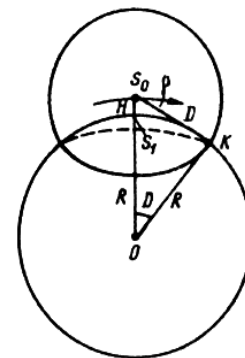


Рис. 16.7

$$\rho^2 = R^2 + (R + H)^2 - 2r(R + H)\cos D \quad (16.8)$$

$$\cos D = 1 - \frac{\rho^2 - H^2}{2(R^2 + RH)}$$

Градиент этой изолинии

$$g = \cos h_s, \quad (16.9)$$

где h_s – видимая угловая высота ИСЗ над горизонтом.

Из выражения (16.9) видим, что для определения изолинии с наибольшей точностью надо наблюдать ИСЗ, имеющие малые высоты.

Для определения места необходимо иметь несколько изолиний. Их можно получить, выполнив наблюдения нескольких ИСЗ или повторные наблюдения одного и того же низкоорбитального ИСЗ через небольшие промежутки времени.

Топоцентрическая дальность может быть измерена пассивным или активным методом. Пассивный метод состоит в определении ρ по времени t распространения радиосигнала от спутника, до приемника:

$$\rho = c(t + \delta_t)$$

где δt – поправка к отсчету времени t из-за сдвига временных шкал часов спутника и приемника. Для измерения дальности ρ пассивным методом с высокой точностью на спутнике и на судне должны быть высокостабильные генераторы частоты. Например, для определения дальности ρ с точностью до 0,3 м кратковременная нестабильность генераторов частоты должна быть не хуже 10-9.

Активный метод измерения дальности до спутника аналогичен методу измерения расстояния до активного радиолокационного отражателя

$$\left(\rho = \frac{ct}{2} - \Delta\rho \right)$$

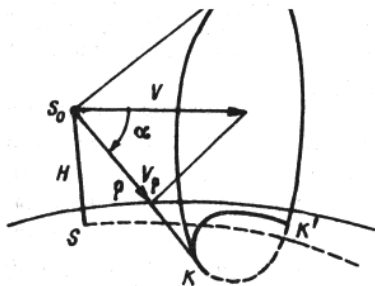


Рис. 16.8

Этот метод не требует наличия высокостабильных генераторов частоты на судне. Но при его использовании возникает другая проблема – обеспечение одновременного обслуживания сотен и тысяч потребителей.

Дальномерный пассивный метод применяется во вводимой в настоящее время спутниковой РНС на средневысоких орбитах.

Радиально-скоростной метод. Быстрое перемещение ИСЗ в зоне радиовидимости наблюдателя позволяет применить

принципиально новый метод определения места, основанный на измерении радиальной скорости, т.е. скорости сближения спутника с наблюдателем. Для измерения радиальной скорости применяется эффект Доплера. Его сущность при использовании в спутниковых РНС заключается в том, что при быстром перемещении спутника, излучающего колебания строго определенной частоты f_0 , неподвижный наблюдатель на Земле будет принимать колебания другой частоты f .

Разность этих колебаний, называемая доплеровским смещением частоты, определяется по формуле

$$F_d = f - f_0 = \frac{v \cos \alpha}{\lambda_0} \quad (16.10)$$

где v – скорость движения ИСЗ по орбите; α – направление на наблюдателя со спутника относительно вектора его скорости (рис. 16.8); λ_0 – длина волны, соответствующая частоте f_0 .

Входящая в формулу (16.10) величина $v \cos \alpha = v_\rho$ называется радиальной скоростью. Поэтому формулу (16.10) можно написать в виде

$$F_d = \frac{v_\rho}{\lambda_0} = \frac{\rho}{\lambda_0} \quad (16.11)$$

Так как частота f_0 передатчика спутника и опорная частота судового генератора могут иметь постоянную разность δ_f то формула (16.11) приобретает вид

$$F_d = \frac{\rho}{\lambda_0} + \delta_f \quad (16.12)$$

Постоянная разность δ_f частот должна определяться как дополнительная неизвестная.

Из формул (16.10) и (16.11) видно, что если $F_d = \text{const}$, то $\alpha = \text{const}$ и $v_\rho = \text{const}$. Углу $\alpha = \text{const}$ в пространстве соответствует изоповерхность в виде кругового конуса, вершина которого совпадает с местом ИСЗ, а ось – с вектором его скорости.

Так как судно находится на Земле, то его место надо искать на кривой КК', по которой конус пересекается с поверхностью Земли (в пределах зоны радиовидимости). Эта кривая получила название изодопы. Изодопы – это изолинии на поверхности Земли, характерными свойствами которой являются постоянство доплеровского смещения частоты и постоянство радиальной скорости. По своей форме изодопы в пределах зоны видимости близка к сферической гиперболе. Расположение изодоп в зоне видимости спутника показано на рис. 16.9. Перемещение спутника приводит к перемещению зоны видимости и соответствующих ей изодоп. Точка пересечения изодоп дает место судна.

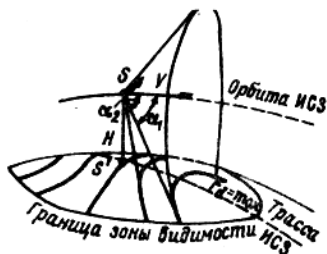
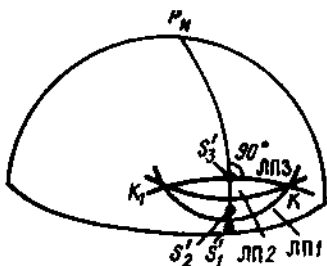


Рис. 16.9

Для определения места судна требуется несколько изолиний – изодоп. Вторую и последующую изодопы получают вскоре после первой. В частном случае, когда $\alpha=90^\circ$ (судно находится на кратчайшем расстоянии от спутника), конус разворачивается в плоскость и изодопа превращается в дугу большого круга. Изодопы пересекаются в двух точках – K и K_1 (рис. 16.10), лежащих по разные стороны трассы ИСЗ. Двухзначность может быть разрешена с помощью счисления. За время пролета низкоорбитальных ИСЗ может быть получено несколько сотен изодоп. Например, при $\Delta T_{\text{Hmax}} = 16 \text{ мин} = 960 \text{ с}$ и измерении доплеровского смещения частоты за 4 с может быть получено 240 изодоп. Как видно, информация со спутника быстротечна и отличается большой избыточностью.

Радиально-скоростной метод определения места судна получил также название доплеровского дифференциального метода.



$$b = \frac{2\pi(R+H)}{T} t_H \quad (16.13)$$

ращения спутника.

Пересечение гиперboloида с поверхностью Земли в пределах зоны радиовидимости дает изолинию – сложную кривую, близкую по форме к сферической гиперболе. На этой гиперболе и будет находиться место судна. Когда база займет новое положение S_1S_2 , измеряют вторую разность расстояний $\Delta\rho_2=\rho_3-\rho_2$ и получают второй гиперboloид и вторую гиперболу, соответствующую величине $\Delta\rho_2$. Аналогично можно получить $\Delta\rho_3$ и третью гиперболу и т. д. Место судна получается в точке пересечения двух, трех и более гипербол.

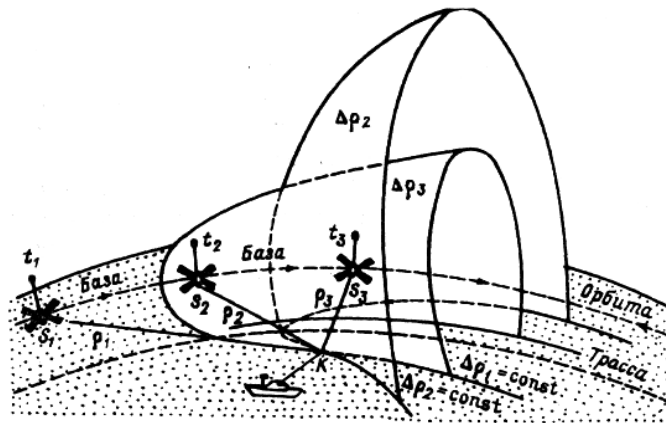


Рис. 16.11

Разность расстояний $\Delta\rho_i$ можно получить подсчетом числа импульсов доплеровской частоты в течение промежутка времени, необходимого спутнику для прохождения длины базы b . Такой подсчет математически представляет собой интегрирование доплеровского смещения частоты по времени в интервале $(t_2+\Delta t_2)-(t_1+\Delta t_1)$

$$\int_{t_1+\Delta t_1}^{t_2+\Delta t_2} F_d(t) dt = \int_{t_1+\Delta t_1}^{t_2+\Delta t_2} (f_{ог} - f_{п}) dt \quad (16.14)$$

где $f_{ог}$ – частота опорного генератора ПИ (рис. 16.12); $f_{п}$ – частота, принимаемая ПИ;

$$\Delta t_1 = \frac{\rho_1}{c}; \Delta t_2 = \frac{\rho_2}{c} - \text{время распространения}$$

радиосигналов от ИСЗ до приемника; f – передаваемая частота.

Интеграл от левой части равенства (16.14) есть число N_ϕ импульсов биений, принятое приемником за время $(t_2+\Delta t_2)-(t_1+\Delta t_1)$.

Тогда

$$N_{\delta} = \int_{e_1 - \rho_1 / c}^{e_2 + \rho_2 / c} f_{ог} dt - \int_{t_1 + \rho_1 / c}^{t_2 + \rho_2 / c} f_{II} dt = I - II$$

Частота $f_{ог}$ постоянная, поэтому

$$I = f_{ог} \left[\left(t_2 + \frac{\rho_2}{c} \right) - \left(t_1 + \frac{\rho_1}{c} \right) \right] = f_{ог} (t_2 - t_1) + \frac{f_{ог}}{c} (\rho_2 - \rho_1)$$

Слагаемое II представляет собой число колебаний (циклов), принятых на судне на частоте f_{II} за время $(t_2 + \Delta t_2) - (t_1 + \Delta t_1)$; оно должно быть равно числу колебаний, переданных спутником на частоте f между моментами t_2 и t_1 :

$$II = \int_{t_1 + \rho_1 / c}^{t_2 + \rho_2 / c} f_{II} dt = \int_{t_1}^{t_2} f dt = f (t_2 - t_1)$$

тогда

$$N_{\delta} = I - II = (f_{ог} - f)(t_2 - t_1) + \frac{f_{ог}}{c} (\rho_2 - \rho_1)$$

Обозначив $t_{II} = t_2 - t_1$, $\delta_f = f_{ог} - f$, получаем $N_{\delta} = \frac{1}{\lambda_0} (\rho_2 - \rho_1) + \delta_f t_{II}$

где $\delta_f = f_{ог} - f$ – постоянный относительный сдвиг частот генераторов приемника и ИСЗ («частота подставки»), откуда

$$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 = \lambda_0 [N_{\delta} - \delta_f t_{II}] \quad (16.15)$$

Таким образом, каждому подсчитанному числу N_{δ} импульсов биений доплеровской частоты соответствует вполне определенное значение разности расстояний от судна до двух последовательных положений спутника на орбите в моменты начала и конца интервала времени t_{II} . Промежуток времени t_{II} называется интервалом интегрирования. Постоянная величина $\delta_f t_{II}$, представляющая собой погрешность в определении числа импульсов биений из-за сдвига частот судового опорного генератора и его кратковременной нестабильности, должна определяться как дополнительная неизвестная. Данный метод определения места судна получил название доплеровского интегрального.

Из изложенного видно, что при использовании доплеровского интегрального метода спутниковая РНС аналогична наземной гиперболической РНС. Спутник в своем движении по орбите является последовательно как бы несколькими опорными станциями, для каждой пары которых измеряется разность расстояний до судна. Периодически спутник передает орбитальную информацию, и если место судна будет определено относительно некоторых фиксированных положений спутника, оно может быть определено и относительно связанной с Землей географической системы координат.

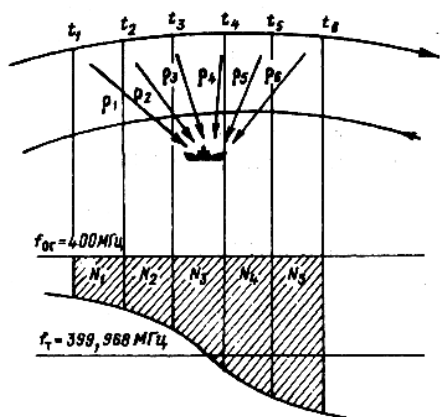


Рис. 16.12

Число изолиний зависит от времени наблюдения спутника и интервала интегрирования. Например, в ПИ спутниковой РНС «Транзит» приняты $t_{\text{и}} = 2$ мин, 1 мин, 30 с, 24 с. При максимальном времени наблюдения низкоорбитального спутника $\Delta T_{H \text{ max}} = 16$ мин может быть получено соответственно 8, 16, 32 и 40 линий положения. Избыточные измерения используются для повышения точности определения места. При более коротких интервалах интегрирования можно получить большее число линий положения, что повышает вероятность обсерваций по спутниковой РНС.

Так как гиперболы на поверхности Земли пересекаются в двух точках, то определение места будет двузначным. Двузначность разрешают с помощью счисления. При этом совершенно необходима ЭВМ, так как полученная во время прохождения спутника информация не может быть обработана оперативно вручную.

При уменьшении интервала интегрирования разностно-дальномерный метод переходит в радиально-скоростной метод. Таким образом, доплеровский дифференциальный метод есть частный случай доплеровского интегрального метода, когда интервал интегрирования равен 1 с. При этом гиперболоид вращения сливается с пространственным асимптотическим конусом.

Использование того или иного метода зависит от интервала интегрирования, примененного в приемоиндикаторе, а спутники будут одними и теми же.

Спутниковая РНС доплеровского типа обладает свойством направленности точности изолиний, как и любая наземная гиперболическая РНС. Поэтому с геометрической точки зрения спутниковая РНС, основанная на использовании доплеровского метода, может быть отнесена к классу гиперболических систем.

Но в отличие от наземных гиперболических РНС, имеющих фиксированные базы, в данном случае получаем гиперболическую систему с перемещающейся базой.

16.4. Использование спутниковой РНС доплеровского типа

В состав спутниковой РНС доплеровского типа входят следующие компоненты: созвездие навигационных спутников на полярных или околополярных орбитах ($i = 90^\circ$ – «Транзит», $i = 83^\circ$ – «Цикада»); станции слежения за спутниками; координационно-вычислительный центр (КВЦ); станции ввода орбитальной информации; обсерватория времени; приемоиндикаторы с ЭВМ.



Рис. 16.13

Обычно в созвездие навигационных спутников входят 4...6 ИСЗ, например в РНС «Цикада» 5 ИСЗ, орбиты которых образуют в пространстве фигуру, похожую на птичью клетку (рис. 16.13). Для равномерной дискретности обсерваций плоскости орбит должны располагаться в пространстве под примерно одинаковыми углами. Однако это не всегда соблюдается. Спутники передают радиосигналы, состоящие из меток времени, орбитальной информации и измерительной информации (доплеровское смещение частоты). Кроме того, передаются сигналы синхронизации, опознавательные сигналы. Спутники РНС «Транзит» и «Цикада» передают информацию на двух частотах: $f_1 = 400 \text{ МГц}$ и $f_2 = 150 \text{ МГц}$.

Это позволяет при измерении в ПИ доплеровского смещения частоты также на двух частотах исключать влияние ионосферной погрешности.

Долговременная нестабильность задающего генератора ИСЗ составляет 10-9, кратковременная – 10-11.

Станции слежения (СС) принимают радиосигналы со спутников и передают их по линиям связи в КВЦ. Здесь сигналы со спутников обрабатываются в ЭВМ и на основании результатов обработки получается орбитальная информация, которая вводится в память ЭВМ спутников с помощью станций ввода, когда они оказываются в зоне видимости спутников. Обновление орбитальной информации спутников производится через 12...14ч⁷ (в РНС «Цикада» – через 24 ч). Одновременно происходит коррекция часов спутников со всемирным координированным временем, обеспечиваемым обсерваторией времени. Спутники, приняв новую орбитальную информацию, репетуют ее. Эта информация в КВЦ сравнивается с вводимой орбитальной информацией. В случае ошибок производится повторный ввод этой информации в память спутника.

⁷ В новых ИСЗ «Триад» орбитальная информация обновляется 1 раз в неделю.

Передача информации со спутника производится двухминутными блоками, определяемыми в конце четной минуты метками времени.

Важнейшим компонентом системы, в котором реализуются результаты ее работы, являются судовые ПИ. Они имеют следующие основные особенности: число каналов приема информации ($f_1 = 400$ МГц или $f_2 = 400$ МГц и $f_2 = 150$ МГц); интервал интегрирования (2 мин, 1 мин, 30с, 24с); способ индикации результатов определения места (телетайп, цифровое табло, дисплей); способ оценки качества обсерваций (интегральный или с помощью отдельных признаков); решаемые дополнительные задачи.

Наибольшее распространение на судах морского транспортного флота получили одноканальные ПИ с интервалом интегрирования 24с. Индикация результатов производится на дисплее с оценкой качества по отдельным признакам.

На гидрографических и океанографических судах применяются также двухканальные ПИ, отличающиеся повышенной точностью определения места

Определение места по спутнику возможно, когда судно находится в зоне его радиовидимости, при этом особенно качественные (надежные) обсервации получаются, если угловая высота ИСЗ над горизонтом: находится в пределах от 10 до 75°. При малых высотах бывает высокий уровень помех и большое затухание радиоволн в атмосфере. При больших высотах изолинии пересекаются под очень острым углом, что приводит к большим погрешностям по долготе.

Наибольшее время наблюдений спутника составляет 16 мин, наименьшее – 6 мин. Наименьшая продолжительность наблюдений; необходимая для получения места, получается как сумма длительности трех блоков орбитальной информации, принимаемых со спутника. Прием трех двухминутных блоков необходим для получения орбитальной информации с высокой степенью надежности (проверяется в ПИ методом верификации).

Число линий положения, получаемых при различных интервалах интегрирования, приведено в табл.16.2.

На практике не всегда получают теоретически возможное число линий положения при данном времени наблюдения спутника. Часть сигналов может быть не принята из-за помех, нарушения синхронизации и других причин, что приводит к потере определенного числа линий положения.

Минимальное число линий положения, необходимое для получения места при различных интервалах интегрирования, равно числу линий положения, принимаемых в течение 6 мин.

Как правило, каждый спутник позволяет получить в одном и том же районе 4 обсервации в сутки (в средних широтах).

Для определения места судна необходимо заблаговременно (как правило, за несколько часов) включить ПИ.

После включения ПИ необходимо в ЭВМ ввести следующие исходные данные: гринвичское $T_{ГР}$ или московское $T_{МСК}$ время (с погрешностью не более 14 мин); φ_c , λ_c (с ошибкой не более 60... 100 миль); скорость и курс судна (если они не вводятся автоматически); высоту h_a приемной антенны над поверхностью референц-эллипсоида.

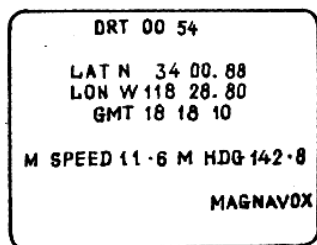


Рис. 16.14

Высота антенны h_a состоит из высоты антенны над ватерлинией h_b геоидной поправки h_r , т.е. $h_a = h_b + h_r$, при этом h_b снимается с теоретического чертежа, а h_r выбирается из специальной карты-схемы.

Геоидная поправка представляет собой разность между уровнем геоида и поверхностью референц-эллипсоида, принятого в ЭВМ для решения задачи. Геоидная поправка h_r находится в пределах от +100 до -100 м и известна с точностью до 10 м. В новейших ПИ (МХ-1122) h_r учитывается автоматически. В этом случае судоводитель должен в ЭВМ ввести только h_b .

После ввода указанных данных ПИ находится в дежурном режиме. При появлении над горизонтом навигационного спутника ПИ принимает его сигналы, синхронизируется ими, выделяет из них орбитальную информацию, измеряет навигационные параметры, обрабатывает результаты измерений, решает навигационную задачу и выдает результат.

Таблица 16.2

Интервал интегрирования	Число линий положения	
	$\Delta T_{H_{\max}} = 16$ мин	$\Delta T_{H_{\min}} = 18$ мин
2 мин	8	3
1 мин	16	6
30с	32	12
24с	40	15

Вид выдаваемой информации может быть различным. Но при этом обязательно указываются $T_{ГР}$, φ_0 , λ_0 и признак качества обсервации. Наиболее удобно выдавать результаты решения на дисплее (рис. 16.14). Обсервации в зависимости от качества можно разделить на группы: надежные, ненадежные и потерянные.

Надежные обсервации должны удовлетворять следующим признакам: 1) $10^\circ < h_{\max}^8 < 75^\circ$; 2) симметричность наблюдений, т.е. до и после момента кульминации должно быть получено примерно равное число линий положения; 3) число линий положения, использованных при расчете обсервованных координат, должно быть больше $N_{\text{лп min}}$ (СМ-табл. 16.2), например при $t_{\text{и}} = 24$ с – больше 15; 4) итераций должно быть меньше 5, т.е. процесс решения задачи должен быть быстро сходящимся; 5) невязка C должна быть меньше заданной невязки ($C < C_{\text{зАд}}$).

Если обсервация удовлетворяет этим признакам, то она автоматически принимается для дальнейшего счисления, т.е. в памяти ЭВМ $\varphi_{\text{с}}$, $\lambda_{\text{с}}$ соответствующие моменту обсервации, заменяются обсервованными координатами.

Обсервация считается ненадежной, если $h_{\max} < 10^\circ$ или $h_{\max} > 75^\circ$ наблюдения несимметричны; $N_{\text{лп}} < N_{\text{лп min}}$ итераций больше пяти; $C > C_{\text{зАд}}$.

Ненадежная обсервация имеет пониженную точность по сравнению с надежной и поэтому не принимается автоматически для дальнейшего счисления, но может быть для этого принята после анализа штурманом указанных выше признаков и по его команде (принудительная замена счисляемых координат обсервованными). Если штурман не даст команду ЭВМ о принятии ненадежной обсервации для дальнейшего счисления, то оно будет вестись от предыдущего надежного обсервованного места. И это будет продолжаться до тех пор, пока судоводитель не получит новую надежную обсервацию.

Однако на практике не каждое прохождение спутника дает обсервацию. Причиной этого могут быть: недостаточность орбитальной информации; недостаточность измерительной информации (доплеровских отсчетов); расходящийся итерационный процесс.

Не получив обсервацию по спутникам, необходимо, если вынуждают обстоятельства, воспользоваться другими способами определения места.

Как видно, при определении места по спутниковой РНС работа судоводителя имеет совершенно иной характер, чем при использовании других РНС. Определение места полностью автоматизировано. Судоводитель не выполняет никаких наблюдений, не производит никаких расчетов. Вместо этого возрастают операторские функции судоводителя. За ним остается также то, что ЭВМ сделать не может: оценка результата обсервации и принятие решения по управлению движением судна. Особенно это относится к случаю, когда качество обсервации невысокое. Например, при большой невязке между обсервованной и счисляемой точками обсервация, «по мнению» ЭВМ, будет ненадежной.

⁸ Различных ПИ пределы $h_{\max}$ могут несколько отличаться от указанных, например для МХ-1102 они составляют 7...700, для ПИ «Шхуна» 15...800.

Однако это не означает, что она действительно плохая. Невязка могла появиться из-за неверно введенной или полученной счислимой точки, и штурман должен это проверить. Только штурман, проанализировав качество обсервации, может принять ее для дальнейшего счисления.

16.5. Эксплуатационные характеристики спутниковой РНС

Характеристиками спутниковой РНС являются точность, дискретность и вероятность надежных обсерваций.

Точность определения места зависит от погрешности местоположения спутника в момент обсервации, погрешности определения места судна относительно спутника, погрешности определения скорости судна во время сеанса наблюдений, погрешности в высоте антенны над поверхностью референц-эллипсоида

Первые две погрешности определяют потенциальную точность спутниковой РНС доплеровского типа, которая для одноканальных ПИ равна примерно 80...100м, для двухканальных 30...40м. При многократном определении места по нескольким прохождением спутников точность

возрастает в $\sqrt{N}$ раз (N — число прохождении ИСЗ). Как видно, потенциальная точность спутниковой РНС довольно высока и сравнима с точностью РНС ближней навигации. При этом точность зависит от высоты кульминации h_{MAX} . Однако она существенно понижается за счет неточного учета скорости судна, вызванного главным образом незнанием течения во время сеанса наблюдений. Установлено, что наибольшее влияние оказывает погрешность в меридиональной составляющей скорости судна.

Погрешность в этой составляющей в 1уз вызывает систематическую погрешность по долготе порядка 1...2 кб. Для уменьшения этой погрешности течение необходимо определять и учитывать.

Практика показывает, что в диапазоне $7^\circ < h_{MAX} < 70^\circ$ радиальная средняя квадратичная погрешность определения места равна 2...4 кб (рис. 16.15). При $h_{MAX} < 4^\circ$ и $h_{MAX} > 70^\circ$ погрешность превышала 1 милю.

Погрешность в высоте антенны δh_o над поверхностью референц-эллипсоида вызывает погрешность по долготе (в метрах)

$$\delta \lambda = \delta h_o \operatorname{tgh} h_{\max}$$

Если, например, $\delta h_o = 10$ м, $h_{MAX} = 80^\circ$, то $M = 57$ м. Поэтому при больших $h_{\max}$ место по спутниковой РНС определяется с пониженной точностью.

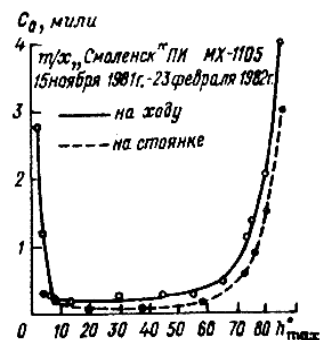


Рис. 16.15

При использовании спутниковой обсервации следует также иметь в виду методическую погрешность, возникающую от применения в спутниковой РНС и при составлении морских навигационных карт различных референц-эллипсоидов и различных опорных геодезических систем. В спутниковой РНС «Транзит» применяется общий земной эллипсоид *WGS-72* ($a = 6\,378\,135$ м; $1/a = 298,26$), и *WGS-84* ($a = 6\,378\,137$ м; $1/298,2572$), при составлении навигационных карт – референц-эллипсоиды Красовского (СССР), Кларка (США), Бесселя (Япония) и т. д. По указанной причине координаты одних и тех же точек на поверхности Земли имеют заметные различия. Поэтому координаты места судна, определенного по спутниковой РНС «Транзит», не совпадают с координатами этого места, снятыми с карты, построенной в местной системе координат. Расхождения могут быть от нескольких десятков до нескольких сотен метров. В ряде случаев они могут превышать погрешности определения места по спутниковой РНС. Например,

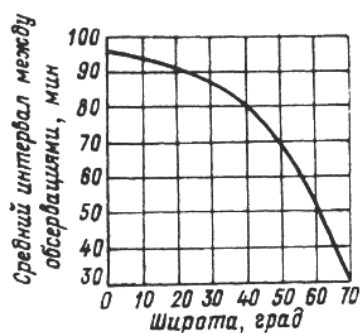


Рис. 16.16

погрешности за расхождение геодезических систем спутниковой РНС и морских карт достигают величины 0,5...0,6 кб в водах России, Европы, Северной Америки; 2,5 кб – в водах Австралии и 3...4 кб – в водах Японии, Южной и Восточной Африки. При плавании вблизи берегов это необходимо учитывать, вводя в координаты, полученные по спутниковой РНС, поправки. Поправки печатаются на морских или навигационных картах и даются в табличной форме.

Дискретность определения места. Спутниковая РНС доплеровского типа позволяет определять место периодически. Интервал между обсервациями зависит от числа ИСЗ и расположения их орбит в пространстве. График зависимости дискретности от широты при пяти ИСЗ приведен на рис. 16.16, где видно, что средний интервал между обсервациями для $\varphi = 0^\circ$ – 96 мин, $\varphi = 30^\circ$ – 85 мин и для $\varphi = 60^\circ$ – 50 мин. На практике дискретность колеблется от 16 мин до нескольких часов. Дискретность становится особенно неравномерной в период схождения орбит в узком секторе.

При длительном интервале между спутниковыми обсервациями место судна должно находиться по счислению или другими способами. Вероятность определения места. Все спутниковые обсервации делятся на три группы, поэтому эффективность использования системы в значительной степени определяется процентным соотношением между этими группами. Практика показала, что вероятность получения надежных обсерваций для современных ПИ равна примерно 75%, а вместе с ненадежными – 84%.

С увеличением широты вероятность надежных обсерваций уменьшается. Однако она компенсируется большим числом обсерваций и меньшим интервалом между ними.

16.6. Дополнительные навигационные задачи

ЭВМ ПИ спутниковой РНС может решить ряд дополнительных навигационных задач по специальным программам, введенным в ее память. К таким дополнительным задачам относятся следующие.

1. Аналитическое счисление, т.е. автоматическое вычисление φ_c , λ_c с заданной дискретностью по данным от гирокомпаса и лага с учетом течения, элементы которого могут браться априорно или находиться по результатам спутниковых обсерваций. Эта задача решается всегда, так как счислимые координаты необходимы для определения обсервованных координат (в ЭВМ вычисляются поправки к счислимым координатам), для нахождения места судна в интервале между спутниковыми обсервациями и для приведения разновременных наблюдений спутника к одному месту.

2. Вычисление курса и расстояния для плавания в заданную точку по дуге большого круга. Эта задача решается при переходе через океан по специальной команде после ввода в ЭВМ координат заданной точки. Для плавания по дуге большого круга необходимо удерживать судно на курсе, вычисляемом ЭВМ (курс показывается на дисплее).

3. Вычисление курса и расстояния для плавания по лохсодромии. Эта задача решается по специальной команде при плавании вблизи берегов и в узкостях после ввода координат заданной точки (точка назначения, поворота, якорной стоянки и т. д.).

4. Вычисление элементов сноса (течения) по результатам последних спутниковых обсерваций. Решение этой задачи позволяет найти истинную скорость судна и его путь, что необходимо для более точного счисления. Знание истинной скорости позволяет также повысить точность спутниковых обсерваций, которая, как известно, существенно зависит от погрешностей в скорости судна.

5. Перевод румбов, т.е. нахождение $KK_{ГК}$ для следования в заданную точку с учетом ΔGK и течения.

6. Расчет времени будущих прохождений спутников, пригодных для обсерваций. Эта задача решается по специальной команде. Если расчеты показывают, что промежуток времени между возможными спутниковыми обсервациями превышает допустимый в данных условиях плавания, то судоводитель должен принять меры для определения места другими способами.

Как видно, ПИ спутниковой РНС доплеровского типа, сопряженный с гирокомпасом и лагом, представляет собой простейший по составу входящих в него приборов навигационный автоматизированный комплекс (НАК), решающий широкий круг навигационных задач. Характерно, что расчеты ведутся от текущей счислимой точки, которая периодически корректируется по спутниковым обсервациям.

Практика использования ПИ спутниковой РНС на морских судах показывает, что число решаемых задач в ЭВМ этого ПИ можно расширить, используя уже заложенные в нее программы. Можно, например, находить ИП небесного светила для определения поправки компаса, применив программу решения задачи плавания по дуге большого круга. Заметим, что определение ИП светила с помощью ЭВМ ПИ спутниковой РНС производится значительно проще и быстрее, чем с помощью любой малогабаритной ЭВМ, так как в нее не надо вводить программу решения задачи, снимать с карты и вводить счислимые координаты места судна (они постоянно находятся в памяти ЭВМ, обновляясь по мере движения судна). Так как задача решается в реальном масштабе времени (ИП вычисляется на момент решения задачи), то и КП светила нужно брать в этот же момент времени.

Для нахождения ИП небесного светила необходимо:

в интервале времени между спутниковыми наблюдениями наметить $T_{гр}$ решения задачи и измерения КП по светилу;

из МАЕ на намеченное $T_{гр}$ выбрать гринвичский часовой угол $t_{гр}$ и склонение светила δ ;

ввести в ЭВМ ПИ данные для решения задачи плавания по дуге большого круга в точку с координатами $\varphi = \delta$, $\lambda = t_{гр}$

в момент намеченного $T_{гр}$ дать команду ЭВМ решить задачу и одновременно измерить КП светила по компасу;

сняв с дисплея или цифрового табло ИП, найти поправку компаса ($\Delta ГК = ИП - КП$).

ИП светила находится с помощью ЭВМ ПИ спутниковой РНС с точностью до $0,1^\circ$.

Используя программу решения задачи плавания по дуге большого круга, можно определить также радиодевиацию $f = \text{ОртП} - \text{ОРП} + \Delta ГК$).

Наконец можно определить циркуляцию судна (при исправно работающем лаге). Для этого используется программа автоматического счисления пути судна. Во время циркуляции судна необходимо с дисплея считывать φ_c , λ_c с дискретностью 10 с.

После этого на крупномасштабном планшете строится кривая циркуляции, с которой снимаются ее элементы. Однако вычерчиваемая по данным автосчисления кривая циркуляции будет иметь несколько меньший диаметр из-за угла дрейфа, который в автосчислителе не учитывается. Определение циркуляции этим методом может оказаться особенно эффективным для крупнотоннажных судов, совершающих повороты при небольших углах перекладки руля и имеющих кривую циркуляции, значительно отличающуюся от окружности.

16.7. Использование спутниковых РНС на средневысоких орбитах

Принцип действия. Недостатки спутниковых РНС доплеровского типа вызвали необходимость создания более совершенных спутниковых навигационных систем. Такие системы созданы на средневысоких орбитах и в настоящее время начинают использоваться на морских судах: НАВСТАР (США) и ГЛОНАСС (Россия). Принципы работы этих систем одинаковы. Рассмотрим их на примере РНС НАВСТАР. Спутниковая РНС НАВСТАР, разрабатываемая с 1975 г., предназначена для непрерывного определения места различных подвижных объектов в любой точке Земли или околоземного пространства в любое время суток в любую погоду.

Эта система после ее полного развертывания должна состоять из 18 ИСЗ (плюс 3 запасных) на 6 орбитах – по 3 равномерно расположенных ИСЗ на каждой (рис.16.17). Орбиты почти круговые высотой $H = 20200$ км. Угол наклона орбит $i=55^\circ$. При таком угле наклона плоскости орбит пересекаются под прямым углом, образуя на поверхности Земли 8 равных октантов. Это обеспечивает единообразные зоны точности по всей поверхности Земли. Период обращения ИСЗ $T \approx 12$ ч. Радиус зоны радиовидимости 76° . В зоне радиовидимости наблюдателя могут быть одновременно видны от 4 до 8 ИСЗ.

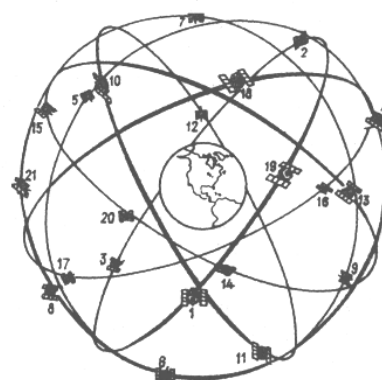


Рис. 16.17

В спутниковой системе НАВСТАР используется дальномерный метод определения места объекта. Наклонное (топоцентрическое) расстояние p до спутника определяется пассивным методом (см. п. 16.3).

На спутниках применяются цезиевые стандарты частоты с нестабильностью 10^{-14} за сутки. Так как уход частоты судового опорного генератора, вызывающий расхождение временных шкал, неизвестен; то он должен определяться как дополнительное неизвестное время с координатами φ_0, λ_0

Для определения места судна одновременно принимают данные не менее чем от трех ИСЗ (рис. 16.18). При пересечении трех изолиний (окружностей) на поверхности Земли получается треугольник погрешности из-за присутствия в измеренных расстояниях p постоянных ошибок $s\delta t$ (рис. 16.19). Место судна находится в точке пересечения биссектрис вершин треугольника погрешности. Найдя место судна (φ_0, λ_0) можно найти и постоянную ошибку $s\delta t$ из-за расхождения временных шкал ИСЗ и ПИ. Таким образом, по одновременным наблюдениям трех ИСЗ можно получить координаты места судна φ_0, λ_0 и поправку δt за расхождение временных шкал.

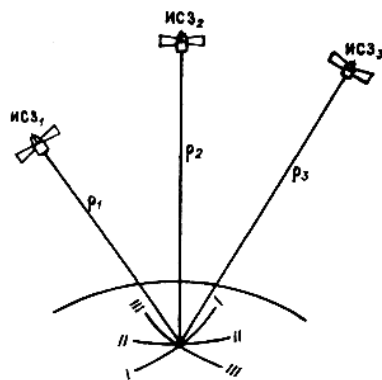


Рис. 16.18

Если ставится задача определять и высоту h нахождения объекта над поверхностью Земли, то необходимо одновременно наблюдать не менее четырех ИСЗ. Большое число ИСЗ в системе НАВСТАР (18 – на первом этапе, 24 – на заключительном) обеспечивает одновременное наблюдение в любой точке Земли от 4 до 8 ИСЗ при 18 ИСЗ в системе и от 6 до 11 ИСЗ при 24 ИСЗ в системе. Среди этого числа спутников нужно выбрать такие, которые бы обеспечивали наибольшую точность обсерваций.

Таковыми являются 3 ИСЗ на малых высотах с разностью азимутов около 120° . Для получения высоты h объекта выбирается 4-й спутник, расположенный в зените наблюдателя или вблизи него.

Для определения координат решаются 4 уравнения вида

$$(X_{Si} - X_0)^2 + (Y_{Si} - Y_0)^2 + (Z_{Si} - Z_0)^2 = (\rho_i - c\delta t)^2$$

где X_{Si} , Y_{Si} , Z_{Si} – прямоугольные координаты места положения i -го ИСЗ ($i = 1; 2; 3; 4$); X_0 , Y_0 , Z_0 – прямоугольные координаты места судна; ρ_i – расстояние от судна до i -го ИСЗ; $c\delta t$ – погрешность в расстоянии из-за расхождения временных шкал ПИ и ИСЗ.

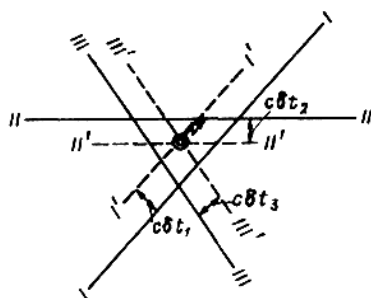


Рис. 16.19

Уравнения решаются итеративным методом. Переход от прямоугольных координат X_0 , Y_0 , Z_0 к географическим φ_0 , λ_0 осуществляется по известным формулам геодезии.

Все спутники работают на одних и тех же частотах: $f_1=1575,42$ МГц ($\lambda_1=19$ см) и $f_2=1227,60$ МГц ($\lambda_2 = 24$ см) с применением псевдошумовой модуляции. Использовать две частоты необходимо для уменьшения влияния на точность обсерваций ионосферного эффекта.

Для гражданских потребителей применяются одночастотные ПИ, работающие в грубом режиме *C/A-code* (*Coarse Acquisition*) с точностью измерения ρ порядка 16 м, для военных потребителей – двухчастотные ПИ, работающие в точном режиме *P-code* (*Precise*) с точностью измерения расстояния порядка 6 м.

Точность определения места. Ошибка определения места по трем ИСЗ на поверхности Земли может быть рассчитана по приближенной формуле мореходной астрономии

$$M = m_p \sec h_{cp} \sqrt{\frac{3}{\sum \sin^2 \Delta A}} = m_p \Gamma$$

где h_{cp} – средняя угловая высота спутников; ΔA – разность азимутов между парами ИСЗ; m_p – средняя квадратичная ошибка определения расстояния. Выражение

$$\sec h_{cp} \sqrt{\frac{3}{\sum \sin^2 \Delta A}} = \Gamma$$

характеризует геометрические условия наблюдений и называется геометрическим фактором (*Geometric Delution of Precision – GDOP* или *Horizontal Delution of Precision – HDOP*). В процессе приема сигналов ИСЗ их геометрическое положение непрерывно меняется: ряд ИСЗ уходит за горизонт, другие появляются из-за горизонта.

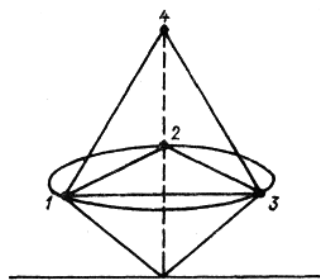


Рис. 16.20

В морских ПИ решается задача выбора из общего числа ИСЗ оптимального созвездия из трех или четырех ИСЗ, обработка сигналов которых обеспечивает минимальное значение геометрического фактора (минимальное значение ошибки определения места). При работе по трем ИСЗ $\Gamma = \min$, если все три ИСЗ размещены одинаково низко над горизонтом, образуя равносторонний треугольник (разность азимутов $\Delta A \approx 120^\circ$). При этом $\Gamma = 1,45$. При работе по четырем ИСЗ $\Gamma = \min = 2,6$, если один ИСЗ в

зените, а остальные три будут иметь одинаковую высоту около 30° , образуя равносторонний треугольник в плоскости расположения ИСЗ. При этом объем тетраэдра, образованного направлениями от судна на ИСЗ, будет максимальным (рис. 16.20).

Геометрический фактор нужен для оценки точности обсерваций. Ошибка обсервации пропорциональна величине геометрического фактора (рис. 16.21). Чем он меньше, тем место определено более точно. Величина геометрического фактора вычисляется при обсервациях: один раз в течение 5...10 мин. Текущее значение геометрического фактора сравнивается с оптимальным его значением, заложенным в программу выбора созвездия спутников, или установленным самим штурманом. Для точных обсерваций должно быть $1,5 < \Gamma < 5$. При $\Gamma > 10$ место получается менее точно.

В некоторых ПИ, например «*Shipmate GPS Navigator /US5700*», точность обсерваций показывается на дисплее буквами: *A* (высокая точность), *B* (хорошая), *C* (удовлетворительная) и *D* (плохая).

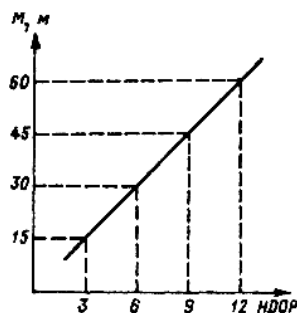


Рис. 16.21

Точность определения расстояния зависит от следующих факторов: нестабильности шкалы времени ИСЗ; ошибок в орбитальной информации; нестабильности шкалы времени в ПИ; влияния ионосферы и тропосферы; шумов аппаратуры ИСЗ; шумов аппаратуры ПИ; многолучевости распространения радиоволн. Суммарная средняя квадратичная ошибка получается порядка 16 м.

Например, если $p=16$ м, $\Gamma=1,45$, то $M = mp \Gamma = 23$ м, предельная ошибка при $P = 95\%$ равна 46 м.

GPS		NAV
LAT	N 28	13,659
LOD	W 79	09,749
GMT	23 43 18	
GO3	R 1846.7	B 041.0
M	SPEED 13.0	HDG 040.7
SOG	12.4	COG 038.9
		DIF 1.3
MAGNAVOX		HDOP 3

Рис. 16.22

GPS	NAV	10:03:25
		13/12/93
	59° 55,988 N	
	030 17,241 E	
Cmg	270,0°	Smg 06,00
Ht +53		HDOP 01.5
GPS Status		

Рис. 16.23

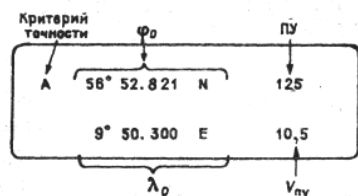


Рис. 16.24

Информация на дисплее ПИ. На судах морского флота применяются различные приемоиндикаторы РНС НАВСТАР: специальные и модернизированные ПИ СРНС «Транзит», дополненные платами для приема и обработки сигналов СРНС НАВСТАР. Постоянным режимом работы ПИ является навигационный (устойчивый прием сигналов одного и того же созвездия КСЗ), который может длиться от 10 до 40 мин. Этот режим чередуется с переходным режимом (прием данных от нового созвездия), который длится 5...8 мин. Вид информации на дисплее зависит от типа ПИ, но основными данными являются $T_{гр}$, obserвованные координаты (ϕ_0 , λ_0) геометрический фактор (HDOP\ путь судна ПУ (Cmg – *course made good* или COG – *course overground*), путевая скорость $V_{пу}$ (Smg – *speed made good* или SOG – *speed over ground*). Последние определяются по серии obserваций. Например, в ПИ MNS 2000 фирмы RACAL-DECCA ПУ и $V_{пу}$ определяются как средние величины за 5 мин по obserвациям с дискретностью 20 с. Точность определения скорости $m_v = 0,1$ м/с, $m_{пу} = 0,1^\circ$.

В ряде ПИ на дисплее показывается невязка между obserвацией и счислением, ведущимся от точки, полученной 1...2 часа назад. Невязка позволяет обнаружить промахи в определении места по СРНС НАВСТАР.

Примеры информации в навигационном режиме показаны на рис. 16.22 (для ПИ MX-1102/GPS), на рис. 16.23 (ПИ MNS 2000 фирмы RACAL-DECCA) и на рис. 16.24 (ПИ «Shipmate GPS Navigator Я85700»).

Кроме $T_{гр}$, φ_0 , λ_0 ПУ, $V_{пу}$ ПИ могут выдавать дополнительную информацию: 1) ПУ и расстояние для плавания по дуге большого круга или локсодромии в заданную точку; 2) поперечное отклонение от выбранного пути (*XTD – cross track distance*)⁹; 3) курс выхода на выбранный путь (*CTS – course to steer*); 4) момент прохождения траверза точки (*Passed WP*); 5) прохождение траверза последней точки (*Approaching LAST WP*); 6) отклонение от места якорной стоянки (*Anchor Watch*); 7) запоминать φ , λ при падении человека за борт и вычислять курс и расстояние до этой точки и др. При решении задач 2...6 ПИ дает звуковой сигнал, если превышает предел (*Limit*) заданной величины.

Объявленная точность СРНС НАВСТАР для ПИ режима С/А М = 100 м (Р = 95%), для ПИ режима Р М = 50 м (Р = 95%). Испытания системы, выполненные в США и других странах, показали, что эта точность вполне реальна.

Наблюдения, выполненные в 1989-1993 гг. на т/х «Комсомольск», т/х «Магнитогорск», т/х «Смоленск» и других, показали, при стоянке этих судов в портах Гавана, Роттердам и других $HDOP > 1...9$ М = 45...100м, при $HDOP > 10$ М = 270м.

Приемоиндикаторы работали в режиме С/А (MX-1W2/GPS и MNI 2000). Следует иметь в виду, что при использовании СРНС НАВСТАР могут иметь место ошибки из-за несоответствия геодезической основы карты и параметров референц-эллипсоида, принятого для расчета в ПИ. Поэтому перед нанесением обсервованной точки на морскую навигационную карту полученные φ_0 и λ_0 должны быть исправлены поправками за расхождение геодезических систем ПИ и карты. Поправки к координатам даются на карте в следующей форме: для перехода от WGS-84 к карте $\Delta\varphi = 0,05'$ к S, $\Delta\lambda = 0,09$ к E. Для облегчения этого перехода во многих ПИ имеются программы пересчета координат из геодезической системы ПИ (WGS-84) в геодезическую систему карты.

Так как СРНС НАВСТАР находится в стадии развертывания, то не всегда может наблюдаться необходимое для определения места судна число ИСЗ. Для суждения о возможности определения места по СРНС НАВСТАР необходимо сделать специальный запрос, по которому выдается расписание (прогноз) наличия ИСЗ в зоне радиовидимости наблюдателя и судоводитель может прогнозировать время, когда возможно получить обсервацию. Информация о числе ИСЗ на дисплее дается для трех двадцатиминуток каждого часа.

⁹ Если $XTD > Limit$, $CTS > Limit$, то подается предупредительный звуковой сигнал.

N 42 23.0 63				W 61 14.267			
15/08/89				GNT 23 03 05			
00	333	232	233	233	233	233	233
04	333	322	222	222	111	111	111
08	232	221	111	111	111	111	111
12	112	111	111	111	112	112	112
16	222	344	445	445	678	678	678
20	655	454	444	444	444	444	444

Рис. 16.25

Она относится к месту запроса и должна уточняться по мере движения судна. Определение места судна возможно при числе ИСЗ не менее трех/Вид такой информации показан на рис. 16.25. Из него видно, что 15.08.89 г. непрерывные определения места были возможны с $T_{гр} = 17.00$ до $T_{гр} = 24.00$.

Для нужд российского морского флота создается система ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система). Она основана на измерении расстояний одновременно минимум до трех спутников из созвездия в 12 ИСЗ, размещенных на трех орбитах. Спутники запускаются на круговые орбиты высотой $H = 19\ 100$ км. Период их обращения 11ч 15 мин, наклонение орбиты $64,8^\circ$, диапазон частот 1240...1260 МГц а ожидаемая точность определения места порядка 100м ($P = 95\%$).

Если опыт эксплуатации систем НАВСТАР и ГЛОНАСС покажет их подавляющее преимущество по сравнению с действующими РНС, то к концу XX в. можно ожидать прекращение срока действия последних.

Спутниковые РНС на средневысоких орбитах станут основным средством обеспечения безопасности судоходства в любой точке Мирового океана, при этом системы НАВСТАР и ГЛОНАСС могут использоваться совместно. В России и за рубежом ведутся работы по созданию комбинированных ПИ.

Одним из возможных в будущем применений спутниковых РНС НАВСТАР и ГЛОНАСС может быть использование их для высокоточной проводки судов в каналах, которая в настоящее время выполняется с помощью береговых РЛС. Для этой цели, а также для обеспечения проведения геодезических работ потребуется установка на берегу контрольных ПИ системы и передатчиков для проведения коррекции измерений на судне в реальном масштабе времени. Такой метод использования СРНС НАВСТАР называется дифференциальным (*DGPS*). В дифференциальном режиме ожидается точность до 6 м в радиусе до 500 км от береговой станции.

Идея дифференциальных методов коррекции координат заключается в том, что приемная аппаратура спутниковых систем устанавливается, на так называемых, опорных (контрольных) станциях, координаты которых определены геодезически и точность привязки в данной системе координат значительно превышает точность определения места по навигационной системе.

Таким образом, принимая измерительную информацию, на станции появляется возможность вычислять дифференциальные поправки к координатам, или к радионавигационным (навигационным) параметрам.

Эти поправки имеют свойство быть практически постоянными на некотором удалении от опорной станции, т.е. в некотором дифференциальном районе.

Поправки радиотехническими методами передаются в приемную судовую аппаратуру для получения более точных координат, поэтому в судовых приемоиндикаторах имеется специальный дифференциальный блок. В системе DGPS принято рассчитывать поправки к псевдодальностям, так как неизвестно, какое созвездие спутников применяет пользователь системы для определения места судна.

Поправки можно использовать в двух режимах:

1. Для неподвижных объектов является несущественным использование дифференциальных поправок в реальном масштабе времени и они могут запоминаться и применяться в дальнейшем для обработки навигационной информации.

2. Для движущихся объектов, которыми являются суда, необходимо применение поправок в реальном масштабе времени.

Состав дифференциальной системы представлен на рис. 16.26.

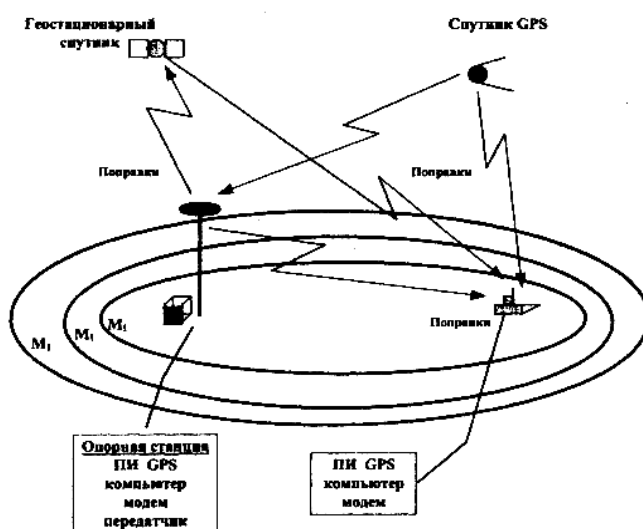


Рис. 16.26

Каналы связи могут быть наземные, например в частотном диапазоне радиомаяков, или через геостационарные спутники (ИНМАРСАТ).

Наибольшее распространение имеет сеть опорных станций, расположенных на уже действующих радиомаяках. Радиомаяки получают вторую жизнь, работая в режиме дифференциальной GPS или ГЛОНАСС. Частотный канал для передачи поправок обычно сдвинут на величину около 0,5 кгц относительно основной частоты. На размеры зоны оказывают влияние те же факторы, что и на дальность действия обычного радиомаяка в режиме пеленгования. Это очень важно для потребителей, так как дифференциальная зона «дышит» в зависимости от условий распространения электромагнитных волн, и на ее границах прием может оказаться неустойчивым.

С удалением от опорной станции точность определения места падает, т.е. в соответствии с рисунком 6.26 $M_1 < M_2 < M_3$, где M_1, M_2, M_3 – средние квадратические погрешности определения координат в соответствующих зонах.

Поправки передаются в формате RTCM SC-104 (Radio Technical Comission for Marine Services). В сигналах опорных станций транслируются 16 видов данных, но непосредственно для навигации используются сообщения типа 1 с общей информацией, которая включает в себя:

1. Идентификатор опорной станции.
2. Расписание передачи информации.
3. Объем передаваемой информации.
4. Техническое состояние опорной станции.

Затем передаются поправки к псевдодальностям по каждому спутнику отдельно в фазовых циклах по следующей форме :

$$d\Phi(t) = d\Phi(t_0) + \frac{d\Phi}{dt}(t - t_0)$$

$d\Phi(t)$ – поправка к псевдодальности в момент t_0 .

$d \frac{d\Phi}{dt}(t - t_0)$ – приращение поправки за время $(t - t_0)$

Далее следуют:

- идентификатор спутника
- техническое состояние спутника
- возраст информации
- предполагаемая погрешность навигационного параметра

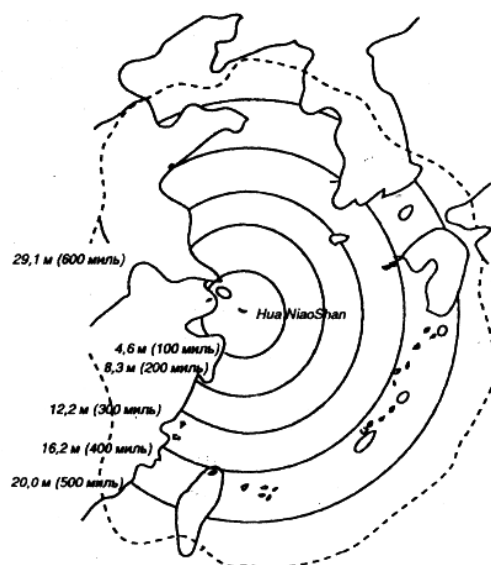


Рис. 16.27

Если произошла коррекция орбитальных данных спутника или произведена временная синхронизация системы, то в течение некоторого времени дополнительно передается поправка за изменение данных $d\Phi$ (сообщения типа 2):

$$d\Phi(t) = d\Phi(t_0) + d \frac{d\Phi}{dt} (t - t_0) + d\Phi_{data}$$

В качестве примера на рис. 16.27 приведена дифференциальная зона системы GPS на радиомаяке HuaNiaoShan (Китай) с дальностью действия до 600 миль, указана так же и точность определения места судна¹⁰.

На рис. 16.28 показаны планируемые станции дифференциальной GPS на базе морских радиомаяков в водах Европы¹¹.

На побережье России в ближайшее время планируется установка около 20 дифференциальных станций системы Глонасс¹².

Интенсивно разрабатывается вопрос о совместном использовании двух систем ГЛОНАСС и GPS в дифференциальном режиме. Совместная система получила название GNSS=GPS + GLONASS. Институт спутниковой навигации в Англии разработал и успешно испытал 20-канальный приемоиндикатор CAA-ISN для DGNSS, который работает через опорные станции Sky Fix с каналом связи для передачи поправок через геостационарные спутники системы ИНМАРСАТ. Для расчета координат применяется референц-эллипсоид WGS-84.

16.8. Использование электронных карт

Современные технические средства позволяют определять место судна и вести автоматическое счисление координат с высокой точностью (до десятков или сотен метров), обновляя текущие координаты судна практически непрерывно (с дискретностью до нескольких секунд). Однако традиционные методы «ручной» обработки навигационной информации не позволяют в полной мере реализовать возможности таких технических средств: графическая прокладка обсерваций на морской навигационной карте не только вызывает существенное запаздывание информации, но и неизбежно снижает точность получаемых данных за счет погрешностей прокладки.

¹⁰ В. С. Трегубов Развитие радионавигации в Китае. Морской транспорт. Экспресс-информация. Серия «Судовождение, связь и безопасность мореплавания», выпуск 9 (328), М., 1996.

¹¹ В. С. Трегубов Развитие радионавигации в Северо-западном регионе Европы. Морской транспорт. Экспресс-информация. Серия «Судовождение, связь и безопасность мореплавания», выпуск 5 (324), М., 1996.

¹² Ю. Г. Зурабов, И. Н. Мищенко. Требования морского флота к радионавигационному обеспечению. Навигация и гидрография, 1996, № 2.

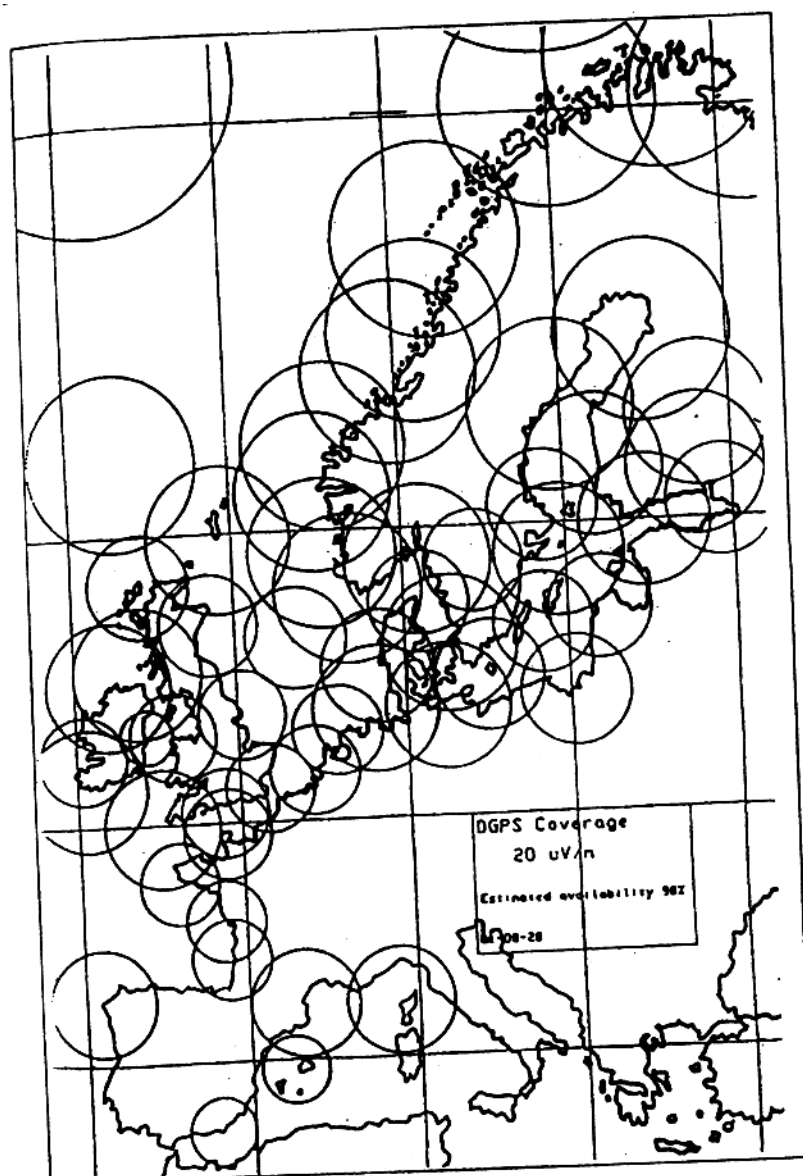


Рис. 16.28

Необходимость обеспечить непрерывный и объективный контроль за местоположением и движением судна и наблюдаемых целей, автоматизировать измерения и их обработку, представлять судоводителю наглядную и надежную информацию в виде, пригодном для немедленного использования, привела в радиолокации к разработке и использованию средств автоматической радиолокационной прокладки – САРП¹³, а в радионавигации – автоматических ПИ РНС¹⁴ и комплексных индикаторов навигационной обстановки (КИНО) с электронными картами¹⁵.

¹³ Английский термин *ARPA – Automatic Radar Plotting Aid(-s)*

¹⁴ Английский термин – «*Automatic Navigation Receiver*».

¹⁵ Английский термин *ECDIS – Electronic Chart Display and Information System* (Система индикации электронных карт и информации).

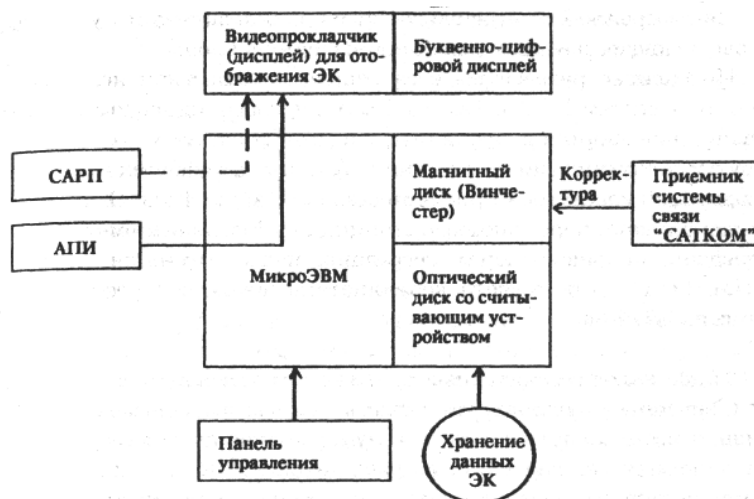


Рис. 16.29

Судоводители уже знакомы с электронными картами, применяемыми в САРП, — упрощенными электронными схемами обстановки, накладываемыми на реальное радиолокационное изображение местности на экране САРП. В большинстве моделей САРП эти карты строит сам судоводитель, затем они «записываются» в память САРП и вызываются на экран по мере необходимости [7]. Однако *ECDIS* — это системы нового поколения и более высокого технического уровня.

Электронная карта нового поколения строится в береговых центрах, имеющих соответствующую лицензию национального Гидрографического управления и несущих ответственность за полноту и правильность отображения навигационной обстановки. Картографические базы данных, используемые и при составлении обычных бумажных морских навигационных карт, преобразуются в цифровую форму, «шифруются» тщательно подобранными условными знаками, записываются на магнитные диски или иные типы носителей и затем, на судне, индицируются на экране дисплея («видеопрокладчика») с высокой разрешающей способностью, управляемого бортовым компьютером (рис. 16.29).

В июне 1982г. ИМО опубликовала (в предварительной версии) стандарт, определяющий характеристики *ECDIS*. Существует также стандарт Международной гидрографической организации — МГО¹⁶ — модифицированный стандарт SP57/ДХ90.

В дополнение к требованиям Правил по конвенционному оборудованию морских судов Регистра России и Общим требованиям к электронному навигационному оборудованию, содержащимся в Резолюции ИМО А.574, видеопрокладчик с электронными картами должен быть одобрен Департаментом морского транспорта России. Символика и цветность картографических данных должны быть максимально приближены к стандартам МГО для *ECDIS*.

¹⁶ Английское название ИО — *International Hydrographic Organization*.

Электронная карта должна отображать следующий минимум картографических данных: контур береговой линии, глубины и высоты, безопасные границы по глубине, подводные препятствия, стационарные и плавучие навигационные средства, морские пути (фарватеры, каналы, рекомендованные курсы, системы разделения движения судов), запретные и ограниченные для плавания районы, а также числовой и линейный масштабы отображаемой карты, значения координат, ограничивающих карту, и, как минимум, по одной промежуточной линии, обозначающей параллель и меридиан (рис. 16.30).

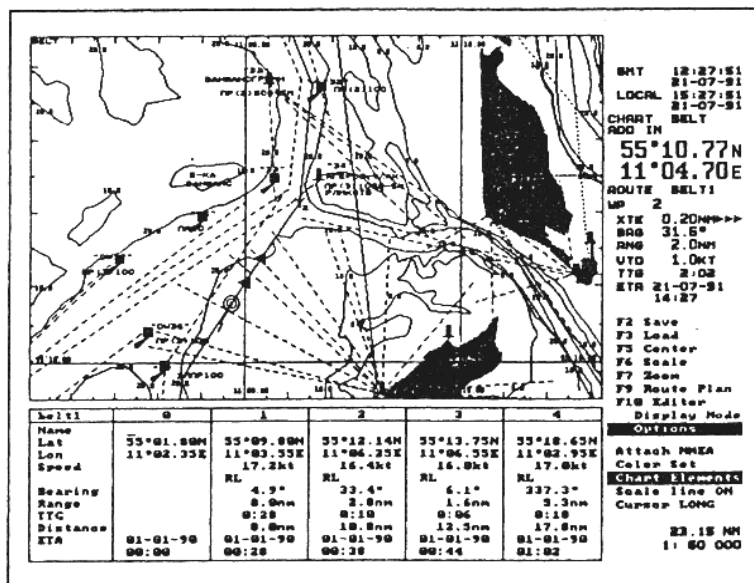


Рис. 16.20

Кроме того, по желанию судоводителя, на экране могут отображаться другие картографические данные из перечня, определенного эксплуатационными требованиями ИМО к *ECDIS*, например подводные трассы кабелей и трубопроводов, пути движения паромов, геодезическая информация (геодезическая модель, дата создания и дата последней корректуры электронной карты), справочные данные о береговых и плавучих СНО и правилах плавания, различные предупреждения навигационного характера и т.д.

Если предусматривается сопряжение с САРП, то на экране видеопрокладчика можно наблюдать и движение других судов с соответствующими векторами их перемещений.

Наконец на экране *ECDIS* отображается в реальном масштабе времени отметка собственного судна, перемещающаяся в соответствии с данными, полученными от высокоточного автоматического ПИ РНС (СРНС). При необходимости символ судна можно показывать на электронной карте в соответствующем масштабе.

Электронная карта должна отображаться в меркаторской проекции с ориентацией «Север» и стабилизацией «Истинное движение», т. е. должен обеспечиваться режим истинного движения символа собственного судна на неподвижной электронной карте. Смена отображаемого участка карты на соседний участок должна производиться автоматически (а при необходимости – и вручную) при приближении символа судна на установленное предельное расстояние к краю экрана.

Видеопрокладчик должен иметь возможность отображать электронные карты в масштабах, адекватных стандартным масштабам морских навигационных карт. При этом необходимо предусмотреть возможность изменения масштабов, как минимум, в два раза – как в сторону увеличения, так и уменьшения. При изменении масштабов размеры отображаемых символов, цифр и букв должны оставаться постоянными.

Следует, однако, иметь в виду, что увеличение масштаба электронной карты означает лишь большее увеличение имеющегося изображения, но не сопровождается вводом большей детальности отображаемого участка, что потенциально опасно для судовождения. Поэтому на экране должны указываться нижний и верхний пределы масштаба данной электронной карты, а в случае нарушения этих пределов судоводителем должно загораться соответствующее предупреждение («неприемлемый масштаб карты»). В этом случае судоводитель, пользуясь электронным каталогом, должен найти другую электронную карту данного района с нужным масштабом.

Чтобы обеспечить необходимые четкость и точность изображения, разрешающая способность экрана должна быть не хуже 0,3...0,5 мм. На индикаторе необходимо обеспечить четкую видимость отображаемых данных как днем, так и ночью с возможностью регулировки яркости. Картографические данные должны четко различаться и не должны затеняться другой отображаемой информацией.

Устройство носителя картографических данных должно быть таким, чтобы исключалась возможность стирания или изменения картографических данных на судне. При этом, однако, должна обеспечиваться возможность корректуры электронных карт на судне – как автоматически (с использованием систем спутниковой связи с избирательным цифровым вызовом), так и вручную, путем нанесения судоводителем дополнительных символов. Внесенная корректура должна отображаться на экране, не затеняя картографической информации и четко различаясь на ее фоне. Сведения о внесенной корректуре должны сохраняться в памяти *ECDIS* и отображаться по запросу судоводителя.

По мере накопления корректуры пользователи будут периодически (например, ежеквартально) автоматически получать полную обновленную версию электронной карты.

Работая с электронным каталогом, судоводитель может подобрать электронные карты всех необходимых масштабов на предстоящий переход, проверить полноту подбора карт с точки зрения как удобства электронной прокладки, так и достаточной детальности изображения.

На один и тот же участок перехода может быть подобрано несколько электронных карт – из разных «масштабных слоев» (генеральные, путевые, крупномасштабные).

На этих картах выполняется предварительная электронная прокладка выбранного маршрута предстоящего перехода. Маршрутные точки¹⁷ могут наноситься либо по географическим координатам (широта, долгота), либо, с помощью специального маркера, по пеленгу и дистанции относительно выбранного ориентира. Заданные таким образом маршрутные точки соединяются линиями предварительной прокладки – локсодромиями или ортодромиями, – которые выделяются на экране особым цветом. С целью «подъема» электронной карты в любой точке экрана могут быть нанесены точки, сплошные и прерывистые линии, условные знаки, цифры, буквы.

С учетом характеристик судна и особенностей района плавания устанавливаются и вводятся в *ECDIS* допустимые значения максимальных отклонений судна от линии заданного пути d_{MAX} , допустимые значения минимальных дистанций сближения с выделенными навигационными опасностями Δ_{MIN} , а также дистанций срабатывания предупредительной сигнализации при подходе к повороту $S_{ПОВ}$ (рис. 16.31). В дальнейшем, при плавании на данном участке, пересечение судном любого из этих пределов вызовет срабатывание предупредительной сигнализации.

В процессе выполнения предварительной прокладки можно при необходимости корректировать выбранный маршрут, например добавляя и убирая маршрутные точки либо изменяя их положение. Уже на стадии планирования перехода *ECDIS* способна выдавать предупредительный сигнал, если электронная линия предварительной прокладки проходит по опасным глубинам либо в недопустимой близости от навигационных опасностей. Выполненная предварительная прокладка заносится в память *ECDIS*; при этом обычно обеспечивается возможность запоминания большого количества маршрутов (до 99 - 999).

Непосредственно на переходе можно наблюдать на экране *ECDIS* в реальном масштабе времени перемещение специального символа, отображающего собственное судно (например, ромб на рис. 16.31), на фоне электронной карты.

Перемещение судна отображается на основе показаний навигационных датчиков (гирокомпаса, лага, РНС и/или СРНС), поэтому точность текущего места судна зависит от точности этих датчиков:

$$M_T = \sqrt{M_0^2 + M_C^2(t)} \quad (16.16)$$

¹⁷ Английский термин *WP – Way Points*.

$$M_c(t) = \frac{S_c}{100} \sqrt{2.8m_{\text{ПУ}}^2 + m_{S\%}^2} \quad (16.17)$$

где M_O – ошибка исходной обсервации; M_T – СКП текущего места судна спустя время t после исходной обсервации; $M_c(t)$ – СКП счисления за время t ; S_c – расстояние, пройденное по счислению; $m_{\text{ПУ}}$, $m_{S\%}$ – СКП учитываемого путевого угла, град, и пройденного по линии пути расстояния, %.

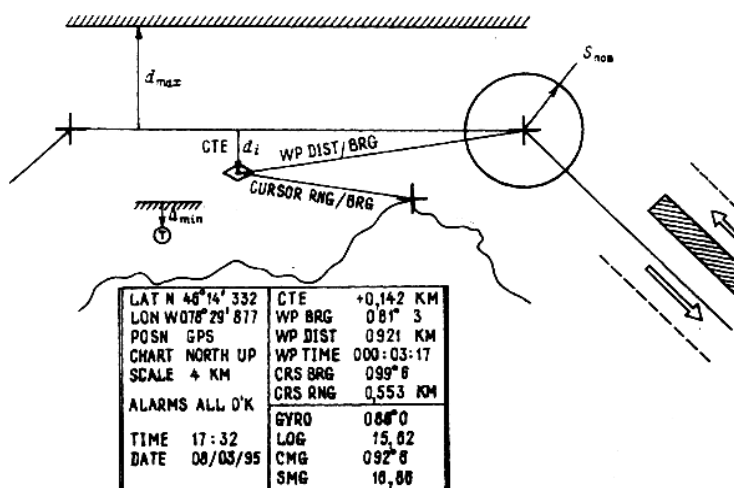


Рис. 16.31

При непрерывных навигационных обсервациях (например, по СРНС НАВСТАР или РНС «Лоран-С») второе слагаемое в формуле (16.16) обращается в ноль, а совместная обработка результатов обсерваций и счисления (режим «обсервационного счисления») позволяет повысить не только надежность, но и точность результатов ($M_T < M_O$). Система может выдавать предупредительный сигнал, если точность навигационной системы недостаточна либо если текущие координаты судна, полученные по различным навигационным датчикам, слишком различаются между собой. Должна быть также предусмотрена возможность коррекции текущего счислимого места судна вручную.

Линия пройденного пути (отличающаяся по цвету от линии предварительной прокладки) и графические отметки времени, выводимые на экран с заданной дискретностью либо по запросу судоводителя, должны сохраняться в памяти *ECDIS* не менее 5 ч и воспроизводиться при необходимости на электронной карте (режим «проигрывания» пройденного маршрута).

Для текущего местоположения судна *ECDIS* должен рассчитывать и индцировать в буквенно-цифровой форме текущую навигационную информацию, в том числе (см. рис. 16.31):

– дату и время (гринвичское или поясное);

- географические координаты судна (с обозначением способа местоопределения);
- гирокомпасный курс (GYRO) и скорость по лагу (LOG) либо путь (*course made good* – CMG) и путевую скорость (*speed made good* – SMG);
- боковое уклонение судна от линии заданного пути *di* (*cross track error* – CTE) с указанием стороны (знака) уклонения;
- дистанцию и пеленг на очередную маршрутную точку (*DIST TO WP*, *BRG TO WP*) и время плавания до нее (*TIME TO WP*);
- географические координаты маркера, который судоводитель может установить в любую точку экрана («+» на рис. 16.31);
- дистанцию и пеленг на маркер (*CURSOR RNG*, *CURSOR BRG*).

Типичные точностные характеристики *ECDIS* приведены в табл. 16.1.

Наблюдая за перемещением отметки собственного судна по экрану *ECDIS*, судоводитель может осуществлять глазомерную проводку судна по линии заданного пути (ЛЗП), опираясь при этом и на объективную цифровую информацию. Замечаемое смещение судна с ЛЗП, м:

$$m_{\perp} = \sqrt{\left(\frac{m_{\text{ГЛ}} C}{1000}\right)^2 + M_T^2}$$

где C – знаменатель масштаба электронной карты; $m_{\text{ГЛ}}$ – глазомерно фиксируемое отклонение отметки судна от линии предварительной прокладки на экране *ECDIS*, мм; M_T – точность текущего места судна, определяемая по формуле (16.16), м.

Таблица 16.3

Вид намерения	$M_{\text{доп}}$
Снятие данных с навигационных карт для построения электронной карты	1...2мм
Данные вводимые судоводителем при предварительной прокладке	2 мм
Измерение географических координат точек с помощью маркера (C – знаменатель масштаба электронной	$\pm \frac{C}{1.000.000 \text{ миль}}$
Измерение полярных координат точки на экране:	
пеленг	$\pm 0,5^\circ$
дистанция (большее из двух указанных значений)	± 100 м или $\pm 2\%$ полудиагонали экрана
Точность текущего места судна и текущей навигационной информации	В зависимости от точности

При надежной и высокоточной навигационной системе *ECDIS* становится важнейшим техническим средством навигации не только в прибрежном плавании, но и в стесненных водах, так как обеспечивает мгновенный контроль за местоположением и движением судна, прогнозирование развития навигационной ситуации, оперативное планирование и контроль маневров, безошибочность опознавания наблюдаемых навигационных и радиолокационных ориентиров в Единой всемирной системе геодезических координат (WGS-84). В отчетах по экспериментам с *ECDIS* неизменно указывается, что даже в сложных навигационных условиях судоводители (по мере накопления опыта работы с системой) охотнее пользуются электронными картами, чем бумажными.

Важно, однако, реально оценивать и учитывать технические ограничения *ECDIS*, в том числе привязку к геодезическим координатам (а не к побережью), зависимость от точности навигационных датчиков и ограничений используемых РНС (СРНС), опасность использования неприемлемого масштаба электронной карты, возможную неполноту информации на электронной карте и т.д. Наконец даже кратковременная неисправность или отказ *ECDIS* могут привести к полной потере контроля за обстановкой и, как следствие, к навигационной аварии.

Выпуск электронных карт, их содержание и передача корректурной информации будут, по-видимому, относиться к юрисдикции национальных властей (гидрографических служб). Открытым пока является и вопрос о едином стандарте для *ECDIS*, который еще нуждается в доработке. Создание международной системы электронных карт требует проведения переговоров и заключения соответствующих международных соглашений. В настоящее время отображаемая видеопрокладчиком электронная карта не рассматривается как законный эквивалент бумажной карты, предусмотренной для использования на судах Правилом V/20 Конвенции СОЛАС-74. Однако несомненно, что со временем *ECDIS* полностью заменит бумажные карты и будет таким же обязательным прибором для морских судов, как, например, гирокомпас или судовая РЛС.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУДОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ В НАВИГАЦИИ

17.1. Виды индикаций изображения на экране РЛС и особенности их использования

Радиолокационная станция позволяет не только определять место судна, но и, что самое главное, видеть объекты, скрытые от визуального наблюдения.

Применение РЛС на морских судах увеличивает безопасность мореплавания и повышает экономическую эффективность работы транспортного флота в сложных гидрометеорологических и навигационных условиях.

Радиолокационная станция предназначена для обнаружения надводных объектов и берега в условиях плохой видимости, определения места судна, обеспечения плавания в узкостях, предупреждения столкновения судов. Кроме того, РЛС может применяться для определения маневренных элементов судна и обнаружения опасных метеорологических явлений (тайфунов, шквалов, снежных зарядов и т. п.).

В судовых РЛС в качестве индикатора применяется электроннолучевая трубка (ЭЛТ) с круговым обзором. Индикатор кругового обзора (ИКО) дает изображение окружающей надводной обстановки и позволяет определять расстояния до объектов и направления на них.

Изображение окружающей надводной обстановки на ИКО может иметь различный вид и различную ориентировку. На морских судах применяются ИКО с двумя видами изображения обстановки: в относительном движении (ОД); в истинном движении (ИД).

При изображении обстановки в ОД место своего судна на ИКО (начало развертки) неподвижно, эхо-сигналы неподвижных объектов (островов, берегов, буев и т. п.) перемещаются на экране в сторону, обратную движению судна, со скоростью, равной скорости судна в масштабе экрана (рис. 17.1,а). Эхо-сигналы подвижных объектов перемещаются по линиям относительного движения (ЛОД) с относительной скоростью, являющейся результатом геометрического вычитания скорости судна-наблюдателя из скорости подвижных объектов.

Этот вид изображения обстановки удобно применять для решения задач на расхождение с другими судами. Недостатком этого вида изображения является нечеткость изображения береговых объектов из-за наложения их эхо-сигналов друг на друга при движении судна («размазывание» за счет послесвечения ЭЛТ).

При изображении обстановки в ИД место своего судна на (начало развертки) перемещается по экрану в направлении и скоростью, которые соответствуют движению своего судна.

В это же время эхо-сигналы неподвижных объектов на экране остаются месте, а подвижных — перемещаются в направлениях, соответствующих их ИК, оставляя за собой следы — линии истинного движения (ЛИД) (рис. 17.1,б). Это достигается тем, что к относительным скоростям движущихся объектов прибавляется скорость судна наблюдателя. Данные о курсе и скорости своего судна вводятся вычислительное устройство автоматически от гирокомпаса и или устанавливаются вручную. Возврат всего изображения и начала развертки в исходную точку, когда оно доходит до края ИКО или до определенного заданного положения (обычно не более $2/3$ расстояния от центра экрана), может осуществляться как вручную, так и автоматически. В режиме ИД пеленги и расстояния измеряют с помощью электронного визира. Этот вид изображения обстановки удобно применять при плавании в узкостях и стесненных водах. При этом исключается «размазывание» изображения неподвижных объектов. Однако решение задачи на расхождение с другими судами в ИД выполнять неудобно. Во-первых, послесвечение обычных ЭЛТ невелико, поэтому след эхо-сигналов встречных судов виден только при достаточно быстром перемещении.

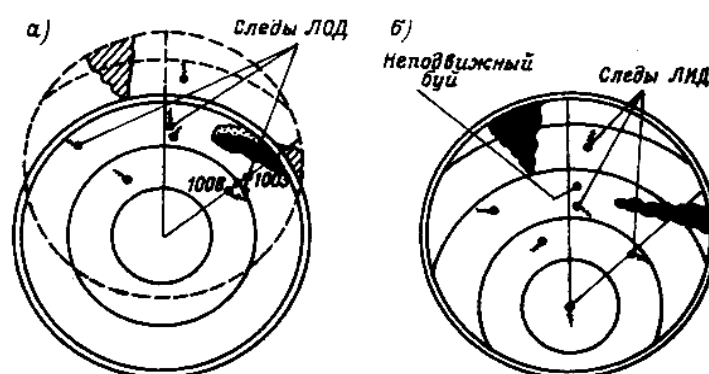


Рис. 17.1

Установить по этим следам курсы судов можно только приблизительно, а скорости невозможно. Во-вторых, ИД не позволяет быстро и достаточно точно определить степень риска столкновения, оцениваемую с помощью главных обстоятельств встречи: дистанции кратчайшего сближения $D_{кр}$ и времени $T_{кр}$ сближения на эту дистанцию.

Изображение на ИКО может быть ориентировано: относительно диаметральной плоскости (ДП) судна («по курсу»); относительно гирокомпасного меридиана («по норду»).

При ориентировке изображения «по курсу» на ИКО видна такая же картина взаимного расположения объектов относительно ДП судна, как и при непосредственном визуальном наблюдении (рис. 17.2,а). При этом отметка курса совпадает с направлением ДП судна и проходит через ноль азимутального круга. По этой шкале отсчитывают курсовые углы на объекты.

При повороте судна отметка курса остается неподвижной, а изображение на ИКО смещается в сторону, обратную стороне поворота, на угол отворота (рис. 17.2,6). Этот вид ориентировки целесообразно применять при плавании в узкостях и при использовании РЛС для предупреждения столкновения судов. Следует иметь в виду, что при ориентировке «по курсу» рыскание судна приводит к смещениям изображения, а это неизбежно ухудшает его четкость, и его называют нестабилизированным. Применяется оно только для режима ОД.

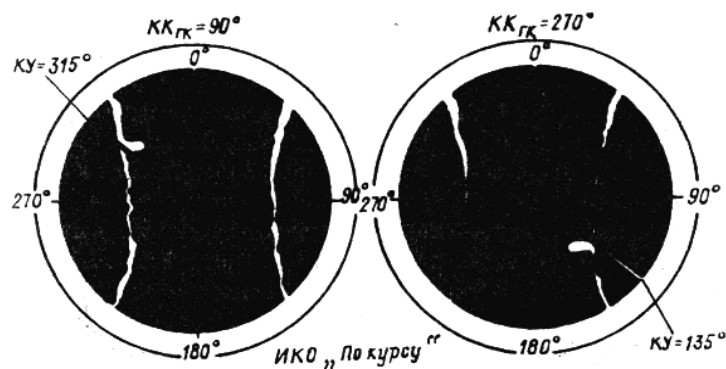


Рис. 17.2

При ориентировке изображения «по норду» на ИКО видна картина, похожая на изображение местности на морской карте. При ноль азимутального круга совпадает с направлением гирокомпасного меридиана. По этой шкале отсчитываются пеленги на объекты курс судна (рис. 17.3). При повороте судна изображение на ИКО остается неподвижным, а отметка курса перемещается в сторону поворота на угол поворота. Таким образом, при поворотах и рыскании судна изображение будет сохранять свою стабильность, поэтому его называют стабилизированным.

Ориентировку «по норду» целесообразно применять для определения места судна. Следует иметь в виду, что этот вид ориентировки применяется для режимов относительного и истинного движения.

Недостаток ориентировки «по норду» — рассогласование в ориентировке картины на ИКО с наблюдаемой визуалью с мостика судна, при которой нулем отсчета служит ДП судна. Это особенно сказывается при плавании в стесненных водах курсами, близкими к 180°, когда отметка курса направлена вниз экрана.

В некоторых современных РЛС применяется дополнительно третий вид ориентировки, называемый «курс стабилизированный». При этой ориентировке отметка курса совпадает с направлением ДП судна и проходит через ноль азимутального круга. Но при небольших изменениях курса, вызванных рысканием, или поворотах отметка курса соответственно изменяет свое положение, а изображение на ИКО остается неподвижным. Благодаря этому изменение курса судна не приводит к «смазыванию» изображения, т.е. устраняется недостаток, свойственный ориентировке «по курсу».

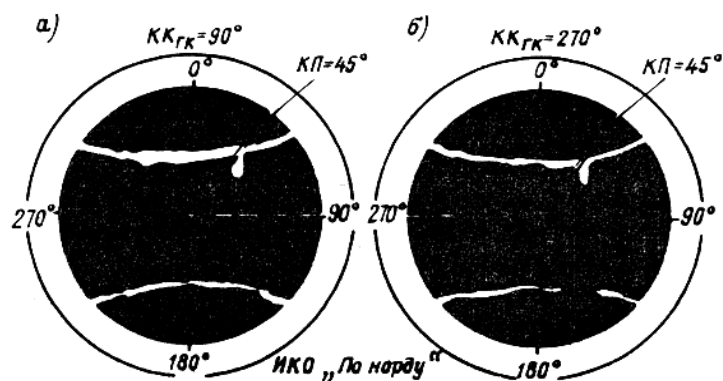


Рис. 17.3

Этот вид ориентировки рекомендуется применять при плавании в узкостях и вдоль берегов в условиях сильного волнения и для решения задач на расхождение с другими судами.

Выбор правильного вида ориентировки имеет большое значение для безопасного плавания, особенно в узкостях. Примером неправильного выбора и применения ориентировки ИКО, являющихся непосредственной причиной аварии, может быть случай, произошедший в 1964 г.

Судно вошло в пролив Босфор с севера, при этом судоводители оставили ориентировку ИКО «по норду» (рис. 17.4,а, б). Отметка курса была выведена (пунктирная линия на рис. 17.4,б). Видимость вначале была хорошей, и проводка судна осуществлялась лоцманским методом. Однако когда судно подошло к месту поворота (см. рис. 17.4, а), видимость резко ухудшилась и судно оказалось в полосе тумана. Лоцман подошел к ИКО, увидел изображение, показанное на рис. 17.4,б, и, не зная, что экран ориентирован «по норду», а отметка курса выведена, дал команду о повороте вправо, что и привело к посадке судна на мель.

Очевидно, что в данной ситуации (узкость, судно следовало в южном направлении) ориентировку ИКО следовало бы иметь «по курсу» (рис. 17.4, в).

Масштаб изображения обстановки на экране РЛС можно изменять переключением ИКО на соответствующую шкалу дальности. Так как на одном и том же экране при меньшей шкале границе экрана будет соответствовать меньшее расстояние, то окружающие судно объекты, находящиеся в пределах данного расстояния, будут видны крупнее, т.е. масштаб будет больше.

Выбор той или иной шкалы дальности зависит от условий плавания.

На крупнотоннажных судах применяются в составе навигационных автоматизированных комплексов или автономно САРП («Бриз-Е», «Океан-С», «Диджиplot», «Дата Бридж-7», «Аутотрек» и др.), состоящие из ЭВМ и радиолокационного индикатора ситуации (РИС).

В этих системах автоматизирован процесс обработки радиолокационной информации, обеспечивается наглядность ее изображения на РИС, выдается цифровая информация о параметрах движения объектов.

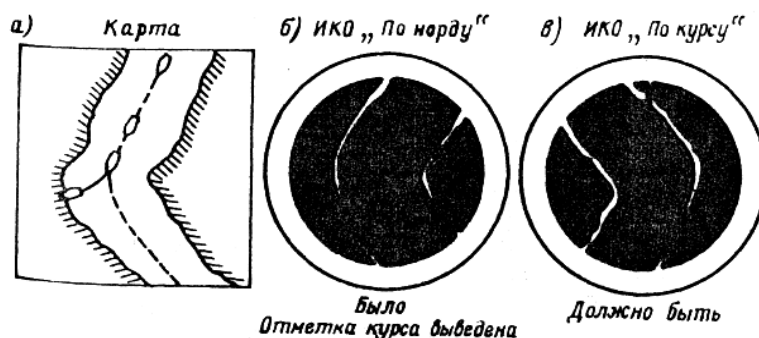


Рис. 17.4

В ЭВМ вырабатываются и хранятся данные о $D_{кр}$, $T_{кр}$, курсе и скорости встречных судов, дистанции и пеленге на них. При необходимости эти данные могут быть воспроизведены на табло в цифровой форме. Характерной особенностью РИС является возможность одновременного сопровождения и обработки сигналов большого числа судов (40 и более). После обработки их эхо-сигналов на РИС высвечиваются линии ИД или ОД судов. Длина этих линий соответствует в масштабе экрана расстоянию, на которое суда переместятся за время экстраполяции. На РИС можно «проиграть» маневр на расхождение со всеми судами, что позволяет выбрать наиболее оптимальный маневр.

Радиолокационный индикатор ситуации удобен и для целей навигации. С его помощью можно вести одновременное непрерывное наблюдение за многими средствами ограждения, получая необходимые данные для определения места судна и безопасного следования вблизи опасностей. Можно также заблаговременно определять $D_{кр}$, на котором судно пройдет тот или иной объект, и своевременно изменять курс для обеспечения безопасного плавания.

Изображение местности на экране весьма сходно с картой. Однако иногда опознание объектов наблюдений может быть затруднительным вследствие искажений. Судоводитель должен знать причины искажений и систематически тренироваться в расшифровке изображения местности на ИКО.

17.2. Основные эксплуатационные данные РЛС

Максимальная дальность действия и дальность обнаружения объектов. В современных РЛС применяются радиоволны сантиметрового диапазона, которые распространяются и отражаются по законам световых волн с несколько большим коэффициентом рефракции. Поэтому они проникают немного дальше за видимый горизонт, чем световые. Максимальная дальность действия радиолокатора определяется радиолокационным горизонтом и может быть найдена по формуле

$$D_p = 2,3930\sqrt{h_d} \approx 2,4\sqrt{h_d} \quad (17.1)$$

где D_p – дальность радиолокационного горизонта, мили; h_d – действующая высота антенны, м.

Эта формула справедлива для стандартных условий атмосферы: давление 760 ммрт.ст., температура +15°C, градиент температуры 0,00657м, относительная влажность (постоянная с высотой) 60%.

Дальность радиолокационного горизонта примерно на 15% больше дальности видимого горизонта, вычисляемой по известной формуле

$$D_e = 2,08\sqrt{e}$$

поэтому D_p можно найти, если выбрать из табл. 22 МТ-75 и умножить ее на коэффициент 1,15.

Дальность обнаружения отдельных объектов с помощью РЛС может быть определена по формуле

$$D_{p.o.} = 2,4(\sqrt{h_d} + \sqrt{h}) \quad (17.2)$$

$$\text{или } D_{p.o.} = 1,15D_{\Pi}$$

Однако в некоторых случаях дальность радиолокационного обнаружения отдельных объектов будет меньше дальности, определяемой формулой (17.2), так как она зависит от отражающей способности этих объектов. Последняя определяется размерами, формой, положением объекта и строением его поверхности (гладкая или шероховатая). Например, высокий крутой каменистый берег будет обнаруживаться на большем расстоянии, чем низкий пологий; металлическое судно – дальше, чем деревянное тех же размеров, и т.д.

Приближенная дальность обнаружения отдельных объектов, полученная на основе наблюдения для РЛС, работающих в диапазоне $\lambda=3\text{см}$ при высоте антенны 15 м, приведена ниже.

Объекты**Вероятная D_{PO} , мили****Судно:**

Небольшое деревянное.....	1...4
Рыболовный траулер	6...9
Водоизмещением 1000т	6...10
Плавмаяк	6...10
Водоизмещением 10 тыс. т.....	10...16
Водоизмещением 50 тыс. т.....	16...20

Буй:

Малый.....	1...2
Средний.....	2...3
Большой.....	3...4
с пассивным отражателем.....	6...8

Объекты**Вероятная D_{PO} , мили****Берег и береговые объекты:**

низменный песчаный берег.....	1...5
Скалы.....	Различная. Для скал высотой 60 м может доходить до 20 миль
Холмы и горы.....	15...40
Причалы, волноломы.....	5...10
Отдельно расположенные маяки.....	5...10
мосты через реки.....	До 5

В туман, дождь, снегопад дальность радиолокационной видимости объектов может быть меньше, чем указано выше, так как часть электромагнитной энергии будет поглощаться частицами воды. При небольших дождях и снегопадах дальность снижается на 10%, при очень сильных (проливных) дождях, тропических ливнях она может уменьшиться на 30 и даже 50%. В связи с этим некоторые современные РЛС являются двухдиапазонными: при ясной атмосфере в них используется диапазон 3 см, при плохой видимости из-за тумана, дождя и т. п. – 10 см.

При некоторых гидрометеорологических условиях может наблюдаться аномальное распространение радиолокационных сигналов, проявляющееся в значительном снижении дальности обнаружения объектов (субрефракция) или в значительном увеличении дальности (сверхрефракция).

Минимальная дальность действия и мертвая зона. Минимальная дальность действия – это наименьшее расстояние, на котором объекты могут обнаруживаться. Она определяется в основном длительностью импульса τ . Пока продолжается излучение энергии импульса, прием отраженных сигналов невозможен, так как антенна все это время подключена к передатчику.

Минимальная дальность действия приближенно равна $c\tau/2$. В действительности минимальная дальность действия несколько больше из-за инерционности антенного переключателя, переключающего антенну на передачу/прием, и невозможности выделить эхо-сигнал при близком расположении его к центру экрана. В общем случае она определяется по формуле

$$D_{\min} = \frac{c\tau}{2} + \frac{c\tau_{\text{пер}}}{2} \approx c\tau \quad (17.3)$$

где $\tau_{\text{пер}}$ – длительность переключения антенны, примерно равная τ .

На шкалах крупного масштаба у современных РЛС $\tau = 0,1\text{мкс}$, что дает $D_{\min} = 30\text{ м}$.

Способность РЛС обнаруживать близкорасположенные объекты характеризуется также мертвой зоной. Ширина диаграммы направленности антенны РЛС в вертикальной плоскости обычно колеблется в пределах $15...30^\circ$, поэтому объекты, находящиеся под нижней кромкой угла излучения, не будут видимы (рис. 17.5). Пространство ниже этой кромки называется мертвой зоной.

Теоретически при отсутствии крена и дифферента величина мертвой зоны определяется радиусом окружности

$$r = h_d \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \quad (17.4)$$

где α – ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости.

Например, для РЛС «Океан», имеющей $\alpha = 15^\circ$, получаем при $h_d = 15\text{ м}$ $r = 114\text{ м}$.

Практически величина мертвой зоны может быть несколько другой, поэтому ее нужно определять экспериментально. Наиболее просто это можно сделать на якорной стоянке судна, используя в качестве надводного объекта шлюпку. Нужно учитывать также, что величина мертвой зоны меняется с изменением осадки, крена и дифферента.

Разрешающая способность РЛС. Разрешающая способность РЛС по расстоянию определяется минимальным (разрешающим) расстоянием между объектами, расположенными на одном пеленге и различимыми на экране РЛС. Она зависит от длительности импульса и размеров рисующего пятна на ИКО: чем короче импульс, тем разрешающая способность больше. Если излучаемый импульс достигает двух объектов, расположенных на расстоянии, меньшем половины длины импульса в пространстве, эхо-сигналы от обоих объектов перекроют друг друга и сольются на ИКО в один эхо-сигнал (рис. 17.6).

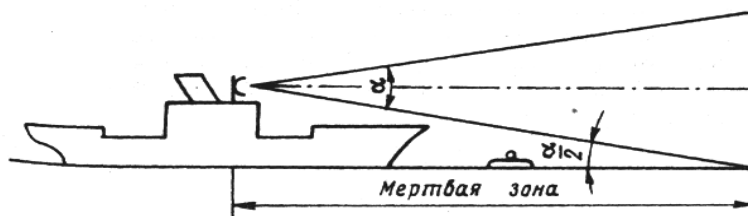


Рис. 17.5

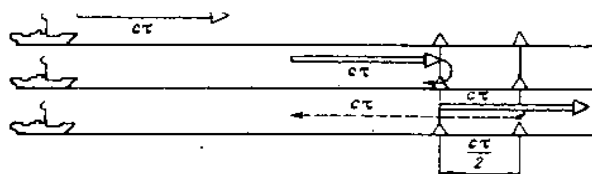


Рис. 17.6

Разрешающее расстояние приблизительно равно половине длины импульса в пространстве плюс диаметр рисующего пятна в масштабе каждой из шкал дальности. С учетом диаметра рисующего пятна получаем

$$\Delta D = \frac{c\tau}{2} + \frac{\alpha}{M} \quad (17.5)$$

где α — диаметр пятна эхо-сигнала; M — масштаб изображения.

Например, для РЛС «Океан»: на шкале 1 мили ($\tau = 0,1$ мкс; $M = 1:9200$; $\alpha = 1$ мм)

$$\Delta D = 15 + 9,2 \approx 24 \text{ м;}$$

на шкале 64 мили ($\tau = 1$ мкс; $M = 1:593\,000$)

$$\Delta D = 150 + 593 = 743 \text{ м.}$$

Как видно, при мелком масштабе главное значение приобретает второй член формулы (17.5).

Разрешающее расстояние для точечных объектов меньше, чем для крупных.

Разрешающая способность РЛС по азимуту определяется минимальным (разрешающим) углом $\Delta\alpha$ между объектами, находящимися на одинаковом расстоянии от судна и отдельно различимыми на экране РЛС. Величина этого угла зависит от ширины $\alpha_{гор}$ диаграммы направленности антенны по азимуту. Приблизительно считают $\Delta\alpha \approx \alpha_{гор}$. Геометрическое толкование этого явления показано на рис. 17.7, где объекты А и В находятся под углом зрения с судна, равным α .

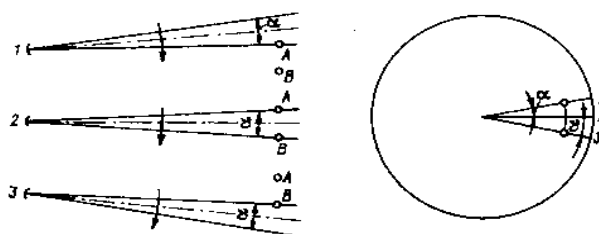


Рис. 17.7

В положении 1 луч антенны касается объекта А и на экране появляется светящаяся точка, которая перемещается по окружности вместе с разверткой в течение времени облучения объекта.

В положении 2, когда объект А находится на задней кромке радиолуча, объект В попадает в зону облучения и начинает давать отметку а экране, являющуюся продолжением отметки объекта А, до прохождения через него задней кромки луча (положение 3). Таким образом, место отметок двух различных объектов получается дуга, равная 2α .

В случае, если угол между объектами будет больше α , на экране индикатора появляются две различные дуги.

Разрешающая способность по азимуту зависит также от диаметра пятна на ИКО и степени усиления приемника. При чрезмерном усилении размеры рисующих пятен возрастают, они сливаются в одно пятно, и поэтому разрешающая способность РЛС уменьшается. С учетом диаметра рисующего пятна получаем

$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{зоп}} + \frac{57,3\alpha}{R} \quad (17.6)$$

где R – расстояние до эхо-сигнала от начала развертки.

Например, для РЛС «Океан» ($\alpha_{\text{зоп}} = 0,7^\circ$) при $a = 1$ мм, $R = 200$ мм получаем

$$\Delta\alpha = 0.7 + \frac{57.3 * 1}{200} \approx 0.7 + 0.3 = 1.0^\circ$$

Разрешающая способность РЛС в целом может быть охарактеризована площадью разрешения, под которой подразумевают площадь, занимаемую изображением на экране эхо-сигнала точечного объекта. Изображение эхо-сигнала такого объекта имеет вид дугообразной полоски, ширина которой в масштабе экрана соответствует линейной ширине луча на расстоянии объекта; длина (радиальная) соответствует расстоянию в масштабе экрана, которое проходят радиоволны за время, равное длительности импульса, т. е. τ . На рис. 17.8 схематически показана площадь разрешения для различных расстояний от антенны.

На малых расстояниях, когда линейное расстояние l между границами луча меньше $c\tau$, отметка эхо-сигнала принимает вытянутую форму; когда $l = c\tau$ – почти круглую форму; при $l > c\tau$ отметка вытягивается по дуге.

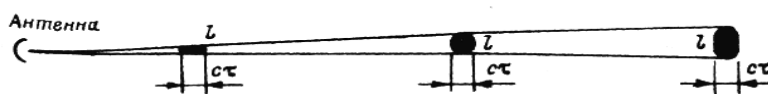


Рис. 17.8

Объекты, находящиеся в пределах площади разрешения, не будут видны раздельно, а дадут один слитный эхо-сигнал.

Точность радиолокационного пеленгования. Точность определения радиолокационного пеленга (РЛП) при использовании механического визира зависит от следующих факторов:

- ширины диаграммы направленности в горизонтальной плоскости (m_1);
- неточной центровки начала развертки (m_2);
- неточного визирования эхо-сигнала объекта (m_3);
- погрешности нуля отсчета, вызванной сдвигом антенны относительно ДП судна или относительно гироскопического меридиана (m_4);
- инструментальной погрешности передачи на индикатор угла вращения антенны (m_5);
- погрешности параллактического характера (m_6).

Увеличение ширины диаграммы направленности в горизонтальной плоскости вызывает, как уже разбиралось выше, растягивание изображения эхо-сигнала по дуге окружности. Это растягивание тем больше, чем дальше от центра экрана находится отметка эхо-сигнала. Изображение точечного объекта растягивается симметрично в обе стороны, и если при пеленговании визир устанавливать над серединой эхо-сигнала, то это явления не внесет заметной погрешности в пеленг.

Иное происходит при пеленговании краев протяженных объектов, например срезов мысов, которые растягиваются несимметрично, только в одну сторону — в сторону моря. Поэтому изображение оконечности объекта появится на экране с некоторой угловой погрешностью, равной половине ширины луча, которая полностью войдет в отсчет пеленга (или курсового угла). Эта угловая погрешность не является постоянной величиной и зависит от многих факторов, в том числе и от отражающих свойств оконечности облучаемого объекта. Например, если мыс оканчивается отвесной скалой, дающей сильное отражение, то погрешность этого рода будет больше, так как эхо-сигнал от скалы достигает большой силы и даст отметку на экране, когда ось радиолокационного луча будет значительно отклонена от направления на нее. Если отражающие свойства оконечности другого мыса будут хуже (например, пеленгуется низкий песчаный мыс), то эхо-сигнал достаточной силы придет к антенне и поступит на ИКО при меньшем удалении оси луча от объекта. Эта погрешность является систематической.

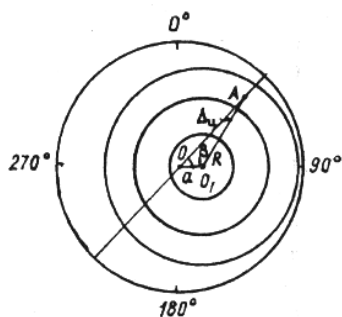


Рис. 17.9

Знак погрешности определяется на основании того, что эхо-сигнал наблюдаемого объекта всегда вытянут в сторону моря.

Из сказанного выше видно, что при радиолокационном пеленговании следует рассматривать два случая: пеленгование точечных и малых отдельно лежащих объектов; пеленгование оконечностей протяженных объектов. Предпочтение следует отдавать первому случаю.

Примем для точечных объектов $m_1 = 0,4^\circ$.

Погрешность от неточной центровки (когда центр окружности, описываемой началом развертки, не совпадает с центром вращения линейки визира, рис. 17.9)

$$\Delta_{ц} = \frac{57,3 \alpha}{R} \sin \beta \quad (17.7)$$

где α – расстояние, на которое смещено начало развертки; β – направление смещения начала развертки относительно линии визирования; R – расстояние до эхо-сигнала.

Из формулы (17.7) видно, что при прочих равных условиях погрешность будет тем больше, чем ближе к центру экрана будет находиться эхо-сигнал. Для уменьшения погрешности пеленга от неточной центровки нужно применять такую шкалу дальности, чтобы эхо-сигнал пеленгуемого объекта оказался на периферии экрана.

При постоянных значениях α и R погрешность достигает своей максимальной величины, когда отметка эхо-сигнала находится на линии, перпендикулярной к направлению смещения центра развертки.

Смещение центра развертки неизбежно и постоянно изменяется, особенно с переменной курса, так как меняется общее магнитное поле судна. Величина смещения редко бывает меньше ± 1 мм. При этом УСЛОВИИ погрешность пеленга для объектов, эхо-сигналы которых находятся на расстоянии 0,5 радиуса экрана, может составить около $m_2 = 0,4^\circ$, увеличиваясь при перемещении эхо-сигнала к центру экрана и уменьшаясь при его перемещении к периферии.

Погрешность от неточного визирования возникает вследствие того, что эхо-сигналы объектов на ИКО часто не имеют резко очерченных границ поэтому при пеленговании мысов бывает затруднительно установить визир точно над краем изображения. Если же пеленгуется какой-либо отдельно лежащий объект, не являющийся точечным, то из-за расплывчатости краев и возможных искажений в его изображении на экране наблюдатель не всегда может симметрично разделить визиром такую отметку. На расстоянии 1/3 радиуса экрана эта погрешность достигает $\pm 0,6^\circ$; 2/3 радиуса – $\pm 0,3^\circ$. Примем в среднем $m_3 = 0,5^\circ$.

Погрешность в нуле отсчета, вызванная сдвигом антенны относительно ДП или гирокомпасного меридиана, может составить $m_4 = 0,3^\circ$. Инструментальная погрешность передачи на индикатор угла вращения антенны $m_5 \approx 0,3^\circ$.

Кроме того, сравнительно небольшие отклонения глаза наблюдателя от строго вертикального положения над визиром вызывают погрешности параллактического характера и при снятии отсчета пеленга, и при совмещении визира с пеленгуемым объектом, так как изображение рисуется на внутренней поверхности ЭЛТ и между нижней кромкой визира и верхней поверхностью трубки имеется некоторый просвет. Поэтому даже при небольших смещениях глаза от строго вертикального положения над визиром при установке визира над объектом возникают большие погрешности (порядка $m_6 = 0,5^\circ$). Эти погрешности являются случайными и оказывают большое влияние на точность РЛП.

Складывая все названные погрешности, получаем среднюю квадратичную погрешность определения радиолокационного пеленга $m_{рлп} = 1,0^\circ$

Можно заключить, что при пеленговании точечных объектов в лучшем случае погрешность радиолокационного пеленга может быть примерно $\pm 1,0^\circ$. При пеленговании мысов погрешность возрастает и может достигать величины $\pm 2...3^\circ$, главным образом за счет искажения (растягивания) эхо-сигналов мысов и неточного визирования.

Так как измеренный РЛП перед прокладкой на карте нужно исправить поправкой гирокомпаса в соответствии с формулой $ИП = РЛП + \Delta ГК$, то на точность проложенного на карте РЛП будет влиять всегда возможная погрешность в поправке гирокомпаса, что судоводитель должен учитывать.

Точность радиолокационного пеленгования будет несколько выше при использовании электронного визира за счет устранения погрешностей m_2 и m_6 . В этом случае $m_{рлп} = 0,8^\circ$.

В режиме автосопровождения точность будет еще выше. Например, в РЛС «Океан» при спокойном море на $\lambda = 3,2$ см $m_{рлп}$ не более $0,5^\circ$, на $\lambda = 10$ см – $0,7^\circ$.

Если пеленгование производится при ориентировке ИКО «по курсу» (или при склоненном от РЛС гирокомпаса), то на объект определяют радиолокационный курсовой угол (РЛКУ) и для прокладки на карте рассчитывают ИП по формуле

$$ИП = КК_{ГК} + \Delta ГК + РЛКУ.$$

В этом случае в пеленг полностью войдет погрешность от неточного определения РЛКУ (вследствие несовпадения нуля азимутального круга с отметкой курса) и погрешность от неточного фиксирования курса (по репитеру гирокомпаса) в момент пеленгования.

Погрешность в КУ от несовпадения нуля азимутального круга ИКО с отметкой курса может достигать $0,5...1,0^\circ$; она особенно опасна при расхождении с судами на встречных курсах.

Поэтому всегда необходимо добиваться возможно большей точности установки нуля индикатора. Если это почему-либо не сделано, то при первом же выходе в море необходимо определить погрешность путем сравнения КУ, наблюдаемых одновременно по компасу и РЛС. Эта погрешность будет постоянной и должна исключаться из всех отсчетов курсовых углов.

Проведенные исследования показывают, что точность радиолокационного пеленгования значительно снижается при качке судна. Например, при крене 10° и дифференте 8° погрешность пеленгования возрастает на 1° . Возникающая вследствие этого погрешность зависит от КУ на объект и равна нулю при КУ, близких к 0 ; 180 или 90° каждого борта; наибольшего значения она достигает при КУ, близких 45 или 135° . Чтобы уменьшить влияние качки на точность измерения, нужно пеленговать ориентиры, расположенные на носовых (кормовых) и траверзных углах. Если необходимо получить точный пеленг на объект при качке, рекомендуется брать несколько отсчетов пеленга при различных углах качки судна и осреднять отсчеты.

Из сказанного видно, что радиолокационное пеленгование производится с невысокой точностью. Поэтому при определении места судна к нему следует прибегать в крайнем случае, когда нельзя определить место другими, более точными способами. Следует стремиться пеленговать только точечные ориентиры и не пеленговать объекты, близко расположенные к центру ИКО.

На некоторых судах применяются двухдиапазонные РЛС «Океан», работающие на $\lambda = 3,2$ и 10 см. При равных размерах антенн Диаграмма направленности в диапазоне $\lambda = 10$ см получается более широкой, отчего в 3 раза снижается разрешающая способность по углу и несколько падает точность радиолокационного пеленгования.

Поэтому для более точного определения пеленга надо применять $\lambda = 3,2$ см.

Следует иметь в виду, что точность радиолокационного пеленгования во многом зависит от опыта наблюдателя.

Радиолокационная девиация. Часто антенны РЛС не удается установить так, чтобы в пространство ее облучения не попадали мачты, такелаж, антенны и другие устройства. В связи с этим наблюдаются так называемые теневые секторы (см. п. 17.3). Отсчеты РЛП, взятые в этих секторах и в пределах $3...5^\circ$ от их границ могут содержать значительные погрешности, называемые радиолокационной девиацией. Причиной ее является искажение электромагнитного поля сигнала, отраженного от объекта, полем, создаваемым на судне вторичными излучателями (принимаемые отраженные сигналы возбуждают ЭДС в мачтах, трубках, антеннах).

Радиолокационная девиация может быть найдена экспериментально и учтена как поправка при расчете радиолокационного пеленга:

$$\text{ИП} = \text{КК}_{\text{КК}} + \Delta\text{ГК} + \text{РЛКУ} + \Delta\text{РЛКУ}. \quad (17.8)$$

Методика определения $\Delta\text{РЛКУ}$ такая же, как при определении радиодевииции радиопеленга визуальным способом. Перед производством работ весь такелаж надо закрепить по-походному. ИКО должен быть ориентирован «по курсу».

Для определения радиолокационной девиации два наблюдателя одновременно должны измерять визуально КУ по азимутальному кругу компаса на объект наблюдения и РЛКУ по азимутальному кругу ИКО.

Таблица 17.1

Девииация, град	РЛКУ, град		Девииация, град	Девииация, град	РЛКУ, град		Девииация, град
-0,3	0	360	-0.3	-1,0	100	260	+4,0
-0,2	10	350	+0.5	-1,7	110	250	+1,5
-0,1	20	340	+1.4	-1,5	120	240	+1,6
-2,5	30	330	+1.9	-2,4	130	230	+1,7
-1,7	40	320	+2.0	-2,1	140	220	+2,0
-1,3	50	310	+5.7	+1,6	150	210	+1,1
-1,4	60	300	+4.3	-1,6	160	200	+0,8
-1,5	70	290	+2,1	-1,9	170	190	-0,5
-1,6	80	280	+2,9	-0,9	180	180	-0,9
-1,5	90	270	+3,6				

Объектами наблюдения должны быть точечные объекты, например, буи с уголковыми отражателями, плавмаяки, маяки-ответчики и т.п., находящиеся на расстоянии хорошей визуальной видимости. Для определения радиолокационной девиации для всего диапазона КУ необходимо ложиться на отдельные курсы через 5...10°. По результатам наблюдений радиолокационную девиацию рассчитывают по формуле

$$\Delta\text{РЛКУ} = \text{КУ} - \text{РЛКУ}. \quad (17.9)$$

Затем составляют таблицу (табл. 17.1) и вычерчивают график радиолокационной девиации как функции РЛКУ.

Установлено, что с увеличением длины волны РЛС и расширением диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости радиолокационная девиация увеличивается.

Чтобы точно определить радиолокационные пеленги, совершенно необходимо учитывать радиолокационную девиацию, поэтому ее нужно определять при первоначальной установке РЛС на судне и при изменениях в установке такелажа, антенн и т. п.

Точность измерения расстояний. Расстояние до эхо-сигнала объекта на экране РЛС может быть измерено с помощью неподвижных (НКД) и подвижных (ПКД) кругов дальности.

С помощью НКД расстояние до объекта измеряется приближенно, путем глазомерной интерполяции положения эхо-сигнала между НКД. В этом случае точность измерений зависит от погрешностей интерполяции, погрешностей расстановки колец дальности, степени нелинейности развертки.

Наибольшее влияние на точность измерения расстояний оказывает первая погрешность. Наблюдатель способен разделить расстояние между НКД с точностью до 1/10, что дает предельную погрешность в $\pm 10\%$ от этого расстояния.

Среднюю квадратичную погрешность измерения расстояния можно найти по формуле

$$m_D = \frac{D_{III}}{3 * 10 N} \quad (17.10)$$

где D_{III} – шкала дальности; N – число колец дальности.

Например, для РЛС «Океан», имеющей на шкале 16 миль 4 круга Дальности, получаем $m_D = 1,3$ кб.

Из формулы (17.10) видно, что с увеличением числа колец дальности относительная точность измерений повышается. Однако большое число колец осложняет наблюдения за экраном, поэтому в судовых РЛС не имеющих ПКД, их не более 10.

Погрешностями расстановки колец дальности пренебрегают, так как они много меньше погрешностей интерполяции. При нелинейности не более 2...3% возникающие погрешности будут на порядок ниже погрешностей интерполяции, поэтому ими также можно пренебречь.

Более точно измерить расстояние можно с помощью ПКД. Точность этого измерения определяется погрешностями калибровки, инструментальной, измерений и объекта.

Погрешность калибровки выражается в том, что каждое фиксированное значение радиуса подвижного круга не соответствует действительному расстоянию для избранного масштаба. При калибровке ПКД расстояния, измеренные с помощью РЛС, сравнивают с расстояниями, измеренными геодезическим путем, и в случае необходимости корректируют отсчет ПКД. Такой метод калибровки имеет высокую точность, и остаточная погрешность не будет превышать 10 м.

В судовых условиях пользуются следующим приемом. На стоянке в порту точно определяют место судна и наносят его на план (масштаб не менее 1:25000). С плана снимают расстояния до хорошо приметных на экране РЛС точечных объектов и по ним производят калибровку, как в уже описанном способе. При таком методе точность будет соответствовать точности измерения расстояний на плане.

Исследования показывают, что при исправном действии дальномерного устройства погрешность калибровки не будет превышать 0,1...0,2 кб. Погрешности калибровки обычно малы, и они могут иметь значение только при проводке судна по узким фарватерам.

Инструментальная погрешность вызывается неточностью работы фазовращателя РДС и обычно имеет величину примерно 10...15 м.

Случайная погрешность измерения возникает при неточном совмещении ПКД с объектом, до которого измеряется расстояние. Причем при каждом последующем совмещении наблюдатель будет устанавливать подвижный круг несколько в ином положении, чем при предыдущем. Вследствие этого на счетчике будут получаться расстояния, отличающиеся друг от друга.

Случайная погрешность зависит от опыта наблюдателя, четкости и масштаба изображения объекта и может быть выведена из серии отсчетов.

Для уменьшения этой погрешности рекомендуется производить наблюдения при возможно крупном масштабе изображения и совмещать внешний край ПКД с передним краем изображения объекта.

При этом легко улавливаются незначительные совмещения ПКД. Яркость ПКД должна быть минимальной.

Погрешность объекта является наиболее существенной при измерении расстояний. Она заключается в том, что штурман не всегда может совершенно точно указать на карте ту часть наблюдаемого объекта, которая создала передний фронт эхо-сигнала на ИКО. Наиболее просто и точно можно измерить расстояния до отдельно лежащих объектов и обрывистых мысов, наименее точно — до низких берегов, пологих мысов и т.п. Поэтому к расстояниям, измеренным до береговой черты или до объектов, расположенных в отдалении от уреза воды (возвышенности; здания, маяки), всегда следует относиться с осторожностью.

На погрешности объекта сказывается степень усиления. При повышенном усилении очертания изображения объекта расплываются и вследствие этого будет измерено меньшее расстояние; при пониженном — большее.

Точность измерения расстояний с помощью РЛС, определенная экспериментальным путем, приводится в описании каждой станции и колеблется в пределах 0,2...1,0кб. На качке погрешность измерения расстояний несколько возрастает, но погрешность не превышает высоты антенны.

В режиме автослежения за объектом погрешность измерения дальности на волне 3,2 см составляет 40 м, на волне 10 см - 30 м. Поэтому можно сделать вывод, что РЛС как дальномерный прибор имеет высокую точность измерений.

17.3. Чтение радиолокационного изображения

Изображение местности на экране ИКО похоже на изображение на карте, но имеет целый ряд особенностей, которые судоводитель должен иметь в виду при использовании РЛС.

Искажение линии берегов. Изображение берега на ИКО во многих случаях может значительно отличаться от карты:

оно соответствует не урезу воды, а некоторой приподнятой части суши;

мелкие подробности местности, имеющие существенное значение для опознавания местности, часто не выделяются на экране из-за сравнительно небольшой разрешающей способности радиолокатора в горизонтальной плоскости;

часть береговой черты может быть затенена и отсутствовать на ИКО, если впереди нее имеются какие-либо экранирующие объекты (остров, гора и т.п.).

Особенности радиолокационного изображения местности наиболее сильно проявляются при плавании вдоль низменных берегов, когда отраженные от низкой части берега сигналы не смогут дать изображения на экране и эхо-сигналы на ИКО будут соответствовать более возвышенным и удаленным от береговой черты частям суши.

Расстояние, измеренное до этих эхо-сигналов-, может быть значительно преувеличенным по сравнению с действительным расстоянием до берега. Это обстоятельство судоводитель всегда должен учитывать, чтобы не поставить свое судно в опасное положение.

Растягивание изображения из-за некоторой ширины радиолокационного луча сглаживает картинку, получающуюся на экране, в результате чего мелкие детали (бухточки, близлежащие к берегу островки) исчезают, что иногда может нарушить ориентировку, создать впечатление единого объекта значительных размеров и т.п.

Затенение одних объектов другими затрудняет опознавание берега, особенно при подходе к нему с моря. При движении вдоль берега изображение местности может постоянно меняться, так как одни объекты будут выходить из затенения или подниматься над радиолокационным горизонтом, а другие, ранее видимые на экране, будут затеняться или скрываться.

Чтобы облегчить опознавание местности и определение места судна, в некоторых странах издают специальные карты с радиолокационной нагрузкой (более подробно отмечен рельеф берега, нанесены контуры объектов, дающих отражение, и т.п.). Однако составление таких карт – очень трудоемкий процесс и пока они не получили широкого распространения. Некоторые судоводители считают более целесообразным приспособлять обычные морские карты для целей радиолокации и издавать фотографии с радиолокационными видами отдельных участков побережья. Для подъема навигационных карт в радиолокационном отношении нужно, пользуясь имеющимися горизонталями, отметить все ближайшие отражающие объекты и по этим данным начертить контур ожидаемого изображения данного участка берега. Эту работу может проделать сам судоводитель, но только при условии, что рельеф берега на морской карте достаточно подробно изображен.

Влияние морского волнения. Эхо-сигналы, создаваемые морскими волнами, могут значительно влиять на качество изображения, создавая в центре экрана яркое пятно радиусом до 2 миль, в сильный шторм – до 4 миль.

Передние склоны волн дают более сильные сигналы, чем задние, поэтому пятно имеет форму овала, большая часть которого расположена с наветренной стороны.

Засветка, создаваемая волнением, иногда бывает настолько яркой, что на ее фоне могут исчезнуть эхо-сигналы даже крупных объектов (судов, буев и т.п.). Это явление представляет серьезную опасность, так как не позволяет обнаруживать и наблюдать объекты тогда, когда это особенно важно, т.е. вблизи судна.

Влияние этого явления до некоторой степени можно снизить, уменьшая чувствительность приемника в центре экрана и сохраняя ее нормальной на периферии (временная автоматическая регулировка усиления – ВАРУ). При использовании ВАРУ слабые эхо-сигналы от волн исчезают и видны только эхо-сигналы от объектов с большей отражающей способностью. Следует, однако, иметь в виду, что, применяя ВАРУ, уменьшают не только паразитные эхо-сигналы от волн, но и полезные. Если эхо-сигналы слабы, то они также исчезнут с экрана ИКО. Например, в штормовую погоду небольшие деревянные суда и шлюпки не могут быть видны на ИКО вблизи судна. Поэтому пользоваться регулировкой ВАРУ нужно с осторожностью, чтобы ликвидировать только сплошное пятно помех, сохранив отдельные случайные эхо-сигналы от волн.

Крупные суда, эхо-сигналы которых не различаются на фоне засветки, могут быть обнаружены по их тени на волнении. Эта тень покрывает собой пространство моря, заслоненное крупным судном от луча антенны.

Влияние метеорологических условий. Опыт работы с РЛС показал, что в туман, дождь и при чрезмерно влажном воздухе наблюдается некоторое уменьшение дальности обнаружения объектов. Это объясняется сильным рассеянием и поглощением радиоволн сантиметрового диапазона водой, находящейся в воздухе. Степень ослабления сигналов увеличивается с уменьшением длины волны, на которой работает РЛС.

При некоторых условиях может наблюдаться аномальное распространение радиоволн сантиметрового диапазона, связанное с изменением коэффициента рефракции. При нормальном состоянии атмосферы радиолокационные лучи слегка изгибаются в сторону земной поверхности (рис. 17.10,а). Если коэффициент атмосферной рефракции убывает с высотой со скоростью меньше нормальной, или увеличивается, то изгиб у радиолокационных лучей будет меньшим и они в меньшей степени будут следовать кривизне земной поверхности.

При этом лепесток диаграммы направленности РЛС будет стремиться подняться выше над поверхностью моря, что приведет к уменьшению дальности радиолокационного горизонта (рис. 17.10,б). Такое явление называется пониженной рефракцией (субрефракцией). Оно возникает, когда холодный влажный воздух распространяется над теплой водой. При субрефракции объекты, имеющие небольшую высоту над уровнем моря, будут обнаруживаться на несколько меньших {расстояниях, чем при нормальных условиях. Известны случаи, когда дальность обнаружения небольших судов и островов сокращалась на 30...40% и более.

Субрефракцию обычно замечают, когда температура воздуха не менее чем на 20°C ниже температуры воды. Наиболее часто это случается в полярных районах зимой и вблизи сильно охлажденных береговых массивов. Поэтому если температура поверхности моря на 20°C превышает температуру воздуха, следует ожидать, что очень близкие объекты, находящиеся на расстоянии 2...3 миль, не будут обнаружены РЛС. (Во время арктических плаваний, когда разница между температурами воды и воздуха была особенно большой, судоводители с трудом обнаруживали айсберги и громадные плавучие льдины на расстоянии менее 1 мили.)

Если коэффициент атмосферной рефракции убывает с высотой со скоростью больше нормальной, то радиолокационный луч изгибается сильнее и в большей степени следует кривизне земной поверхности»

В этом случае лепесток диаграммы направленности радиолокатора будет стремиться прижаться к земной поверхности, что вызовет увеличение дальности радиолокационного горизонта (рис. 17.10, в). Это явление называется повышенной рефракцией (сверхрефракцией). При сверхрефракции дальность радиолокационного горизонта может достигать нескольких сотен миль.

Исключительным случаем сверхрефракции является волноводное распространение, при котором радиоволны распространяются внутри высотного атмосферного волновода на большие расстояния, следуя кривизне земной поверхности.

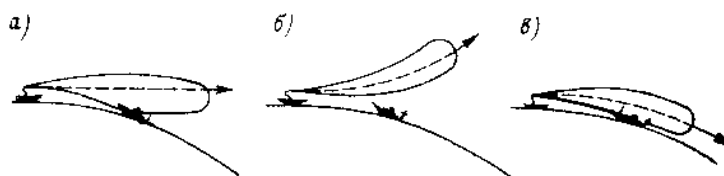


Рис. 17.10

Сверхрефракция обычно возникает при тихой погоде антициклонического типа, когда над относительно холодной поверхностью моря находится теплый сухой воздух. Наиболее часто такие условия встречаются в прибрежных водах умеренного (летом) или тропического пояса, а также в области пассатов и в Красном море.

Явление сверхрефракции не слишком опасно. Единственные помехи, которые могут появиться на экране, это эхо-сигналы последующего хода развертки. Они появляются в случае распространения радиоволн на большие расстояния по атмосферному волноводу, когда отраженный сигнал возвращается к антенне спустя несколько циклов развертки.

Для того чтобы убедиться, является ли принятый сигнал действительным или ложным, необходимо переключить РЛС на другую шкалу дальности, частота посылки импульсов на которой отлична от предыдущей. Если расстояние до объекта изменится, то это ложный сигнал последующего хода развертки.

Опыт использования РЛС показывает, что на экранах может появиться метеорологическое эхо, т.е. эхо-сигналы от облаков, полос ливня, границ районов с резко отличающейся влажностью. Неопытный наблюдатель может принять их за изображение препятствий (остров, берег и т.п.). Кроме того, такие эхо-сигналы затрудняют наблюдение за другими объектами, так как грозовые и дождевые тучи и сильный снегопад очень сильно засвечивают экран и среди этих пятен невозможно обнаружить нужные объекты.

Недооценка судоводителями этой особенности судового радиолокатора приводила к серьезным авариям. В районах, где одиночные острова являются единственными ориентирами, легко спутать с ними отдельные ливневые образования.

В районах с изрезанными берегами во время сильных ливней конфигурация берега может быть сильно искажена, причем границу ливня можно принять за сушу.

Для того чтобы отличить ливень от острова, необходимо вести тщательное наблюдение за изменением формы эхо-сигналов на экране. Отличие становится особенно заметным, если у островов имеются характерные по очертаниям мысы. Эхо-сигналы от туч и грозовых фронтов имеют мелкие очертания с постоянно меняющейся формой. Можно также рекомендовать работу РЛС в режиме ИД, при котором будет видно движение облаков.

Наблюдение за пеленгами эхо-сигналов дает возможность во многих случаях уверенно опознать остров среди ливневых образований, так как последние имеют собственное движение.

Наблюдения за эхо-сигналами от метеорологических явлений могут дать ценные сведения о метеорологической обстановке. Созданы специальные береговые РЛС для обнаружения и определения положения штормов на расстоянии нескольких сотен километров для наблюдения за их дальнейшим движением и развитием. Такие сведения имеют большое значение для кратковременного предсказания о выпадения осадков, прохождения гроз и для указания вероятных путей движения ураганов.

Обнаружение льдов. Выше отмечалось, что РЛС в условиях субрефракции плохо обнаруживают большие ледяные поля и айсберги. Однако льды не всегда обнаруживаются также и потому, что лед обладает малой эффективной площадью отражения, которая определяет возможность видимости объектов РЛС.

При плавании во льдах (или вдоль берегов, покрытых снегом) возникает значительное зеркальное отражение радиоволн и резко уменьшается рассеянное (диффузное) отражение, часть которого как эхо воспринимается радиолокационным приемником. По этой причине плохо обнаруживаются гладкие ледяные поля и айсберги с пологими склонами. Известен случай, когда айсберг длиной 230 и высотой 65 м не был обнаружен РЛС на расстоянии всего 3 мили. Причиной этого явилась большая (порядка 60° от нормали) пологость склона, обращенного к судну.

Когда судно миновало айсберг, то этот же айсберг наблюдался на расстоянии до 12 миль, так как другая его сторона была крутой.

Ровный, гладкий лед почти не виден на экране РЛС. То же самое можно сказать и об отдельно плавающих крупных обломках льдов (несаки).

Наиболее сильные эхо-сигналы дает смерзшийся торосистый лед, изображение которого на экране во многом сходно с эхо-сигналом от сильного волнения.

Снеговое покрытие и льды (припай) вблизи низменных берегов могут исказить очертание береговой линии на экране РЛС и вызвать затруднения в опознавании берега и определении места судна.

Все сказанное выше не означает, что РЛС бесполезна при плавании во льдах. Действительно, РЛС не всегда надежно обнаруживает отдельные ледовые образования, и это следует учитывать, но тем не менее она может дать ценную информацию, особенно при плавании в сплошных льдах, когда РЛС позволяет отыскивать разводья и полыньи, даже закрытые выпавшим снегом. При навыке можно по яркости изображения на ИКО различать состояние льда на различных участках видимой на экране поверхности моря и определять направления, где лед разрежен или более тонок. Радиолокатор позволяет более точно вести счисление, так как с его помощью можно измерять расстояния, проходимые судном на каждом курсе (по льдине-ориентир, расположенной прямо по курсу судна).

Теневые секторы. При установке РЛС на судне стремятся поместить антенну в таком месте и на такой высоте, чтобы различные предметы судовой аппаратуры не мешали обзору всего горизонта. Однако так установить антенну можно не на всех судах. В некоторых направлениях на пути распространения радиоволн могут встретиться препятствия: мачты, труба и т.п., которые затеняют всю вертикальную полезную ширину луча антенны. Так как металлические предметы непроницаемы для радиоволн сантиметрового диапазона, то пространство, находящееся непосредственно позади препятствия, окажется в тени. Влияние теневого сектора на обнаружение объектов, расположенных в створе с препятствием, зависит от их размеров по отношению к ширине сектора, а следовательно, от их удаления. На грузовом судне обычного типа с антенной, установленной над рубкой мостика, теневой сектор от фок-мачты составляет $1...3^{\circ}$, а секторы от ближайших грузовых полумачт — $5...10^{\circ}$.

Фок-мачта может и не создать теневого сектора, а только уменьшить интенсивность луча и снизить дальность обнаружения объектов. Наиболее широкий теневой сектор ($10...45^{\circ}$) создает труба

Секторы, образованные мачтами, грузовыми полумачтами и трубами, нетрудно обнаружить: они хорошо видны на фоне засветки от волн. В штилевую погоду теневые секторы определяют с помощью небольшого катера или шлюпки. Катер обходит вокруг судна с поднятым уголковым отражателем. Схему расположения теневых секторов вывешивают в штурманской рубке.

Чтобы обнаружить суда и другие объекты, оказавшиеся в теневых секторах, нужно периодически на короткое время изменять курс на угол, равный наибольшему теневому сектору, расположенному в носовых курсовых углах.

Невыполнение этого требования может привести к аварии.

Ложные эхо-сигналы. При чтении радиолокационного изображения наблюдатель сталкивается с появлением на экране различных ложных эхо-сигналов, мешающих радиолокационному наблюдению. Причинами их появления могут быть техническое несовершенство и неисправность РЛС, физические явления, связанные с распространением радиоволн. Рассмотрим некоторые ложные эхо-сигналы.

Вследствие несовершенства антенны не могут собирать всю энергию в один пучок, называемый главным лепестком. Часть энергии излучается и по боковым направлениям. Количество этой энергии обычно невелико и составляет в хороших антеннах не более 5% всей излучаемой энергии. Эти нежелательные дополнительные излучения принято называть боковыми лепестками. Эхо-сигналы, принятые боковыми лепестками антенны, появляются в виде нескольких изображений одного и того же объекта, расположенных по дуге окружности, радиус которой равен расстоянию до объекта.

Если объект находится достаточно близко к антенне и обладает хорошей отражающей способностью, то эхо-сигналы от боковых лепестков могут засветить экран РЛС. Процесс образования подобных ложных (так как их в действительности в этом направлении нет) эхо-сигналов показан на рис. 17.11. Как видно из рисунка, эхо-сигнал от данного объекта, вызванный каждым боковым лепестком, появляется на экране в тот момент, когда этот боковой лепесток направлен на объект (ложные эхо-сигналы 1, 3, действительный – 2). Антенна в этот момент не направлена на объект, но эхо-сигнал от бокового лепестка появится на экране на пеленге антенны, указываемом направлением развертки. Очень часто такие эхо-сигналы образуют большие ярко светящиеся дуги, затрудняющие наблюдения. Такие ложные эхо-сигналы могут быть устранены уменьшением общего усиления и применением ВАРУ.

Непрямые эхо-сигналы появляются от реальных объектов, но в другом направлении, так как часть энергии, посылаемая антенной РЛС и отраженная какими-либо металлическими судовыми конструкциями достигает объектов и отражается от них, в то время как развертка направлена в другую сторону.

Отраженный сигнал тем же путем возвращается в антенну и создает засветку экрана в направлении судовой конструкции, расположенной на расстоянии, соответствующем истинной дальности до объекта.

Чаще всего ложные эхо-сигналы, например *a* и *b* на рис. 17.12, наблюдаются в теневых секторах, т.е. на постоянных КУ, независимо от КУ объекта. Вид ложных эхо-сигналов обычно не соответствует виду прямого эхо-сигнала от того же объекта

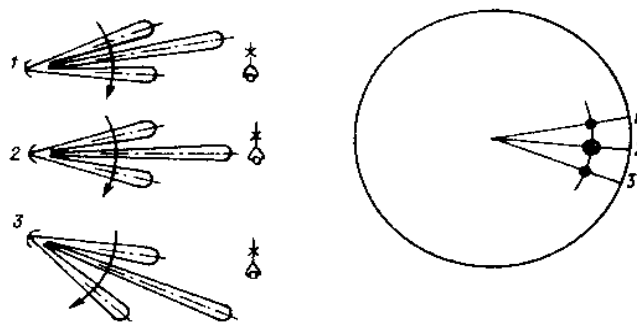


Рис. 17.11

Если судно находится близко к постройкам, мостам, стенкам дока и т.п., от них могут получаться ложные эхо-сигналы точно так же, как и от частей судна. Это обычно бывает при плавании в узкостях. Ложные эхо-сигналы могут появиться в любой части экрана, создавая значительные помехи наблюдению.

17.4. Определение места судна с помощью РЛС

Радиолокационная станция применяется главным образом для определения места судна по измеренным расстояниям. При наличии точечных или имеющих характерные очертания ориентиров можно для этого использовать и радиолокационные пеленги.

Так как изображение берегов на экране только лишь в общих чертах совпадает по своему виду с их изображением на карте, то при подходе к берегу с моря возникает задача опознавания района нахождения судна, а также объектов, эхо-сигналы которых видны на ИКО и которые затем могут быть использованы для определения места судна.

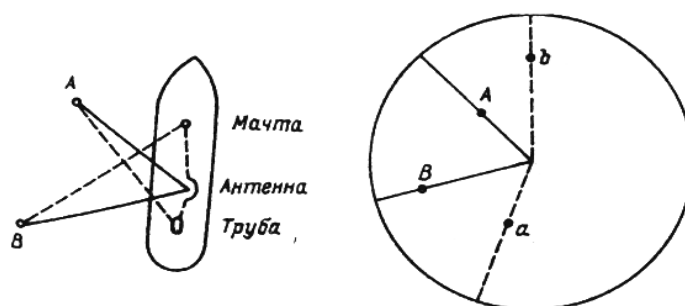


Рис. 17.12

Опознавание береговой черты. Основными признаками для опознавания берега являются конфигурация береговой черты, отдельно лежащие в море скалы, островки и т.п. Для опознавания нужно использовать также все навигационные средства, особенно такие, как измерение глубин и радиопеленгование. Это в значительной степени поможет разобраться в изображении берега на экране. Изображение при этом следует ориентировать относительно меридиана.

Опознавание береговых объектов для последующего определения места судна может производиться несколькими способами.

1. Способ веера. Наблюдатель быстро измеряет пеленги и расстояния до характерных объектов a, b, c, d, e, f (рис. 17.13,а). Затем на кальке прокладывает линию пути судна и из любой точки этой линии по измеренным пеленгам и расстояниям в масштабе карты наносит места объектов – a', b', c', d', f' (рис. 17.13,б).

Наложив кальку на карту в районе счислимого места, перемещает ее до тех пор, сохраняя параллельность линии пути, пока точки a', b', c', d', f' не совпадут с характерными объектами на карте. Точка пересечения пеленгов будет приближенным местом судна, а объекты на экране можно считать опознанными. Для большей уверенности наблюдения следует повторить несколько раз, связывая полученные обсервованные точки счислением.

2. Способ траверзных расстояний. Наблюдатель измеряет расстояния до объекта, эхо-сигналы которых видны на экране, когда они приходят на один и тот же КУ, лучше всего на траверз, и в момент измерения расстояний замечает время и отсчет лага.

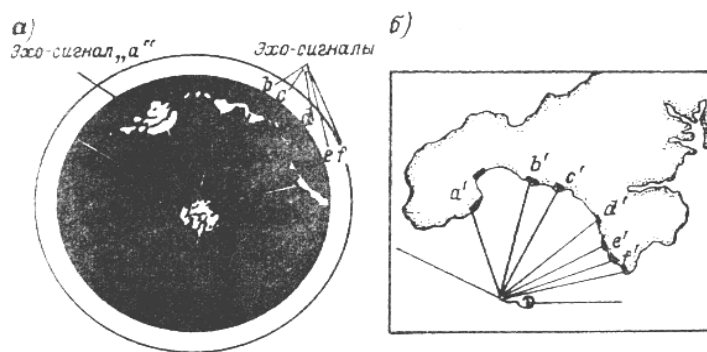


Рис. 17.13

Затем на листке кальки прокладывает линию курса со счислимыми точками каждого измерения. Из соответствующих точек по КУ и расстоянию наносит объекты. Кальку накладывает на карту и перемещает, как и в первом случае. В результате совпадения объектов наблюдатель получает уточненное положение линии пути и опознанные объекты на экране РЛС.

Определение места судна по расстояниям до нескольких ориентиров. 1. Расстояния измеряются до точечных или имеющих характерные очертания ориентиров (выступающих мысов и островков небольших размеров). Наблюдатель последовательно измеряет расстояния до нескольких ориентиров с помощью ПКД. При этом ПКД нужно совмещать с той частью изображения, которая больше всего выступает в сторону судна.

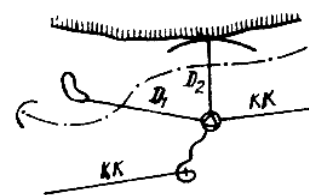


Рис. 17.14

Чтобы уменьшить влияние разновременности измерения расстояний на точность определения места судна этим способом, необходимо сначала измерять расстояния до объектов, расположенных на траверзе или около него, а затем до объектов, расположенных на острых КУ, или, если скорость судна значительна, приводить измерения к одному месту. Приведение можно производить графически или с помощью таблиц величины изменения расстояния, например табл. 31МТ-75.

2. Расстояния измеряются до участка береговой черты с плавными очертаниями и точечного (или имеющего характерные очертания) ориентира. Измерения расстояний ничем не отличаются от предыдущего способа. Однако прокладка этих расстояний затруднена, так как на плавной береговой черте невозможно найти точку, до которой производились измерения.

Построение ведется следующим образом (рис. 17.14): от точечного объекта радиусом, равным измеренному расстоянию, проводят дугу окружности и на ней ищут место, откуда дуга, проведенная радиусом, соответствующим второму измеренному расстоянию, касалась бы плавной береговой черты. Положение острия Циркуля будет соответствовать месту судна. Точность определения места судна в данном случае будет несколько ниже, чем в первом, за счет всегда возможной ошибки объекта при измерении расстояния до береговой черты.

Для контроля следует определить радиолокационный пеленг точечного объекта и нанести его на карту.

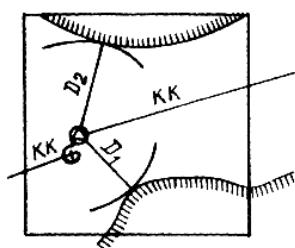


Рис. 17.15

3. Расстояния измеряются до участков береговой черты с плавными очертаниями. В практике часто встречаются случаи, когда на ИКО видны только плавные очертания береговой черты без каких-либо приметных ориентиров, например при входе в проливы, устья рек, широкие каналы и т.п.

В этом случае рекомендуется измерять расстояния D_1 и D_2 до ближайших к судну точек береговой черты (рис. 17.15).

Затем на кальку наносят линию курса судна и из какой-либо точки этой линии проводят дуги окружностей радиусами, равными измеренным расстояниям (в масштабе карты). Дуги проводят примерно в районе тех КУ, на которых были измерены расстояния. Кальку накладывают на карту так, чтобы общий центр дуг находился примерно в районе счислимого места. Передвигая кальку на карте, находят такое ее положение, при котором дуги коснутся обоих участков берега. Положение центра дуг в этот момент и определит место судна. Очевидно, что в случае, когда участки береговой черты параллельны, место судна определить таким способом нельзя.

Если во время измерения расстояний до участков береговой черты с плавными очертаниями одновременно заметить и приближенные пеленги на точки касания ПКД, то построение можно выполнить непосредственно на карте, не пользуясь калькой. Для этого от наблюдаемых объектов проводят линии пеленгов и откладывают на них измеренные расстояния D_1 и D_2 .

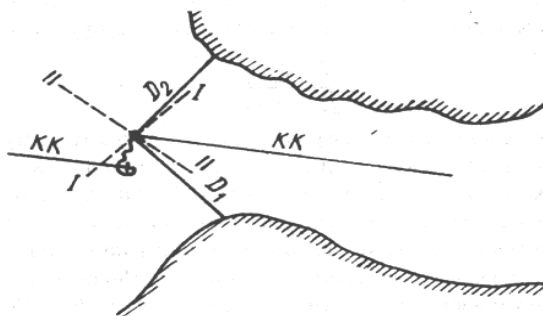


Рис. 17.16

Через полученные таким путем точки проводят линии $I-II$ и $II-II$, перпендикулярные наблюдаемым пеленгам. Точка пересечения этих линий и даст место судна (рис. 17.16).

Реальная средняя квадратичная погрешность определения места судна по двум радиолокационным расстояниям может быть рассчитана по формуле

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{m_{D_1}^2 + m_{D_2}^2} \quad (17.11)$$

где m_{D_1} , m_{D_2} – средние квадратичные погрешности измерения расстояний.

Если точность измерения обоих расстояний примерно одинакова, т.е. $m_{D_1} = m_{D_2}$ (как это часто бывает при измерении до точечных объектов), то формула (17.11) примет вид

$$M = \frac{1.41 m_D}{\sin \Theta}$$

Пример. Определили место судна с помощью РЛС: $D_1 = 50$ кб; $D_2 = 60$ кб; $\Theta = 30^\circ$. Погрешность измерения расстояний равна 1% от измеренного расстояния.

Определить погрешность обсервации M .

Решение. Определяем погрешность измерения расстояний:

$$m_{D_1} = 0.5 \text{ кб}; m_{D_2} = 0.6 \text{ кб}$$

Вычисляем погрешность M , кб:

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{0.5^2 + 0.6^2} = 1.4$$

При определении места судна по трем радиолокационным расстояниям погрешность может быть рассчитана по формуле

$$M = \frac{m_D \sqrt{3}}{\sqrt{\sum \sin^2 \Theta}} \quad (17.12)$$

Определение места судна по радиолокационному пеленгу и расстоянию до одного ориентира. Этот способ применяется, когда на ИКО виден только один хорошо различимый, лучше всего точечный, ориентир и его не видно визуально. Обсервованное место получают на линии пеленга на измеренном расстоянии от объекта. При прокладке линии радиолокационного пеленга не следует забывать исправлять пеленг поправкой ГК.

Средняя квадратичная погрешность в определении места судна данным способом может быть вычислена по формуле

$$M = \frac{1}{\sin \Theta} \sqrt{\left(\frac{D_{m_{РЛЛ}}}{57,3} \right)^2 + m_D^2} \quad (17.13)$$

Так как расстояние РЛС измеряется с высокой точностью, то погрешности в определении места судна этим способом зависят, главным образом, от погрешностей радиолокационного пеленга.

Кроме названных выше, могут применяться также и комбинированные способы определения места, например по визуальному пеленгу маяка и радиолокационному расстоянию и др.

Учитывая, что главную трудность при радиолокационных наблюдениях составляет точное опознавание объектов, нужно стремиться получить не менее трех линий положения (три расстояния, два расстояния и пеленг и т. д.). Тогда большой треугольник погрешности, заметно не изменяющийся при повторном наблюдении через небольшой промежуток времени, укажет на погрешность в опознавании объектов или на погрешности наблюдений.

При определении места судна с помощью РЛС главная задача состоит в том, чтобы узнать, от каких участков берега отразился сигнал. Если это не установлено, то определить место судна нельзя, а можно только сказать, проходит судно чисто от опасности или нет.

Поскольку изображение местности на ИКО имеет особенности и лишь в общих чертах сходно с ее изображением на карте, для уверенного опознавания различных участков береговой черты необходимо проводить радиолокационное изучение района плавания.

Исправно работающая и умело используемая РЛС позволяет уверенно плавать в условиях полного отсутствия видимости. Однако при этом нельзя пренебрегать обычными методами контроля за движением судна. Нужно аккуратно вести счисление и возможно чаще определять место судна при хорошей видимости с помощью РЛС, особенно при плавании в незнакомых или малознакомых местах. Тогда при внезапном ухудшении видимости судоводитель уверенно будет опознавать объекты по изображению на экране, чтобы использовать их для дальнейших радиолокационных обсерваций.

17.5. Использование средств автоматической радиолокационной прокладки в навигации

Средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП) предназначены в основном для предупреждения столкновения судов и облегчения выбора маневра в сложной навигационной обстановке.

В САРП с помощью ЭВМ происходит автоматическая обработка всей (или по выбору штурмана) радиолокационной информации (эхо-сигналов подвижных и неподвижных объектов), и данные о ней в векторной форме показываются на РИС. Это обеспечивает более высокую наглядность ситуации по сравнению с изображением обстановки на ИКО РЛС. Например, маневры других судов индицируются через 1...3 мин после их выполнения. Благодаря этому обеспечивается более ранняя и определенная оценка ситуации при расхождении. На РИС можно «проиграть» маневр на расхождение с опасными судами, что позволяет выбрать оптимальное решение задачи.

Длина векторов целей на РИС соответствует в масштабе экрана заданному времени экстраполяции. Изменяя это время, можно изменить и длину векторов и находить точки, в которых окажутся цели через установленное время экстраполяции.

Изображение на РИС может быть ориентировано «по курсу» или «по норду». Движение целей представляется ЛИД или ЛОД. Индикация ЛОД позволяет очень быстро оценить опасность столкновения (ЛОД опасных целей проходят через центр РИС или вблизи него). Индикация ЛИД позволяет легко отличить неподвижные объекты от подвижных (у первых не будет векторов).

Если на отметку любого объекта, видимого на РИС, нанести светящийся маркер, то вычисленные в ЭВМ данные об этой цели будут индицироваться в цифровой форме на специальном индикаторе: дистанция и пеленг, $D_{кр}$ и $T_{кр}$, курс и скорость цели. При этом вычисленные параметры являются текущими, т.е. относятся к настоящему моменту времени.

САРП могут быть успешно использованы и для решения ряда навигационных задач. С их помощью можно:

определять место судна по пеленгам и дистанциям неподвижных объектов, получая мгновенно необходимые данные. Это позволяет осуществлять в узкостях непрерывный контроль за движением судна по выбранному пути;

определять $D_{кр}$ до неподвижных объектов (островков, буев, плавмаяков и т.п.), около которых проложен путь судна. Непрерывно контролируя $D_{кр}$, можно заблаговременно изменить курс судна и пройти на заданном безопасном расстоянии от объекта;

определять свой путь и действительную скорость судна, наблюдая неподвижные ориентиры;

плавать по изолинии;

контролировать поворот на новый курс.

Если на судне не учитывают течение (например, из-за его незнания) и вводят в САРП скорость судна от лага (вручную или автоматически), то символы неподвижных объектов на РИС в режиме ЛИД будут иметь векторы. Наведя маркер на отметку неподвижного объекта, можно по данным о его векторе определить поправку к скорости своего судна и угол сноса. Для этого вектор кажущегося движения неподвижного объекта нужно мысленно разложить на составляющие векторы, один из которых параллелен курсу судна, другой перпендикулярен к нему. Параллельный вектор, взятый с обратным знаком, представляет собой поправку к скорости судна; перпендикулярный вектор, взятый с обратным знаком, указывает направление и скорость сноса.

В ряде моделей САРП, например «Бриз-Е», «Дата Бридж-7», координаты объектов могут быть введены в память ЭВМ с наборного поля. Тогда по результатам измерений будут определяться автоматически полярные координаты (пеленги и расстояния) всех сопровождаемых объектов и рассчитываться по ним φ_0 и λ_0 , т.е. вестись обсервационное счисление. При этом обсервованные координаты судна выводятся практически непрерывно с высокой точностью. При экспериментах с САРП «Бриз-Е» по точечному объекту место получалось с погрешностью 80...150м (P=95%) на расстояниях 10...20 миль с дискретностью 1мин. При сопряжении САРП с автопрокладчиком реализуется графическое обсервационное счисление, что позволяет непрерывно контролировать движение судна относительно линии заданного пути и практически избавляет штурмана от ручной прокладки.

В некоторых САРП по текущим географическим координатам рассчитываются маршрутные координаты: дистанция до выбранной точки на заданной линии пути и боковое смещение с этой линии. Маршрутные координаты непосредственно используются для управления движением судна.

При средней квадратичной погрешности измерения расстояния 50...100м боковое смещение судна с заданной траектории определяется с точностью 50...100м. Например, при экспериментах с САРП «Бриз-Е» при автосопровождении точечных объектов получили боковое смещение со средней квадратичной погрешностью 15,8 м, с захватом участков береговой черты 81,9 м.

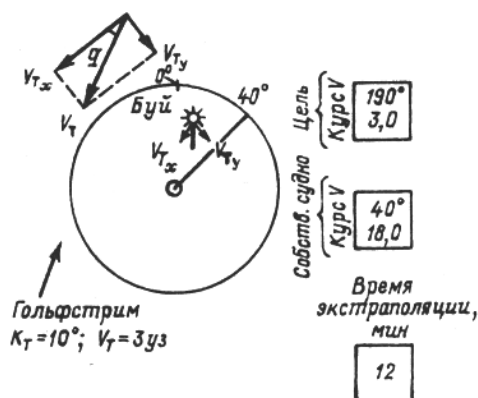


Рис. 17.17

Приведем несколько примеров из опыта использования САРП «Диджиplot» на теплоходе «Магнитогорск» для решения некоторых навигационных задач.

Пример. 21 ноября 1976 г. следовали ИК = 40° со скоростью по лагу $V_L = 18$ уз во Флоридском проливе и на РИС наблюдали следующую ситуацию (рис. 17.17). У неподвижного ориентира (буя) наблюдался вектор движения по направлению 190° со скоростью 3 уз, что являлось результатом сноса судна течением Гольфстрим; параллельная составляющая вектора

$$V_{Tx} = V_T \cos q = 3 \cdot 0,8660 = 2,6 \text{ уз};$$

перпендикулярная составляющая

$$V_T = V_T \sin Q = 3 \cdot 0,5 = 1,5 \text{ уз}.$$

Поэтому действительная скорость судна (относительно дна)

$$V = 18 + 2,6 = 20,6 \text{ уз}.$$

Судно сносится течением влево на угол, величина которого определится, очевидно, так:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_{Ty}}{V_L} = \frac{1,5}{18} = 0,0833$$

$$\alpha = -5^\circ$$

Тогда ПУ = 40-5 = 35°.

После установки на пульте управления САРП «Диджиplot» скорости судна 20,6 уз и курса 35° вектор движения у буя исчез, что свидетельствовало о правильности определения течения и его действия на движение судна

Приведенные расчеты показывают сущность решения задачи по определению неизвестного течения, пути судна и его действительной скорости. Эта задача может быть решена без каких-либо вычислений методом проб. Точность определения течения довольно высокая. Например, при экспериментах с помощью САРП «Бриз-Е» суммарный снос был получен со средней квадратичной погрешностью 0,15 уз при расстояниях до сопровождаемых ориентиров 1...6 мили.

Пример. 16 декабря 1976 г. следовали проливом Большой Бельт. В 8 ч 21 мин легли на ИК = 202° , имея $V_{\text{л}} = 17,5$ уз. На РИС наблюдали следующую ситуацию (рис. 17.18, а). У неподвижного ориентира (буя) наблюдался вектор в сторону движения судна со скоростью 1,5 уз, что являлось результатом сноса судна встречным течением $V_T = 1,5$ уз.

После уменьшения на пульте управления САРП «Диджиplot» скорости судна до 16 уз вектор движения у буя исчез.

Пример. 24 ноября 1976 г. следовали вдоль восточного побережья США со скоростью $V_{\text{л}} = 14$ уз. Для прохождения маяка Фраинг Пэн на $D_{\text{кр}} = 4$ мили легли на $KK_{\text{ГК}} = \pm 61^\circ (0^\circ)$. Когда символ маяка появился на РИС, получили до него $D = 16$ миль и $D_{\text{кр}} = 3,7$ миль, $T_{\text{кр}} = 68,6$ мин. Изменив курс на 1° вправо ($KK_{\text{ГК}} = 62^\circ$), получили $D_{\text{кр}} = 4$ мили (рис. 17.18, б). Через 68,5 мин прошли мимо маяка Фраинг Пэн на $D_{\text{кр}} = 4$ мили.

В заключение подчеркнем, что наряду с большими достоинствами САРП имеют целый ряд объективных ограничений и недостатков, которые должен учитывать штурман. Так как САРП используют данные от РЛС, то все ограничения РЛС действуют и в САРП.

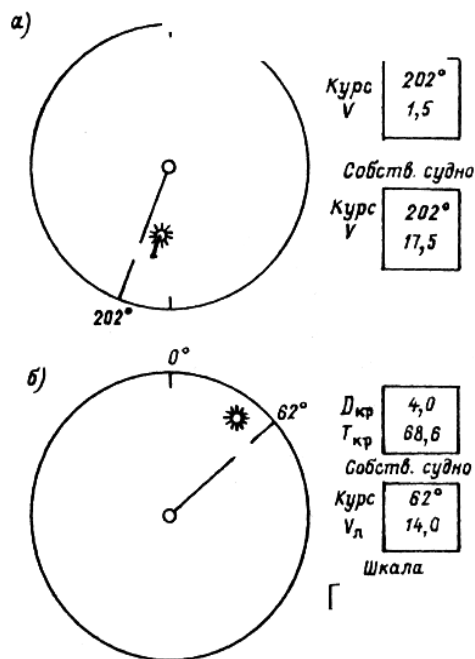


Рис. 17.18

Например, если РЛС не обнаруживает объекты, то и САРП не будут решать по ним. Если радиолокационная информация подвержена влиянию помех, то и САРП будут испытывать вредное воздействие помех, которые могут вызвать появление ложных целей, ложное срабатывание предупредительной сигнализации, появление погрешностей в расчетах, выполненных САРП. Например, через 3 мин после начала автосопровождения относительный курс объекта вычисляется с погрешностью $3...5^\circ$, относительная скорость — с погрешностью порядка 1 уз, дистанция кратчайшего сближения — с погрешностью 0,5...0,7 мили, время до точки кратчайшего сближения — с погрешностью до 1 мин.

Кроме того, САРП имеют свои собственные ограничения: не все наблюдаемые на экране индикатора объекты автоматически сопровождаются; неустойчиво сопровождаются объекты со слабыми сигналами; данные, вычисляемые САРП, выдаются с запаздыванием, необходимым для набора первичной информации в течение некоторого времени.

Надежные результаты расчета основных обстоятельств расхождения с объектом и его элементов движения можно получить не ранее чем через 3 мин.

Несмотря на отмеченные ограничения и недостатки, которые судоводители должны знать и учитывать, умелое использование САРП для расхождения со встречными судами и решения навигационных задач, безусловно, способствует снижению навигационной аварийности.

17.6. Непрерывный контроль за движением судна при плавании в стесненных водах с помощью РЛС

При плавании в стесненных водах, где судно, как правило, движется по рекомендованным путям или фарватерам, практически непрерывно необходим контроль за движением судна по заданному пути одновременно с наблюдением окружающей обстановки. В этих условиях метод судовождения «от обсервации до обсервации» при современных скоростях и размерах судов не может в полной мере обеспечить безопасность плавания.

Эта задача наиболее эффективно может быть решена с помощью автоматических непрерывных обсерваций (обсервационного счисления), осуществляемых по сигналам РНС в путепрокладчиках навигационных автоматизированных комплексов.

Однако такие системы имеются пока на ограниченном числе морских судов. На большинстве судов для непрерывного контроля Движения судна при плавании в стесненных водах может быть использована судовая РЛС или система САРП, если на экране видны эхо-сигналы характерных объектов (маяки, островки, скалы, остроконечные мысы и т. п.).

Непрерывный контроль за движением судна основан на следующих свойствах радиолокационного изображения:

- его непрерывности;

- относительном движении эхо-сигналов неподвижных объектов (на ИКО РЛС относительного движения эхо-сигнал любого неподвижного объекта движется в сторону, обратную движению судна, — по ЛОД).

Методы непрерывного контроля основаны на глазомерной оценке положения судна относительно характерных ориентиров, навигационных опасностей или ограждающих их изолиний.

Пусть, например, судну необходимо пройти в районе разделения движения по пути $П_1П_2П_3$ (рис. 17.19,а), где положение точек поворота $П_1$, $П_2$, $П_3$ относительно неподвижного точечного объекта М (плавмаяка, островка и т.п.) определяется при предварительной прокладке по пеленгам и расстояниям. Во время движения судна по пути $П_1П_2П_3$ эхо-сигнал объекта М будет двигаться по ломаной траектории $П'_1П'_2П'_3$ (рис. 17.19,б), представляющей собой последовательное сложение $ЛОД_1$ ($ИК_1 \pm 180^\circ$), $ЛОД_2$ ($ИК_2 \pm 180^\circ$) и $ЛОД_3$ ($ИК_3 \pm 180^\circ$).

Если по пеленгам и расстояниям заранее нанести траекторию $П'_1П'_2П'_3$ на ИКО РЛС или на экран САРП (для этого в РЛС и САРП имеются специальные технические возможности), то можно непрерывно контролировать движение судна по пути не прибегая к частым определениям места судна. Признаком движения судна по пути $П_1П_2П_3$ будет последовательное перемещение эхо-сигнала неподвижного объекта М по траектории $П'_1П'_2П'_3$, что определяется наблюдателем визуально на ИКО РЛС или на экране САРП.

Отклонение эхо-сигнала от траектории $П'_1П'_2П'_3$ будет означать уклонение судна от маршрута $П_1П_2П_3$. Своевременно его можно вернуть на этот путь.

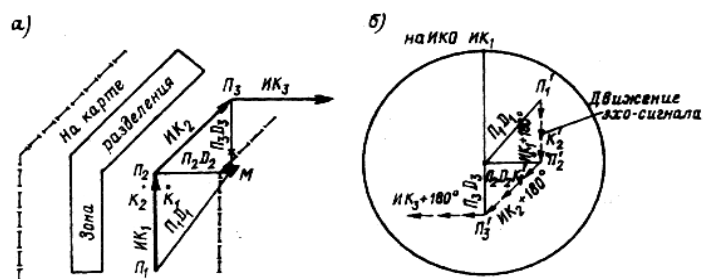


Рис. 17.19

Если, например, эхо-сигнал объекта М оказался не на ожидаемой ЛОД, а в точке K'_1 (см. рис. 17.19,б), т. е. ближе к центру экрана, то это означает, что судно сдвинулось к объекту (точка K_1 на рис. 17.19,а). Поэтому необходимо немного изменить курс в сторону от эхо-сигнала K'_1 (в данном случае влево), чтобы вывести эхо-сигнал на $П'_1П'_2$.

Если эхо-сигнал объекта окажется не на ожидаемой ЛОД, а дальше от центра экрана (точка K'_2 на рис. 17.19,б), это означает, что судно отодвинулось дальше от объекта (точка K_2 на рис. 17.19,а). Поэтому необходимо немного изменить курс в сторону эхо-сигнала K'_2 (в данном случае вправо).

Таким образом, обеспечивается непрерывный контроль за отклонением судна от заданного пути, вызванным действием неизвестного течения, ветрового дрейфа и т.п.

Точность плавания рассмотренным методом определяется в основном следующими факторами: погрешностью в положении ожидаемой ЛОД эхо-сигнала объекта на ИКО РЛС или экране САРП; величиной поперечного смещения эхо-сигнала от ЛОД, определяемой разрешающей способностью глаза наблюдателя; отклонением эхо-сигнала от намеченной ЛОД за счет маневрирования судна (лежания на неточном курсе и циркуляции при возвращении на линию пути); масштабом изображения) на ИКО.

Теоретическое исследование и экспериментальная проверка показали, что при наличии точечных ориентиров проводка судна по намеченному пути обеспечивается с точностью до 50 м, если используется шкала дальности 4 мили, и до 115 м, если шкала дальности 16 миль.

Методы непрерывного контроля нашли широкое практическое применение при плавании по рекомендованным путям, выходе судна в точку поворота и т. п. Конкретная реализация этих методов зависит от технических возможностей РЛС и САРП. Но в любом случае по своей геометрической сущности методы непрерывного контроля за движением судна представляют собой варианты использования известных в навигации оградяющих, контрольных и ведущих изолиний с учетом особенностей радиолокационного изображения. Приведем несколько примеров применения метода непрерывного контроля движения судна.

І. *Оградяющее, или опасное, расстояние.* Применяется для непрерывного контроля за положением судна относительно навигационных опасностей при плавании вблизи берегов и в узкостях.

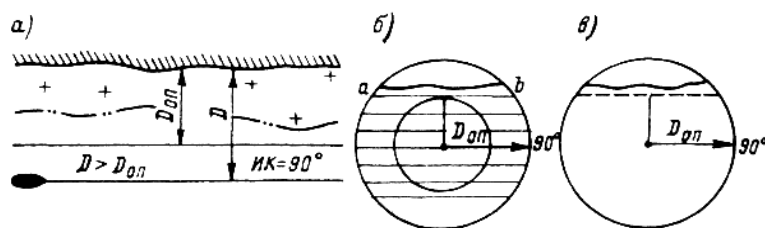


Рис. 17.20

Для заданного участка перехода устанавливают такое значение расстояния $D_{оп}$ меньше которого до берега не должно быть (рис. 17.20,а).

Контроль за безопасным плаванием осуществляется на ИКО РЛС с помощью ПКД, который устанавливают на $D_{оп}$, или сетки параллельных линий механического визира¹⁸, установленного параллельно линии ИК. Судоводитель должен следить на ИКО за тем, чтобы между ПКД или параллельной линией визира (на рис. 17.20,б, линия ab) и эхо-сигналом берега был зазор (в этом случае $D > D_{оп}$).

При плавании серединой узкостей (рис. 17.21,а) круг радиусом $D_{оп}$ должен чисто проходить мимо эхо-сигналов берегов (рис. 17.21,б). Если на судне установлены современные САРП, в которых имеются электронные ограждающие изолинии (например, в САРП «Диджиплот» *NAV-LINE*), то можно их применить путем вывода на экран и установки параллельно линии ИК на $D_{оп}$ (пунктирные линии на рис. 17.20,в, и рис. 17.21,в).

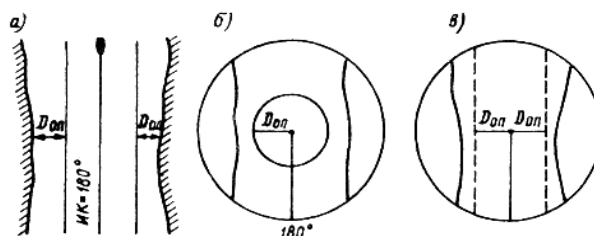


Рис. 17.21

II. Контроль поворота. Для этого применяются контрольные пеленги и расстояния. Пусть, например, судну нужно повернуть в точке B с $ИК_1$ на $ИК_2$ (рис. 17.22).

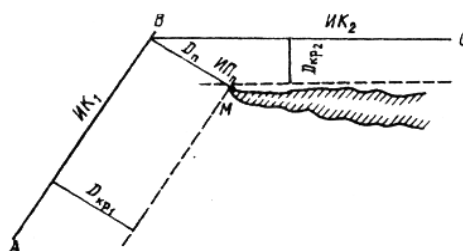


Рис. 17.22

На $ИК_1$ кратчайшее расстояние до мыса M — $D_{кр1}$, на $ИК_2$ — $D_{кр2}$. Для контроля поворота можно использовать различные приемы в зависимости от технических возможностей РЛС.

¹⁸На накладных планшетах РЛС «Наяда» ограждающая изолиния может быть нанесена стеклогграфом.

1. Контроль поворота с помощью ПКД и механического визира. Устанавливают визир на $ИП_{II}$ поворота, а ПКД на D_{II} поворота (рис. 17.23,а). Когда точка К пересечения визира с окружностью коснется эхосигнала мыса M_1 необходимо поворачивать на $ИК_2$.

2. Контроль поворота с помощью электронного визира (рис 17.23,б). Устанавливаем электронный визир на $ИП_{II}$ и расстояние D_{II} . В момент касания конца визира (точка К) эхосигнала мыса M_1 ложатся на $ИК_2$.

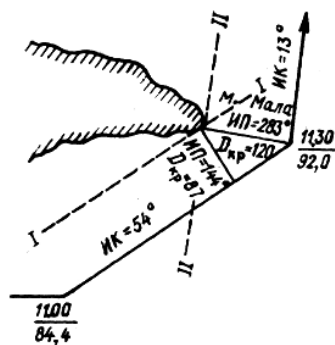


Рис. 17.24

3. Контроль поворота с помощью САРП (рис. 17.23, в). На экране САРП устанавливают электронные ограждающие изолинии $I-I$ и $II-II$ на расстояниях D_{KP1} и D_{KP2} соответственно. При движении судна по $ИК_1$ эхосигнал мыса M_1 будет перемещаться по линии $ИК_1$ 180°.-Когда он придет на электронную ограждающую изолинию $II-II$, необходимо ложиться на $ИК_2$ (рис. 17.23,г).

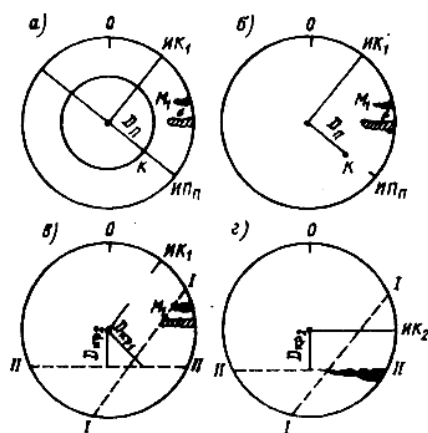


Рис. 17.23

Контроль поворота с помощью САРП «Диджиplot» покажем на примере.

П р и м е р. 26 апреля 1986 г. теплоход «Смоленск» в Тихом океане следовал в Панамский залив. В 11.00 ОЛ = 84,4, проложили ИК = 54°, на расстоянии $D_{кр} = 8,7$ миль от мыса Мала (рис. 17.24). Когда мыс Мала придет на ИП = 283°, $D = 12,0$ миль, надо лечь на ИК = 13° для следования к месту якорной стоянки.

Через мыс Мала на карте провели ограждающие линии опасного расстояния от судна $D_{кр} = 8,7$ миль, ИП1 = 54,0° и $D_{кр2} = 12,0$ миль, ИП2 = 13,0°. На экране САРП «Диджиplot» воспроизвели эти же линии (они называются *NAV-LINE*) (рис. 17.25, а). При следовании ИК = 54° наблюдали за тем, чтобы эхо-сигнал мыса Мала двигался по ЛОД = 54 + 180 = 234°. В 11.30 ОЛ = 92,0, когда ограждающая линия опасного расстояния ИП = 13° коснулась эхо-сигнала мыса Мала (рис. 17.25, б), легли на ИК = 13°. Далее следовали этим курсом, наблюдая за тем, чтобы эхо-сигнал мыса Мала двигался по ЛОД = 13 + 180 = 193°.

Одновременно для контроля выхода в точку поворота использовали визир РЛС «Океан» (рис. 17.25, в). В момент поворота на ИК = 13° конец электронного визира, ориентированного по ИП = 283°, $D = 12$ миль, коснулся эхо-сигнала мыса Мала.

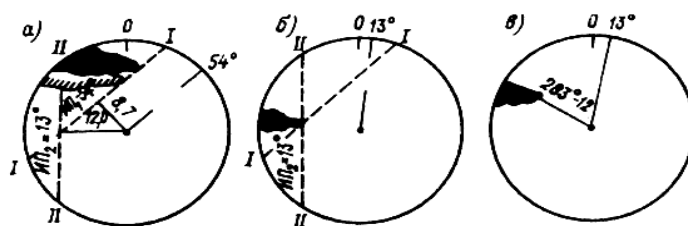


Рис. 17.25

Могут быть и другие примеры использования методов непрерывного контроля за движением судна. Основное достоинство приведенных методов заключается в том, что их применение не требует ухода судоводителя с мостика в штурманскую рубку и, следовательно, не прерывается визуальное и радиолокационное наблюдение за окружающей обстановкой. Эти методы не заменяют традиционных, а должны разумно сочетаться с ними.

Обычные определения места судна на карте должны делаться с необходимой дискретностью. Однако эти методы дополняют обычные наблюдения и дают быструю оперативную и надежную информацию о том, что судно находится в безопасности в интервалах между наблюдениями. Следует также иметь в виду, что методы непрерывного контроля требуют более тщательной и глубокой, чем обычно, проработки предстоящего перехода и подъема карты. В частности необходимо подобрать характерные ориентиры (маяки, островки, скалы, остроконечные мысы и т.п.). Для успешного плавания необходимо, чтобы РЛС была исправна и выверена.

Раздел VI

МЕТОДЫ НАВИГАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЛАВАНИЯ

Глава 18

Общая характеристика методов навигации.

Глава 19

Плавание в открытом море.

Глава 20

**Плавание в стесненных водах и районах регулирования
движения судов.**

Глава 21

Навигационное обеспечение плавания при особых обстоятельствах.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ НАВИГАЦИИ

18.1. Безопасная глубина, ее оценка и контроль

Глубина под килем судна – важнейший параметр, определяющий навигационную безопасность. Теоретически посадка судна на мель или касание грунта исключены, если в любой точке маршрута в любой момент фактическая глубина моря H_ϕ больше фактической осадки судна T_ϕ , т.е.

$$H_\phi > T_\phi \quad (18.1)$$

Однако на практике судоводитель не знает с абсолютной точностью ни мгновенных значений динамической осадки судна, ни, тем более, фактической глубины моря, а оперирует с расчетными либо измеренными их значениями, неизбежно содержащими различные погрешности. Поэтому приходится брать определенный запас и оценивать требуемую безопасную глубину.

Расчетная глубина моря в данной точке на заданный момент времени

$$H_p(t) = H_K + h_p(t) = H_K + h_{пп}(t) + h_{гм}(t) \quad (18.2)$$

где H_K – глубина моря в данной точке, указанная на морской навигационной карте (МНК) относительно принятого нуля глубин; $h_p(t)$ – расчетная высота уровня моря относительно нуля глубин на данный момент времени; $h_{пп}(t)$ – расчетная приливная поправка, получаемая с помощью «Таблиц приливов», «Частных диаграмм прилива», специальных графиков и таблиц издаваемых для конкретных портов и районов; $h_{гм}(t)$ – гидрометеорологическая поправка, учитывающая непериодические колебания уровня моря.

«Таблицы приливов» позволяют выполнять расчеты правильных полусуточных приливов с предельными ($P = 0,95$) погрешностями по времени ($\hat{m}_T$) и по высоте ($\hat{m}_h$) порядка

$$\left. \begin{aligned} \hat{m}_T &= \pm 10 \text{ мин или } 2 \% T_p (T_{II}); \\ \hat{m}_h &= \pm 0,5 \text{ м или } 4 \% B, \end{aligned} \right\} \text{ (берется большее значение) } \quad (18.3)$$

где $T_p (T_{II})$ – продолжительность роста или падения уровня, мин; $B = h_{пв} - h_{мв}$ – величина прилива, м, т.е. разность высот полных (пв) и малых (мв) вод.

Однако, кроме астрономических факторов, на величину и характер прилива оказывают существенное влияние физико-географические условия (очертания берегов, размеры и форма водоема, глубины наличие островов), а также погодные условия (например, ветер, совпадающий с направлением движения приливной волны, увеличивает скорость ее распространения и величину прилива).

Поэтому не следует переоценивать точность выполняемых расчетов приливной поправки.

Непериодические колебания уровня моря порождаются исключительно случайным воздействием гидрометеорологических факторов – сменой ветров, изменением величины атмосферного давления, временными течениями, изменением соотношения осадков, речного стока и т. д. Длинная волна может поднимать уровень моря до 5 м (Финский залив), а сильный ветер может повышать или понижать уровень мелководных заливов до 3...5 м.

Судоводители не располагают, однако, практическими методами предвычисления непериодических колебаний уровня моря. Иногда эта информация включается в штормовые предупреждения, передаваемые местными прогностическими органами, а более точные данные могут быть получены от службы капитана порта или от портового лоцмана. Обычно колебания уровня моря вызываются совместным действием различных причин. Именно мгновенный уровень моря определяет в итоге возможность безопасного плавания судна, поэтому его правильная оценка имеет важнейшее значение.

Нельзя считать абсолютно достоверными и глубины, показанные на МНК: на карте могут быть показаны лишь те детали подводного рельефа и опасности, которые были обнаружены при гидрографическом промере, и с той степенью точности, которая обеспечивалась при промере. Следовательно, точность указания глубин на МНК зависит от следующих факторов:

- подробности промера, способа и подробности показа глубин на карте;

- времени выполнения промера и применяемых технических средств измерения глубин (навигационный эхолот, промерный эхолот, гидролокатор, гидрографическое траление);

- технических средств определения места судна при промере (астрономические методы, навигационные РНС, визуальные методы, высокоточные геодезические РНС);

- характера грунта и рельефа дна (при сложном рельефе повышается вероятность встретить малые глубины или банки, оказавшиеся между галсами и не обнаруженные при промере);

- изменчивости глубин под влиянием гидрологических, гидрометеорологических факторов (течений при песчаном и илистом грунте) или вулканической деятельности.

Таким образом, нельзя полностью полагаться на глубины, показанные на карте, в особенности если они близки к осадке судна (если лет указания о гидрографическом тралении). Если судно среднего тоннажа (с осадкой до 8...10м) следует по фарватеру, который постоянно используется аналогичными судами, то степень доверия к глубинам на карте будет достаточно высока. Однако на судне с большей осадкой либо при подходе к незнакомому порту надлежит следовать с осторожностью (если только нет данных, что другие суда с такой же осадкой уже проходили данным фарватером).

На крупнотоннажном судне степень доверия к глубинам на карте должна быть меньше, чем на судне среднего тоннажа.

Динамическая осадка судна – максимальное погружение корпуса под влиянием мгновенных значений крена, дифферента, качки на волнении, проседания на мелководье и т. д. – величина переменная и точно никогда не известна. Ее расчетное значение

$$T_{дин} = T_{ст} + \Delta T_{дин} = T_o + \Delta T_{пл} + \Delta T_{дин} \quad (18.4)$$

где T_o , $T_{ст}$ – максимальная (при данных загрузке и посадке) статическая осадка неподвижного судна в воде стандартной плотности ($\rho_o = 1,025 \text{ т/м}^3$) и при данной плотности воды ρ_i соответственно; $\Delta T_{пл}$ – увеличение осадки судна, м, за счет уменьшения плотности воды от ρ_1 до ρ_2

$$\Delta T_{пл} = \frac{D}{S} \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \right) \quad (18.5)$$

При переходе из морской воды в пресную

$$\Delta T_{пл} = \frac{D}{S} \left(\frac{\rho_o - \rho_i}{\rho_i} \right) \approx \frac{D}{S} (\rho_o - 1) \quad (18.6)$$

где D – объемное водоизмещение судна при данной загрузке, м^3 ; S – площадь действующей ватерлинии, м^2 ; $\Delta T_{дин}$ – динамическая поправка, т.е. расчетное динамическое увеличение осадки судна в процессе его движения при действии возмущающих факторов:

$$\Delta T_{дин} = \Delta T_{кр} + \Delta T_v + \Delta T_{\text{пр}} \quad (18.7)$$

здесь $\Delta T_{кр}$, ΔT_v , $\Delta T_{\text{пр}}$ – увеличение осадки судна за счет крена, на волнении, «проседание» судна на мелководье соответственно.

Таблица 18.3

	Высота ветровых волн, м			
Длина судна, м	1	2	3	4
	Волновой запас, м			
75	0,2	0,7	1,2	2,0
100	0,2	0,6	1,1	1,7
150	0,1	0,4	0,8	1,3
200	0,1	0,3	0,7	1,1
250	-	0,3	0,6	1,0
300	-	0,2	0,5	0,8

Если сечение судна по мидель-шпангоуту считать прямоугольным, то

$$\Delta T_{кр} = \frac{B}{2} \sin \Theta = \frac{B}{2} * \frac{\Theta}{57.3} \approx \frac{B \Theta}{115} \quad (18.8)$$

т.е. можно приблизительно считать, что каждый градус крена Θ дает увеличение осадки судна $\Delta T_{кр}$ в сантиметрах, численно равное ширине конкретного судна B в метрах.

Волновой запас ΔT_B учитывает возможность увеличения осадки судна относительно уровня спокойной водной поверхности за счет вертикальных перемещений корпуса на волнении, зависящих от размеров судна, высоты и курсового угла волнения, периода следования волн, периода качки судна, частоты встреч судна с волной (табл. 18.1).

Табл. 18.1 может быть рекомендована для практических расчетов. Следует, однако, учитывать, что при траверзном подходе волны волновой запас оказывается в 1,5...2 раза больше, чем при попутном и встречном волнении. С увеличением периода волн ($T_{\theta} > 9$ с) не только существенно возрастает просадка на волнении, но и усиливается качка (особенно при равенстве периода волн и периода качки судна), что требует увеличения *крепового запаса*. У неподвижного судна волновой запас может достигать 50...80% высоты волны (при большом периоде волн).

Таблица 18.1

H_p/H_{cp}	Скорость судна, уз.					
	4	6	8	10	12	14
2,0	0,1	0,2	0,4	0,6	1,0	1,6
1,2	0,2	0,3	0,5	0,9	1,4	-

Скоростной запас ΔT_v – динамическое проседание судна при плавании на мелководье – может быть оценен по формулам Г. И. Сухомела:

$$\Delta T_v = \frac{(K_v^2 - 1)}{2g} V_c^2 \text{ при } \frac{H_p}{T_{cp}} \leq 1.4$$

$$\Delta T'_v = \Delta T_v \sqrt{\frac{T_{cp}}{H_p}} \text{ при } \frac{H_p}{T_{cp}} > 1.4 \quad (18.9)$$

где T_{cp} – средняя статическая осадка судна, м; H_p – расчетная глубина моря, м; V_c – скорость судна, м/с; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; K_v – коэффициент, выбираемый из табл. 18.2.

Для судов среднего тоннажа и с острыми оконечностями увеличение скорости приводит также к появлению дифферента на корму

$$\Delta T_K = K_K \Delta T_V \quad (18.10)$$

где K_K – коэффициент, также выбираемый из табл. 18.2.

Для крупнотоннажных судов с носовым бульбом и коэффициентом полноты подводной части корпуса судна $0,80 < \delta < 0,90$ увеличение скорости на мелководье ($H/T < 1,5$) приводит к появлению дифферента не на корму, а на нос; величину просадки носом на мелководье можно оценить по методике *NPL* – Национальной физической лаборатории Великобритании [10].

Увеличение осадки судна на мелководье при $L/B \cong 6$ (без учета изменения посадки) можно оперативно оценить по данным табл. 18.3.

Проседание при движении в канале будет тем больше, чем выше отношение площади подводной части мидель-шпангоута судна S к площади поперечного сечения канала. Графики, характеризующие проседание и изменение посадки конкретного судна на мелководье и в канале, должны быть представлены в обязательной информации о маневренных элементах судна (по форме ИМО).

Скоростной запас – единственное слагаемое в формуле (18.7), которым можно управлять: снижение скорости ведет к уменьшению проседания судна на мелководье, т.е. снижает риск касания грунта на малых глубинах.

Таблица 18.2

L/B	4	5	6	7	8	9
K_V	1,32	1,27	1,23	1,19	1,17	1,15
L/B	3,5... 5,0		5,0... 7,0		7,0... 9,0	
K_K	1,5... 1,25		1,25... 1,1		1,1	

Так как расчетная глубина в районе плавания (18.2) и расчетная динамическая осадка (18.5) неизбежно содержат некоторые погрешности, то минимальная безопасная глубина может оцениваться формулами

$$H_{MIN} = T_{ДИН} + \Delta_{НЗ} = T_{СТ} + T_{ДИН} + \Delta_{НЗ} \quad (18.11)$$

$$H_{MIN} = T_{СТ} + \Delta_{ОЗ} \quad (18.12)$$

$$\Delta_{ОЗ} = \Delta T_{ДИН} + \Delta_{НЗ} = \Delta T_{КР} + \Delta T_B + \Delta T_V + \Delta_{НЗ} \quad (18.13)$$

где $\Delta_{НЗ}$ – навигационный запас глубины; $\Delta_{ОЗ}$ – общий (суммарный) расчетный запас глубины под килем.

Принимаемая судоводителем величина Δ_{H3} зависит от большого числа различных факторов (включая и степень доверия к карте). Выбирать ее надо с учетом того, чтобы:

- обеспечить необходимую управляемость судна;
- компенсировать возможные погрешности в оценке расчетной глубины (18.2) и расчетной динамической осадки (18.4);
- учесть возможные последствия от касания грунта (степень стесненности фарватера, характер грунта, род груза и его экологическую опасность и т.д.).

Рекомендуемые минимальные значения Δ_{H3} приведены в табл. 18.4.

Навигационный запас может приниматься минимальным в районах, где есть уверенность в правильности показанных на карте глубин (профиль дна протрален или обследован с помощью современных гидролокаторов бокового обзора; известны технические требования по точности промера в данном районе; известно, что здесь уже проходили суда аналогичного тоннажа, и т.д.).

Суммарный расчетный запас под килем Δ_{O3} , определенный формулой (18.13), в ряде случаев должен быть значительно больше традиционных «семи футов под килем» (см. с. 336).

Район плавания

Δ_{O3}

Балтийские проливы (рекомендации Датской Администрации).....	≥ 2 м
Па-де-Кале (рекомендации Великобритании)	≥ 4 м
Средние условия плавания.....	$\geq 1/3 T_{CT}$

Рассчитанная минимальная безопасная глубина (18.11) и (18.12) сопоставляется с расчетной глубиной моря (18.2):

$$\left. \begin{aligned} H_P(t) &> H_{MIN} - \text{плавание считается безопасным;} \\ T_{ДИН} < H_P(t) < H_{MIN} &- \text{плавание возможно, риск повышается;} \\ T_{СТ} < H_P(t) < T_{ДИН} &- \text{возможна буксировка судна;} \\ H_P(t) < T_{СТ} &- \text{плавание судна невозможно.} \end{aligned} \right\} (18.14)$$

В морях с приливами оценивается время безопасного прохода мелководным участком

$$t_{прох} = t[H_P(t) \geq H_{min}] \quad (18.15)$$

Очевидно, что плавание судна возможно без ограничения по времени, если

$$\begin{aligned} H_K &\geq H_{MIN} \\ H_K + h_{MB} &\geq H_{MIN} \end{aligned} \quad (18.16)$$

Напротив, безопасное плавание судна невозможно, если

$$H_K + h_{ПВ} < H_{MIN} \quad (18.17)$$

В практике судовождения существует понятие «проходная осадка» $T_{прох}$ – максимальная динамическая осадка судна, при которой возможно безопасное плавание судна данным каналом (фарватером):

$$T_{прох} = H_{рг} - \Delta_{нз} \quad (18.18)$$

где $H_{рг}$ – расчетная гарантированная глубина на канале.

Осадка, по которую можно загрузить судно,

$$(T_{ст})_{мах} = T_{прох} - \Delta T_{дин} = H_{рг} - \Delta_{оз} \quad (18.19)$$

Таблица 18.4

Район плавания	Мягкий грунт, % $T_{ст}$	Скалистый грунт, камни, % $T_{ст}$
Акватория порта	3...4	5...6
Входной канал	4...5	6...7
Подходы к портам:		
подходные фарватеры, рейды	5...7	7...10
открытые районы, подверженные	10	10...15
Судоходные проливы	5...6	6...7
Прибрежные воды		
обследованные	7...10	10...15
недостаточно обследованные	10...25	20...25

Сведения о гарантированных глубинах, проходной осадке, обязательном минимальном навигационном запасе приводятся в портовых правилах, обязательных постановлениях по порту, навигационных пособиях и справочниках (типа «*Guide to Port Entry*») и могут быть уточнены у лоцмана или администрации порта. Точное знание проходной осадки позволяет максимально использовать грузоподъемность судна, т.е. Получить ощутимый экономический эффект. Однако чрезмерное уменьшение запаса под килем повышает риск касания грунта или посадки на мель, убытки от которых, как правило, в несколько раз превышают доход от перевозки дополнительного груза. Поэтому предельная осадка, по которую загружается судно, должна быть тщательно обоснована.

Минимальная безопасная глубина (18.11) и (18.12) определяет изобату, при пересечении которой резко повышается опасность касания грунта или посадки на мель. Более широким понятием является опасная (или ограждающая) изобата – такая изобата, не пересекая которую, судно вообще не попадает в район навигационных опасностей (мелководье, банки и т. п.) или не выйдет за пределы заданной полосы движения.

При выборе значения опасной изобаты учитывается целый ряд факторов, в том числе $T_{дин}$, ΔH_z , крутизна уклона дна (чем больше крутизна, тем меньше запас времени у судоводителя, чтобы отреагировать на уменьшение глубин), курс судна по отношению к изобатам, скорость судна, степень сложности рельефа дна и характер грунта, пределы распространения навигационных опасностей («все банки с малыми глубинами расположены в пределах трех миль от побережья», «... в пределах изобаты 100 м»), и т.д.

Рекомендуемые принципы выбора значения ограждающей изобаты:

1) учитывать рекомендации и предупреждения лоций и навигационных пособий, а также предупреждения под заголовком карты;

2) при плавании на предельно малых глубинах в качестве ограждающей (опасной) изобаты принимать

$$H_{оп} \geq H_{MIN} + \Delta H_э \quad (18.20)$$

где $\Delta H_э$ – предельная погрешность измерения глубины эхолотом;

3) там, где позволяют глубины, в качестве ограждающей изобаты принимать:

в стесненных водах – изобату 20 м, затем (при появлении больших глубин) – изобату 50 м и т. д.;

в прибрежном плавании – ту изобату (100 м, 200 м и т. д.), в пределах которой лежат все навигационные опасности;

4) при подходе к берегу с моря опасной считается та изобата, которую нельзя пересекать, не зная точного места судна;

5) при плавании по установленным путям и системе разделения движения (СРД) ограждающей будет изобата, которая исключает выход судна за пределы заданной полосы движения (если изобаты расположены параллельно или почти параллельно границам полосы движения);

6) при плавании вдали от навигационных опасностей в качестве ограждающей выбирается та изобата, которая позволит исключить существенные отклонения судна от линии заданного пути либо сближение с берегом на расстояние, меньшее установленного.

Выбранную опасную изобату «поднимают» на карте простым карандашом. При плавании вблизи опасной изобаты контроль глубин должен быть непрерывным. Рекомендуется использовать имеющуюся у большинства эхолотов сигнализацию выхода на заданную глубину

$$H_{зад} = H_{оп} - T_{дин} \quad (18.21)$$

Сигнальная система эхолота срабатывает при измеренной глубине

$$H_{изм} \leq H_{зад} \quad (18.22)$$

Если эхолот допускает ввод осадки судна, то сигнальная система эхолота может быть установлена непосредственно на значение $H_{оп}$.

Во время перехода эхолот является важным средством обеспечения навигационной безопасности, в особенности при подходе к берегу с моря, прохождении узкостей и отличительных глубин, при плавании на мелководье, вблизи навигационных опасностей, в районах с недостаточными или недостоверными промерами глубин. Контроль глубин по маршруту плавания судна является одним из важнейших элементов навигационной безопасности.

18.2. Безопасная полоса движения судна

При отсутствии возмущающих факторов ИК и направление движения судна совпадают с линией заданного пути (ЛЗП на рис. 18.1, а). «Геометрическая полоса», занимаемая судном при движении, равна ширине корпуса судна B .

При наличии возмущающих факторов и погрешностей курсоуказателя судно, следующее заданным ИК, будет смещаться с ЛЗП в направлении преобладающего сноса. Боковое смещение судна с ЛЗП Y_6 будет пропорционально углу сноса c и пройденному судном расстоянию S за время плавания данным курсом t (рис.18.1,б):

$$Y_6 = S \frac{c}{57.3} \approx Vt \frac{c}{60} \quad (18.23)$$

Геометрическая полоса движения судна также увеличивается:

$$W_r = L \sin c + \cos c \approx B + \frac{Lc}{57.3} = B \left(1 + \gamma \frac{c}{60} \right) \quad (18.24)$$

где $\gamma = L/B$. Принимая, что у современных крупнотоннажных транспортных судов $\gamma < 8$, получим значение геометрической полосы, м:

$$W_r \approx B \left(1 + \frac{c}{7} \right) \quad (18.25)$$

Решая задачу плавания по ЛЗП, судоводитель принимает обычно расчетную поправку на снос c_p , т.е.

$$ГКК_P = ПУ_{ЗД} - c_P - \Delta ГК \quad (18.26)$$

Из-за неизбежных погрешностей оценки угла сноса Δc , зависящих от величины угла сноса и применяемых методов его определения, судно будет смещаться с ЛЗП (рис. 18.1,в), НQ под меньшим углом

$$Y_6 = S \frac{c}{57.3} \approx Vt \frac{c}{60} \quad (18.27)$$

Геометрическая полоса движения судна, м,

$$W_r = B \left(1 + \gamma \frac{c}{60} \right) \approx B \left(1 + \frac{c_p + \Delta c}{7} \right) \quad (18.28)$$

ориентирована относительно ЛЗП под углом Δc .

Если обеспечивается условие $\Delta c < c$, то боковой снос судна с ЛЗП замедляется, т.е. судоводитель получает больший резерв времени для навигационных определений. Однако сторона возможного сноса судна с ЛЗП в общем случае неизвестна, так как зависит от знака допущенной погрешности ($+\Delta c$ или $-\Delta c$). Чтобы избежать неопределенности в направлении сноса, судоводитель часто назначает поправку на снос c_p с заведомым «недостатком» ($c_p < c$) или «избытком» ($c_p > c$), что несколько увеличивает погрешность Δc .

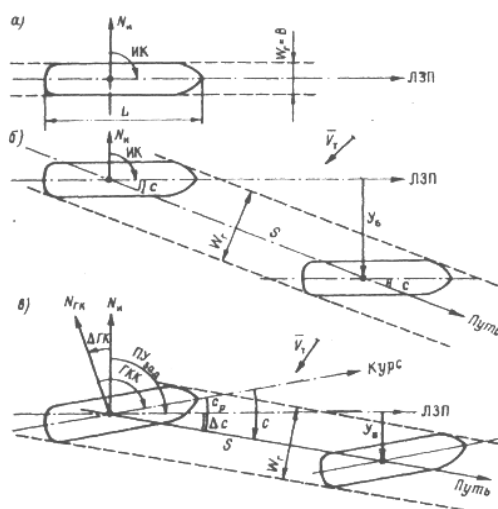


Рис. 18.1

Используя навигационные методы, судоводитель корректирует боковой снос судна с ЛЗП (рис. 18.2,а). Пусть в точке 1 судно начало смещаться с ЛЗП, в точке 2 судоводитель способен обнаружить это смещение, в точке 3 — даст команду на поворот, в точке 4 судно начнет циркуляцию. Тогда наибольшее маневренное смещение судна с ЛЗП может быть выражено формулой, м,

$$Y_m = Y_H + Y_{3M} + Y_{МП} + Y_{Ц} + Y_{ВК} + Y_P \quad (18.29)$$

где Y_H — замечаемое смещение судна с ЛЗП в зависимости от применяемых навигационных методов (линейная чувствительность створа; предельные погрешности линии ведущего пеленга и обсервации по направлению, перпендикулярному ЛЗП, и т.п.);

$$Y_{3M} + Y_{МП} = V \Delta c (t_{3M} + t_{MH}) \quad (18.30)$$

Y_{3M} , $Y_{МП}$ — боковое смещение судна с ЛЗП за время задержки маневра t_{3M} «мертвого промежутка» t_{MH} , в течение которого судно, в силу своей инерционности, не реагирует на перекладку руля;

$$t_{3M} = \Delta t_{HK} + t_{AH} + t_{доп} \quad (18.31)$$

Δt_{HK} – дискретность навигационного контроля, при непрерывном контроле (например, при плавании по створу) $\Delta t_{HK} \rightarrow 0$; t_{AH} – время, необходимое для анализа ситуации; $t_{доп}$ – время, в течение которого судоводитель считает смещение судна с ЛЗП допустимым и не предпринимает коррекции курса;

$t_{МП}$ – значение «мертвого промежутка», мин, при данном угле перекладки руля с учетом влияния ветра на поворотливость судна; $Y_{ц}$ – дополнительное смещение центра масс судна на циркуляции.

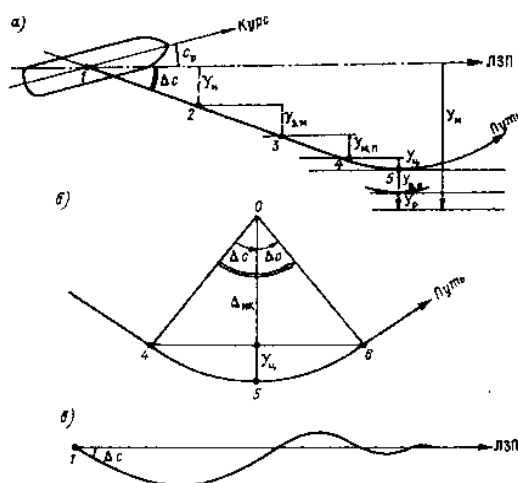


Рис. 18.2

При оптимальной величине коррекции курса, определяемой формулой
 $\Delta ИК = -2\Delta c;$ (18.32)

получим (рис. 18.2,б), м,

$$Y_{ц} = R_{ц} (1 - \cos \Delta c) = \frac{V}{\omega} 2 \sin^2 \frac{\Delta c}{2} = 57.3 * 60 \frac{V}{\omega^0} 2 \left(\frac{\Delta c}{2} \right)^2 \left(\frac{1}{57.3} \right)^2$$

или окончательно

$$Y_{ц} = \frac{V}{\omega^0} \frac{\Delta c^2}{2} \quad (18.33)$$

где V – линейная скорость судна, м/с; ω, ω^0 – угловая скорость поворота судна на заданный угол в рад/с и град/мин соответственно (по графикам маневренных элементов судна); Y_{BK} – вынос кормы на повороте:

$$Y_{BK} \leq 0,5B; \quad (18.34)$$

Y_P – неизбежное рыскание судна на курсе, м,

$$Y_p = \pm V \frac{\tau_p}{4} \sin \psi \approx \pm V \frac{\tau_p \psi}{4} \quad (18.35)$$

ψ, τ_p – угол рыскания, град, и период рыскания судна на курсе, мин.

Таким образом, в общем случае при корректируемом движении ширина полосы движения судна определяется формулой

$$W_{\text{пд}} = W_{\Gamma} + 2Y_M \quad (18.36)$$

а при известной стороне уклонения судна от ЛЗП (когда поправка на снос принимается с заведомым «недостатком» или «избытком»)

$$W_{\text{пд}} = W_{\Gamma} + Y_M \quad (18.37)$$

Анализ формул (18.28), (18.29), (18.36) и (18.37) показывает, что ширина полосы движения судна зависит от геометрических размеров судна, гидрометеорологических условий плавания (чем больше суммарный угол сноса, тем больше возможные погрешности его определения и учета), скорости, рыскливости, поворотливости судна и применяемых навигационных методов.

Контроль за местоположением и движением судна играет роль своего рода обратной связи, позволяет ограничить монотонно возрастающее отклонение судна от ЛЗП (18.27) относительно небольшими периодическими отклонениями (18.29), причем по мере уточнения угла сноса амплитуда этих отклонений уменьшается, т.е. Процесс движения судна по ЛЗП носит затухающий характер (рис. 18.2,в).

С этой точки зрения наиболее опасным при плавании по фарватеру является начальный этап плавания данным курсом, сразу же после завершения поворота, пока сторона и скорость бокового сноса судна достоверно неизвестны.

При дальнейшем плавании данным курсом судоводитель с помощью навигационных методов контроля и небольших последовательных «поворотов» уточняет фактическое значение угла сноса, уменьшая тем самым возможность отклонения судна от ЛЗП.

Повышение точности навигационных методов контроля, уменьшение их дискретности (а в пределе – переход к непрерывному контролю), оперативная реакция судоводителя на обнаруженное отклонение судна от ЛЗП способствуют уменьшению ширины полосы движения судна.

При таком «геометрическом» подходе требуемая ширина фарватера при одностороннем движении определяется формулой

$$F_{\text{ТР}} = W_{\text{ПЛ}} + 2\Delta_{\text{НЗ}} \quad (18.38)$$

где $\Delta_{\text{НЗ}}$ – навигационный запас с каждого борта до бровки канала (опасной изобаты).

Для специфических условий плавания в подходных каналах портов опытным путем получены статистические характеристики требуемой ширины канала в зависимости от скорости поперечного течения или бокового сноса, и ширины судна В (табл. 18.5).

Таблица 18.5

Навигационное ограждение	$Y_H, \text{м}$	Ширина канала при поперечных течениях		
		слабых (0,5 уз)	средних (0,5...2 уз)	сильных (>2уз)
Стандартное ПСНО и створные знаки	20	6В	8В	10В
Стандартное повышенной точности	10	5В	6...7В	8...9В
Высокоточное позиционирование	5	4В	5...6В	7...8В

Примечание:.. $V = 10$ уз.

На поворотах ширина канала должна быть увеличена по меньшей мере на двойную ширину расчетного судна. При двустороннем движении судов требуемая ширина канала вдвое больше.

При вероятностном подходе к выводу требуемой ширины фарватера принимают, что маневренные отклонения судна от ЛЗП носят случайный характер, подчиняются закону нормального распределения и оцениваются средним квадратичным значением $\pm m_v$. Тогда вероятность безопасного прохода судна [6] оценивается формулой.

$$P = 0.5[\Phi(z_1) + \Phi(z_2)] \quad (18.39)$$

где z_1, z_2 – нормированные (т.е. выраженные в средних квадратичных отклонениях) расстояния до опасных изобат справа и слева.

$$z_1 = \frac{y_1}{m_y}; z_2 = \frac{y_2}{m_y} \quad (18.40)$$

y_1, y_2 – линейные расстояния от границ геометрической полосы до опасных изобат справа и слева; $\Phi(z_1), \Phi(z_2)$ – нормированные функции Лапласа, выбираемые из табл. 1-6 МТ-75.

Если навигационная опасность расположена только с одного борта (например, справа на расстоянии y_1), то с другого борта (слева) $y_2 \rightarrow \infty$, $\Phi(z_2) \rightarrow 1$, тогда

$$P = 0,5[1 + \Phi(z_1)] \quad (18.41)$$

Если же ЛЗП проложена посередине между опасностями, то $y_2 = y_1$, $z_2 = z_1 = z$ тогда

$$P = \Phi(z) \quad (18.42)$$

Для навигатора прокладка курса посередине узкости более предпочтительна, так как при той же точности навигационного контроля ($\pm m_v$) вероятность безопасного прохода повышается по сравнению с любыми другими несимметричными вариантами расположения ЛЗП.

Формула (18.42) особенно ценна тем, что позволяет выработать нормативные требования к точности судовождения относительно ширины фарватера. Задавая требуемым уровнем вероятности безопасного прохода $P_{з\text{ад}}$ обратным входом в табл. 1-6 МТ-75 можно получить требуемые значения нормированных отклонений $Z_{\text{тр}}$ и требуемую ширину фарватера $F_{\text{тр}}$:

$$P_{\text{з\text{ад}}} \xrightarrow[\text{(обратный ход)}]{\text{табл.1 - 6 МТ - 75}} Z_{\text{тр}} \quad (18.43)$$

$$F_{\text{тр}} = 2 m_y Z_{\text{тр}} + W_{\Gamma}$$

Если же размерами судна можно пренебречь, то

$$F_{\text{тр}} = 2 m_y Z_{\text{тр}} \quad (18.44)$$

Отсюда получим норматив требуемой точности судовождения, %.

$$\Delta_{\text{доп}} = \frac{(m_y)_{\text{доп}}}{F_{\text{фвк}}} = \frac{1}{2 Z_{\text{тр}}} 100 \% \quad (18.45)$$

где $F_{\text{фвк}}$ – фактическая ширина канала (фарватера); $\Delta_{\text{доп}}$ – допустимое среднее квадратичное значение маневренного смещения по отношению к ширине свободного навигационного пространства.

Например, задавая вероятностью безопасного прохода $P_{\text{з\text{ад}}} = 0,999$, обратным входом в табл. 1-6 МТ-75 получим $Z_{\text{тр}} = 3,57$, откуда $\Delta_{\text{доп}} = 14\%$, т.е. среднее квадратичное значение маневренного смещения судна с ЛЗП ($P = 0,683$) не должно превышать 14% имеющейся ширины свободного пространства между опасными изобатами (за вычетом ширины геометрической полосы). Подобный вероятностный подход использован при выработке требований к точности судовождения Международной ассоциацией маячных служб (МАМС).

18.3. Методы контроля за местоположением и движением судна

Навигационные методы контроля за местоположением и движением судна должны решать следующие задачи:

определение текущих координат судна в выбранной координатной системе – географической (φ, λ), полярной (пеленг и дистанция относительно заданной точки), маршрутной (расстояние до очередной точки поворота и боковое отклонение от ЛЗП);

определение действительной траектории движения судна, действительных элементов движения (пути, путевой скорости, суммарного угла сноса) и оценку тенденции движения судна для прогнозирования текущих координат по времени;

Перечисленные задачи контроля относятся к так называемым «задачам реального времени», решение которых бессмысленно, если оно будет получено позднее, чем через некоторый промежуток времени («такт реального времени»). Чем сложнее навигационные условия, тем короче должен быть такт реального времени, т.е. меньше Допустимое запаздывание навигационной информации. Поэтому достоинство любого навигационного метода определяют три главных характеристики: точность определения текущих координат судна, продолжительность навигационного определения (время, затраченное на получение координат) и дискретность определений (промежуток времени между последовательными определениями координат).

Существующие методы контроля за местоположением и движением судна могут быть поделены на две большие группы: штурманские и лоцманские (рис. 18.3). При штурманских методах контроля на основе навигационных измерений, расчетов и/или прокладки получают точку, в которой находилось судно на момент измерений, и в зависимости от положения этой точки относительно ЛЗП (берега, навигационных опасностей) решают остальные навигационные задачи. К штурманским методам относятся счисление координат судна, его уточнение по одной линии положения, навигационные обсервации, а также методы, образуемые их сочетаниями.

Основными достоинствами счисления (см. гл. 7) являются его непрерывность, автономность, простота и наглядность, легкость автоматизации.

Важнейшим ограничением счисления является нарастание погрешностей счислимого места по мере плавания по счислению, в особенности под действием неучитываемых (или неточно учитываемых) систематических факторов. Так, систематическая ошибка счисления составит за сутки 24 мили за каждый узел скорости неучитываемого течения. Чем дольше судно следует по счислению, тем больше возможная погрешность счисляемых координат и тем степень доверия к счислимому месту. Таким образом, требуется периодическая коррекция счисляемых координат, т. е. сброс накапливающихся погрешностей счисления.

Если удалось выполнить навигационные измерения в ограниченном объеме и получить только одну линию положения, то она также может быть использована для уточнения счислимого места (см. п. 12.3). Вероятнейшее место судна — основание перпендикуляра, опущенного на обсервованную линию положения из счислимого места

Полученное место судна хотя и является более вероятным, чем счислимое, но не является надежным и нуждается в проверке при первой же представившейся возможности.

Более высокую степень доверия имеет счислимо-обсервованное место — место судна, координаты которого получены по двум и более разновременным обсервованным линиям положения с учетом счисления (см. гл. 11).

Так как точность счислимо-обсервованного места зависит от точности счисления за время между измерениями, то оно менее надежно, чем обсервованное, а процесс его получения длителен.

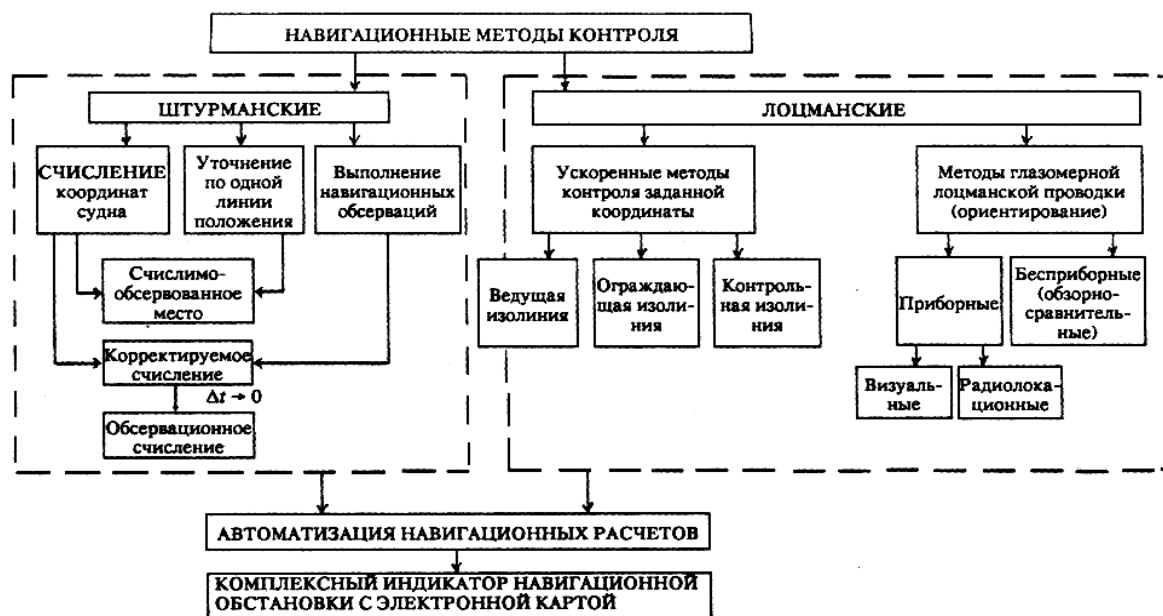


Рис. 18.3

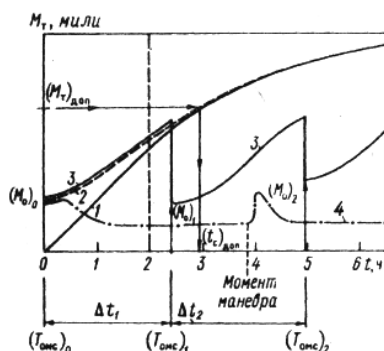


Рис. 18.4

Обсервованное место судна — место, координаты которого получены пересечением двух и более одновременных (или практически одновременных) обсервованных линий положения (см. гл.8). Навигационная обсервация абсолютно независима от счисления, поэтому позволяет сбросить накопившиеся погрешности счисления до уровня погрешностей самой обсервации. Однако навигационные обсервации довольно продолжительны, дискретны, неавтономны (т.е. требуют наличия ориентиров или передающих радиостанций), подвержены

погрешностям измерений и их обработки. Возможны промахи при опознавании ориентиров, навигационных измерениях и их обработке. Таким образом, хотя в общем случае обсервованное место судна более надежно, чем счислимое или счислимо-обсервованное, оно также нуждается в контроле.

Поэтому наиболее распространенным штурманским методом контроля является корректируемое счисление — периодические обсервации, в промежутках между которыми ведется счисление координат судна (причем с развитием технических средств судовождения дискретность обсерваций все более уменьшается).

Счисление обеспечивает непрерывность контроля, расчет поворотов, опознавание ориентиров, контроль обсерваций на промах, определение (по результатам обсерваций) действующего вектора сноса, выдачу счислимых координат для решения различных навигационных задач (в том числе для расчета обсервованных координат от счислимого места при обобщенном способе линий положения). В свою очередь, навигационные обсервации позволяют периодически уточнять место судна, сбрасывать накапливающиеся погрешности счисления, выявлять действующие систематические факторы (например, снос течением) и тем самым повышать точность самого счисления.

Средняя квадратичная погрешность (СКП) текущего места судна при корректируемом счислении

$$M_T = \sqrt{M_0^2 + M_c^2(t)} \quad (18.46)$$

где M_0 – СКП исходной обсервации, от которой ведется счисление; $M_c(t)$ – СКП счисления за время плавания от исходной обсервации t_c определяемая формулами (6.26):

$$M_c(t) = \begin{cases} 0.7K_c t_c & \text{при } T_c \leq 2 \text{ ч.} \\ K_c \sqrt{t_c} & \text{при } T_c \geq 2 \text{ ч.} \end{cases} \quad (18.47)$$

K_c – коэффициент точности счисления, характеризующий скорость нарастания погрешностей счисления и определяемый экспериментально для различных условий плавания.

СКП счислимого места (18.47) монотонно нарастает по мере плавания по счислению от нулевого значения (кривая 1 на рис. 18.4), а СКП текущего места (18.46) – от уровня M_0 (кривая 2). При периодических обсервациях (периодически корректируемое счисление) график $M_T(t)$ имеет «пилообразную» форму (кривая 3), где нижний уровень погрешностей определяется значением M_0 , скорость нарастания погрешностей – коэффициентом K_c , а время нарастания погрешностей – дискретностью обсерваций (Δt).

При малой дискретности обсерваций ($\Delta t \rightarrow 0$) возможен режим обсервационного счисления – счисление координат, выполняемое путем совместной автоматизированной обработки данных от средств обсервации и счисления. Обсервационное счисление является наиболее эффективным и надежным приборным методом контроля за местоположением и движением судна, СКП текущих координат (в установившемся режиме) может быть меньше СКП обсерваций (кривая 4). Однако данный метод возможен лишь при использовании средств автоматизации судовождения.

В режиме корректируемого счисления обсервации необходимо тщательно анализировать для того, чтобы оценивать надежность счисления и обсерваций, произвести контроль на промахи, выявить и учесть систематические факторы.

Практикой выработано понятие «надежность обсервации». Обсервация считается надежной, если одновременно выполняются условия: 1) навигационные измерения выполнялись с помощью исправных технических средств с надежными известными поправками; 2) измерения выполнялись в пределах зоны хорошей видимости ориентиров или уверенного приема сигналов РНС при обычном уровне помех; 3) избыточность измерений обеспечивает контроль промахов; 4) ориентиры (станции РНС) подобраны оптимально; 5) ориентиры надежно опознаны (многозначность измерений надежно устранена); 6) систематические погрешности надежно учтены, а случайные имеют обычный Уровень; 7) применяемые методы обработки измерений либо исключают возможность промахов, либо допускают контроль на промахи; 8) расстояние между обсервациями соответствует скорости судна и времени, а УГОЛ сноса и путевая скорость – условиям плавания; 9) СКП обсервации по меньшей мере втрое меньше, чем СКП счислимого места; 10) невязка между счислимой и обсервованной точками меньше суммы предельных радиальных погрешностей счисления и обсервации:

$$C \leq M_T + M_0 \quad (18.48)$$

Большая невязка может быть следствием погрешностей или промаха в самой обсервации (повторить определение, и по возможности – другим способом), в счислении (проверить расчеты и прокладку от последней надежной обсервации), неучитываемого или неточно учитываемого сноса (проверить возможность такого сноса при действующих гидрометеоусловиях), ненадежных поправок компаса или пата либо ненадежной работы этих приборов.

Надежная обсервация может быть принята к учету для дальнейшего счисления. При любых сомнениях место судна, по возможности, определяется снова, желательно другим способом. До выяснения причины появления большой невязки достоверность места судна считается сомнительной.

Оценка надежности обсерваций существенно упрощается, если анализируется целая серия обсерваций, полученных через равные промежутки времени. При движении судна постоянным курсом и скоростью обсервованные точки должны лежать на одной прямой, расстояния между ними одинаковы (или пропорциональны времени) и соответствуют пройденному судном расстоянию, невязка либо постоянна, либо монотонно изменяется по величине и направлению, а при переходе на другую комбинацию ориентиров не наблюдается резкого ее изменения.

Серия надежных обсерваций (рис. 18.5) позволяет решать целый ряд навигационных задач.

1. Определить (снять с карты) фактические элементы движения судна: фактический путь $ПУ_0$, фактический угол сноса

$$c_0 = ПУ_0 - ИК \quad (18.49)$$

фактическую путевую скорость $V_{П} = S_{П} / t$, где t – время между соответствующими обсервациями.

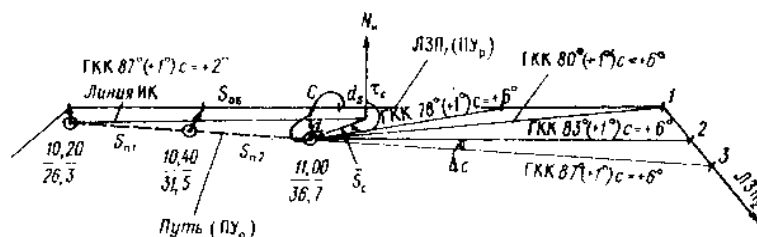


Рис. 18.5

2. Определить (снять с карты) элементы, характеризующие движение судна относительно предварительной прокладки и тенденции их изменения: невязку C , боковое смещение судна с ЛЗП $d_{\perp}$, продольное смещение d_s , т.е. отставание (или опережение) обсервованной точки относительно счислимой вдоль ЛЗП.

3. Определить фактический вектор суммарного сноса; для этого необходимо из исходной обсервации проложить линию ИК, отложить по ней расстояние $S_{об}$ по оборотам движителя и времени, соединить полученную точку с последней обсервацией и получить вектор сноса $\overline{S_c}$; тогда снять с карты направление сноса (τ_c) и рассчитать скорость сноса $V_c = S_c / t$.

4. Оценить тенденцию движения судна относительно ЛЗП, спланировать вариант дальнейших действий (см. рис. 18.5):

а) если не изменять курс, то судно будет продолжать движение по линии обсерваций (ПУ_о), следуя в точку поворота 3;

б) если изменить ГКК на величину Δc , то судно будет следовать параллельно ЛЗП в точку поворота 2:

$$\Delta \text{ГКК} = -\Delta c = \text{ПУ}_{\text{ЗД}} - \text{ПУ}_o \quad (18.50)$$

$$\text{ГКК}_H = \text{ГКК}_{\text{СТ}} + \Delta \text{ГКК} = \text{ГКК}_{\text{СТ}} - \Delta c$$

в) можно изменить курс таким образом, чтобы вернуться на ЛЗП; при этом оптимальная величина угла отворота

$$\left. \begin{aligned} \Delta \text{ГКК} &= -2\Delta c = 2(\text{ПУ}_{\text{ЗД}} - \text{ПУ}_o) \\ \text{ГКК}_H &= \text{ГКК}_{\text{СТ}} - 2\Delta c \\ \text{ПУ}_H &= \text{ПУ}_o - 2\Delta c \end{aligned} \right\} \quad (18.51)$$

г) можно изменить курс таким образом, чтобы выйти в ранее намеченную точку поворота 1; для этого надо снять с карты новый путь ПУ_H и задать рулевому новый курс

$$\text{ГКК}_H = \text{ПУ}_H - c_o - \Delta \text{ГК} \quad (18.52)$$

Формулы (18.50)...(18.52) являются приближенными, так как принимается, что поправка на снос примерно равна самому углу сноса, а величина угла сноса при малых изменениях курса практически не меняется.

5. Предвычислить $T_{\Pi} / ОЛ_{\Pi}$ на момент выхода в заданную точку (например, точку поворота 1 на рис. 18.5), сняв с карты расстояние до нее $S_{ЗД}$ по линии пути:

$$\left. \begin{aligned} t_{\Pi} &= \frac{S_{ЗД}}{V_{\Pi}}; T_{\Pi} = T_0 + t_{\Pi} \\ РОЛ_{\Pi} &= РОЛ_t \frac{t_{\Pi}}{t} \\ ОЛ_{\Pi} &= ОЛ_0 + РОЛ_{\Pi} \end{aligned} \right\} \quad (18.53)$$

где $РОЛ_t$ – разность отсчетов лага за некоторый предшествующий промежуток времени t .

Можно сделать вывод, что в целом штурманские методы обеспечивают решение навигационных задач с наибольшей полнотой, наглядностью и надежностью, упрощается контроль на промахи, благодаря четкой алгоритмизации задач облегчается автоматизация их решения. Однако штурманские методы имеют и ряд серьезных ограничений: отвлечение судоводителя от наблюдения и управления судном на время получения обсервации; длительность процесса определения места судна; возможность оценки тенденции движения судна только после получения серии обсерваций; существенное запаздывание навигационной обсервации, что особенно неприемлемо при плавании в стесненных водах.

Этих недостатков практически лишены лоцманские методы контроля за местоположением и движением судна (см. рис. 18.3), основанные на детальном знании района плавания, тщательных предварительных расчетах и прокладке и обеспечивающие оперативную оценку текущего местоположения и движения судна по минимально необходимой информации.

В штурманской практике наиболее распространены ускоренные методы контроля заданной координаты, основанные на использовании ведущих, ограждающих, контрольных изолиний (линий положения).

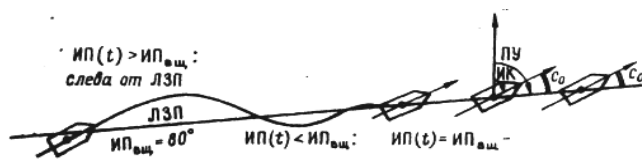


Рис. 18.6

Ведущая изолиния, или линия положения (ВЩЛП), служит для непрерывного оперативного контроля за движением судна по ЛЗП с помощью измерения (контроля) только одного навигационного параметра (ведущий створ, ведущий пеленг, ведущая гипербола и др.).

Путь судна выбирается совпадающим с ВЩЛП (рис. 18.6). При этом должна обеспечиваться надежная непрерывная наблюдаемость ориентира на курсе (недопустима смена ВЩЛП в момент прохода вблизи навигационной опасности). Снимается с карты или рассчитывается ведущее значение навигационного параметра ($ИПВЩ = 80^\circ$ на рис. 18.6), его значение надписывается на карте; устанавливается закон изменения навигационного параметра в зависимости от стороны смещения судна с ЛЗП (например, при сносе с ЛЗП вправо пеленг на ведущий ориентир по носу будет уменьшаться).

При подходе судна к данному участку необходимо заблаговременно обнаружить и надежно опознать ведущий ориентир, по мере приближения к ВЩЛП начать контроль навигационного параметра, лечь на ведущую изолинию и путем небольших подворотов добиться, чтобы отсчет навигационного параметра был постоянным и равным заданному значению:

$$U(t) = U_{з\Delta Д} = \text{const.} \quad (18.54)$$

После того как судно начнет устойчиво следовать по ЛЗП, можно получить фактический угол суммарного сноса

$$C_o = ПУ_{з\Delta Д} - ИК = \tau_{вщ} - ИК \quad (18.55)$$

где $\tau_{вщ} = ПУ_{з\Delta Д}$ – направление ведущей изолинии. СКП ведущей линии положения

$$m_{вщ} = \frac{m_U}{g} \equiv Y_H \quad (18.56)$$

Подставив эту величину в формулу (18.29), можно оценить ширину полосы движения судна при плавании по ведущей изолинии, а по формулам (18.43) и (18.44) при $m_y = m_{вщ}$ – требуемую ширину фарватера

Таким образом, ВЩЛП позволяет провести судно по ЛЗП с непрерывным контролем бокового смещения, без каких-либо расчетов или построений, что позволяет оперативно реагировать на появляющийся снос и не допускать значительных отклонений судна от ЛЗП. Недостатком является неопределенность положения судна вдоль ЛЗП, что требует применения других методов контроля (особенно при подходе к повороту).

Ограждающая изолиния, или линия положения (ОЛП), служит для непрерывного оперативного контроля за положением судна относительно кромок фарватера или навигационных опасностей путем измерения (контроля) только одного навигационного параметра l (рис. 18.7).

Тем самым оперативно контролируется предел безопасного отклонения судна от ЛЗП под воздействием гидрометеорологических факторов или при расхождении с другими судами. Примерами ОЛП являются щелевой створ, секторный огонь (с разным цветом огня в опасных и безопасных секторах), ограждающая изобата и др.

При выполнении предварительной прокладки ОЛП выбирают таким образом, чтобы:

выбранный ориентир заблаговременно обнаруживался, надежно опознавался и мог непрерывно наблюдаться в течение всего требуемого времени;

один и тот же метод и ориентир использовались бы для контроля и ВЩЛП и ОЛП;

ОЛП была параллельна или почти параллельна ЛЗП;

ОЛП проходила с некоторым навигационным запасом ($\Delta_{НЗ}$) от границ навигационной опасности (в зависимости от предельных погрешностей ОЛП, стесненности судоходного пространства, степени изученности района);

ОЛП обеспечивала необходимую быстроту, точность, надежность и однозначность контроля.

Выбранная ОЛП прокладывается на карте; снимается с карты или рассчитывается ограждающее (опасное) значение навигационного параметра ($ИП_{оп} = 70^\circ$ на рис. 18.7), устанавливается закон изменения параметра в зависимости от величины смещения судна с ЛЗП. При следовании данным участком плавание судна осуществляется по ведущей изолинии; однако если возникает необходимость отклонения от ЛЗП — например, при расхождении с другим судном, — начинается контроль ОЛП с тем, чтобы в любой момент времени контролировать безопасность такого отклонения и его допустимый предел.

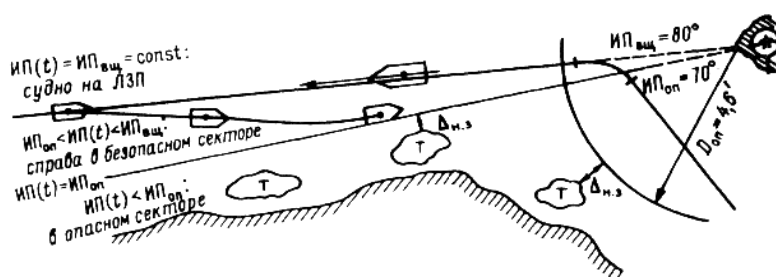


Рис. 18.7

Контрольная изолиния, или линия положения (КЛП), служит для оперативного контроля момента выхода судна в точку начала поворота путем измерения (контроля) только одного навигационного параметра (рис. 18.8). КЛП выбирают таким образом, чтобы:

выбранный ориентир заблаговременно обнаруживался, надежно опознавался и мог непрерывно наблюдаться в процессе поворота;

направление КЛП было возможно ближе к направлению пути после поворота ($\tau_{КЛП} \rightarrow \text{ПУ2}$);

одни и те же метод и ориентир использовались бы (по возможности) и для контроля поворота, и в качестве ведущей изолинии после завершения поворота;

контролировать тот навигационный параметр, который по мере подхода судна к повороту изменяется быстрее (например, дистанцию до ориентира на острых носовых или кормовых курсовых углах либо пеленг ориентира вблизи траверза;

КЛП обеспечивала необходимые быстроту, точность, надежность и однозначность контроля начала поворота.

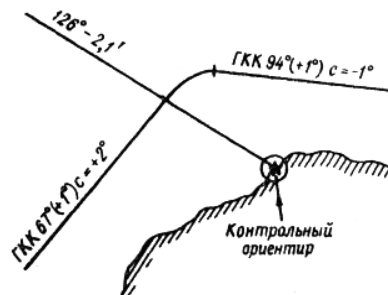


Рис. 18.8

При выполнении предварительной прокладки на карте намечают точки начала и конца поворота на новый курс (см. п. 7.2). В точку начала поворота (точку подачи команды на руль) проводится КЛП от выбранного ориентира, рассчитывается (снимается с карты) и надписывается значение контрольного навигационного параметра. Учитывая важность операции поворота, дополнительно на подходе предвычисляют время и отсчет лага (T_{II} / OL_{II}) на момент начала поворота. Предусматриваются также возможность контролировать боковое смещение с ЛЗП перед подходом к повороту и обязательное определение места судна (обсервация) после завершения поворота.

При подходе к повороту контролируют 4 параметра — $ИП_K$, D_K , T_{II} , OL_{II} , причем в ситуации рис. 18.8 основным параметром будет $ИП_K = 126^\circ$. При этом совпадение дистанции с расчетной укажет то, что судно перед поворотом находится на ЛЗП, а совпадение T_{II} / OL_{II} с расчетными — на отсутствие промаха (в том числе в опознании контрольного ориентира).

Точность определения момента выхода в точку начала поворота зависит от СКП КЛП, а также от возможного смещения судна с ЛЗП (Δ_1) перед поворотом (рис. 18.9). Так, при $\Delta_1 = \text{const}$ боковое смещение судна с ЛЗП после поворота (Δ_2) зависит от выбора контрольного ориентира: $(\Delta_2)_A > (\Delta_2)_B > (\Delta_2)_C$, причем если поворот выполняется на пеленге ориентира С, одновременно являющемся ведущим для ПУ_2 , то при любом Δ_1 получим $(\Delta_2)_C \rightarrow 0$.

Аналогичный эффект можно получить, используя принцип параллельного пеленга: проложить от ориентира А контрольный пеленг $ИП_K = ПУ_2 = 94^\circ$, снять расстояние S_Π от этой линии до поворота и рассчитать t_Π , $РОЛ_\Pi$. Тогда, зафиксировав $T_o / ОЛ_o$ в момент пересечения контрольного пеленга, поворот выполняют лишь по времени и по отсчету лага: $T_\Pi = T_o + t_\Pi$; $ОЛ_\Pi = ОЛ_o + РОЛ_\Pi$

Однако необходимо учитывать, что чем больше t_Π , тем больше погрешности предвычисления $T_\Pi / ОЛ_\Pi$, особенно при плавании в условиях ветра и течения. Таким образом, правильно подобранная комбинация ведущих, ограждающих, контрольных изолиний способна обеспечить эффективный контроль за движением судна, не прибегая к навигационным обсервациям. На прямолинейном курсе контролируется соответствующая ВЩЛП (контроль и минимизация боковых уклонений судна с ЛЗП), при вынужденном отклонении от ЛЗП контролируется ОЛП (предел безопасного отклонения); перед подходом к повороту усиливается контроль за движением судна вдоль ЛЗП, при этом КЛП позволит зафиксировать момент выхода судна в точку качала поворота (рис. 18.10).

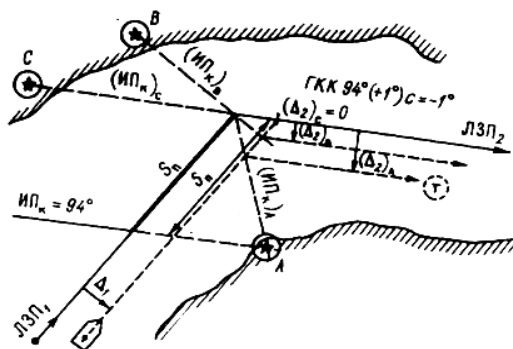


Рис. 18.9

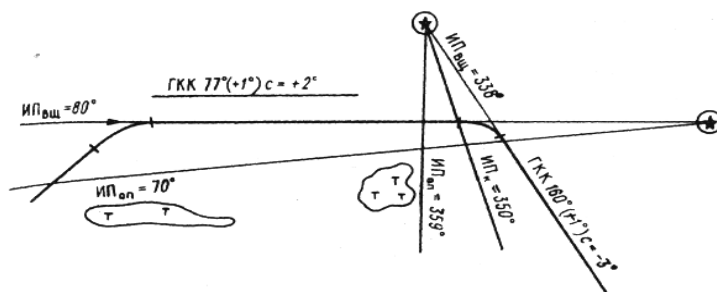


Рис. 18.10

Методы глазомерной лоцманской проводки (ориентирования) основаны на детальном знании района плавания, глазомерном определении положения осевой линии и границ фарватера относительно выбранных навигационных ориентиров, быстрой глазомерной оценке зоны, в которой на данный момент находится судно. С учетом меняющихся навигационных условий судоводитель корректирует курс и/или скорость судна с тем, чтобы удерживать судно (или начало развертки на экране РЛС при радиолокационных методах) в пределах заданной полосы движения.

Важнейшими достоинствами лоцманских методов контроля за местоположением и движением судна являются их высокая оперативность, возможность решения задач навигации и управления судном без отрыва судоводителя от наблюдения за навигационной обстановкой, возможность мгновенной оценки не только положения, но и тенденций движения судна.

Однако важнейшим ограничением лоцманских методов является их недостаточная надежность: вся текущая информация сосредоточивается, хранится, перерабатывается в голове человека, управляющего судном (капитана, лоцмана), поэтому его ошибка, связанная с каким-либо отвлечением, физической усталостью, пропуском важной информации и т. п., немедленно провоцирует ошибочное действие по Управлению судном. Лоцманские методы требуют более глубокой, тщательной и полной проработки перехода и предварительной прокладки. Кроме того, лоцманские методы (в отличие от штурманских) Решают задачу лишь частично, не позволяя получить всех параметров, характеризующих текущее местоположение и движение судна, и практически не поддаются алгоритмизации и автоматизации.

Выбор оптимальных методов контроля за местоположением и движением судна определяется условиями плавания. В открытом море, где требование оперативности контроля не является определяющим, используют только штурманские методы. В прибрежном плавании штурманские методы по-прежнему являются главными, однако начинают использовать элементы лоцманских методов – для контроля поворотов.

Ситуация принципиально изменяется в стесненных водах: главным требованием становится оперативность контроля, местоположение судна оценивается не в географических, а в полярных или маршрутных координатах, поэтому судоводитель, управляющий судном (капитан, лоцман), использует только лоцманские методы. Однако вахтенный помощник капитана обязан при этом применять обычные штурманские методы. Такое дублирование контроля за местоположением и движением судна имеет целью, во-первых, своевременное обеспечение капитана необходимой навигационной информацией, а во-вторых (и это не менее важно!) – своевременное обнаружение ошибок в управлении судном. В случае появления сомнений в обстановке или при обнаружении обстоятельств, существенных для обеспечения безопасности плавания судна, вахтенный помощник обязан немедленно докладывать капитану.

Увеличение числа судоводителей на мостике в сложных условиях плавания, четкое распределение обязанностей между ними, действенная система дублирования контроля за местоположением и движением судна способны до определенной степени объединить достоинства штурманских и лоцманских методов контроля, снять их существенные ограничения. Однако полное устранение противоречий между ними, обеспечение полноты, объективности, наглядности навигационной информации без запаздывания по времени, исключение возможных промахов (минимизация человеческого фактора) возможны лишь за счет автоматизации получения, обработки и представления навигационных данных. Перспективной технической основой представляется комплексный индикатор навигационной обстановки, включающий видеопрокладчик с электронной картой, на который накладывается информация с РЛС/САРП и выводятся основные цифровые параметры, характеризующие текущее местоположение и движение судна по данным спутниковой РНС второго поколения (ГЛОНАСС/НАВСТАР).

18.4. Общие задачи навигационного обеспечения

Важнейшей функцией судовождения является обеспечение навигационной безопасности плавания, т.е. предотвращение аварий и происшествий, обусловленных ошибками решения задач морской навигации. Задача обеспечения навигационной безопасности решается непрерывно в течение всего времени пребывания судна в море, независимо от характера его деятельности.

С организационно-технической точки зрения все задачи обеспечения навигационной безопасности подразделяются на две большие группы: решаемые в ходе предварительной подготовки к переходу и решаемые непосредственно в процессе плавания судна (рис. 18.11). Структура и содержание задач, рекомендации по их решению детально изложены в РШС-89 [9].

Предварительная подготовка к переходу имеет важное практическое значение: анализ показывает, что значительная часть навигационных аварий и происшествий была предопределена заранее – отсутствием или недостаточной эффективностью такой подготовки.

Особое внимание должно уделяться бесперебойному получению и надлежащему использованию навигационной информации по маршруту предстоящего перехода (печатные корректурные документы, радиослужбы навигационных предупреждений, информация от портовых властей и лоцмана и т.д.). Никакие ссылки на незнание информации, объявленной в печатных извещениях мореплавателям или в переданных по радио навигационных предупреждениях, во внимание не принимаются.

Наиболее творческой частью предварительной подготовки является проработка предстоящего перехода, включая выбор наивыгоднейшего маршрута, выполнение предварительной прокладки, предварительные навигационные расчеты, планирование перехода и методов контроля за местоположением и движением судна.



Рис. 18.11

Изучение района плавания в полном объеме выполняется перед выходом в первое плавание по данному маршруту; перед повторным рейсом по ранее изученному маршруту уточняются данные, связанные с изменениями в навигационной обстановке, и учитывается опыт, полученный в предыдущих рейсах.

Маршрут перехода выбирает капитан судна, а предварительную прокладку делает один из помощников капитана по его поручению. Предварительную прокладку выполняют на генеральных, путевых (в том числе радионавигационных) и частных картах наиболее удобного масштаба; при этом используют информацию карт и планов наиболее крупного масштаба, которая может содержать важные навигационные данные.

Одновременно с предварительной прокладкой выполняют «подъем» (графическую подготовку) навигационных карт, т.е. выделение и/или нанесение на карту в наиболее удобной графической форме наиболее важной оперативной информации (ограждающие изобаты и отдельно лежащие опасности); ведущих, контрольных и ограждающих изолиний с указанием цифровых значений навигационных параметров; границ дальности видимости навигационных ориентиров, секторов огней и секторов опасных курсов; границ зон действия систем УД С, точек подачи маршрутной информации и др.). Полнота и тщательность выполнения предварительной прокладки во многом определяют качество контроля за местоположением и движением судна в рейсе.

Важно заранее спланировать основные и дублирующие методы контроля за местоположением и движением судна. Логическая схема выбора оптимальных методов контроля представлена на рис. 18.12.

Круг выбираемых методов ограничивается составом, исправностью, надежностью судовых технических средств навигации (ТСН) – с одной стороны, и возможностью использования неавтономных навигационных средств (ориентиров, СНО, РТСНО, РНС) – с другой. Главным достоинством обсервации является ее надежность (см. п. 18.3); правильно подобранные методы должны обеспечивать учет и нейтрализацию ограничений используемых ТСН.

Точность обсервации (см. п. 18.4) является важным фактором, но лишь в той мере, в какой она гарантирует уровень погрешностей не выше допустимого. Например, самый точный из всех визуальных методов – определение места судна (ОМС) по двум горизонтальным углам, измеренным секстантом, – практически почти никогда не используется, так как, помимо точности, вступают в действие другие факторы, отмеченные ниже.

Важно выбирать такой метод навигационных определений, чтобы он обеспечивал минимальное отвлечение судоводителя от контроля за навигационной обстановкой, наблюдения, управления судном. Например, в прибрежном плавании судоводители обычно предпочитают судовую РЛС (САРП), которая позволяет осуществлять (одновременно и взаимосвязано) наблюдение за надводной обстановкой, обнаружение целей и расхождение с ними, обнаружение и опознавание навигационных ориентиров, регулярные обсервации, непрерывный контроль за местоположением и движением судна ускоренными методами, глазомерную радиолокационную проводку судна – без отрыва от наблюдения, без потери контроля за обстановкой.

Кроме того, судоводитель должен как можно меньше времени затрачивать на обсервацию, а для этого необходимы: доступность прибора в любой момент, мгновенность снятия отсчетов без дополнительных настроек, простота расчетов и прокладки, уровень автоматизации определения места. Общая продолжительность определения места судна $t_{\text{ОМС}}$ должна быть не более допустимой при данных условиях плавания $(t_{\text{ОМС}})_{\text{доп}}$

Требуемая частота определений места ($\Delta t_{\text{доп}}$) зависит от точности обсерваций, расстояния до навигационных опасностей, расположения опасностей относительно линии пути, направления и скорости суммарного сноса.

Пусть СКП текущего места судна описывается формулами (18.46) и (18.47), а нарастание погрешностей характеризуется кривой 2 на рис. 18.4. Если установлена допустимая СКП текущего места $(M_T)_{\text{доп}}$, то график позволяет определить допустимое время плавания по счислению $(t_c)_{\text{доп}}$ с момента последней обсервации.

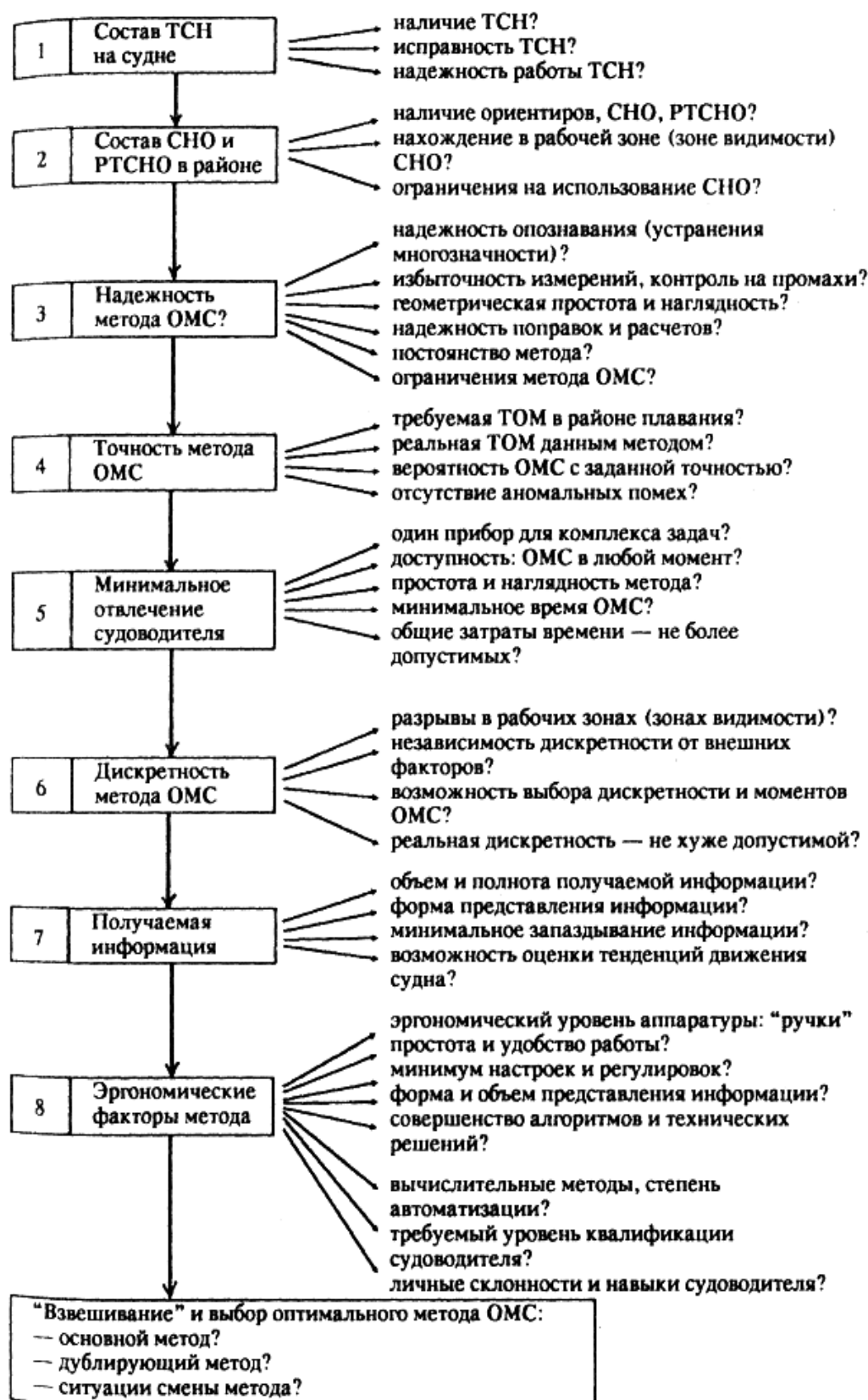


Рис. 18.12

Эта же задача может быть решена чисто математически; на основе (18.46) запишем

$$[M_T(t)]_{\text{доп}} = \sqrt{M_0^2 + [M_C^2(t)]_{\text{доп}}} \quad (18.57)$$

Тогда допустимая СКП счислимого места

$$[M_C(t)]_{\text{доп}} = \sqrt{[M_T^2]_{\text{доп}} - M_0^2} \quad (18.58)$$

Отсюда, с учетом (18,47), получим $(t_c)_{\text{доп}}$, ч:

При $t_c \geq 2\text{ч}$

$$(t_c)_{\text{доп}} = \frac{[M_C^2(t)]_{\text{доп}}}{k_C^2} = \frac{[M_T^2(t)]_{\text{доп}} - M_0^2}{k_C^2} \quad (18.59)$$

при $t_c \leq 2\text{ ч}$

$$(t_c)_{\text{доп}} = \frac{[M_C(t)]_{\text{доп}}}{0.7k_C} = \frac{\sqrt{[M_T^2(t)]_{\text{доп}} - M_0^2}}{0.7k_C} \quad (18.60)$$

Подобный вероятностный подход позволил сформулировать требования ИМО к точности судовождения, изложенные в Резолюции ИМО А.529 (13), принятой 17 ноября 1983 г. (см. п. 8.4, табл. 8.1).

Вероятность определения места судна с требуемой точностью $M_{\text{доп}}$ можно оценить на основе распределения Релея:

$$P = 1 - \exp \left[\frac{- \left(\frac{M_{\text{доп}}}{M_X} \right)^2}{2} \right] \quad (18.61)$$

где M_X – СКП определения места судна по заданному направлению с помощью данной навигационной системы. Если считать распределение погрешностей круговым или почти круговым ($M_y \approx M_x$), то радиальная СКП обсервации

$$M_O = M_X \sqrt{2}. \quad (18.62)$$

Тогда после подстановки (18.62) в (18.61) получаем рабочую формулу

$$P = 1 - \exp \left(\frac{- M_{\text{доп}}^2}{M_0^2} \right), \quad (18.63)$$

расчеты по которой можно выполнять по табл. 1-а МТ-75.

При плавании между навигационными опасностями, по каналам и фарватерам требования к точности судовождения выводятся по формулам (18.39)...(18.45); этот подход использован МАМС (табл. 18.6), которые являются более детальными, чем требования ИМО (см. табл. 18.1).

В требованиях МАМС и ИМО задаются предельные радиальные погрешности определения места судна $(\hat{M}_T)_{\text{доп}}$, $(\hat{M}_0)_{\text{доп}}$ с вероятностью $P = 0,95$. Связь между СКП(M) и предельными ($M_{0,95}$) погрешностями задается (при нормальном распределении погрешностей) приближенными формулами

$$\begin{aligned}\hat{M}_{0,95} &= 1,96 M \approx 2M \\ M &\approx 0,5 \hat{M}_{0,95}\end{aligned}\tag{18.64}$$

Допустимая дискретность обсерваций $(t)_{\text{доп}}$ оценивалась с помощью формул (18.59) и (18.60), а допустимое время на определение места $(t_{\text{омс}})_{\text{доп}}$ оценивалось по допустимому отвлечению судоводителя от наблюдения за обстановкой и по допустимой величине запаздывания навигационной информации в зависимости от условий плавания.

Требования ИМО и МАМС носят только ориентирующий характер, на практике требуемую точность судовождения устанавливает капитан в зависимости от условий плавания. При этом рекомендуется определять место судна через равные промежутки времени – это облегчает анализ невязок и контроль на промахи. Чем ближе опасности и сложнее навигационные условия, сильнее снос судна в сторону опасности – тем чаще должны быть определения места. Устанавливать дискретность обсерваций менее 5 мин, как правило, нецелесообразно даже в стесненных водах, так как основную роль здесь играют лоцманские методы (см. п. 18.3).

По возможности, место судна обязательно определяется в следующих типовых ситуациях:

- смена вахты;
- отход от берега в открытое море (по береговым ориентирам);
- подход к побережью и навигационным опасностям после перехода открытым морем;
- подход к району со стесненными условиями плавания, СРД, зоне действия системы управления движением судов;
- подход к точке поворота и после поворота на новый курс;
- подход к месту скопления судов (в том числе предполагаемого);
- ухудшение видимости или подход к району ограниченной видимости;
- обнаружение неизвестных опасных объектов и глубин, наличие необычных природных явлений;
- касание грунта и другие аварийные случаи;
- получение сигнала бедствия;
- все другие случаи, требующие точного места судна.

Таблица 18.6

Район плавания	$\left(\bar{M}_0\right)_{доп} \text{ с}$ $P = 0,95$	$(t_{омс})_{доп}$	$(\Delta t)_{доп}$
Стесненные воды:		Мгновенно	Непрерывно
с установленными каналами, ФВК, СРД	20%	(6...10 с)	(6...10 с)
подходы к портам и узкостям	50...200м	0,5...3 мин	1...5мин
Прибрежное плава- ние (доп = 10...50 миль)	4...20 кб	1...3мин	10... 30 мин
Открытое море (доп > 50 миль)	2...4 мили	10...15 мин	2...4 ч

Важную роль при выборе оптимального метода навигационных определений играют объем, полнота, своевременность, форма представления навигационной информации. Наличие режимов вторичной обработки информации многократно повышает ее полезность (текущее отклонение судна от ЛЗП, текущий пеленг на очередную маршрутную точку и др.), а наличие комплексного индикатора навигационной обстановки (см. п. 18.3) обеспечивает максимальную наглядность, позволяет сохранить всю полноту данных, свойственную штурманским методам, и получить высокую оперативность контроля и управления, характерную для лоцманских методов.

Наконец выбирая методы для определения места судна, судоводитель всегда принимает во внимание эргономический уровень ТСН (в первую очередь — количество органов управления и сложность работы с прибором), необходимость высокой профессиональной квалификации при работе с данным прибором, а также личные навыки самого судоводителя, не склонного полагаться на незнакомые технические средства и методы, даже самые эффективные (что может быть скорректировано тренажерной подготовкой).

Таким образом, выбор оптимальных методов контроля за местоположением и движением судна по маршруту предстоящего перехода носит творческий характер и требует профессионализма. Для сложных Участков перехода предусматриваются не только основные, но и дублирующие методы контроля — как для нормальных погодных условий, так и для ограниченной видимости.

Одновременно планируются точки подачи «маршрутной информации» о движении судна, требуемой Правилами плавания (MAREP – в проливе Ла-Манш, BAREP – в балтийских проливах, GIBREP – в Гибралтарском проливе и др.), а также точки подачи заявок на лоцманскую проводку, подачи информации об ожидаемом времени прибытия (ETA – *Expected Time of Arrival*) в заданную точку.

Выбранный маршрут перехода, предварительную прокладку, правила и условия плавания прорабатывает весь штурманский состав судна. Протяженные переходы можно прорабатывать по частям, особое внимание должно уделяться наиболее сложным участкам (проливы и узкости, СРД, районы лоцманской проводки, подходы к портам и портовые воды и т. п.).

Штурманская работа на переходе (рис. 18.11) должна обеспечивать безопасное плавание судна по выбранному маршруту, надлежащее непрерывное квалифицированное наблюдение за обстановкой, своевременную реакцию на ее изменения, расхождение с судами и другими объектами, возвращение на линию предварительной прокладки, а в случае необходимости или целесообразности – корректировку выбранного маршрута с учетом изменившейся обстановки. Вахтенный помощник капитана должен четко осознавать свою ответственность за безопасность судна (независимо от присутствия капитана на мостике), действовать в соответствии со своими обязанностями, определенными руководящими документами и указаниями капитана, а в оговоренных этими документами ситуациях или при любом сомнении в обстановке докладывать капитану, вызывать его на мостик и до прихода капитана самостоятельно принимать меры для обеспечения безопасности плавания [9].

ПЛАВАНИЕ В ОТКРЫТОМ МОРЕ

19.1. Выбор и расчет наивыгоднейшего пути

В практике морского судоходства наивыгоднейшим (оптимальным путем) между двумя заданными точками является тот путь, который данное конкретное судно при сложившейся гидрометеорологической обстановке проходит за кратчайшее время при минимальной затрате ресурсов, обеспечении безопасности мореплавания и сохранности перевозимых грузов. В то же время при выполнении конкретных переходов могут задаваться частные критерии оптимальности, например:

безусловное выполнение задачи независимо от затраченного времени (доставка особо ценного груза и т. п.);

наибольшая рентабельность рейса;

наименьшее время в пути (сохранность скоропортящихся грузов);

наименьший расход топлива;

наименьшее воздействие ветра и волнения, максимальные удобства и привлекательность рейса для пассажиров (круизные суда) и др.

Выбор критериев оптимального маршрута перехода определяется поставленной перед судном задачей.

По навигационным и гидрометеорологическим пособиям и картам изучается район предстоящего перехода, в особенности — его гидрометеорологические характеристики, вероятные погодные условия, вероятность опасных явлений (сильный шторм, плавающие льдины и айсберги, обледенение, плохая видимость и др.), глубина и навигационные опасности, система передачи навигационной и гидрометеорологической информации, радиотехнические СНО, основные пути движения судов, организация проводки судов береговыми гидрометеороцентрами (ВГМЦ) или научно-исследовательскими судами погоды (НИСП). На основе этих данных и квалифицированной оценки всех факторов производится выбор наивыгоднейшего маршрута перехода:

- 1) локсодромия, или линия постоянного курса;
- 2) ортодромия, или дуга большого круга (ДБК);
- 3) составное плавание (ДБК—ограничивающая параллель — ДБК);
- 4) стандартный климатический путь с учетом установившегося (или прогнозируемого) типа погоды;
- 5) оптимальный путь под проводкой ВГМЦ или НИСП;
- 6) оптимальный путь, выбираемый и корректируемый судоводителем самостоятельно с учетом состояния судна, фактической и прогнозируемой гидрометеорологической обстановки.

Локсодромия (см. п. 3.1) пересекает все меридианы под одним и тем же постоянным углом ($K = \text{const}$), поэтому предварительный расчет, построение локсодромии и плавание по ней наиболее просты.

Обратная локсодромическая задача (ОЛЗ) – расчет путевого угла K и расстояния S между двумя заданными точками $A (\varphi_A, \lambda_A)$ и $B (\varphi_B, \lambda_B)$ – обычно решается графически на меркаторской карте, где локсодромия изображается прямой линией. В случае необходимости аналитическое решение ОЛЗ (в милях) может быть выполнено по формулам, выведенным в п.7.1:

$$\operatorname{tg} K = \frac{PД}{PMЧ} = \frac{\lambda_B - \lambda_A}{MЧ_B - MЧ_A} \quad (19.1)$$

$$S = PШ \sec K = (\varphi_B - \varphi_A) \sec K$$

или при курсах, близких к 90° (270°) – по вспомогательной сводке формул

$$\operatorname{ctg} K = \frac{PMЧ}{PД} = \frac{MЧ_B - MЧ_A}{\lambda_B - \lambda_A}$$

$$OTШ = PД \cos \varphi_m \text{ (мили)} \quad (19.2)$$

$$S = OTШ \operatorname{cosec} K \text{ (мили)}$$

$$\varphi_m = 0.5(\varphi_A - \varphi_B)$$

где $PШ$, $PД$ – разность широт и разность долгот заданных точек B и A , утл. мин; $PMЧ$ – разность меридиональных частей ($MЧ_B, MЧ_A$) заданных точек, выбираемых из табл. 26 МТ-75, утл. мин; φ_m – средняя широта.

Аналитическое решение ОЛЗ выполняется автоматическими приемоиндикаторами (АПИ) РНС по введенным координатам «маршрутных точек» (WP от *Way Points*).

При небольших переходах, а также вблизи экватора и при курсах, близких к 0° (180°), разность длин локсодромии S и ортодромии D невелика и ею обычно пренебрегают. Однако при больших океанских переходах разность длин $\Delta S = S - D$ может достигать сотен миль, чего нельзя не учитывать при выборе пути.

Величину ΔS наиболее просто рассчитать на АПИ РНС либо выбрать из табл. 23-6 МТ-75. Если относительная разность длин

$$\Delta S = \frac{S - D}{S} 100 \% \geq 0.5 \% \quad (19.3)$$

то плавание по ортодромии может быть более предпочтительным.

Ортодромия, или ДБК, является кратчайшим расстоянием между двумя точками на земной сфере. Ортодромия АВ обращена выпуклостью к ближайшему полюсу (на рис. 19.1 – к Северному полюсу РN). и пересекает меридианы под различными углами (K_H, K_I, K_V, K_K) поэтому для строгого следования по ДБК было бы необходимо непрерывно изменять курс судна на малую величину.

Разность направлений ДБК в точках А и В называется сходимением меридианов γ_{AB} :

$$\gamma_{AB} = K_K - K_H = \psi_A - \psi_B \quad (19.4)$$

где ψ_A, ψ_B – ортодромические поправки, т. е. углы между ортодромией и локсодромией в точках А и В (см. п. 13.5).

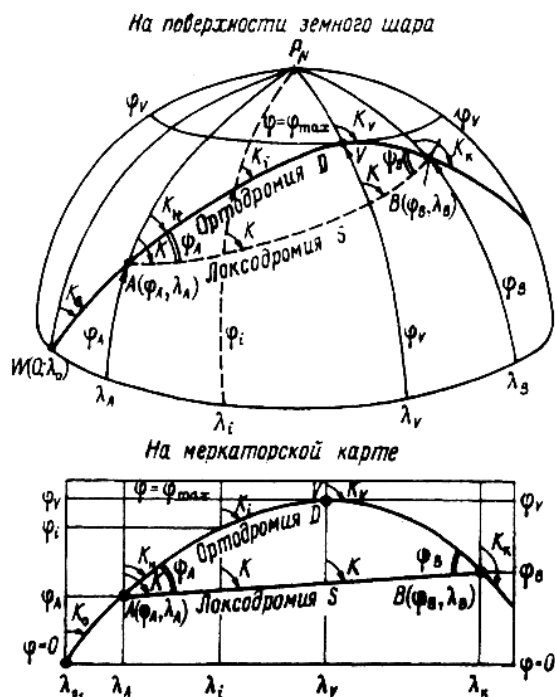


Рис. 19.1

Относительная разность длин локсодромии и ортодромии (в %) может быть приближенно оценена через величины γ или ψ :

$$\Delta S \approx \frac{\gamma^2}{800} \approx \frac{\psi^2}{200} \quad (19.5)$$

т.е. $\Delta S \geq 0,5\%$ возможно при $\gamma \geq 20^\circ$ или при $\psi \geq 10^\circ$

На поверхности земного шара ортодромию можно задать однозначно любым из четырех способов (рис. 19.2):

по координатам любых двух точек – $A(\varphi_A, \lambda_A)$ и $B(\varphi_B, \lambda_B)$ – при условии, что эти точки не лежат на противоположных концах земного диаметра;

по координатам любой точки ортодромии и направлению (курсу) ортодромии в этой точке, например: φ_A, λ_A и K_H ; φ_B, λ_B и K_K , φ_i, λ_i и K_i ;

по долготе λ_o точки W_o пересечения ортодромии с экватором и направлению ортодромии в этой точке, т.е. λ_{o1} и K_{o1} или λ_{o2} и K_{o2} , причем $\lambda_{o2} = \lambda_{o1} \pm 180^\circ$;

по координатам φ_V, λ_V вертекса V – точки ортодромии с наибольшей широтой ($\varphi_V = \varphi_{MAX}$) ортодромия в точке вертекса касательна к параллели, поэтому $K_V = 90^\circ$ (270°); заметим, что

$$\begin{aligned}\varphi_V &= 90^\circ - K_{o1} \\ \lambda_V &= \lambda_{o1} \pm 90^\circ\end{aligned}\quad (19.6)$$

где KQX должен быть взят в четвертном счете.

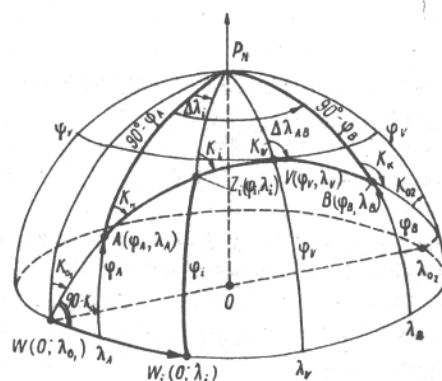


Рис. 19.2

Обычно при расчете плавания по ДБК ортодромия задается первым способом, а в процессе расчетов производится переход к одному из остальных (в зависимости от применяемого метода расчетов).

Решая навигационный сферический треугольник $AP_N B$ по формулам косинуса стороны и четырех рядом лежащих элементов, получим расстояние D по ортодромии между заданными точками А и В, начальный K_H и конечный K_K курсы для плавания по ДБК:

$$\cos D = \sin \varphi_A \sin \varphi_B + \cos \varphi_A \cos \varphi_B \cos(\lambda_B - \lambda_A) \quad (19.7)$$

$$\begin{aligned}\operatorname{ctg} K_H &= \cos \varphi_A \operatorname{tg} \varphi_B \operatorname{cosec}(\lambda_B - \lambda_A) - \\ &- \sin \varphi_A \operatorname{ctg}(\lambda_B - \lambda_A)\end{aligned}\quad (19.8)$$

$$\begin{aligned}\operatorname{ctg} K_K &= -\operatorname{tg} \varphi_A \cos \varphi_B \operatorname{cosec}(\lambda_B - \lambda_A) + \\ &+ \sin \varphi_B \operatorname{ctg}(\lambda_B - \lambda_A)\end{aligned}\quad (19.9)$$

Координаты промежуточных точек ортодромии $Z_i(\varphi_i, \lambda_i)$ легко рассчитывать, переходя ко второму способу задания ортодромии:

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \left[\frac{\operatorname{tg}(\lambda_i - \lambda_A)}{\operatorname{tg} K_H \cos \varphi_A} + \operatorname{tg} \varphi_A \right] \cos(\lambda_i - \lambda_A) \quad (19.10)$$

Задаваясь любыми долготами λ_i меридианов на генеральной карте (через $10 \dots 20^\circ$), получим широты промежуточных точек, по которым хорды ортодромии можно нанести на карту, т.е. выполнить предварительную прокладку океанского перехода (рис. 19.3).

Формулы (19.7)...(19.10) требуют анализа на знаки по обычным правилам; следует также учесть, что нельзя задаваться такой долготой λ_i , при которой $\lambda_i - \lambda_A = 90^\circ$, так как при этом в формуле наступает неопределенность.

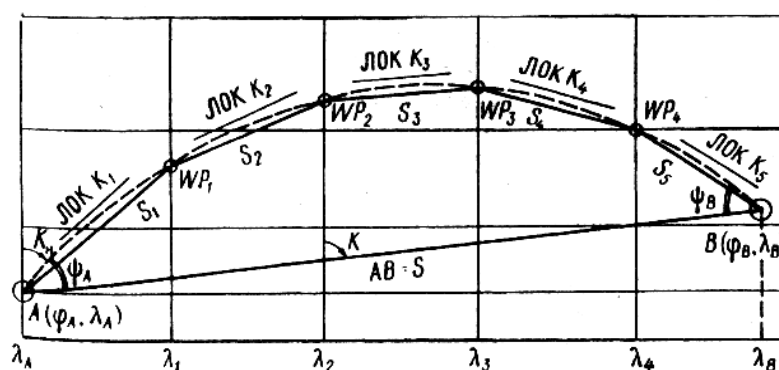


Рис. 19.3

При табличных методах расчета ДБК удобнее рассчитывать через координаты вертекса $V(\varphi_v, \lambda_v)$ либо через параметры (λ_{01}, K_{01}) . Описание способа приводится в руководстве № 9021 «Океанские пути мира».

Наиболее точно, быстро и безошибочно расчет плавания по ДБК 4 (обычно с учетом сжатия Земли) может быть выполнен с помощью АЛИ РНС, так как данная задача входит в состав обязательного математического обеспечения АПИ. При этом большинство АПИ позволяют решать задачу в полном объеме, рассчитывая начальный курс ортодромии в точке отхода K_H , длину ортодромии D , координаты промежуточных точек ортодромии φ_i, λ_i , по которым строятся хорды ортодромии, а также направление Лок K_i и длину S_i каждой хорды.

Если же АПИ рассчитывает только два параметра – K_H и D , то таблицу координат промежуточных точек φ_i, λ_i для выполнения предварительной прокладки можно рассчитать на любом программируемом калькуляторе по формуле (19.10), используя рассчитанное ПИ значение K_H . II

Для расчета ДБК могут быть также использованы (хотя и с некоторыми ограничениями) астрономические таблицы типа ВАС-58 и ТВА-57: если принять $\varphi_A = \varphi_C, \varphi_B = \delta, \Delta\lambda = (\lambda_B - \lambda_A) = t$, то из таблиц получим $K_H = A_C$ и $D = 90 - h_C$.

Наконец существует ряд приближенных способов расчета плавания по ДБК:

с помощью мелкомасштабной карты в косо́й гномонической проекции, на которой ортодромия изображается прямой линией (координаты промежуточных точек ДБК могут быть сняты с гномонической карты с погрешностями до $\pm 3...6$ миль);

с помощью номограммы Вейра (номограммы № 90199, проекция Литтрова), позволяющей получить и координаты промежуточных точек с погрешностями до ± 12 миль;

с предварительным расчетом локсодромии (19.1) и ортодромической поправки:

$$\left. \begin{aligned} D &= S - \Delta S \\ K_H &= L_{OK}K - \psi_A \\ K_K &= L_{OK}K + \psi_B \\ \gamma &= K_K - K_H = \psi_B - \psi_A \\ n &= \gamma / \Delta K_i \\ S_{КОР} &= D / (n - 1) \end{aligned} \right\} \quad (19.11)$$

где $\Delta S, \psi_A, \psi_B$ – разность длин локсодромии и ортодромии, ортодромические поправки в точках А и В, выбираемые из табл. 23-6 МТ-75 и подставляемые в формулы со своими знаками; ΔK_i – задаваемая судоводителем величина изменения коррекции курса при плавании по хордам ДБК ($2...3^\circ$); n – число изменений курсов при плавании по хордам от точки А до точки В; $S_{КОР}$ – длина каждой хорды ДБК, мили, т.е. плавание до очередной коррекции курса.

Несмотря на кажущуюся простоту, способ не является популярным из-за нарастающей погрешности в координатах промежуточных Л точек и сложности интерполяции при выборке из табл. 23-6 МТ-75.

Так как ДБК обращена выпуклостью к ближайшему полюсу, то при плавании по ортодромии судно может зайти в такие высокие широты, где плавание будет затруднено ледовыми условиями или неблагоприятной штормовой погодой.

Если при следовании от пункта А до пункта В нежелательно подниматься выше некоторой ограничивающей параллели $\varphi_{огр}$, то рассчитывают составное плавание (рис. 19.4,а), состоящее из трех плавно сопрягаемых траекторий: ортодромии AV_1 локсодромии (параллели) V_1V_2 и ортодромии V_2B , причем обе ортодромии касаются ограничивающей параллели, т.е. $\varphi_{V_1} = \varphi_{V_2} = \varphi_{огр}$

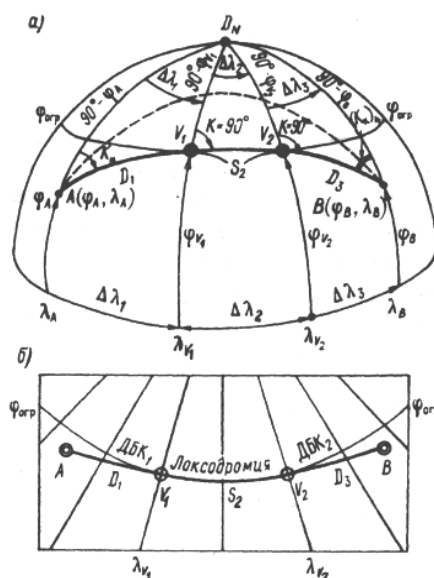


Рис. 19.4

Из прямоугольного сферического треугольника AP_NV_1

$$\begin{aligned} \sin K_H &= \sec \varphi_A \cos \varphi_{огр} \\ K_V &= 90^\circ (270^\circ) \\ \cos D_1 &= \sin \varphi_A \operatorname{cosec} \varphi_{огр} \\ \cos \Delta\lambda_1 &= \sin \varphi_A \operatorname{ctg} \varphi_{огр} \\ \lambda_{V_1} &= \lambda_A + \Delta\lambda_1 \end{aligned} \quad (19.12)$$

Из прямоугольного сферического треугольника V_2P_NB

$$\begin{aligned} K_V &= 90^\circ (270^\circ) \\ \sin K_K &= \sec \varphi_B \cos \varphi_{огр} \\ \cos D_3 &= \sin \varphi_B \operatorname{cosec} \varphi_{огр} \\ \cos D_3 &= \sin \varphi_B \operatorname{cosec} \varphi_{огр} \end{aligned} \quad (19.13)$$

В треугольнике $V_1 P_N V_2$ угол при полюсе

$$\Delta\lambda_2 = (\lambda_B - \lambda_A) - (|\Delta\lambda_1| + |\Delta\lambda_3|) \quad (19.14)$$

Тогда локсодромическое плавание по параллели

$$K_2 = 90^\circ (270^\circ);$$

$$S_2 = \Delta\lambda_2 \cos \varphi_{ОГР} \quad (19.15)$$

где $\Delta\lambda_2$ - разность долгот, утл. мин. Формулы (19.12)...(19.15) определяют аналитический алгоритм расчета составного плавания. Более просто, но с неизбежной потерей точности задача решается на гномонической карте путем проведения из точек А и В прямых линий, касательных к назначенной ограждающей параллели, с получением тем самым искомым ортодромий AV_1 и BV_2 (рис. 19.4,6).

Ортодромия может считаться оптимальным путем, если с учетом складывающейся гидрометеорологической обстановки плавание по ней оказывается кратчайшим не только по расстоянию, но и по времени. Если же в районе прохождения ДВК наблюдается штормовое волнение или встречное течение, то иной, более длинный путь, может оказаться более выгодным и безопасным.

Стандартные климатические пути, разработанные на основе многолетнего опыта мореплавания и среднестатистических данных о распределении факторов по сезонам (зима и лето), приведены в официальном справочном руководстве для судоводителей № 9021 «Океанские пути мира» (аналогичное английское издание – «*Ocean Passages for the World*») и на издаваемых ГУНиО «Гидрометеорологических картах» на океаны и моря (в Великобритании – «*Routing Charts*», в США – «*Pilot Charts*»).

Рекомендованные пути делятся на двусторонние (рекомендованные для движения в обоих направлениях) и односторонние, а по времени пользования – на круглогодичные и сезонные, т.е. используемые судами в зависимости от сезона года или установившегося типа погоды (в последнем случае необходимо предварительно определить, какой тип погоды установился или устанавливается по долгосрочному прогнозу погоды по маршруту предстоящего перехода). Кроме того, в руководстве даются дополнительные пути, которые могут быть использованы в тех случаях, когда все другие пути по каким-либо причинам окажутся неприемлемыми, а также пути для «судов со слабыми машинами».

Рекомендации «Океанских путей мира» основаны преимущественно на качественном анализе и не позволяют сделать количественное сравнение предлагаемых вариантов. В отличие от него месячные «Гидрометеорологические карты» позволяют рассчитывать ветроволновые потери скорости судна на переходе, ожидаемую продолжительность перехода, вероятность встречи с опасными гидрометеорологическими явлениями (штормы и ураганы, айсберги и дрейфующие льды, опасность обледенения и др.), а тем самым – количественно сравнивать предлагаемые варианты.

Следует, однако, иметь в виду, что руководство «Океанские пути мира» и «Гидрометеорологические карты» не заменяют лоций и других навигационных пособий и не освобождают судоводителя от их использования. Количественные оценки по гидрометеокартам носят достаточно приближенный характер.

Как «Океанские пути мира», так и гидрометеокарты составлены на основе средних многолетних данных, поэтому предложенные рекомендации будут эффективны лишь в районах с относительно постоянным режимом погоды по сезонам, где значительные отклонения фактических гидрометеоусловий от среднестатистических маловероятны. В районах с изменчивыми погодными условиями (например, северная часть Атлантического и Тихого океанов) путь, выбранный на основе среднестатистических рекомендаций, далеко не всегда оказывается оптимальным.

Более надежен выбор наивыгоднейшего маршрута перехода (и его оперативная корректировка) по рекомендациям ВГМЦ или НИСП. Процедура подачи заявки на проводку и правила плавания судов под проводкой ВГМЦ/НИСП изложены в руководстве «Океанские пути мира».

Практика показала, что суда, пользующиеся рекомендациями ВГМЦ/НИСП, совершают океанские переходы быстрее и в более благоприятных погодных условиях, чем при самостоятельном выборе пути, особенно в районах с неустойчивым режимом погоды. К началу 90-х гг. отечественные группы проводки проводили ежегодно около 600 судов, причем 70...80% проводок оказывались успешными, средний выигрыш ходового времени составлял 3,6...7,4%. Тем не менее 10...12% капитанов судов предпочитали не пользоваться услугами групп проводки.

Капитан судна может и обязан самостоятельно выбирать или корректировать оптимальный маршрут перехода с учетом состояния судна, прогнозируемой и фактически складывающейся синоптической обстановки. Если синоптическая ситуация развивается не так, как предполагалось, то маршрут перехода корректируется на обход районов, где наблюдаются опасные гидрометеорологические явления. В настоящее время такой выбор осуществляется судоводителями чисто, качественно, на основе личного практического опыта, однако специалистами активно разрабатываются методы, алгоритмы и программы расчета оптимального пути непосредственно на судне с использованием персональной ЭВМ.

Основу автоматизированного выбора пути составляют алгоритмы расчета и предвычисления полей ветра и волнения (в том числе на основе информации с метеорологических ИСЗ), оценки ветроволновых потерь скорости судна, выбора наилучшего варианта перехода методами динамического программирования по заданному критерию.

Наиболее общепринятой для оценки ветроволновых потерь скорости судов водоизмещением 5...25 тыс. т является формула ЦНИИМФ, уз:

$$\Delta V = V_B - V_O = -h(0.745 - 0.257q_B)(1 - 1.35 \cdot 10^{-6} DV_O) \quad (19.16)$$

где V_O – скорость судна на тихой воде, соответствующая фактическим оборотам движителя и фактическому весовому водоизмещению D судна, уз; V_B – скорость судна при тех же оборотах движителя при плавании на волнении, уз; h – высота волн, м; q_B – курсовой угол волнения, рад.

Возможны и другие варианты формул для оценки ветроволновых потерь. Общей закономерностью всех формул является тот факт, что с увеличением весового водоизмещения судна потери скорости на волнении уменьшаются. Ветроволновые потери зависят от курсового угла ветра и волнения и максимальны в диапазоне $0^\circ < q_B < 45^\circ$. На кормовых курсовых углах ветра силой до 3...4 баллов может наблюдаться приращение скорости до 5...8%, однако при дальнейшем усилении ветра и волнения скорость вновь начинает падать из-за увеличения гидродинамического сопротивления и ухудшения условий работы гребного винта. Следует учитывать и необходимость вынужденного снижения скорости судна: так, на крупнотоннажных танкерах в грузу при встречном ветре 7...8 баллов и волнении 5...6 баллов скорость снижается на 20...30%, а при ветре 8...9 баллов и волнении 6...7 баллов – до 40%.

Автоматизированный выбор наивыгоднейшего пути предполагает прогноз времени перехода как по стандартному климатическому пути, рекомендованному на данном направлении, так и по нескольким другим маршрутам, отклоняющимся от него вправо и влево в разумных пределах, с последующим выбором оптимального варианта методами динамического программирования по критерию вида

$$F(\tau, K) = \alpha \frac{t}{t_0} + (1 - \alpha)K = \min, \quad (19.17)$$

где t_0 – время перехода по ортодромии или стандартному климатическому пути при благоприятных гидрометеорологических условиях; t – прогнозируемое время перехода; K – коэффициент опасности, определяемый формулой

$$K \approx \frac{h_{\max}}{h_{\text{доп}}} \left(1 + \frac{t_1}{t}\right) \left(1 + \frac{t_2}{t}\right) \quad (19.18)$$

$h_{\max}$ – максимальная высота волны на переходе; $h_{\text{доп}}$ – допустимая высота волны, задаваемая капитаном судна; t – время перехода с момента отплытия; t_1, t_2 – время перехода при опасном ($h > h_{\text{доп}}$) и при особо опасном волнении соответственно; α – весовой коэффициент, зависящий от режима плавания (целей рейса, состояния, типа и загрузки судна, общего состояния погоды и др.).

Весовой коэффициент позволяет учитывать задачи и особенности конкретного рейса: при $a=1$ оптимальный маршрут определяется минимальным временем перехода, а при $a=0$ – минимальным коэффициентом опасности. Компьютерные системы для выбора наиболее выгодного пути уже поступают на суда.

Особое внимание должно уделяться своевременному уклонению от штормовой зоны ураганов и тропических циклонов, движение которых неустойчиво, скорость перемещения достигает 40 уз, диаметр штормовой зоны – до 400...500 миль, а скорость ветра – до 17... 35 м/с в тропических штормах и более 35 м/с в тропических ураганах. Информация о тропических циклонах всегда содержит погрешности до 20...25 миль по координатам центра циклона, а по направлению его движения – до 30° за 10 ч и до $90...100^\circ$ – за сутки, поэтому прогноз его положения на 10...12 ч вперед нужно делать по 3...4 факсимильным картам.

Расчет маневра для уклонения от встречи со штормовой зоной тропического циклона аналогичен решению задачи тактического маневрирования на расхождение с $D_{кр} \geq D_{зд}$ (рис. 19.5):

нанести место судна K_o и место $Ц_o$, приведенные к одному моменту времени;

из точки $Ц_o$ провести окружность радиусом, мили,

$$R_{ц} = R_{ш} + 25 \quad (19.19)$$

т.е. увеличить указанный в информации радиус штормовой зоны $R_{ш}$ тропического циклона на величину возможной погрешности в координатах его центра;

из точки K_o провести касательные к внешней границе штормовой зоны;

из точек касания T_1 и T_2 построить векторы скорости циклона $\bar{V}_{ц}$ и из концов этих векторов засечь обе касательные раствором циркуля, равным скорости судна V_c .

Полученные таким образом направления векторов V_c определяют выбор возможных курсов расхождения K_i :

курсы в секторе $K_1 < K_I < K_2$ опасны;

при курсах $K_I \leq K_1$ судно будет пересекать линию перемещения циклона впереди штормовой зоны;

при курсах $K_I \geq K_2$ судно будет пересекать линию перемещения циклона позади его штормовой зоны.

Если полное уклонение от штормовой зоны оказывается невозможным, то следует уклоняться от наиболее опасного сектора тропического циклона (правый задний сектор циклона в Северном полушарии, левый задний сектор циклона в Южном полушарии), где скорость ветра складывается со скоростью перемещения циклона.

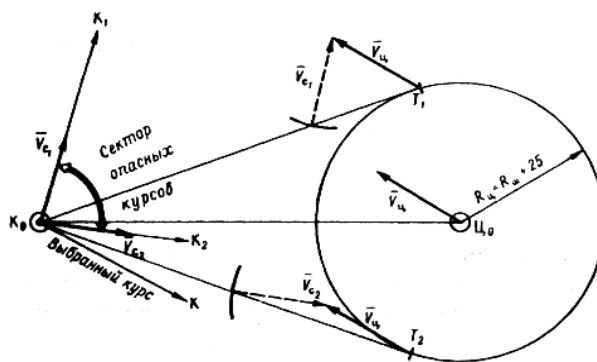


Рис. 19.5

При отсутствии достоверной информации сторона штормовой зоны, в которой оказалось судно, определяется по наблюдаемому изменению ветра: изменение направления ветра вправо (влево) указывает, что судно находится в правой (в левой) по ходу циклона половине штормовой зоны, а при постоянстве направления и усилении ветра судно находится на линии перемещения циклона.

Следует подчеркнуть, что уклонение от опасных гидрометеоявлений целесообразно даже для крупных современных судов. Подавляющее число случаев гибели отечественных морских грузовых транспортных судов за 1970 – 1990 гг. связано со штормовыми условиями плавания. При вынужденном попадании в штормовые условия необходимо правильно выбирать курсы и скорости судна по отношению к волне с использованием универсальной диаграммы качки, а при усилении волнения – своевременно переходить к штормованию.

19.2. Навигационное обеспечение плавания в открытом море

Выбранный наивыгоднейший путь наносится на навигационные карты, координаты маршрутных точек вводятся в АПИ РНС. Производится расчет курсов для рулевого (если необходимо – с учетом ожидаемых параметров ветра и течения) и ожидаемого времени перехода. Так как $t = S / V_{\Pi}$, где V_{Π} – вероятное значение средней путевой скорости на переходе, то по формуле СКП функции [6] относительная СКП расчета ожидаемого времени прибытия (ЕТА) составит

$$\frac{m_t}{t} = \pm \sqrt{\left(\frac{m_S}{S}\right)^2 + \left(\frac{m_V}{V_{\Pi}}\right)^2} \approx \pm \frac{m_V}{V_{\Pi}} \quad (19.20)$$

т.е. при достаточно точно известном расстоянии перехода S относительная погрешность расчета ЕТА равна относительной погрешности в оценке скорости на переходе m_v / V_{II} . Так, если $V_{II} = 16$ уз и $m_v = \pm 1$ уз, то получим $m_t = \pm 4,5$ ч при расчетном времени перехода $t = 3$ сут или $m_t = \pm 15$ ч при $t = 10$ сут. Поэтому по мере подхода к заданному пункту ранее переданную информацию ЕТА необходимо уточнять.

Оптимальная скорость судна выбирается с учетом требований предупреждения столкновений, гидродинамических факторов, экономических соображений.

Из экономических соображений судну может быть задана экономическая скорость, при которой расход топлива на пройденную милю будет наименьшим. Экономическим ходом часто пользуются в тех случаях, когда в порту назначения предстоит длительное ожидание причала.

С точки зрения гидродинамики, судоводитель, выбрав безопасную скорость, обеспечивает отсутствие штормовых повреждений от днищевого и бортового слеминга, гидродинамических ударов волн по палубному грузу и палубным конструкциям; исключает или сводит к минимуму заливаемость главной палубы; избегает попадания судна в зону резонансной бортовой качки, снижения остойчивости и потери управляемости на попутной волне и др. В большинстве случаев при ветре до 5...6 баллов и волнении до 4 баллов на судах водоизмещением более 12...15 тыс. т скорость преднамеренно не снижают. Выбор безопасного сочетания курса и скорости судна рекомендуется производить с использованием универсальной диаграммы качки Ю. В. Ремеза [10].

С точки зрения предупреждения столкновений с судами, плавающими предметами, другими находящимися в море объектами, выбор безопасной скорости V_b регламентируют Правила МППСС-72 [11]. При хорошей видимости и отсутствии поблизости других судов обычно выбирают режим полного хода. При ограниченной видимости (менее 5 миль) основой для выбора V_b является предположение о надежной дальности обнаружения $D_{обн}$ эхо-сигналов наименьших по размеру судов, с которыми возможна встреча в данном районе. Безопасная скорость должна быть такой, чтобы при внезапном обнаружении цели на близких дистанциях (когда не остается времени для определения элементов движения цели и полной оценки ситуации) иметь возможность остановить судно в пределах половины дальности уверенного обнаружения:

$$S_T \leq \frac{D_{обн}}{2} - D_6 - S_p \quad (19.21)$$

где S_p – расстояние, которое пройдет судно за время реакции судоводителя (осознание ситуации, принятие решения, подача команды); D_6 – дистанция до встречного судна после полной остановки своего судна, которую можно считать безопасной при данных условиях;

S_T – максимально допустимое значение тормозного пути, на основе которого по графикам активного торможения судна выбирается значение безопасной скорости.

При плавании в районах, где возможна встреча с малыми судами, и на волнении, создающем сильную засветку на экране РЛС, безопасная скорость должна быть меньше. С момента обнаружения цели вопрос о величине безопасной скорости должен решаться заново.

Непрерывное квалифицированное наблюдение организуется в соответствии с Правил 5 МППСС-72. В открытом море при хорошей видимости и отсутствии других судов безопасность плавания в полной мере обеспечивается надлежащее организованным визуальным и слуховым наблюдением. При изменении в худшую сторону любого из этих условий становится необходимым радиолокационное наблюдение.

При обнаружении цели оценка ситуации должна производиться, по возможности, на дистанциях 12...8 миль, маневрирование – на дистанциях 8...4 мили, под зоной чрезмерного сближения понимаются дистанции менее 4 миль. Наблюдение должно обеспечивать своевременное обнаружение не только других судов, но и любых объектов на воде, а также квалифицированный контроль визуальной видимости и изменений гидрометеорологической обстановки.

Основной метод контроля за местоположением судна в открытом море – *корректируемое счисление*. При длительном отсутствии обсерваций полоса движения судна имеет вид расширяющегося сектора шириной $\pm m_{пу}$, где $m_{пу}$ – СКП путевого угла. СКП счислимого места оценивается формулами (18.47), типичные для транспортных судов значения коэффициентов K_c приведены ниже

Режимы счисления, условия плавания K_c

Автоматическое счисление (АЛИ РНС, НАК):

в комплексе с абсолютным лагом..... 0,4
в комплексе с относительным лагом..... 0,6

Ручное графическое счисление:

Закрытые моря со слабыми течениями..... 0,9...1,2
моря с сильными переменными течениями..... 1,5...1,8
моря с сильными постоянными течениями..... 2,0...2,4
океаны при нормальных погодных условиях..... 1,8...2,4
Океаны при штормовой погоде..... 3...4

Надежность и точность счисления обеспечиваются исправной работой судовых средств счисления, достоверностью учитываемых поправок, правильным учетом влияния ветра и течения на судно, а также точностью удержания судна на курсе.

Поправка гирокомпаса должна проверяться 1...2 раза в сутки астрономическими методами, показания гирокомпаса и магнитного компаса должны сличаться ежечасно и после поворотов. Счисление контролируется равенством отрезков между счислимыми точками, проложенными через равные промежутки времени, а главным образом – наблюдениями.

Если наблюдения выполняются регулярно, а счисление ведется автоматически, то от графического счисления высокой точности не требуется, прокладка ведется на генеральных картах. Счислимое место отмечается на линии пути в моменты смены вахт, наблюдений, изменений курса или скорости судна, а также в иных случаях по указанию капитана или по усмотрению вахтенного помощника. При наличии автосчислителя (АПИ РНС, НАК) счисляемые точки переносятся на навигационную карту с указанной капитаном дискретностью и обозначаются условным знаком $\oplus$.

Определения места судна нужны для контроля за движением судна по заданному маршруту с требуемой точностью. СКП текущего места судна при корректируемом счислении оценивается формулой (18.46). В соответствии с требованиями ИМО, предельная ($c_p = 0,95$) погрешность текущего места судна не должна превышать 4 миль. Этим требованиям удовлетворяют спутниковые РНС и наземные РНС типа «Декка», «Лоран-С», «Чайка», «Марс-75» (в пределах их рабочих зон). Определения места судна по РНС должны выполняться через равные промежутки времени (за исключением СРНС «Транзит»/«Цикада») в пределах допустимой дискретности наблюдений (см. табл. 8.1), с последующим анализом серии наблюдений (см. рис. 18.5). При наличии радионавигационных определений астрономические наблюдения становятся резервным способом, при этом для ускорения и повышения надежности вычислений необходимо использовать программируемые вычислительные средства (с предварительным решением тестовой задачи с известными ответами).

Если под действием неучтенных гидрометеорологических факторов, из-за погрешностей счисления или по какой-то иной причине судно значительно уклонилось от ЛЗП, то возвращение на прежнюю ЛЗП лишь удлинит переход. Вместо этого из текущего места судна рассчитывают новый кратчайший (или наивыгоднейший) путь на заданную конечную точку (точку поворота).

19.3. Навигационное обеспечение плавания при подходе к побережью

Варианты подхода к побережью. Под термином «подход к побережью» понимается этап перехода от плавания в открытом море к прибрежному плаванию с определениями места судна по береговым ориентирам. Важнейшей навигационной проблемой является обеспечение безопасного выхода судна к заданному участку побережья, его своевременное обнаружение и надежное опознавание открывающихся ориентиров. В течение многих столетий огромное число навигационных аварий было связано с тем, что судно из-за больших ошибок счисления и промахов судоводителей оказывалось на мели прежде, чем были достоверно опознаны береговые ориентиры и выполнено определение места судна. Успешное решение задачи подхода к побережью зависит главным образом от точности текущих координат судна, характера побережья, условий видимости.

При изучении района плавания особое внимание обращается на характер побережья, характер и пределы распространения навигационных опасностей, наличие характерных («приемных») ориентиров, обнаруживаемых и надежно опознаваемых на больших расстояниях, вероятные дальности и направления открытия ориентиров, характеристики «приемных» СНО и РТСНО.

Важно заранее выделить ориентиры, схожие по очертаниям, и навигационные огни с одинаковыми или схожими характеристиками, которые могут послужить причиной промаха в опознавании. Непосредственно перед подходом оцениваются погодные условия, и в первую очередь метеорологическая видимость.

Исходя из радионавигационной обеспеченности района, навигационного оборудования судна, условий плавания, опыта предыдущих переходов оцениваются возможные варианты подхода к побережью и выбирается оптимальный из них. При использовании современных РНС и СРНС, удовлетворяющих требованиям стандартов точности судовождения ИМО, судно может выйти к побережью на дальность надежного радиолокационного обнаружения с предельной ($P = 0,95$) погрешностью текущего места $\widehat{M}_T \leq 4\% D_{оп}$, т.е. острота проблемы снимается. Для подхода к побережью выбираются общепринятые кратчайшие курсы, безопасные в навигационном отношении.

При использовании традиционных методов навигации для подхода к побережью обычно практиковалась последовательная смена способов навигационных определений: астрономические методы или РНС дальнего действия невысокой точности – прибрежные РНС (типа «Декка») или радиомаяки – радиолокационные определения – визуальные обсервации. При этом дискретность обсерваций естественным образом уменьшалась, а точность обсерваций и точность текущего места судна повышались, что и обеспечивало уверенный выход судна на заданный участок побережья.

Худшим вариантом является подход к побережью по счислению после длительного плавания без обсерваций. Площадь вероятного места судна оказывается большой (18.46), даже малая систематическая ошибка (в учете течения, ветрового дрейфа, поправок компаса и лага) приводит к значительным ошибкам счислимого места при длительном переходе. Анализ записей судовых журналов показывает, что вплоть до установки на судах АПИ спутниковых РНС даже крупнотоннажные суда выходили к проливу Ла-Манш после перехода через Атлантику или к Японским островам после плавания от Панамского канала (главным образом в осенне-зимний период) с ошибкой счислимого места до 30...40 миль. Такие ошибки могут стать (и неоднократно становились!) причиной промаха в опознавании открывшегося участка побережья либо промаха в устранении многозначности при входе в зону действия РНС «Декка». Общеизвестна посадка на мель сухогрузного судна у побережья Восточной Африки с невязкой в 39 миль.

Если судно вынуждено подходить к побережью после длительного плавания, то до подхода необходимо принять все меры для получения надежной обсервации, а если это невозможно – уточнить место судна хотя бы по одной линии положения (см. п. 12.3).

Если полученная линия положения перпендикулярна или почти перпендикулярна побережью, она укажет вероятный участок выхода к побережью. Напротив, линия положения, параллельная побережью, укажет, на каком расстоянии от берега находится судно, но останется неизвестным конкретный участок выхода судна к побережью. (Следует заметить, что даже поток судов, выходящих из важного судоходного пролива или уходящих от крупного порта, может служить своеобразным ориентиром при подходе к побережью.)

При подходе к побережью резко возрастает роль навигационного эхолота как средства для непрерывного контроля глубин и предупреждения об опасности (несовпадение глубин по эхолоту и на карте, неожиданное резкое уменьшение глубин и т.п.). Измеренную глубину (обсервованную изобату) можно использовать и для уменьшения площади вероятного места судна, когда глубины в районе плавания изменяются достаточно быстро, но не беспорядочно:

а) если в районе плавания изобаты параллельны или почти параллельны между собой, то используется общий прием уточнения счислимого места по одной линии положения – обсервованной изобате (аналогично п. 12.3);

б) если в районе плавания изобаты расходятся с углом $\theta > 30^\circ$, то возможно уточнение счислимого места методом крюйс-изобаты по двум разновременным измерениям глубин (плавание по счислению $\bar{S}_H$ за время между измерениями вмещается между соответствующими изобатами на карте);

в) если в районе имеются отличительные глубины, то при обнаружении этой отличительной глубины площадь вероятного места судна уменьшается до ее размеров.

Все методы уточнения места по глубинам носят ориентировочный характер (опознавание места) и являются резервными, а результаты такого уточнения должны проверяться при первой возможности более точными навигационными способами.

Выбор курсов подхода. При большой погрешности текущего места судна курсы подхода к побережью следует выбирать особым образом – так, чтобы обеспечить гарантированное обнаружение, опознавание побережья и определение места судна по береговым ориентирам до подхода к навигационным опасностям (рис. 19.6):

$$D_{обн} > D_{зн} > D_{омс} > (D_{оп} + M_T) \quad (19.22)$$

где M_T – предельная погрешность текущего места судна при подходе к побережью с учетом как случайных, так и возможных систематических погрешностей счисления;

$D_{оп}$ – расстояние от «приемного» ориентира до опасной изобаты в секторе вероятных курсов подхода к побережью;

$D_{омс}$, $D_{зн}$ – расстояния, на которых должна обеспечиваться возможность определения места судна по данному ориентиру (ориентирам) и возможность надежного опознавания ориентира соответственно;

$D_{обн}$ – требуемая дальность обнаружения «приемного» ориентира при данных условиях плавания.

При отсутствии особых рекомендаций, в общем случае, для подхода к побережью выбирается приглубый участок, чистый от подводных опасностей, где имеется характерный, далеко видимый ориентир, надежно опознаваемый на экране РЛС. Курс судна прокладывается прямо на этот «приемный» ориентир и по возможности перпендикулярно к изобатам. После обнаружения и опознавания «приемного» ориентира относительно него опознается вся открывающаяся обстановка и определяется место судна.

При этом важнейшей задачей становится обеспечить выход судна к побережью в пределах надежной дальности обнаружения «приемного» ориентира $(D_{обн})_H$. По аналогии с формулами (18.42) и (18.63) вероятность обнаружения «приемного» ориентира может описываться функцией Лапласа

$$P = \Phi(Z) = \Phi\left[\frac{(D_{обн})_H}{(M_T)_\perp}\right] \quad (19.23)$$

по табл. 1-6 МТ - 75 либо распределением Релея

$$P = 1 - \exp\left[-\frac{(D_{обн})_H^2}{M_T}\right] \quad (19.24)$$

с расчетом по табл. 1-а МТ - 75.

Следуя принципу «Считай себя ближе к опасности», СКП текущего места судна по направлению, перпендикулярному курсу $(M_T)_{\perp}$, можно принимать равной радикальной СКП текущего места, т.е.

$$(M_T)_{\perp} \approx M_T \quad (19.25)$$

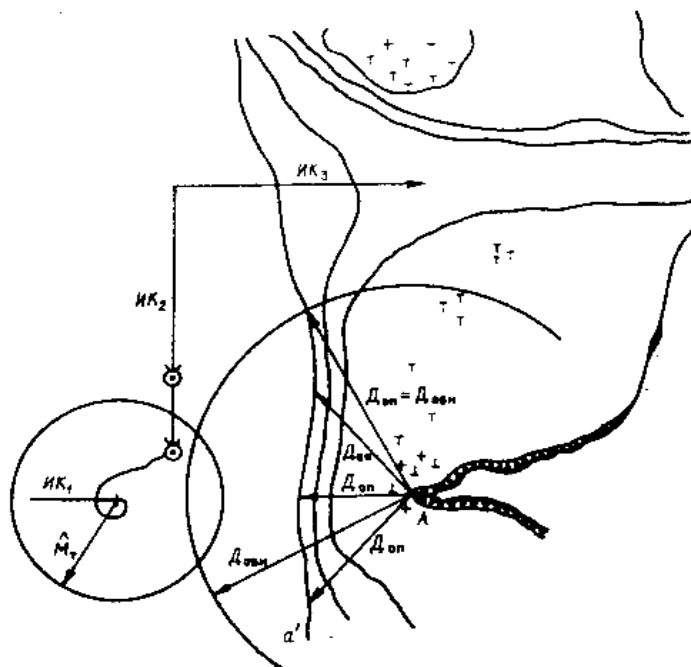


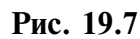
Рис. 19.6

Так, если $M_T \leq \frac{1}{3} (D_{обн})_H$, то $P=0,997$

т. е. обнаружение «приемного» ориентира практически гарантируется.

При больших погрешностях текущего места, не гарантирующих попадание судна в зону видимости «приемного» ориентира, курс судна прокладывается таким образом, чтобы выйти к побережью в заведомо определенной стороне (например, справа) от заданного ориентира и, обнаружив побережье, уверенно поворачивать в сторону ориентира (в данном случае – влево). Этот остроумный прием, предложенный и апробированный судоводителями при плавании к островам Новая Земля во время второй мировой войны, вполне применим при подходе к однообразному побережью с редкими ориентирами.

При отсутствии возможности определения места судна даже единственная линия положения позволяет не только уменьшить площадь вероятного места судна, но и обеспечить более точный выход в заданную точку (например, точку WP на рис. 19.7).



а) проложить обсервованную линию положения $I - I$ на карте, снять ее направление $R_{лп}$, перенести счислимое место судна в определяющую точку К на линии положения;

$$\Pi Y_{\text{полх}} = R_{\text{лп}} \quad (19.26)$$
$$\Pi Y_2 = R_{III} \pm 90^0 \quad (19.27)$$
$$\begin{aligned} t_{II} &= \frac{S_2}{V_{II2}}; T_{II} = T_1 + t_{na} \\ POL_{II} &= \frac{S_2}{K_{II}}; OL_{II} = OL_1 + POL_{II} \end{aligned} \quad (19.28)$$

357

Ширина полосы выхода $\pm m_{WP}$ оценивается формулой

$$m_{WP} = \pm \sqrt{m_{ЛП}^2 + m_{S_2}^2 + \left(S_{подх} \frac{m_{ПУ}}{57,3} \right)^2} \quad (19.29)$$

где $m_{ЛП}$ – СКП обсервованной линии положения, полученной в момент времени T_1 , мили; m_{S_2} – СКП плавания судна промежуточным курсом (19.27) до выхода на линию курса подхода, мили; $S_{подх}$ – плавание судна курсом подхода, мили; $m_{ПУ}$ – СКП в путевом угле судна при плавании курсом подхода, град.

Чем сложнее условия, ниже точность линии положения, больше S_2 и $S_{подх}$, тем шире полоса выхода к заданной точке побережья.

Плавание может осуществляться и непосредственно по обсервованной линии положения при использовании ее в качестве ведущей (см. п. 18.3). При этом различают два случая, навигационные возможности которых также резко различны:

если обсервованная линия положения получена на основе измерений, которые невозможно повторить (как, например, единственная высотная линия положения), то она способна вывести судно лишь произвольный участок побережья ($a - b$), случайно оказавшийся ее продолжением, а ширина полосы выхода

$$m_{WP} = \pm \sqrt{m_{ЛП}^2 + \left(S_1 \frac{m_{ПУ}}{57,3} \right)^2} \quad (19.30)$$

если же данный навигационный параметр возможно измерять (контролировать) непрерывно или, по крайней мере, достаточно часто, то можно выбрать такую ведущую изолинию (гиперболу, ведущий радиопеленг, створный радиомаяк, ведущую дистанцию и др.), следуя по которой судно выйдет в заданную точку (на вход в СРД, на приемный буй и т.п.).

Так, при подходе с Атлантического океана к о-вам Силли для входа в пролив Ла-Манш гипербола «красной» пары Кр.-С.02,00 цепи «ІВ» РНС «Декка» выводит судно прямо на середину полосы движения системы разделения, находящейся к югу от о-вов Силли. Ширина полосы выхода в этом случае минимальна за счет исключения счисления:

$$m_{WP} = \pm m_{ЛП} \quad (19.31)$$

Проложив, например, линию ведущего радиопеленга на радиомаяк через приемный буй, можно, используя радиопеленгатор, вывести судно на буй с СКП

$$m_{\text{лп}} = m_{\text{п}} \frac{D_6}{57,3} \quad (19.32)$$

где D_6 – расстояние от радиомаяка (радиостанции) до приемного буя в милях.

Вероятность обнаружения приемного буя определяется формулой (19.23), где $(M_T)_\perp = m_{\text{лп}}$.

В последние годы судоводителям достаточно часто приходится решать задачу, как войти после океанского плавания в свою полосу движения СРД (например, «приемная» СРД банки Ойо на подходах к Гибралтарскому проливу). Курс судна прокладывается на середину полосы движения СРД только в том случае, если предельная погрешность текущего места судна $\overline{M}_T$ не превышает половины ширины полосы $W/2$, т.е. если

$$\widehat{M}_T = K_P \sqrt{M_0^2 + M_C^2(t)} < \frac{W}{2} \quad (19.33)$$

В противном случае курс прокладывается на расстоянии $\widehat{M}_T$ от границы зоны разделения СРД с тем, чтобы исключить нарушение правил плавания, т. е. исключить случайный заход судна в зону разделения из-за ошибок счисления. При больших возможных ошибках текущего места судна, может быть, более благоразумно прокладывать курс в стороне от СРД, на достаточном расстоянии от нее.

При прокладке курса на середину полосы движения СРД вероятность попадания судна в полосу описывается, по аналогии с (18.42) и (19.23), функцией Лапласа

$$P = \Phi(z) = \Phi\left[\frac{(W/2)}{(M_T)_\perp}\right] \quad (19.34)$$

значит, если

$$(M_T)_\perp \leq \frac{W}{6}, \text{ то } P \geq 0,997$$

т.е. попадание в полосу практически гарантировано.

Аналогичным образом оценивается возможность устранения многозначности фазовых отсчетов при входе с океана в зону действия РНС «Декка» (см. п. 15.2). Чтобы не ошибиться в определении буквенного индекса зоны, предельная погрешность текущего места судна [формула (19.33)] должна быть менее половины ширины зоны. Если возможная погрешность текущего места судна превышает этот предел, то зона может быть определена ошибочно и все линии положения, полученные впоследствии по данной паре станций, будут иметь систематическую погрешность, равную ширине зоны (т.е. 6...12 миль).

Опознавание ориентиров. При подходе к побережью очень важно своевременно обнаружить и опознать открывающиеся навигационные ориентиры. Опознавание усложняется при большой площади вероятного места судна, плохой видимости, однообразных очертаниях побережья или при наличии на побережье объектов (ориентиров) со сходными очертаниями или характеристиками. Промах опознавания – ошибка, в результате которой один объект принимается за другой или вся наблюдаемая картина приписывается другому участку побережья, – является распространенной причиной посадок судов на мель с тяжелыми последствиями. Хорошей морской практикой выработано правило: «Не опознав – не определяйся, не определившись – не подходи!» Общая функциональная схема рекомендуемой последовательности и методики опознавания ориентиров при подходе к побережью приведена на рис. 19.8.

Радиолокационное и визуальное наблюдения, контроль глубин при подходе к побережью следует начинать заблаговременно, на предельных дальностях, так как при положительных систематических погрешностях счисления берег может открыться ранее расчетного рубежа. Если побережье не появляется в расчетное время или, напротив, открывается ранее расчетного, если глубины по эхолоту не соответствуют карте, если глубины начинают резко уменьшаться, если визуальное наблюдение за водной поверхностью указывает на близость побережья, если появились любые сомнения в местоположении судна – вахтенный помощник обязан доложить о складывающейся ситуации капитану.

Нельзя пересекать намеченную ограждающую изобату (см. п. 18.1) без надежного определения места судна.

При радиолокационном наблюдении первыми появляются на экране РЛС изображения высоких участков берега в виде отдельных пятен (отметок), по которым местность обычно опознавать трудно (за исключением случаев, когда эхо-сигнал имеет очень характерную форму или получен от одиночного, удаленного от других, высокого объекта).

Затем происходит постепенное насыщение радиолокационного изображения множеством отметок эхо-сигналов, изображение местности на экране все более напоминает по своим очертаниям изображение на карте (хотя многие детали береговой черты на экране «сглаживаются», некоторые участки побережья затеняются, а в районе низменностей могут оставаться «разрывы» в радиолокационном изображении).

С появлением эхо-сигналов на экране РЛС судоводитель должен сориентироваться в изображении, выделить основные (опорные) ориентиры, выдвинуть гипотезу о наименовании и положении на карте наблюдаемых объектов, учитывая:

- характер радиолокационного изображения;
- дальность и пеленг открытия объектов в сравнении с расчетными;
- характер взаимного расположения объектов относительно опорного на экране РЛС и на карте;
- степень доверия к счислимому месту.

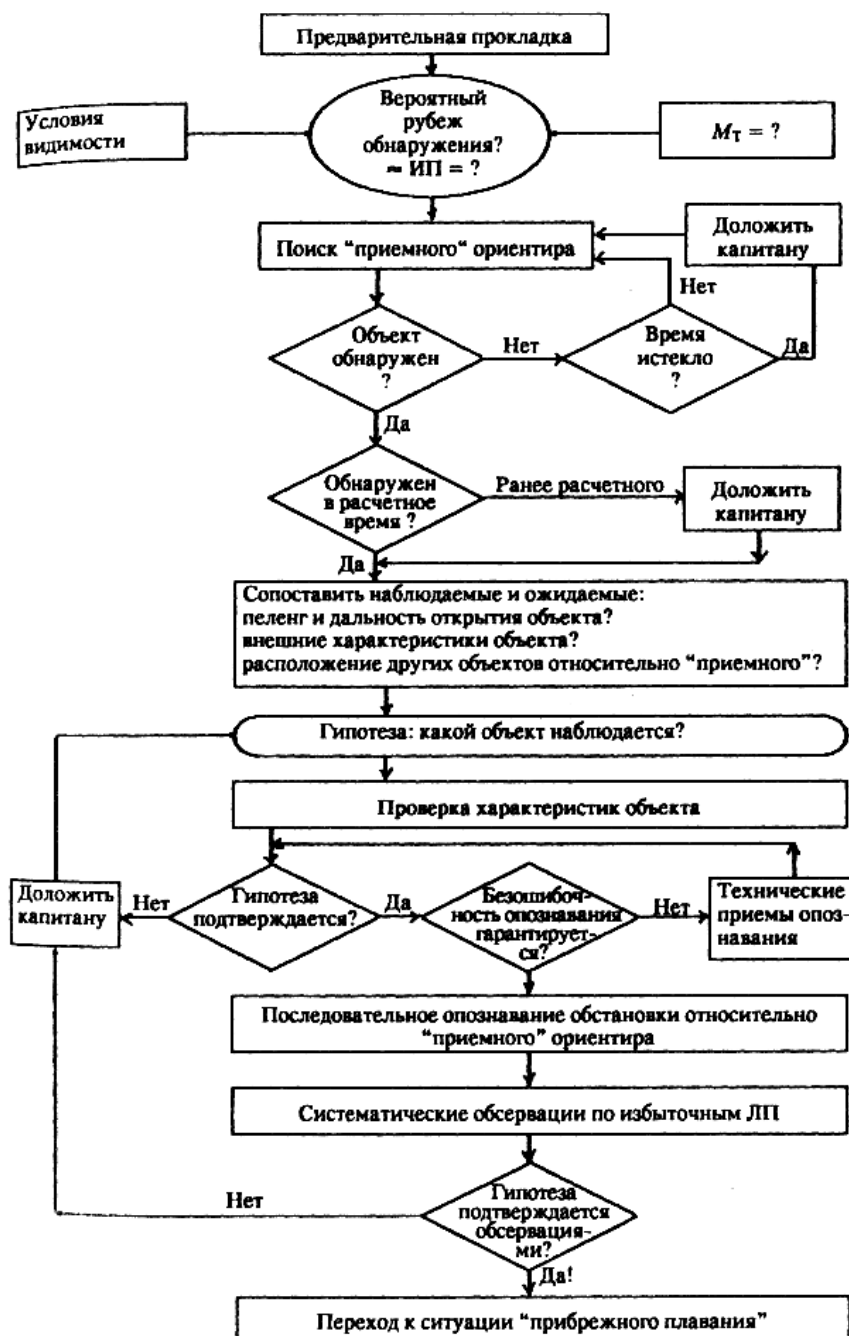


Рис. 19.8

Проверка характеристик объекта (например, измерение и сопоставление с картой расстояний и направлений между наблюдаемыми мысами на экране РЛС, проверка окраски маячного сооружения по справочнику «Огни», проверка характеристик огней по секундомеру и др.) позволяет проверить (подтвердить или опровергнуть) выдвинутую гипотезу. Если характеристики объекта настолько оригинальны, что безошибочность опознавания гарантируется, то задача опознавания будет существенно упрощена. В противном случае необходимо дополнительно использовать специальные технические приемы опознавания, рассмотренные в п. 17.4 и работе [7].

1. Если на экране РЛС наблюдается только один характерный эхо-сигнал, то для его опознавания используется метод площади вероятного места судна (попадание измеренных по РЛС пеленга и дистанции до ориентира в круг $\widehat{M}_T$ на карте). Способ не надежен, а при возможном наличии систематической погрешности или промаха в счислении даже опасен, так как «провоцирует» судоводителя принять желаемое за действительное.

2. Если на экране РЛС наблюдаются два характерных эхо-сигнала, а на карте имеется несколько подобных объектов, то для опознавания рекомендуется метод раздельного нанесения точек пересечения пеленгов и точек пересечения дистанций для каждой пары ориентиров; при правильной комбинации ориентиров обе эти точки должны располагаться рядом, а при неправильном опознавании – на большом расстоянии друг от друга. Задача опознавания надежно не решается, если ориентиры на карте расположены на примерно одинаковых расстояниях друг от друга.

3. Если на экране РЛС наблюдаются три характерных эхо-сигнала, то наиболее удобен метод трех дистанций, измеренных по РЛС; критерием правильности опознавания будет пересечение всех трех окружностей в одной точке или малый треугольник погрешностей. Причиной того, что три дистанции не сходятся в точку, могут быть и ошибки объекта, когда ориентир в целом опознан правильно, но неизвестно, от какой именно его части получен отраженный эхо-сигнал. Большую надежность опознавания дают измерение и прокладка на карте всех шести изолиний – трех пеленгов и трех дистанций – с последующим анализом получаемой фигуры погрешностей.

4. Если на экране РЛС наблюдается несколько (более трех) характерных эхо-сигналов, то наиболее надежен метод веера пеленгов и дистанций (см. рис. 17.13), который обеспечивает не только надежное опознавание, но и (благодаря большой избыточности измерений) выявление ошибок объекта, что повышает точность последующих определений места судна по этим объектам.

5. Способ параллельных пеленгов (см. рис. 17.14) может применяться в том случае, если судно, подходя к изрезанному побережью, движется вдоль него под некоторым углом. Недостатком способа является длительное плавание судна вдоль побережья без знания надежного места.

6. Если хотя бы один из наблюдаемых ориентиров надежно опознан, то для опознавания других объектов наиболее эффективен метод привязки – измерение пеленга и дистанции по РЛС на известный ориентир ($ИП_o - D_o$) и одновременно – на неизвестный ($ИП_i - D_i$) с последующей прокладкой на карте из обсервованной точки (рис. 19.9,а). Способ позволяет опознать объект, выявить ошибки объекта либо определить, находится ли объект (ПСНО) на штатном месте (но только в пределах точности метода).

Радиальная СЕП определения местоположения опознаваемого объекта $M_{пр}$ складывается из СКП по известному ориентиру M_o и СКП относительного положения искомого объекта $M_{отн}$:

$$M_o = \sqrt{m_D^2 + \left(m_{\Pi} \frac{D_o}{57.3}\right)^2} \quad (19.35)$$

$$M_{отн} = \sqrt{m_D^2 + \left(m_{\Pi} \frac{D_i}{57.3}\right)^2} \quad (19.36)$$

$$M_{пр} = \sqrt{M_o^2 + M_{отн}^2} = \sqrt{2m_D^2 + \left(\frac{m_{\Pi}^2}{57.3}\right)^2 (D_o^2 + D_i^2)} \quad (19.37)$$

В результате на больших расстояниях до ориентиров способ не позволяет выявить ошибку объекта и надежно определить, находится ли плавмаяк (буй) на штатном месте.

При наличии в РЛС выносного электронного визира (ВЭВ) метод привязки может быть реализован не от судна, а от объекта (рис. 19.9,6): начало ВЭВ наводится на известный ориентир, а конец ВЭВ – на опознаваемый, тогда по снятым с РЛС пеленгу и дистанции ($ИП_{oi} - D_{oi}$) определяется место объекта на карте. Радиальная СКП привязки, мили,

$$M_{пр} = \sqrt{m_D^2 + \left(m_{\Pi} \frac{D_{oi}}{57.3}\right)^2} \quad (19.38)$$

Таким образом, за счет исключения промежуточной операции – определения места судна – точность метода привязки резко повышается.

Невозможно перечислить все разнообразные технические приемы опознавания ориентиров. На основании предложенной общей методики, собственного опыта, особенностей района плавания и технических особенностей судовой РЛС судоводитель выбирает и применяет наиболее оптимальные методы. Судоводитель не должен пренебрегать никакими средствами, методами и приемами, которые позволяют с наибольшей надежностью опознать отдельный объект или участок побережья.

Надежное опознавание опорных («приемных») ориентиров позволяет последовательно опознать относительно них все открывающиеся участки побережья и перейти к определению места судна по береговым ориентирам.

На больших расстояниях выбор ориентиров обычно невелик, и располагаются они в узком секторе на носовых курсовых углах. Для обсерваций используются отдельные опознанные мысы, высоты, вершины, относительно которых место судна определяется по радиолокационному пеленгу и дистанции.

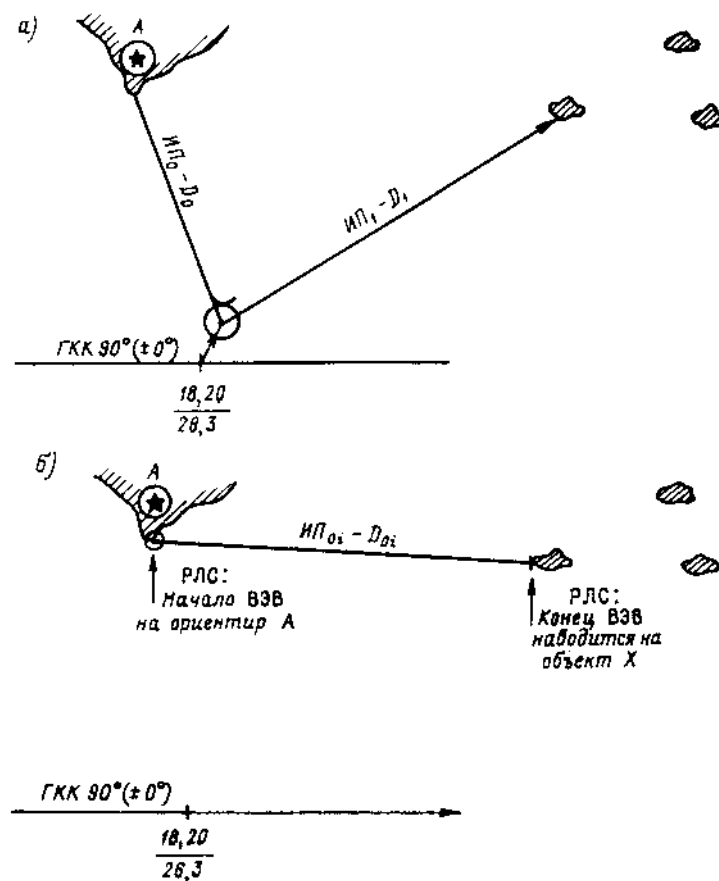


Рис. 19.9

Точность таких определений обычно невелика, и они носят ориентировочный характер, обеспечивая первичную «привязку» к побережью и сокращая площадь вероятного места судна по сравнению со счислением.

При дальнейшем приближении к берегу, увеличении числа наблюдаемых ориентиров, повышении четкости радиолокационного изображения побережья систематические определения места производятся по 2...3 ориентирам с избыточными (3...4) линиями положения. Избыточность обеспечивает надежность получаемых обсерваций, исключение промахов и повышение точности определений. «Результаты обсервации могут быть опровергнуты только результатами другой или повторной обсервации, но не домыслами о возможных малых ошибках проверяемого счислимого места», — гласит испытанное веками правило.

С открытием и опознаванием визуальных ориентиров повышение точности достигается путем использования визуальных пеленгов вместо радиолокационных, а повышение надежности — разумным чередованием визуальных и радиолокационных обсерваций, проверкой характеристик навигационных огней, взятием избыточных линий положения, анализом невязок, измерением и контролем глубин.

В районах, где береговая черта и глубины нанесены на карты недостаточно достоверно, подход к побережью требует особой осторожности. Скорость судна, как правило, должна быть уменьшена, а глубина контролироваться непрерывно. Иногда в качестве предупредительной меры притравливают якорь на глубину, несколько большую осадки судна, и наблюдают за якорь-цепью, что позволяет обнаружить подводную опасность при непосредственном приближении к ней.

19.4. Навигационное обеспечение прибрежного плавания

Под термином «прибрежное плавание» понимается плавание судна на удалении от берега и навигационных опасностей $3 \leq D_{оп} \leq 50$ миль, т. е. в зоне постоянной или периодической видимости побережья (визуально или по РЛС), что позволяет систематически определять место судна по береговым ориентирам. Для прибрежного плавания характерны более высокие требования к точности судовождения, чем в открытом море, большее влияние течений (особенно приливо-отливных), более широкие возможности навигационных определений, более плотный судопоток, особенно на подходах к поворотным мысам, узкостям, проливам, крупным портам.

Из-за многообразия различных факторов выбор оптимальных курсов в прибрежном плавании усложняется (рис. 19.10). В первую очередь необходимо учитывать положения международно-правовые документов и законодательных актов прибрежных государств.

Свобода судоходства как общепризнанный принцип открытого моря имеет определенные изъятия в экономической (рыболовной) зоне существенно ограничена в территориальных водах прибрежного государства (в особенности для некоммерческих судов и судов с особыми характеристиками).

Так, если законодательство прибрежного государства требует от иностранного рыболовного судна при плавании в 200-мильной зоне держать рыболовные снасти «по-походному» и налагает ряд других ограничений, то более длинный путь в обход этой зоны может оказаться более предпочтительным. При осуществлении мирного прохода через территориальные воды прибрежное государство может устанавливать для всех иностранных судов специальные морские коридоры и СРД. Для судов определенных типов (например, танкеров) могут потребовать держаться в стороне от побережья на расстоянии, не менее указанного прибрежным государством. Обязателен обход запретных и ограниченных для плавания районов.

При выборе курсов необходимо учитывать СРД, установленные пути, рекомендованные курсы. Обычно это регламентируется правилами, устанавливающими режим судоходства в данном районе. Кроме того, используя СРД и рекомендованные пути, судоводитель вправе рассчитывать, что этими путями уже прошло множество судов, а поэтому на них и в прилегающих к ним водам не должно быть навигационных опасностей.

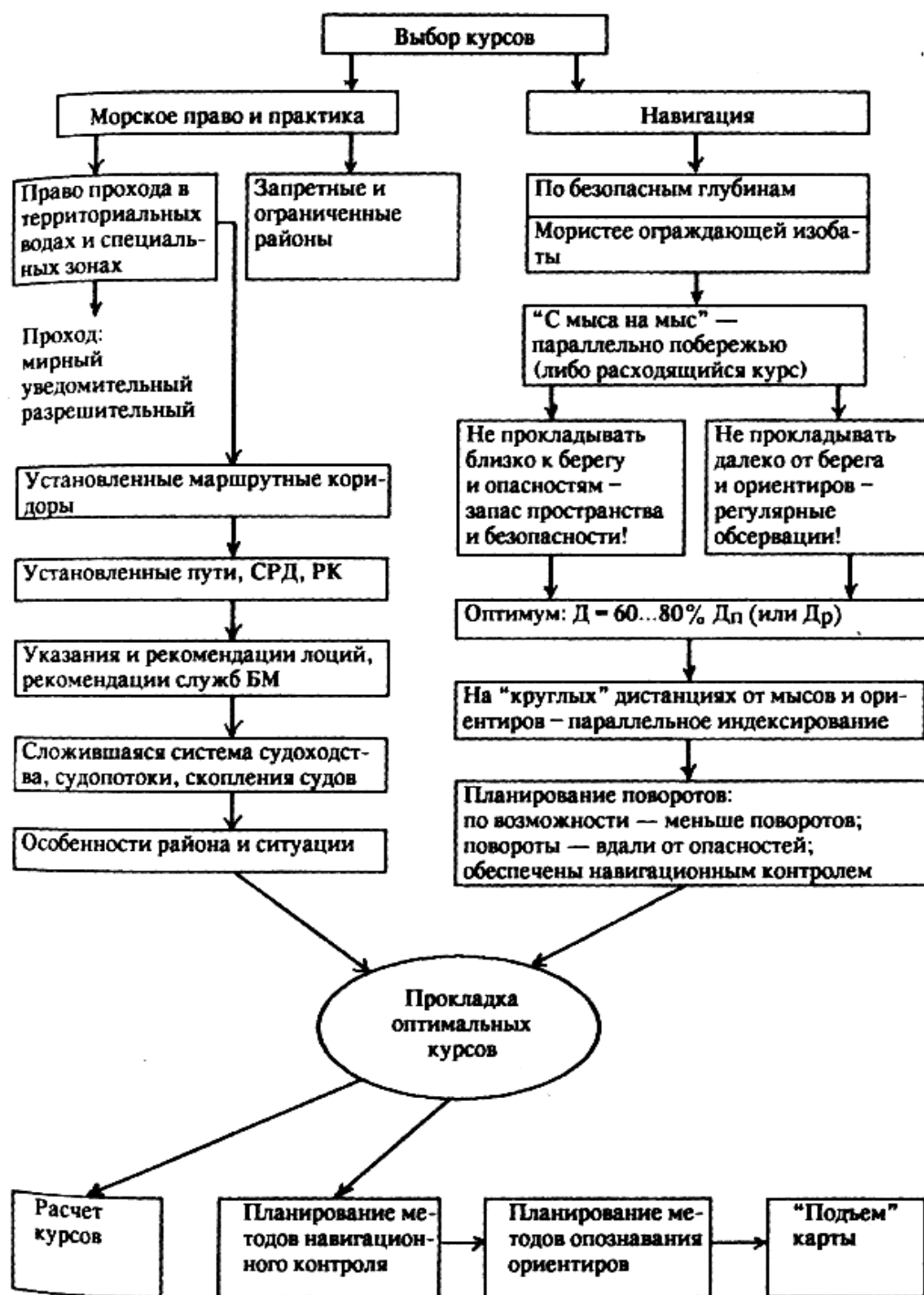


Рис. 19.10

Плавание между соседними СРД осуществляется, как правило, кратчайшими безопасными курсами. При плавании в узкостях курсы прокладываются с учетом Правила 9 МППСС-72 или местных правил плавания. Кроме того, в каждой лоции есть раздел «Правила плавания в водах...», наставления для плавания по генеральным курсам, наставления и указания для плавания в районе описываемого объекта и т.д.

Всякое отклонение от рекомендованных курсов должно быть тщательно обосновано. Не следует без крайней необходимости пользоваться путями для судов, знакомых с местными условиями плавания (*“A Ship with local Knowledge”*). Очень внимательно нужно относиться к предупреждениям об опасностях местного характера, печатаемым под заголовком карты (учитывая, что под заголовок выносят только крайне необходимые и важные предупреждения). Должны быть учтены и другие материалы по режиму плавания - циркулярные письма, радиогаммы и рекомендации судоходной компании, описания маршрутов, наставления, рекомендации, издаваемые различными ведомствами.

При выборе курсов в районах интенсивного судоходства необходимо учитывать и характеристики сложившихся судопотоков, плотность которых часто увеличивается в районах поворотных мысов и вблизи конечных участков СРД.

При попадании судна во встречный судопоток частота расхождений и опасность столкновения резко возрастают (как это бывает, например, в районе мыса Гата при плавании в сторону Гибралтарского пролива). Необходимо прокладывать курсы с таким расчетом, чтобы до минимума свести вероятность возникновения опасной ситуации и иметь достаточное пространство для маневра.

С этой же точки зрения рекомендуется обходить районы промысла и другие районы, где обычно наблюдается скопление судов.

Хорошая морская практика требует не прокладывать курсы близко к берегу, если имеется свободное пространство в сторону моря. Курсы судна в прибрежном плавании должны прокладываться по безопасным глубинам за пределами ограждающей изобаты – изобаты, в пределах которой лежат все навигационные опасности (см. п. 18.1). При скалисто-вулканическом характере дна не следует без крайней необходимости прокладывать курсы в пределах 200-метровой изобаты. Расстояние до берега и навигационных опасностей должно быть существенно увеличено в слабоизученных районах, с редкими или недостоверными промерами глубин, с наличием объектов типа ПП, ПС, СС. Прокладывая курсы в непосредственной близости от навигационных опасностей или между опасностями, судоводитель тем самым усложняет задачу обеспечения безопасного плавания, причем сложная ситуация будет, в свою очередь, способствовать появлению ошибок в оценке ситуации и управлении судном.

В то же время чрезмерное удаление от побережья будет затруднять навигационные обсервации. Поэтому рекомендуется прокладывать курс на достаточном (не менее двух миль) расстоянии от опасной изобаты в пределах 60...80% ожидаемой дальности визуального или радиолокационного наблюдения ориентиров – с таким расчетом, чтобы обеспечить возможность регулярных обсерваций.

Чтобы спрямить путь, курсы прокладываются «с мыса на мыс» параллельно генеральному направлению побережья либо расходясь с ним: не следует прокладывать курсы, сходящиеся с побережьем под малым углом, так как монотонное и постепенное сближение с берегом притупляет у судоводителей чувство опасности. При этом рекомендуется планировать прохождение мысов на «круглых» дистанциях, соответствующих значениям НКД судовой РЛС, это существенно упростит Радиолокационный контроль за местоположением и движением судна (особенно при использовании механического визира с системой параллельных линий) (рис. 19.11).

Повороты планируются таким образом, чтобы поворотных точек было бы по возможности меньше и чтобы можно было надежно определить место судна на подходах к повороту и сразу после него. Удобно выполнять повороты на траверзах ориентиров («поворотных» мысов) либо на тупых курсовых углах ($100...110^\circ$); поворот на остром курсовом угле может привести к нежелательному сближению с мысом. При поворотах, огибании мысов, банок следует придерживаться фарватеров и рекомендованных курсов, не приближаясь к берегу и не срезая углы на поворотах. Учитывая, что поворот на новый курс никогда не может быть выполнен абсолютно точно (и особенно при действии ветра и течения), не следует планировать выполнение поворотов вблизи навигационных опасностей или пытаться войти в узкий канал (фарватер) на циркуляции. Поворот лучше начинать и выполнять заблаговременно с тем, чтобы иметь запас пространства и времени компенсировать ошибки поворота и стабилизировать судно на новом пути до подхода к опасностям.

Все точки поворотов «привязываются» контрольными пеленгами и дистанциями к береговым ориентирам, координаты этих точек вводятся в АПИ РНС (*Way Points* – маршрутные точки).

Все проложенные на картах линии предварительной прокладки являются линиями заданного пути *ПУ_{зад}*. Рассчитываются курсы для рулевого (если необходимо – с учетом ожидаемых параметров ветра и течения).

Навигационные треугольники с учетом вектора течения и угла ветрового дрейфа (см. п. 6.6) строятся на свободном участке карты; элементы приливо-отливных течений выбираются на средний момент каждого часа, а при коротких курсах – на средний момент плавания каждым курсом (см. п. 6.5). При изменении хотя бы одного из элементов – курса, скорости судна, направления или силы ветра расчеты и построения должны выполняться заново.

На основании выполненных расчетов в соответствии с РШС-89 [9] оформляются надписи на линиях предварительной прокладки и производится «подъем» карты.

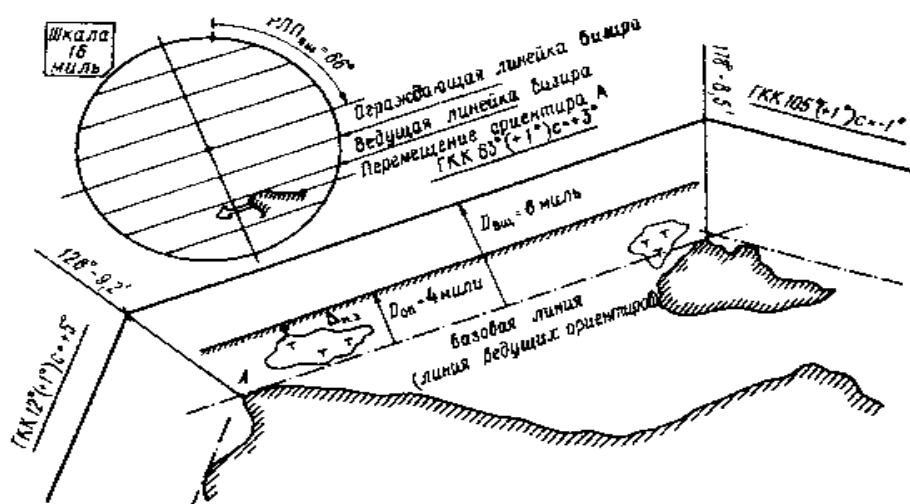


Рис. 19.11

Оптимальная скорость судна выбирается на основе тех же самых принципов, что и при плавании в открытом море (см. п. 19.2). Однако при этом дополнительно учитываются большая плотность и интенсивность движения судов; возможные скопления судов (например, в районах рыболовного промысла); вероятность встречи с малыми судами (каботажными, рыболовными, прогулочными и др.), не всегда достаточно освещенными, надежная дальность обнаружения которых существенно меньше.

Радиолокационное, визуальное и слуховое наблюдения организуются на тех же принципах, что и в открытом море, однако в прибрежном плавании необходимо выставить, как минимум, одного квалифицированного матроса-наблюдателя.

При усложнении плавания ходовая вахта на мостике усиливается. При организации наблюдения учитывается и необходимость частых определений места судна, особенно перед поворотом на новый курс: уходя в штурманскую рубку, вахтенный помощник капитана должен убедиться в отсутствии опасности для плавания, а также в том, что во время его кратковременного отсутствия будет обеспечено надлежащее наблюдение.

При плавании в условиях интенсивного движения судов радиолокационное наблюдение становится необходимым при любых условиях видимости, так как в соответствии с Правил 5 МППСС-72 оно существенно дополняет визуальное наблюдение (в частности, позволяет оценить взаимное положение судов в потоке, их взаимодействие и маневрирование, курсы и скорости, возможные точки поворотов и др.). Судовая РЛС (САПР) используется не только для предупреждения столкновения судов, но и для навигации.

Основным методом контроля за местоположением и движением является корректируемое счисление (см. п. 18.3).

В соответствии с требованиями ИМО и МАМС предельная ($P = 0,95$) погрешность текущего места судна не должна превышать 4% от D при дискретности L обсерваций до 20...30 мин и затратах времени на обсервацию до 2...3 мин. Обсервации должны выполняться через равные промежутка времени, по избыточным (3...4) линиям положения, с последующий -анализом невязок и решением задач по серии обсерваций (см. рис 18.5). При достаточно точных и регулярных обсервациях от графического счисления особой точности не требуется, главное его назначение – обеспечение исходных данных для навигационных расчетов, предотвращение промахов при опознавании ориентиров, при поворотах на новый курс. Счисление ведется, как правило, по предварительной прокладке; при отклонении судна от ЛЗП курс судна корректируется, нарастание невязок сверх разумного предела не допускается. Однако требование придерживаться предварительной прокладки не должно ограничивать свободу маневра при расхождении, в особенности с несколькими судами, находящимися в ситуации взаимного сближения: как правило, более оптимальна стратегия расхождения со всей группой судов путем разумного отклонения от предварительной прокладки вместо того, чтобы заведомо усложнять ситуацию только лишь потому, что так требует предварительная прокладка

Выбор основных и дублирующих способов определения места судна производится на основе общих критериев, рассмотренных в п. 18.4 (см.рис. 18.12). Основным способом является, как правило, радиолокационный, учитывая многоцелевой характер судовой РЛС. Статистика показывает, что в прибрежном плавании с помощью радиолокатора выполняется до 90% всех обсерваций.

На показания приемоиндикаторов РНС можно полагаться только в том случае, если они обеспечивают необходимую точность и если совпадают координатные системы АПИ и навигационной карты (обсервации по РНС связаны не с побережьем, а с геодезическими координатами, что потенциально опасно в прибрежном плавании и стесненных водах при различии используемых геодезических систем и ошибках местных геодезических съемок). При наличии на судне высокоточного АПИ СРНС на средневысоких орбитах, сопряженного с комплексным индикатором навигационной обстановки с электронной картой (*ECDIS*), такой индикатор становится основным методом контроля за местоположением и движением судна в прибрежном плавании, а судовая РЛС (САРП) становится дублирующим средством.

С учетом тактико-технических характеристик РЛС используется преимущественно как средство измерения дистанций.

Наиболее точными и надежными являются определения места судна по дистанциям трех ориентиров либо по пеленгам и дистанциям двух ориентиров (т.е. по четырем линиям положения).

В промежутках между этими опорными наблюдениями место судна может определяться и по двум линиям положения – по двум дистанциям, радиолокационному пеленгу и дистанции, визуальному пеленгу ориентира и дистанции по РЛС (чаще всего до береговой черты) – при уверенности в надежном опознавании ориентиров. При визуальных определениях места судна опорные наблюдения выполняются по пеленгам трех ориентиров, а промежуточные – по двум пеленгам.

В промежутках между наблюдениями и при маневрировании в процессе расхождения с другими судами эффективный контроль за местоположением и движением судна обеспечивается ускоренными радиолокационными методами [7] – например, с помощью выносного электронного визира или механического визира с параллельными линиями, развернутого по направлению пути. Выход судна в точку поворота контролируется по секущей контрольной изолинии (см. рис. 18.8, 18.9).

Так как по мере движения судна происходит непрерывная смена наблюдаемых ориентиров, требуется систематическое повторение задачи опознавания (см. рис. 19.8). Опознавание ориентиров облегчается сравнительно точным (до 1...2 миль) знанием текущего места судна, а также более детальным, чем при подходе к берегу с моря, изображением береговой черты на экране РЛС. Однако для исключения промахов опознавания и устранения ошибок объекта глазомерное опознавание необходимо дублировать применением технических приемов. Наиболее применимыми в данных условиях являются метод трех дистанций и метод привязки (см. рис. 19.9). Метод привязки может быть использован и для нанесения на навигационную карту новых ориентиров (например, буровых вышек) с целью последующего их использования для наблюдений.

При визуальных методах определений желательно, чтобы пеленг каждого нового ориентира накладывался на обсервованную точку, полученную по пеленгам ранее надежно опознанных ориентиров, с обязательной проверкой характеристик огня ориентира по секундомеру. Для обеспечения надежной привязки рубеж опознавания выбирается таким образом, чтобы опознать открывшийся ориентир и определить по нему место судна до того, как ранее использовавшийся ориентир. Уйдет за пределы дальности надежного наблюдения.

Глава 20

ПЛАВАНИЕ В СТЕСНЕННЫХ ВОДАХ И РАЙОНАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ

20.1. Общая характеристика условий плавания в стесненных водах

Под термином стесненные воды понимают плавание вблизи побережья на расстояниях менее 3...5 миль от берегов и навигационных опасностей, в судоходных проливах и узкостях, в районах с установленными путями, фарватерами, СРД — всюду, где маневрирование судна «стеснено» навигационными условиями и/или интенсивным судоходством. Стесненность условий зависит от внешних факторов, размеров и маневренности судна, а также — что немаловажно — от выбранной скорости движения. Хотя океанское судно проводит в стесненных водах в среднем до 5...10% ходового времени, на эти районы приходится свыше 80% всех навигационных аварий. Это свидетельствует, с одной стороны, об объективной сложности условий плавания, а с другой — о несовершенстве методов судовождения, применяемых в стесненных водах.

Можно выделить следующие основные особенности условий плавания в стесненных водах (рис. 20.1):

1) малый (часто минимальный) запас воды под килем, в результате чего многие суда становятся «стесненными своей осадкой»; связанная с этим необходимость учета колебаний уровня моря, постоянного контроля глубин;

2) ограниченность безопасного судоходного пространства, близость навигационных опасностей, резкое ограничение свободы маневрирования;

3) резкое ограничение возможных отклонений судна от ЛЗП, что требует максимально точной навигации и обуславливает расхождение судов на встречных курсах на минимальных траверзных расстояниях;

4) большая упорядоченность судопотока (по установленному пути, створу, наибольшим глубинам и т.д.);

5) пестрый состав судопотока — от крупнотоннажных судов прогулочных яхт и катеров с разными маневренными возможностями и чрезвычайно различным уровнем подготовки судоводителей

6) сочетание «транзитного» движения судов вдоль узкости с пересекающими его местными судами (особенно в районах паромных переправ) и частое следование малых судов курсами, отличными от рекомендованных;

7) частые смены курсов, усложняющие и навигацию, и наблюдение за целями, так как цели также часто маневрируют;

8) ограниченность зоны визуального и радиолокационного обзора, относительно малые дистанции обнаружения целей, скоротечность ситуаций, острый дефицит времени на принятие решений, маневрирование;

9) большое количество навигационных ориентиров (включая плавучие СНО), постоянная их смена, необходимость постоянного опознавания ориентиров и оценки нахождения буев на штатном месте;

10) чрезвычайно малый запас времени и пространства для реакции на неожиданный или неверный маневр цели, для коррекции собственного неудачного маневра, для действий при отказе судовых технических средств.

В силу этих особенностей требуются особенно высокая точность, четкость, безошибочность, быстроедействие всей системы управления движением судна. Основные задачи – наблюдение, навигация, предупреждение столкновений – должны решаться одновременно и взаимосвязано (пренебрежение любой из них влечет повышение риска либо столкновения, либо посадки на мель в процессе расхождения). Возрастает напряженность работы судоводителей и, как следствие, – вероятность навигационной ошибки. Стесненные воды – это самый сложный по своим условиям район плавания, где в полной мере проверяются опыт и искусство судоводителя, где в наибольшей степени проявляется человеческий фактор.

При выборе курсов в стесненных водах в первую очередь надо учитывать международные и местные правила плавания, а также конкретизирующие их наставления, указания, рекомендации для плавания в данном районе; любое отклонение от действующих рекомендаций должно быть тщательно взвешено и обосновано. При наличии установленных путей, СРД, фарватеров, рекомендованных курсов, обеспечивающих безопасное плавание судна, все они фактически определяют выбор курсов судна. Не следует, однако, пользоваться рекомендованными путями для судов, знакомых с местными условиями плавания (*"A Ship with local Knowledge"*).

Глубоководные пути, в пределах которых произведено тщательное гидрографическое обследование до обозначенной на карте наименьшей глубины, предназначены для судов с большой осадкой, которые из-за соотношения своей осадки и окружающих глубин нуждаются в таком пути; остальные суда должны, по возможности, избегать следования глубоководными путями.

Если район плавания подпадает под понятие узкость, то в соответствии с Правилom 9 МППСС-72 судно должно держаться внешней границы прохода или фарватера (с правого борта) «настолько близко, насколько это безопасно и практически возможно» (с целью исключить концентрацию судов вблизи оси узкости). Судно не должно пересекать узкий проход или фарватер, если такое пересечение затруднит движение другого судна, которое может безопасно следовать только в пределах такого прохода или фарватера [Правило 9 (d)].

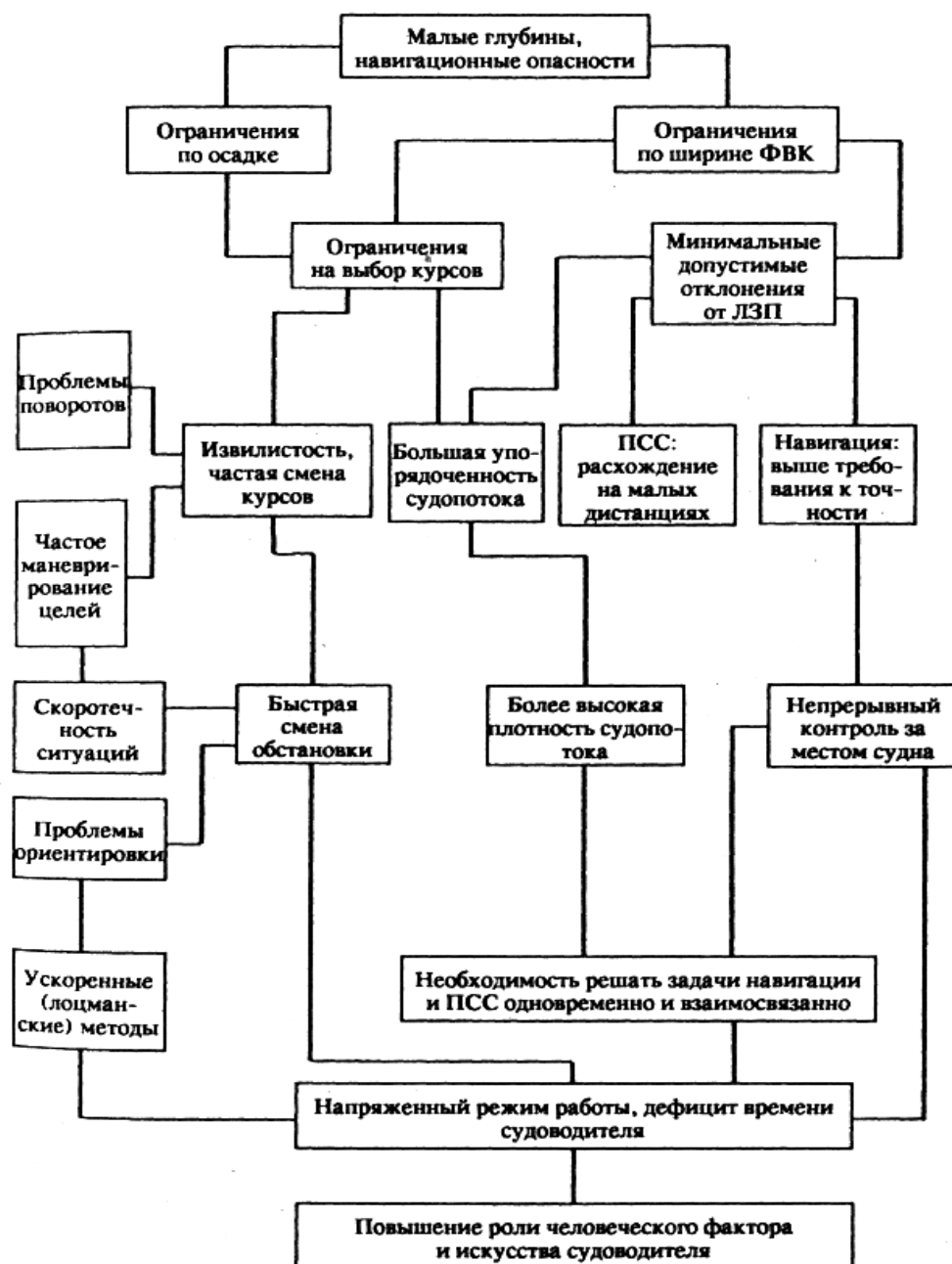


Рис. 20.1

Так как строгого определения понятия узкость в МППСС-72 нет, то во всех сомнительных случаях рекомендуется рассматривать район плавания как узкость и прокладывать курсы по ее правой стороне, однако при возникновении опасности столкновения необходимо действовать в соответствии с правилами маневрирования МППСС-72. В узкости с установленным односторонним движением курсы судна рекомендуется прокладывать по ее середине.

При отсутствии конкретных правил, рекомендаций, установленных путей курс судна прокладывается по безопасным глубинам за пределами ограждающей изобаты и на достаточном удалении от навигационных опасностей. Предпочтение отдается таким курсам, которые обеспечены ведущими створами (искусственными или естественными); если створа нет, желательно иметь хотя бы ведущий ориентир прямо по носу или по корме (рис. 20.2). При использовании РЛС прокладывают курсы так и на таком расстоянии от ориентиров, чтобы максимально использовать НКД и награвированные на механическом визире параллельные прямые [7].

При выборе курсов в стесненных водах следует иметь в виду, что не всякий кратчайший маршрут является лучшим. При поворотах, переходе с одного рекомендованного курса на другой, огибании мысов и банок следует строго придерживаться фарватера, не прижимаясь к берегу и не срезая углы на поворотах, так как это резко снижает безопасность плавания. Повороты лучше выполнять заблаговременно до подхода к навигационным опасностям, поэтому необходимо соблюдать следующие правила:

не следует выполнять резких поворотов вблизи опасностей или входить в узкий канал на циркуляции;

входить в подходной канал порта надо заблаговременно, мористее приемного буя и под острым углом; если после приема лоцмана или съёмки с якоря вход в подходной канал возможен только на крутой циркуляции, то лучше отойти мористее или выполнить циркуляцию в сторону моря.

При подходе к месту якорной стоянки надлежит придерживаться общепринятых курсов и лишь перед подходом к точке отдачи якоря проложить курс против ветра, течения или их равнодействующей. При проходе на малом расстоянии мимо судов, стоящих на якоре, лучше проходить у них по корме, так как в противном случае повышается опасность навала. Аналогично, при подходе к точке встречи лоцманов также надлежит придерживаться общепринятых курсов и лишь перед подходом лоцманского бота изменить курс таким образом, чтобы прикрыть бот бортом от ветра и волнения.

Особое внимание при выборе курсов следует уделять опасным районам стесненных вод, где суда вынуждены проходить вблизи навигационных опасностей, имеются крутые повороты, действуют сильные свальные течения, а также районы, особо опасные с точки зрения предупреждения столкновений судов.

Такие участки можно выявить путем тщательного изучения навигационных условий, на основе опыта судовождения, анализа навигационных аварий в данном районе. Знание опасных районов позволит спланировать дополнительные меры по обеспечению навигационной безопасности.

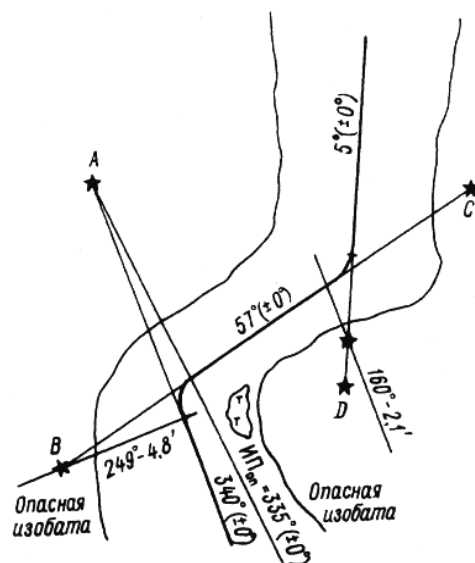


Рис. 20.2

Скорость судна в стесненных водах должна быть такой, чтобы судно надежно управлялось и могло бы в случае необходимости вовремя погасить инерцию. Не следует развивать скорость больше, чем позволяют обстоятельства: на крупнотоннажном судне увеличить скорость легче, чем погасить, а при работе машины на задний ход контроль над движением судна ухудшается или может быть потерян совсем. Безопасная скорость $V_б$ выбирается в пределах:

$$V_{MIN} < V_б < \begin{cases} V_{MAN} \\ V_{ПР} \\ V_{ПСС} \\ V_{НАВ} \\ V_{ГД} \end{cases} \quad (20.1)$$

где V_{MIN} — минимальное значение скорости, при которой сохраняется управляемость судна при данном варианте загрузки и сложившихся гидрометеорологических условиях;

V_{MAN} — скорость полного переднего хода в маневренном режиме (заблаговременный переход с ходового на маневренный режим работы СЭУ должен выполняться еще при подходе к району со стесненными условиями плавания); $V_{ПР}$ — предельная скорость движения судна относительно грунта, регламентируемая местными правилами плавания или обязательными постановлениями по портам; $V_{ПСС}$ — скорость судна, безопасная в отношении предупреждения столкновений; $V_{НАВ}$ — скорость, безопасная в навигационном отношении; $V_{ГД}$ — скорость, безопасная в гидродинамическом отношении.

Имеющаяся на судах информация о маневренных элементах судна (по форме ИМО) позволяет оценить условия потери управляемости от ветра и, задаваясь скоростью и курсовыми углами кажущегося ветра, установить нижний предел скорости V_{MIN} при которой судно сохранит управляемость. Следует иметь в виду, что управляемость судна под воздействием ветра резко ухудшается при уменьшении скорости, при плавании в балласте с малой осадкой, высоким надводным бортом и, в особенности, когда часть гребного винта и пера Руля оказываются над водой.

Управляемость ухудшается при плавании на попутном течении и при неравномерном воздействии свального течения на корпус, вызывающем быстрый разворот судна поперек фарватера. Минимальная безопасная скорость при плавании на течении

$$(V_{MIN})_T \geq 5V_T \quad (20.2)$$

Если судно при сильном ветре и/или течении для сохранения надежной управляемости вынуждено иметь чрезмерно высокую скорость, то благоразумнее отказаться от прохода через стесненный рейд до улучшения гидрометеорологических условий либо воспользоваться помощью буксиров.

С точки зрения предупреждения столкновений судов безопасная скорость $V_6 < V_{псс}$ устанавливается на основе Правила 6 МППСС-72 и общего принципа (19.21) с учетом конкретных обстоятельств плавания, включая:

- метеорологическую видимость (минимальное значение);

- проблемы визуального обнаружения встречного судна (фон освещения от береговых огней, затрудненность обнаружения малого судна на фоне моря при большой высоте глаза наблюдателя, возможность встречи с малыми судами без огней и др.);

- надежную дальность радиолокационного обнаружения целей (в том числе судов, выходящих из-за поворота, высокого мыса, острова, из узкого прохода между островами);

- ограничения, связанные с применяемыми методами обработки радиолокационной информации, квалификацией и опытом наблюдателя у РЛС, требуемым темпом и сложностью обработки информации;

- наличие, характер, плотность и интенсивность движения судов;

- осадку и маневренные характеристики судна: при плавании в стесненных условиях возможности отворота обычно ограничены (особенно для «судна, стесненного своей осадкой»), поэтому при неожиданной встрече другого судна или осложнении обстановки важно иметь возможность быстро остановить движение.

Для обеспечения навигационной безопасности при выборе безопасной скорости $V_6 < V_{НАВ}$ учитывается еще более широкий спектр факторов, связанных с навигационно-гидрографическими и гидрометеорологическими условиями плавания, в него входят:

применяемые методы контроля за местоположением и движением судна, их точность, дискретность, продолжительность операций контроля;

степень стесненности и извилистости фарватера, характер и близость навигационных опасностей;

степень совокупного воздействия внешних факторов (в особенности ветра и течения) на точность стабилизации судна на ЛЗП;

надежность имеющейся информации о глубинах и точность учета колебаний уровня моря;

дальность надежного обнаружения $D_{обн}$ потенциальных навигационных опасностей (или ограждающих их СНО) с учетом организации наблюдения и гидрометеофакторов; по аналогии с формулой (19.21),

$$S_V \leq D_{обн} - L_{\delta} - D_{\delta} - S_P \quad (20.3)$$

где S_V – максимально допустимое значение тормозного пути, на основе которого по графикам активного торможения судна выбирается значение безопасной скорости; L_{δ} – расстояние от точки наблюдения (мостика) до носовой оконечности судна.

При уклонении от опасности не торможением, а отворотом элементы циркуляции судна мало зависят от начальной скорости в довольно широком диапазоне скоростей, поэтому формулу (20.3) рекомендуем использовать в виде

$$S_P = V_{ср} \leq D_{обн} - L_{\delta} - D_{\delta} - S_{отв} \quad (20.4)$$

где S_P – путь, проходимый судном за время реакции судоводителя t_P ; $S_{отв}$ – запас пространства для отворота, оцениваемый по диаграмме циркуляции судна; при уклонении от протяженной опасности $S_{отв} = l_1$ (выдвигу).

Реально оценивая t_P , можно выбрать безопасную скорость: чем меньше скорость судна, тем больше запас времени на оценку ситуации и принятие правильного решения.

Гидродинамические эффекты в наибольшей степени проявляются на мелководье при отношении глубины к осадке судна $H/T < 1,2$ и при отношении ширины канала к осадке судна $W/B < 6$ и резко усиливаются с увеличением скорости судна. Уменьшение скорости ослабляет эффект гидродинамического взаимодействия.

Скорость судна должна быть меньше критической, при которой образуется спутная волна:

$$V_{ГД} < V_{кр} = \sqrt{gH} \quad (20.5)$$

Уменьшая скорость, можно уменьшить проседание судна на мелководье [(см. формулы (18.9)], т.е. снизить степень риска касания грунта на малых глубинах.

Наконец при снижении скорости уменьшается степень гидродинамического взаимодействия между судами (при расхождении и обгонах), между судном и стенкой канала (включая зарыскивание судна от мелководной банки или бровки канала на глубокую воду), а также эффекты волнообразования (например, при проходе мимо доков, стоящих у причала судов).

Выбранная на основе принципа (20.1) безопасная скорость судна является основой для дальнейших предварительных расчетов и планирования плавания судна в стесненных водах. Однако V_6 не является постоянной величиной и должна корректироваться при изменении обстоятельств плавания. Так, обнаружение встречного судна, следующего не по своей стороне фарватера, требует соответствующего уменьшения безопасной скорости.

Следование с чрезмерной скоростью в стесненных водах во многих случаях было первопричиной навигационных аварий. Превышение скорости, позднее обнаружение, запоздалые действия – понятия взаимосвязанные. При высокой динамике развития ситуации снижение скорости увеличивает резерв времени на оценку ситуации, а предпринимаемые действия оказываются более эффективными. Снижение скорости на сложных участках и в районах интенсивного – судоходства (особенно ночью) уменьшает нагрузку на наблюдателей и судоводителей.

20.2. Транспортный поток судов и плавание в судопотоке.

Увеличение плотности и интенсивности движения судов на основных морских путях, в международных проливах, на подходах к крупным портам привело к формированию мощных судопотоков, усилению взаимосвязей между движущимися судами, переходу от плавания одиночного судна к групповому плаванию судов. Это, в свою очередь, потребовало изучения закономерностей группового плавания, методов управления потоками судов, а также обучения судоводителей методам обеспечения безопасности мореплавания в условиях интенсивного судоходства.

Транспортный поток судов (судопоток) – это совокупность судов, движущихся на определенном участке морского пути по определенному маршруту в условиях динамического взаимодействия друг с другом. Судопоток – это сложная динамическая система, обладающая такими свойствами, которых не имеют отдельные суда, составляющие этот поток.

Наличие внутренней организации представляет собой специфический способ взаимосвязи и взаимодействия судов в потоке.

Основные пространственно-временные характеристики транспортного потока формулируются следующим образом:

- 1) географическое положение судопотока (например, поток судов, следующих Гибралтарским проливом в западном направлении);
- 2) состав судопотока (так, в Ормузском проливе более 40% транспортных судов составляют танкеры, большей частью крупнотоннажные);

3) среднее направление движения судов в потоке (например, среднее направление потока судов, следующих к Гибралтарскому проливу в западной части Средиземного моря, составляет $258,5^\circ$ со средним квадратичным отклонением $1,8^\circ$ при нормальном законе распределения¹⁹);

4) средняя скорость судопотока ($V_{cp} = 13,6$ уз в западной части Средиземного моря и $V_{cp} = 14,1$ уз в проливе Па-де-Кале с СКО $\pm 4,2$ уз и $\pm 4,6$ уз соответственно);

5) средняя плотность судопотока – число судов N , приходящихся на единицу площади S судоходного пространства в некоторый момент времени, ед./милю²:

$$\rho_s = \frac{N}{S} \quad (20.6)$$

Плотность судопотока может быть связана с числом судов N , наблюдаемым на экране РЛС, и установленной шкалой дальности $D_{шк}$, ед./милю²:

$$\rho_s = \frac{N}{\pi D_{шк}^2} \quad (20.7)$$

т.е. при $D_{шк} = 16$ миль плотность $\rho_s = 0,063$ означает, что на экране РЛС наблюдается одновременно около 50 судов;

6) средняя линейная плотность судопотока – число судов на единицу l судоходного пролива, канала, узкости, ед./милю:

$$\rho_l = \frac{N}{l} \quad (20.8)$$

Обратной величиной является средняя дистанция между судами в потоке

$$D_{cp} = \frac{l}{N} = \frac{1}{\rho_l} \quad (20.9)$$

Тогда средний интервал времени между судами в потоке, проходящими через одно и то же сечение канала, будет

$$\Delta t_{cp} = \frac{D_{cp}}{V_{cp}} = \frac{\tau_{cp}}{N} \quad (20.10)$$

где τ_{cp} – средняя продолжительность прохода судна данным проливом (каналом) при постоянной скорости движения;

¹⁹ По исследованиям проф. С. Б. Олышамовского.

7) средняя интенсивность движения судов в потоке – число судов, проходящих через заданное сечение канала за единицу времени t , ед./ч, ед./сут:

$$\lambda = \frac{N}{t} \quad (20.11)$$

Величина, обратная интенсивности, вновь даст средний интервал времени между судами в потоке:

$$\Delta t_{cp} = \frac{t}{N} = \frac{1}{\lambda} \quad (20.12)$$

где t – промежуток времени, в течение которого выполнялись наблюдения. Максимальное значение интенсивности движения судов ограничивается пропускной способностью канала (фарватера) при установленной организации движения;

8) распределение плотности судопотока по ширине судоходного пространства (канала, фарватера) обычно подчиняется закону нормального распределения [6]:

$$P(y) = \int_{-y}^{+y} f(y) dy = \frac{1}{m_y \sqrt{2\pi}} \int_{-zmy}^{+zmy} \exp\left(-\frac{y^2}{2m_y^2}\right) dy \quad (20.13)$$

или, при выражении через функцию Лапласа, по аналогии с формулами (18.39)...(18.42),

$$P(y) = 0,5[\Phi(z_1) + \Phi(z_2)] = \Phi(z) \quad (20.14)$$

где $P(y)$ – вероятность нахождения судна на участке $(-y, +y)$ относительно оси судопотока; m_y – среднее квадратичное отклонение судов от оси потока; z_1, z_2, z – нормированные СКО судов от оси:

$$z_1 = -\frac{y}{m_y}; z_2 = +\frac{y}{m_y}; z = \pm \frac{y}{m_y} \quad (20.15)$$

Отсюда, по формуле (18.43), требуемая ширина фарватера с односторонним движением, м:

$$F_{TP} = 2m_y z_{TP} + W_{\Gamma} \quad (20.16)$$

Например, задаваясь вероятностью безопасного прохода $P_{зд}=99\%$, по табл. 1-6 МТ-75 получим $z_{TP} = 2,58$; тогда

$$F_{TP} = 5.2m_y + W_{\Gamma} \quad (20.17)$$

Аналогичным образом можно вывести рабочие формулы и для фарватеров с двусторонним движением.

Распределение судов в потоке по ширине судоходного пространства зависит от степени стесненности этого пространства и установленной организации движения судов (рис. 20.3).

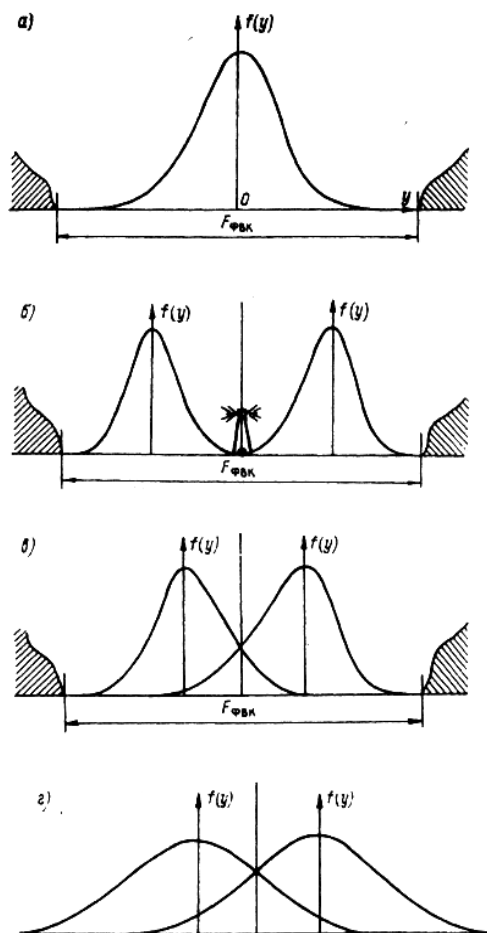


Рис. 20.3

Так, на фарватере с односторонним движением ось судопотока обычно совпадает с осью фарватера (створом), максимальные отклонения не выходят за пределы безопасной полосы (рис. 20.3,а). На фарватерах с двусторонним движением встречные судопотоки разделены, т.е. наблюдается два определения судов относительно оси фарватера. Если ось фарватера -четко обозначена на местности (например, осевыми буями), то вероятность выхода судна на полосу встречного движения мала и судопотоки практически не пересекаются (рис. 20.3,б).

Если же осевая линия не обозначена, вероятность выхода судов на полосу встречного движения повышается (рис. 20.3,в). Наконец в районах без навигационных ограничений судопотоки наиболее «размыты» и не имеют четких границ (рис. 20.3,г).

На маршрутах открытого моря ось судопотока совпадает с рекомендованными наивыгоднейшими путями. При этом высокоточные навигационные (в том числе спутниковые) системы уменьшают отклонения судов от предварительной прокладки и тем самым способствуют концентрации судов на рекомендованных и оптимальных путях, повышая частоту встреч и опасность столкновений в открытом море. В прибрежном плавании центрами, формирующими судопоток, являются узловые точки — выступающие в море «поворотные» мысы острова) и/или расположенные около них системы разделения движения, где плотность судов наибольшая. При малых расстояниях между узловыми точками суда следуют вдоль побережья довольно плотными, жми потоками, однако при больших расстояниях судопоток начинает постепенно «размываться». Плавание ближе к левой (внешней) кромке судопотока более опасно, так как повышается вероятность встретить судно, идущее в левой части встречного судопотока. Если правая (внутренняя) кромка судопотока обращена к побережью, то при плавании в правой части судопотока повышается вероятность встречи каботажными, рыболовными, прогулочными судами. В средней части судопотока плотность движения судов наибольшая. Потоки судов различают по продолжительности функционирования постоянные и временные), по составу судов (однородные и смешанные), по значению (местные, региональные, межконтинентальные), по структуре (однорядные, двухрядные, многорядные), по взаимному расположению (односторонние, двусторонние, пересекающиеся), по организации движения (регулируемые и нерегулируемые) и т.д.

Система организационных и технических мероприятий для упорядочения движения судов в потоке с целью повышения безопасности мореплавания, достижения наибольшей надежности и эффективности транспортной системы в заданном районе называется управлением потоком судов. Потребность в управлении потоком возникает прежде всего там, где наиболее интенсивное движение судов, сложные условия плавания, часты навигационные аварии.

Методы управления потоком судов подразделяются на активные и пассивные. Активные методы заключаются в регулировании и управлении движением судов в районе с помощью береговых РЛС, постов регулирования движения судов, систем управления движением судов. Пассивные методы предполагают целенаправленное воздействие на судопоток с помощью системы правил, введения установленных путей, запретных для плавания районов, системы радиолокационного контроля за судоходством и информации о движении судов в районе.

Общие принципы установления путей движения судов (*Routing*) приняты Ассамблеей ИМО (Резолюции А.378(X) от 14.11.1977 и А. 428 (XI) от 15.11.1979) и изложены в руководстве № 9036 [12]. Общая схема установления путей движения судов представлена на рис. 20.4.

Эффективным средством пассивного управления судопотоками является система разделения СРД – разделение встречных потоков судов посредством установления зон и/или линий разделения и полос движения (рис. 20.5). Наиболее часто используются СРД линейного типа (рис.20.5,а). Установленная зона прибрежного плавания удерживает суда местного плавания на достаточном расстоянии от СРД, а транзитные суда – от приближения к берегу и навигационным опасностям.

Секторное разделение движения (рис. 20.5,б) используется там, где сходятся потоки судов, идущих с различных направлений; в узловых точках схождения потоков вводятся районы кругового движения или районы повышенной осторожности плавания.

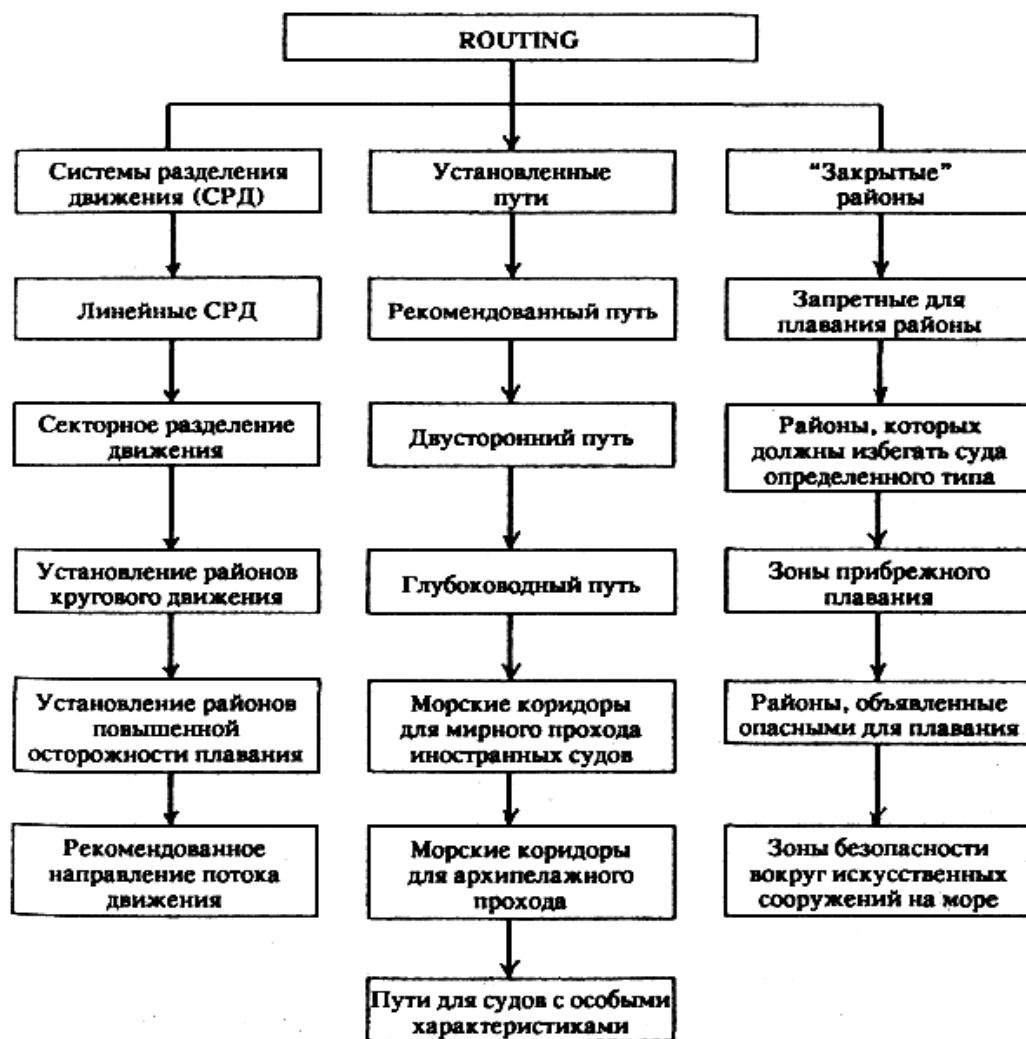


Рис. 20.4

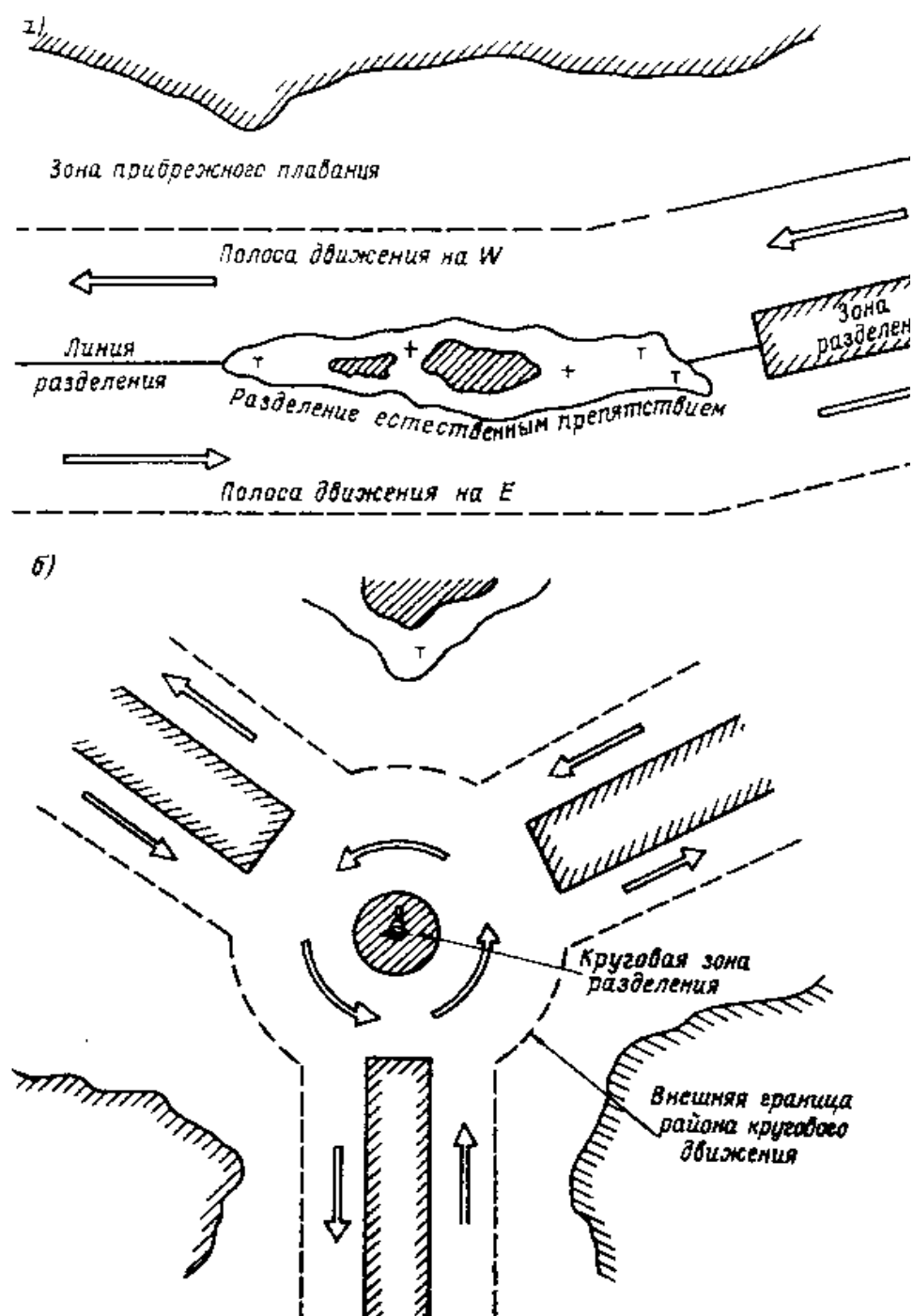


Рис. 20.5

Там, где соединяются или пересекаются пути, также вводятся районы пересечения, районы соединения, районы повышенной осторожности плавания. Полосы движения должны прокладываться так, чтобы оптимально использовать имеющиеся глубины; максимальная ширина полос движения и зон разделения должна устанавливаться исходя из точностных возможностей способов определения места судна в соответствии с действующими требованиями к судовому оборудованию [12].

Единственным международным органом, ответственным за установление СРД, является ИМО. Однако правительства прибрежных государств вправе самостоятельно вводить СРД в водах, находящихся под их юрисдикцией, информируя об этом ИМО и заблаговременно оповещая всех через систему «Извещений мореплавателям». Плавание по СРД, одобренным ИМО, регламентируется Правилom 10 МППСС-72 (рис. 20.6). Правила плавания в национальных СРД устанавливает прибрежное государство, они могут существенно отличаться от Правила 10. Необходимо учитывать, что и в некоторых СРД, одобренных ИМО (например, в Сингапурском проливе), могут действовать дополнительные правила, также одобренные ИМО и частично изменяющие Правило 10 МППСС-72. Даже если объявленная СРД не одобрена ИМО и не является обязательной для использования, хорошая морская практика требует от судоводителя следовать соответствию с установленной системой до тех пор, пока другие – более важные – соображения не заставят пренебречь ею.

В соответствии с Правилом 10 судно должно в общем случае входить в полосу движения СРД или покидать ее на конечных участках но если судно покидает полосу движения или входит в нее с любой стороны, оно должно делать это под возможно меньшим углом к общему направлению потока движения. При плавании вблизи конечных участков СРД необходимо соблюдать особую осторожность, так как движение судов здесь не является упорядоченным, выбор курсов может быть достаточно произвольным, а изменения курсов – неожиданными. Судно, не использующее СРД, должно держаться от нее на возможно большем расстоянии.

Судно, использующее СРД, должно следовать в соответствующей полосе движения в принятом на ней общем направлении потока движения и держаться, насколько это практически возможно, в стороне от линии (зоны) разделения движения. Учитывая это обстоятельство, при предварительной прокладке пути судна рекомендуется прокладывать то середине полосы движения, если справа по ходу за границей полосы движения находится зона прибрежного плавания или опасный район (рис. 20.7). Если же за правой границей полосы движения опасности нет (нижняя полоса на рис. 20.7), то путь судна лучше располагать в 2/3 ширины полосы движения от зоны разделения. В дальнейшем, при фактическом плавании судна в данном районе, путь судна может быть скорректирован в зависимости от движения других судов в СРД.

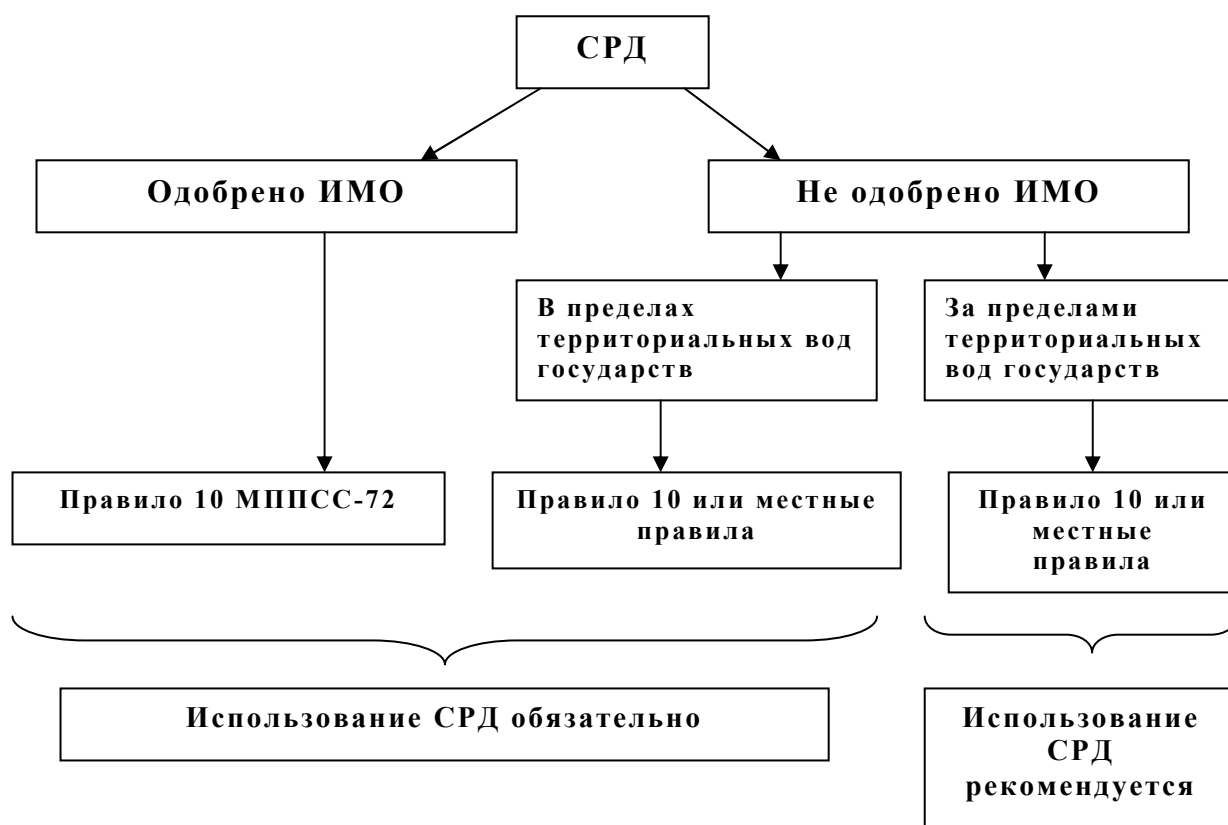


Рис. 20.6

Судно, если оно не пересекает СРД, не входит в полосу движения не выходит из нее, не должно, в общем случае, входить в зону разделения или пересекать линию разделения движения, кроме ситуаций крайней необходимости: для избежания непосредственной опасности либо при лове рыбы или гидрографических работах в пределах зоны разделения (не затрудняя при этом движение других судов, следующих в полосе движения).

Судно должно, насколько это практически возможно, избегать пересечения полос движения, но если оно вынуждено пересекать полосу движения, то должно делать это, насколько возможно, курсом под прямым углом к общему направлению потока движения (рис. 20.7, варианты а, б, в).

Существует широко распространенное убеждение о привилегированном статусе судов, использующих СРД для транзитного прохода. Однако в соответствии с Правилем 10(а) плавание по СРД «не освобождает никакое другое судно от его обязанностей, вытекающих из любого другого Правила». Таким образом, при возникновении опасности столкновения Правила маневрирования МППСС-72 имеют приоритет перед Правилем 10.

При плавании в судопотоке оптимальной (с точки зрения минимума обгонов) является скорость судна, равная средней скорости ближайших судов, следующих в той же полосе движения.

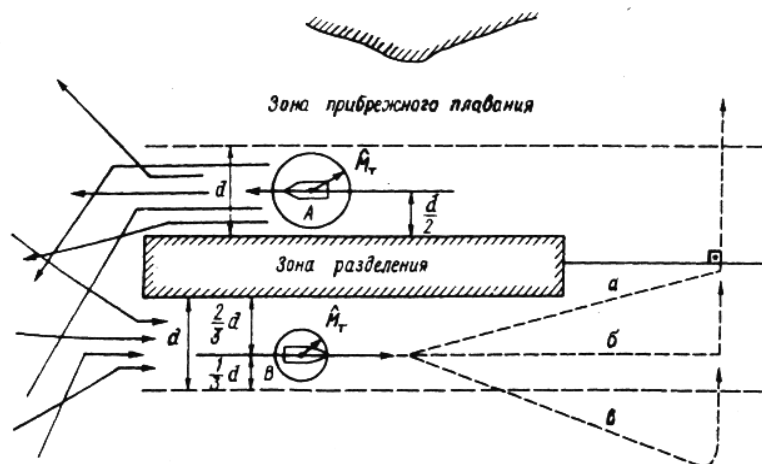


Рис. 20.7

Скорость судна, несколько превышающая это значение, более предпочтительна, чем несколько меньшая, так как отводит своему судну активную роль при обгонах, однако в любом случае скорость должна быть безопасной (см. п. 20.1). При ограничении или запрещении обгона скорость судна подбирается такой, чтобы не допустить чрезмерного сближения с судном, идущим впереди.

Минимальную безопасную дистанцию до впереди идущего судна, позволяющую избежать столкновения при экстренном его торможении, можно определить с помощью выражения

$$D_{\delta} \geq S_p + (S_{TH} - S_{TC}) + \Delta_{H3} \quad (20.18)$$

где Δ_{H3} – навигационный запас – минимальное безопасное расстояние до кормы стоящего впереди судна после торможения своего судна; $\Delta S_T = (S_{TH} - S_{TC})$ – разница тормозных путей своего судна и цели, в наиболее опасной ситуации (например, при столкновении или посадке на мель впереди идущего судна) $S_{TC} \approx 0$ и $\Delta S_T \approx S_{TH}$; S_p – путь, проходимый своим судном с постоянной скоростью за время реакции судоводителя (обнаружение торможения впереди идущего судна, анализ сложившейся ситуации, подача команды на реверс).

Важнейшим фактором является своевременное обнаружение торможения впереди идущего судна. Порог замечаемого изменения скорости дели может быть принят равным 20...30% от исходной; более надежные результаты дает контроль дистанций по РЛС.

В большинстве случаев безопасной считается дистанция до попутного судна по носу

$$D_{\delta} > 10L \quad (20.19)$$

где L – длина своего судна. Достаточным считается расстояние до судна-попутчика порядка 4...8кб справа, 3...6 кб слева, 3...4кб по корме. Следует, однако, иметь в виду, что в теневом секторе близко идущего попутчика может скрываться опасная цель. Особого внимания требуют суда-попутчики, дистанция до которых монотонно уменьшается, а также приближение к повороту СРД.

Учитывая, что точность плавания по СРД зависит от точности применяемых методов контроля за местоположением и движением судна, возможны случаи нарушений и выхода судна на полосу встречного движения. Судно-нарушитель может быть проинформировано о нарушении правил плавания любым другим судном как по радиотелефону, так и по МСС (сигнал YG).

СРД являются эффективными только при условии соблюдения установленных правил всеми судами, поэтому существенным элементом разделения движения судов является жесткий контроль за соблюдением правил со стороны прибрежного государства – с помощью береговых РЛС (БРЛС), патрульных кораблей, самолетов, вертолетов.

Предусматриваются информация о судах-нарушителях и определенные санкции по отношению к ним. Если обстоятельства вынуждают судно нарушить правила плавания (например, для избежания непосредственной опасности), необходимо немедленно сообщить об этом по радиотелефону на береговую станцию контроля.

Если в СРД предусматривается периодическая подача радиоинформации на береговой центр о местоположении и движении судна, то пометки об этом должны быть сделаны на путевой карте в соответствующих точках, а тексты сообщений подготовлены заранее.

Суда по возможности не должны становиться на якорь в районах СРД или вблизи конечных участков СРД, чтобы не мешать движению судов и не подвергаться опасности столкновения.

20.3. Плавание в районах регулирования движения судов

Плавание судов на подходах к портам и в портовых входах часто осуществляется на предельно малых глубинах, при малых отношениях сечения канала к площади мидель-шпангоута судна, на малых скоростях, при которых в наибольшей степени сказывается снос от ветра и течения, ухудшается управляемость судна.

Как правило, подходы к портам и портовые акватории находятся во внутренних или территориальных водах, где установлены местные правила плавания, имеется лоцманское обслуживание, а в крупных портах – БРЛС, посты регулирования движения судов (ПРДС) или системы управления движением судов (СУДС).

Местные правила, учитывающие специфику местных условий, могут существенно отличаться от МППСС-72. Особого внимания требует плавание вблизи границы зоны действия местных правил из-за опасности различной трактовки ситуации на судах в процессе расхождения.

Контроль и регулирование движения судов необходимы для сокращения простоев судов по метеорологическим причинам, предотвращения навигационных аварий, обеспечения безопасного плавания судов и координации их действий в стесненной навигационной обстановке. Зона действия ПРДС (СУДС), процедуры контроля и регулирования движения судов, правовые взаимоотношения и ответственность четко оговариваются в местных правилах плавания. В отечественной практике разработано и утверждено «Типовое положение о службе управления движения судов», на основе которого в портах разрабатываются и утверждаются собственные «Положения о СУД с (ПРДС)», учитывающие специфику местных условий.

Различают радиолокационный контроль, радиолокационную проводку судов, регулирование движения судов, управление движением судов в контролируемом районе. *Радиолокационный контроль* – это постоянный систематический обзор рабочей зоны РЛС с целью заблаговременного обнаружения возникновения опасной ситуации (сближение контролируемого судна с опасностью, сближение контролируемых судов между собой, появление судна, нарушающего правила, и др.) и своевременного предупреждения ее развития в нежелательном направлении.

Радиолокационная проводка – это инструментальное (с помощью БРЛС) определение текущих координат судна (маршрутных или полярных) и передача их на судно с необходимой частотой. Полярные координаты – это пеленг и дистанция судна (ИП – D_p) относительно БРЛС либо относительно оговоренного навигационного ориентира (мыса, маяка, входного мола порта и др.), по которым текущее место судна наносится судоводителем на навигационную карту (рис. 20.8). СКП определения текущего места судна можно вывести с помощью формул

$$M_T = \sqrt{M_P^2 + M_{шт}^2 + (Vm_t)^2} \quad (20.20)$$

$$M_P = \sqrt{m_{D_p}^2 + \left(\frac{m_{np}^o D_{OP}}{57.3} \right)^2} \quad (20.21)$$

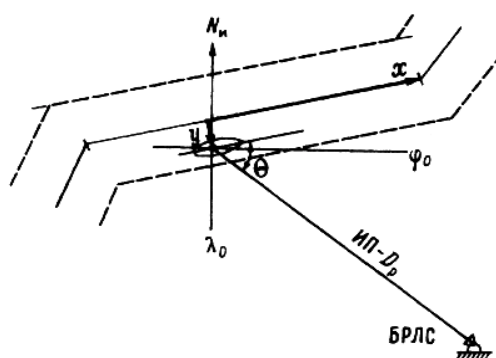


Рис. 20.8

$$M_{шт} = \sqrt{m_{D_{шт}}^2 + \left(\frac{m_{пш}^0 D_{ор}}{57,3} \right)^2} \quad (20.22)$$

где M_p – СКП определения места судна по БРЛС; m_{D_p} , $m_{пш}$ – СКП измерения радиолокационной дистанции, кб, и радиолокационного пеленга, град, по БРЛС, зависящие от точностных характеристик станций и тщательности измерений лоцмана-оператора БРЛС, для современных автоматизированных БРЛС

$$m_{D_p} = \pm 0,1 \dots 0,2 \text{ кб};$$

$$m_{пш} = \pm 0,25^\circ \quad (20.23)$$

D_p – дистанция от БРЛС до судна; $D_{ор}$ – дистанция от БРЛС (либо оговоренного ориентира) до судна, откладываемая судоводителем; $m_{D_{шт}}$, $m_{пш}$ – СКП прокладки судоводителем указанных лоцманом-оператором БРЛС дистанции и пеленга на навигационной карте, зависящие от масштаба карты и тщательности прокладки на карте; $M_{шт}$ – СКП нанесения точки судоводителем (штурманом) на карту по данным БРЛС; V – скорость судна, кб/мин; m_t – среднее квадратичное значение разницы во времени между моментом измерений по БРЛС и моментом, к которому судоводитель относит нанесенную им на карту точку на основе полученной с БРЛС информации, мин.

Так, при $D_p = D_{ор} = 6$ миль, $m_{пш} = \pm 0,2^\circ$, $m_{D_{шт}} = \pm 0,1$ кб, $m_{D_p} = \pm 0,2$ кб, $V = 12 \text{ уз} = 2$ кб/мин, $m_t = 0$ получим $M_T = 0,4 \text{ кб} \approx 75 \text{ м}$, а при $m_t = 0,5 \text{ мин}$ – $M_T = 1,1$ кб, т.е. точная временная привязка обсерваций очень важна.

Маршрутные координаты – это текущее боковое отклонение судна у от оси канала (фарватера) и расстояние x до ближайшей поворотной точки.

Для судоводителя маршрутные координаты более информативны и оперативны, не требуют прокладки пеленгов и дистанций на карте, поэтому при радиолокационной проводке они используются чаще, чем полярные, хотя при этом на лоцмана-оператора возлагается дополнительная обязанность – определять боковое отклонение судна от ЛЗП («Вы в 5 м левее оси канала... Вы в 10м левее оси канала, возьмите 2° вправо...»). В сложных условиях плавания информация передается обычно 2 раза в минуту, а при большом отклонении судна – вдвое чаще, т.е. каждые 15 с.

Если лоцман-оператор оценивает смещение судна с ЛЗП глазомерно, относительно нанесенной на дисплей БРЛС «электронной линии» оси фарватера, то СКП определения смещения судна с ЛЗП будет равна, м:

$$m_y = \pm m_{гл} C = \pm m_{гл} \frac{2 D_{шк}}{\phi} 1852 \quad (20.24)$$

где $m_{гл}$ – ОКП глазомерного контроля положения эхо-сигнала относительно «электронной линии», $m_{гл} = \pm 0,5$ мм; C – знаменатель масштаба радиолокационного изображения при данном диаметре экрана БРЛС ϕ , мм, и установленной шкале дальности $D_{шк}$, мили.

В автоматизированных БРЛС, где осуществляется аналитическое преобразование измеренных полярных координат судна в маршрутные,

$$m_y = \pm \sqrt{m_{D_p}^2 \sin^2 \Theta + \left(\frac{m_{пп} D_{пл}}{57,3} \right)^2 \sin^2 \Theta} \quad (20.25)$$

где Θ – угол между линией оси канала (фарватера) и направлением с БРЛС на судно.

По экспериментальным данным для системы «Бриз-1609-УДС» при сопровождении малой цели $m_y = \pm 0,9$ кб.

Подставив полученные значения точности определения бокового смещения судна с ЛЗП [из формул (20.20), (20.24) или (20.25) в формулы (18.29)...(18.36)], можно оценить ширину полосы движения судна при радиолокационной проводке. Эксперименты с высокоточными БРЛС подтвердили возможность радиолокационной проводки судов на дистанциях до 6...7 миль по фарватерам шириной до 200 м при одностороннем движении и до 300 м – при двустороннем. В конкретной обстановке возможность и безопасность радиолокационной проводки определяются технико-эксплуатационными параметрами БРЛС и СУДС, профессиональными качествами лоцмана-оператора и судоводителя, размерениями и маневренными возможностями судна, характеристиками фарватера, гидрометеорологической обстановкой и др.

В небольших портах в качестве БРЛС иногда используют обычные судовые РЛС, но точность проводки с их помощью ниже.

Напротив, в портах с протяженными подходами часто применяют цепочки из нескольких дистанционно управляемых автоматизированных БРЛС, информация с которых транслируется по радиорелейным и кабельным линиям связи в единый центр (ЦСУДС), где она отображается на экранах кругового или секторного обзора с нанесенной на них детальной электронной картой контролируемой акватории. Компьютерная вторичная обработка радиолокационной информации повышает ее точность, а наложение этой информации на электронную карту облегчает оператору оценку складывающейся ситуации.

Важно помнить, что в автоматизированных БРЛС обработка информации осуществляется относительно центра эхо-сигнала.

Лоцман-оператор фиксирует на экране отклонение эхо-сигнала относительно «электронной линии» оси фарватера. Но центру эхо-сигнала соответствует, как правило, центр одной из оконечностей судна – носовой или кормовой – в зависимости от ракурса судна и других причин. Так, если БРЛС расположена вблизи оси канала, то эхо-сигнал судна, выходящего из порта, может соответствовать его кормовой оконечности. Однако при больших углах сноса боковое отклонение дальней от БРЛС (т.е. в данном случае носовой) оконечности судна может быть значительно больше, м:

$$Y_2 = Y_1 + \Delta Y = Y_1 + \left(\frac{lc}{60} + \frac{B}{2} \right) \quad (20.26)$$

где Y_1 – контролируемое оператором БРЛС боковое смещение с ЛЗП ближней оконечности судна; Y_2 – неконтролируемое оператором боковое смещение дальней оконечности судна; l – расстояние по диаметральной плоскости между центром отражающей (ближней) оконечности и наиболее удаленной скулой судна; c – угол бокового сноса, град.

Неучет данного эффекта нередко становится причиной касания грунта при радиолокационной проводке судна по узкому открытому фарватеру (например, выходной канал порта Вентспилс).

На основании информации о текущем местоположении судна, передаваемой лоцманом-оператором БРЛС, судоводители управляют судном, корректируют его курс и/или скорость с учетом складывающейся навигационной обстановки. Такой метод проводки называется *пассивным*. *Активный* метод дистанционной радиолокационной проводки предполагает управление всеми маневрами судна лоцманом-оператором ЦСУДС по радиотелефону. Этот метод, обеспечивающий высокую точность проводки на прямолинейных каналах, не дает хороших результатов на извилистых фарватерах, так как лоцман-оператор не знает маневренных характеристик и особенностей поворотливости судна, особенно в условиях сильного ветра.

Регулирование движения судов – выдача разрешений судам на вход в зону действия системы, отход от причала, съемку с якоря, Движение по контролируемой акватории, а также назначение очередностей, порядка и маршрута движения в зависимости от конкретных обстоятельств, установление определенных скоростей судов и Дистанций между ними.

Судно, стоящее на якоре или у причала, входящее в зону действия или проходящее через нее, должно до начала движения (либо при подходе к зоне) установить связь с ЦСУДС, запросить разрешение на движение и в дальнейшем нести постоянную радиовахту на рабочем канале центра (поста). Радиообмен центра (поста) с судами а текущая навигационная обстановка документируются.

Центр (пост) дает разрешение на вход в свою зону только после надежного опознавания эхо-сигнала судна на экране БРЛС (по полярным координатам относительно определенного ориентира, по выполнению судном обусловленного маневра, по радиопеленгу судна другими указанными в Правилах плавания методами). Полученное разрешение на движение или вход в зону действия СУДС действует, как правило, в течение 30 мин и в случае задержки должно быть возобновлено. Судно должно репетовать все относящиеся к нему указания центра (поста).

Плавание в зоне действия СУДС (как с лоцманом, так и без лоцмана на борту) не снимает с капитана ответственности за все действия по травлению судном и безопасность судна Информация, выдаваемая лоцманом-оператором СУДС, носит рекомендательный характер.

Однако в быстроменяющейся ситуации и оператор СУДС, и капитан судна должны учитывать множество обстоятельств. В силу большей информированности оператор СУДС лучше капитана знает текущую обстановку, действия и намерения других судов, правила плавания в районе, степень нарастания опасности ситуации. Его единственное решение будет, по-видимому, всегда лучше двух (или нескольких) противоречивых решений капитанов сближающихся судов. Именно поэтому международными и местными правилами оператору СУДС предоставлено право *управления движением судов*. Обычно обязательными для выполнения являются указания оператора СУДС, касающиеся очередности и маршрута движения, порядка расхождения судов, действий для предотвращения опасного сближения, якорной стоянки. Капитан, не выполнивший указание СУДС, несет ответственность за это как за нарушение обязательных постановлений по порту и правил плавания.

Капитан судна вправе не выполнить указание оператора СУДС, если это невозможно либо связано с непосредственной опасностью для судна, сообщив незамедлительно причину отказа оператору. СУДС несет ответственность за переданную информацию в пределах точности используемых технических средств, известных капитану. Аварийные убытки, происшедшие по вине СУДС, должны возмещаться по тому же принципу, что и в случае аварии судна во время лоцманской проводки.

Лоцманские службы играют важную роль в обеспечении безопасности плавания в стесненных водах. Знание местных условий и эффективность радиосвязи, обеспечиваемые лоцманом, существенно снижают навигационную аварийность при входе и выходе из порта, движении по акватории порта, каналам и фарватерам.

Лоцманская проводка может быть обязательной и необязательной, это определяется правилами плавания либо обязательными постановлениями по портам. Заявка на лоцманское обслуживание подается в установленном порядке.

Судно должно прибыть к точке встречи лоцмана (ТВЛ) в указанное в заявке время и быть полностью подготовленным для безопасной приемки лоцмана. Учитывая, что ТВЛ (лоцманские станции) часто являются узлами повышенной плотности движения судов, характер маневрирования здесь наименее предсказуем, а наблюдение в момент приемки (сдачи) лоцмана может оказаться ослабленным, необходимо принять дополнительные меры по обеспечению навигационной безопасности. Следует также заранее предусмотреть варианты дальнейших действий на случай задержки лоцмана или невозможности его высадки на судно по погодным условиям (лечь в дрейф, развернуться на выход в открытое море, следовать самостоятельно по фарватеру к находящемуся в укрытии лоцманскому боту, согласиться на дистанционную лоцманскую проводку методом лидирования).

Во время приемки (высадки) лоцмана необходимо поддерживать устойчивую связь с лоцманским ботом по радиотелефону и согласовывать с ним свои действия. К ТВЛ рекомендуется подходить на минимальной скорости, достаточной для удержания судна на курсе, принимая лоцманский бот с подветренного борта и прикрывая его (в случае необходимости) от ветра и волнения. Капитан судна обязан обеспечить быстрый и безопасный прием лоцмана на борт и не допустить повреждений лоцманского бота.

Прибывший на судно лоцман должен предъявить лоцманское удостоверение, вручить капитану лоцманскую квитанцию (которая должна быть заполнена до начала лоцманской проводки) и экземпляр обязательных постановлений по порту (местных правил плавания). Капитан обязан проинформировать лоцмана об осадке, маневренных элементах и особенностях управляемости судна, состоянии и поправках судовых технических средств судовождения, особенностях регулировки и использования судовой РЛС (САРП). Со своей стороны, лоцман должен познакомить капитана с изменениями правил плавания и навигационной обстановки, планом проводки судна с учетом гидрометеорологических факторов; эту информацию рекомендуется получать в присутствии помощника капитана с показом намеченного маршрута на навигационной карте и, желательно, со схемой швартовки, выполненной лоцманом.

Такой обмен информации между лоцманом и капитаном играет важную роль для успеха лоцманской проводки, для понимания действий и намерений лоцмана

Кроме того, для капитана судна важно как можно скорее оценить компетентность и профессиональную квалификацию лоцмана (в том числе по характеру и своевременности подаваемых команд), его собранность, внимательность, готовность к работе. Капитан вправе отказаться от услуг лоцмана, если у него есть обоснованные сомнения в отношении его физического состояния или компетентности либо в случае неправильных действий лоцмана, и в дальнейшем управлять судном самостоятельно либо потребовать замены лоцмана.

В соответствии с установившейся практикой, лоцман является только советчиком капитана, использующего его практические знания и опыт плавания в данном районе. Присутствие лоцмана на судне не освобождает капитана и его помощников от необходимости знать район плавания, от обязанностей контролировать местоположение и движение судна, правильность отдаваемых лоцманом команд. На каждом участке плавания следует четко представлять, какая из команд лоцмана – поворот в сторону опасности, увеличение скорости сверх безопасной и т. д. – должна быть немедленно отменена, так как на выяснение намерений лоцмана может не оказаться времени. Учитывая эти обстоятельства, подготовка к плаванию в районе лоцманской проводки должна быть такой же полной, как и при плавании без лоцмана.

20.4. Навигационное обеспечение плавания в стесненных водах

Планирование и выполнение поворотов. Предварительная подготовка к плаванию в стесненных водах (и, в частности, предварительная прокладка) должна быть настолько тщательной и детальной, чтобы в процессе плавания, пользуясь материалами этой подготовки, можно было бы непрерывно контролировать местоположение и движение судна и обеспечивать безопасное плавание при любых изменениях навигационной обстановки, независимо от наличия на своих штатных местах ПСНО. При этом важно четко знать не только маршрут плавания судна на различных участках (см. п. 20.1), но пределы допустимых отклонений от рекомендованных курсов, опасные районы и опасные глубины, куда судно не должно заходить ни в коем случае. Необходимо выделить участки, где плавание будет особенно трудным и где следует избегать расхождений (обгонов).

При отсутствии соответствующих правил и контроля за судоходством обычно руководствуются принципами хорошей морской практики: на участке, где одновременное прохождение опасно, судно, следующее против течения, должно задержаться и пропустить судно, следующее по течению.

Для проложенных на картах ЛЗП и планируемых скоростей оценивается расчетная поправка на снос c_p ветром и/или течением и рассчитываются курсы для рулевого (18.26):

$$ГКК_p = ПУ - c_p - \Delta ГК \quad (20.27)$$

От допущенной погрешности Δc в принятой поправке на снос зависят скорость бокового смещения судна с ЛЗП (формула 18.27)

$$V_{\perp} \approx \frac{V \Delta c^0}{60} \quad (20.28)$$

и запас времени судоводителя до момента выхода судна на бровку (касания бровки)

$$t_{кас} = \frac{Y_{бр}}{V_{\perp}} = \frac{F_{ФВК} - B}{2V_{\perp}} \quad (20.29)$$

где $Y_{бр}$ – расстояние от судна до бровки канала (фарватера) в исходный момент времени. Переменные по направлению и величине течения, боковой ветер могут вызвать значительный дрейф судна, особенно при малых скоростях, а малая ширина фарватера оставляет судоводителю слишком короткий промежуток времени для коррекции курса судна по результатам навигационного контроля. Судно может быть очень быстро снесено на бровку либо, напротив, на полосу встречного движения судов. Поэтому задание курсов рулевому $ГКК_p$ с учетом предварительно оцениваемой поправки на снос c_p желательно и необходимо в подавляющем большинстве случаев (см. п. 18.2).

Однако в стесненных водах отсутствие достоверных сведений о течениях, их изменчивость часто не позволяют достоверно оценить поправку на снос заранее, и лишь тщательный непрерывный контроль за местоположением и движением судна ускоренными (лоцманскими) методами способен свести к минимуму воздействие внезапного сноса. С этой точки зрения наиболее опасными моментами являются поворот на новый курс (сложность контроля за движением судна по криволинейной траектории), начальный участок плавания каждым курсом (незнание фактического угла сноса с ЛЗП), Участки с внезапным (ударным) воздействием свального течения в точке впадения бокового канала или слияния различных струй течения (вплоть до возможного разворота судна из-за неравномерного воздействия свального течения на корпус судна).

Эти обстоятельства необходимо учитывать как при выборе курсов, так и при планировании методов навигационного контроля.

Наиболее важными моментами предварительной прокладки в стесненных водах являются расчет и планирование поворотов.

Так как ЛЗП определена условиями плавания, то при расчете поворота решается, как правило, обратная задача (см. п. 6.2): найти точку подачи команды на руль (ТПКР) и точку конца поворота (ТКП) таким образом, чтобы судно, начав поворот на первой $ЛЗП_1$ вышло бы к моменту окончания поворота на следующую $ЛЗП_2$ (рис. 20.9,а). Эта задача может быть решена двумя методами – для постоянного угла перекадки руля ($\delta_p = \text{const}$) либо для постоянной угловой скорости поворота ($\omega_p = \text{const}$).

При расчете поворотов первым методом рекомендуется планировать $\delta_p = 15...20^\circ$, так как это позволит впоследствии вносить необходимые коррекции («Больше вправо!» «Меньше вправо!») в случае отличия фактической траектории судна от расчетной.

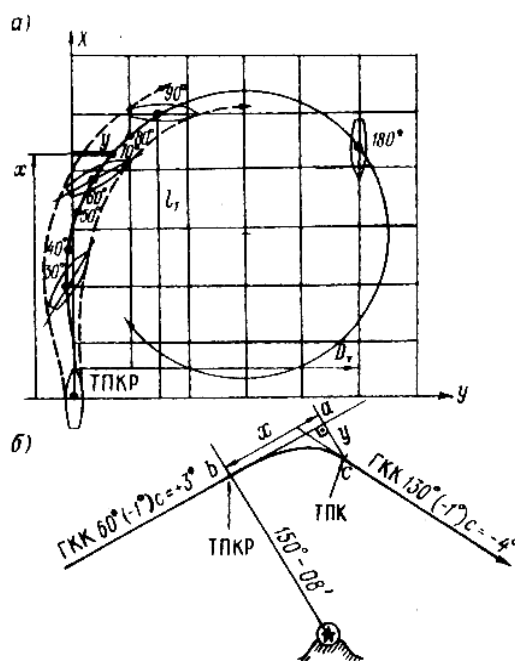


Рис. 20.9

При малых углах перекадки руля затягивается процесс поворота, возрастает влияние внешних факторов (особенно ветра) на поворотливость судна и в итоге увеличиваются погрешности выполнения поворота. При больших углах перекадки руля корректировать движение судна на циркуляции будет трудно, так как руль уже переложен на борт и запаса для ускорения поворота не будет. Кроме того, в стесненных водах вообще избегают перекадки руля на большие углы, потому что ошибки в маневре при большой инерции судна трудно исправить, а вероятность выхода из строя рулевого устройства увеличивается.

Расчет поворота может быть выполнен способами, рассмотренными в п. 6.2: приближенным способом двух длин, способом окружности (в том числе с учетом «мертвого промежутка») и др. Однако для крупнотоннажных судов наилучшие результаты дает использование диаграмм циркуляции (рис. 20.9,6), входящих в состав информации о маневренных элементах судна (по форме ИМО). Начальная точка каждой диаграммы циркуляции ($T = 00.00$) соответствует ТПКР, т. е. никаких дополнительных поправок на «мертвый промежуток» не требуется. Для более точного планирования поворота рекомендуется нанести на диаграммы положения судна, соответствующие углам отворота $\Delta_K = 10, 20, 30, 60^\circ$ от первоначального курса. Аргументами для входа в диаграмму циркуляции являются загрузка судна (в грузу или в балласте), сторона поворота и угол перекладки руля (выбор диаграммы) и угол отворота судна (угол разворота ДП судна)

$$\Delta_K = ИК_2 - ИК_1 = ГКК_2 - ГКК_1 \quad (20.30)$$

На диаграмме циркуляции отыскивается точка а, соответствующая углу отворота Δ_K , и снимаются прямоугольные координаты этой точки, кб, относительно начала координат (ТПКР):

$$x = ba; \quad y = ca.$$

На навигационной карте поперечное смещение $y=ca$ вмещают по перпендикуляру к $ЛЗП_1$, полученная точка с будет концом поворота (ТКП). Отложив от а назад по ЛЗП прямое смещение $x = ba$, получим ТПКР, которую необходимо «привязать» к береговым ориентирам контрольными пеленгом и дистанцией ($ИП_K, D_K$). Кривая циркуляции b — с вписывается от руки, проверяется безопасность прохождения этой кривой с учетом выноса кормы на повороте и полосы, занимаемой судном при криволинейном движении.

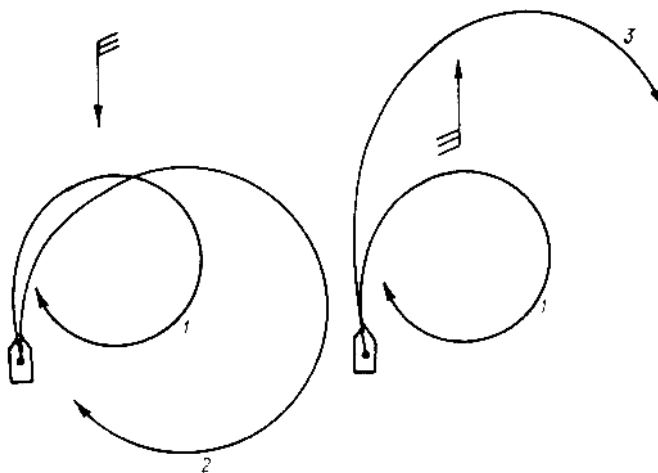


Рис. 20.10

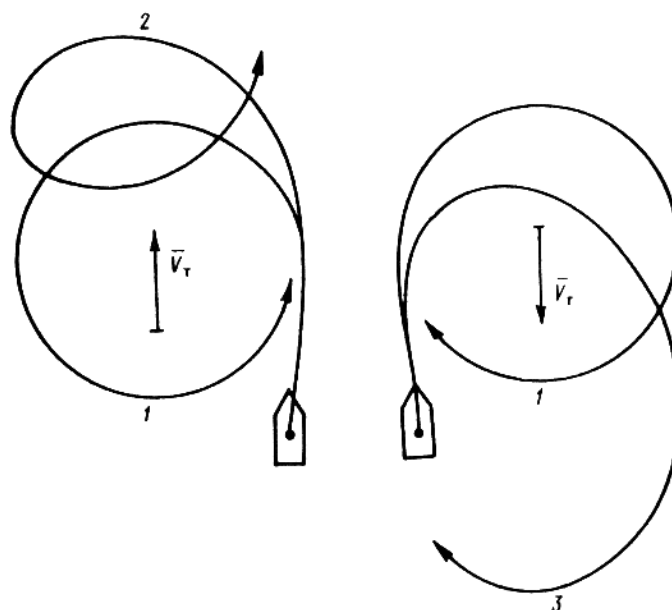


Рис. 20.11

Следует, однако, учитывать, что маневр поворота практически никогда не будет выполнен в полном соответствии с планируемой траекторией. Во-первых, сам процесс движения судна на циркуляции является в значительной степени случайным из-за тенденции поворота (рыскания) судна в момент перекладки руля, характера перекладки руля и «сдерживания» рулевым, что приводит к разбросу траекторий движения судна на циркуляции. Во-вторых, еще более случайный характер придают циркуляции различия в загрузке и посадке судна (по отношению к стандартным), характер изменения глубин (в особенности на мелководье), влияние ветра на поворотливость судна и смещение судна по течению в процессе циркуляции на величину, пропорциональную времени поворота (рис. 20.10 и 20.11).

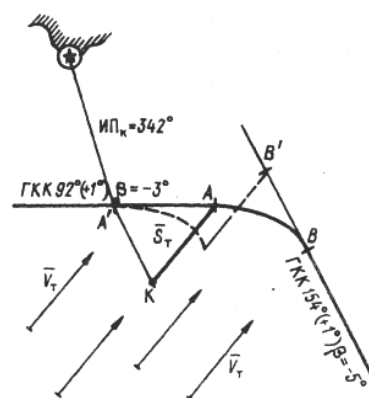


Рис. 20.12

Так, на рис. 20.10 кривая 1 показывает циркуляцию судна без воздействия ветра, а кривые 2 и 3 — при встречном и попутном ветре соответственно. Аналогично на рис. 20.11 кривая 1 показывает циркуляцию судна без воздействия течения, а кривые 2 и 3 — на попутном и встречном течении соответственно со скоростью течения V_T .

При известных элементах течения ТПКР рассчитывают с учетом сноса судна течением за время $t_{\Delta K}$ выполнения циркуляции (рис. 20.12):

$$\bar{S}_T = \bar{V}_T t_{\Delta K} \quad (20.31)$$

Пусть точки А и В – ТПКР и ТКП при отсутствии течения, полученные с помощью диаграммы циркуляции. Величину $\bar{S}_T$ откладывают от точки А навстречу течению и через полученную определяющую точку К проводят прямую, параллельную $ПУ_2$ до пересечения с линией $ПУ_1$. Полученная точка А' и будет искомой точкой подачи команды на руль с учетом течения, а расчетная ТКП будет в точке В'. Следует, однако, иметь в виду, что неточное знание элементов течения резко увеличивает погрешность в выполнении рассчитанного поворота, еще более увеличивая «полосу рассеивания» возможных траекторий движения судов. Таким образом, подтверждается вывод о том, что поворот судна на новый курс выполняется с невысокой точностью. Поэтому и рекомендуется по возможности избегать поворотов вблизи навигационных опасностей и не входить в узкий канал на циркуляции.

Принципиально иным методом планирования и выполнения поворота, позволяющим оперативно учитывать фактическую поворотливость судна, является поворот с фиксированной (заданной) угловой скоростью, рад/с:

$$\omega_{зад} = \frac{2\pi}{T_{ц}} = \frac{2V_c}{D_{ц}} = \frac{V_c}{R_{ц}} \quad (20.32)$$

или, град/мин,

$$\omega_{зад} = 0,95 \frac{V}{R_{зад}} \quad (20.33)$$

где $R_{ц}$, $R_{зад}$ – заданный радиус траектории движения судна при повороте в метрах и милях соответственно; V_c , V – линейная скорость И судна, м/с и узлы соответственно.

Влияние течения может быть скомпенсировано коррекцией задаваемой угловой скорости поворота, град/мин:

$$\omega_{корр} = \omega_{зад} k = \omega \quad (20.34)$$

так как поворот должен быть выполнен за то же время, но на больший (или меньший) угол.

Технология выполнения поворота заключается в следующем.

Сняв с карты заданный радиус циркуляции (например, радиус кривизны речного фарватера), судоводитель рассчитывает требуемую угловую скорость поворота. Не доходя примерно одной длины судна до намеченной точки начала поворота, дают команду на перекладку руля и указывают рулевому требуемую угловую скорость поворота. Наблюдая за показаниями указателя угловой скорости поворота (гиротаксметра) и самостоятельно корректируя угол перекладки руля, рулевой добивается постоянства угловой скорости

$$\omega(t) = \omega_{з\Delta\Delta} = \text{const} \quad (20.35)$$

и тем самым ведет судно по кривой заданного радиуса. Если рулевой будет выдерживать $\omega_{з\Delta\Delta}$ с СКП $\pm m_\omega$ и периодом рыскания τ_p , с, то судно будет следовать по синусоиде с боковыми отклонениями относительно заданной траектории, м,

$$m_d = \pm \frac{m_\omega}{60} \frac{\tau_p}{4} V_c \quad (20.36)$$

Если к моменту прихода в точку начала поворота направление движения центра масс судна будет отличаться от $\Pi\Upsilon_1$ на величину σ_K , то даже при выполнении условия (20.35) судно будет постепенно удаляться в сторону от заданной траектории на величину, м,

$$\sigma_d = 30\sigma_K S_{\Pi} \quad (20.37)$$

т.е. примерно 30 м на каждую милю плавания S_{Π} при угловой ошибке $\sigma_K = 1^\circ$. Необходимо учитывать и существенную (до 30...50% при крутых поворотах) потерю скорости на циркуляции, принимая при расчете $\omega_{з\Delta\Delta}$ среднее значение V . В целом способ достаточно прост и надежен, требуется лишь наличие гиротаксметра и опыт работы с ним.

Поворот по окружности заданного радиуса можно выполнить и с помощью абсолютного гидроакустического лага с носовой и кормовой станциями, разнесенными на расстояние l , рассчитав заданное значение $\Delta y_{з\Delta\Delta}$ алгебраической разности поперечных составляющих скорости судна на носовой V_{yH} и кормовой V_{yK} станциях, уз:

$$\begin{aligned} \Delta_{y \text{ зад}} &= (V_{yH} - V_{yK})_{\text{зад}} = \\ &= \frac{l \sqrt{V_x^2 + V^2}}{R_{\text{зад}}} = \frac{lV}{R_{\text{зад}}} \end{aligned} \quad (20.38)$$

где V_x — продольная составляющая скорости судна; V — абсолютная путевая скорость судна.

Для следования по окружности необходимо снимать с лага текущие значения $V_{\text{УН}}$, $V_{\text{УК}}$, мгновенно вычислять их алгебраическую разность, сравнивать эту величину с заданной (20.38) и корректировать соответственно угол перекладки руля. Способ, однако, сложнее, чем при использовании гиротаксометра.

Перед крутым поворотом рекомендуется планировать уменьшение скорости с тем, чтобы к моменту выхода в ТПКР погасить инерцию судна. Выйдя в ТПКР, на короткое время увеличивают частоту вращения винта для улучшения управляемости (метод толчка).

Контроль за местоположением и движением судна. Сложность условий плавания в стесненных водах обуславливает абсолютную необходимость тщательной подготовки судна к такому плаванию [9]. Особое внимание следует обратить на необходимость усиления ходовой вахты на мостике, своевременного перевода машины в маневренный режим, перехода на ручное управление рулем, а также заблаговременного выхода на курс, ведущий в узкий пролив. Использование РЛС является обязательным при любых условиях видимости.

По радиотелефону необходимо прослушивать два канала – дежурный канал и канал ПРДС (СУДС), а в случае необходимости – периодически давать информацию о своем движении.

Необходимость одновременного, взаимосвязанного, практически непрерывного решения нескольких главных задач судовождения – наблюдение, навигация, предупреждение столкновений является важной особенностью плавания в стесненных водах. При неожиданном маневре близко идущего судна прилежание вахтенного помощника в определении места может обернуться непростительной небрежностью в ведении должного непрерывного наблюдения. Если решение навигационных задач становится важным, что не может быть отложено при приближении другого судна, то на мостике нужен еще один судоводитель, поскольку наблюдение квалифицированного наблюдения не может быть отодвинуто на второй план. Усиление вахты на мостике является общепринятой практикой в стесненных водах.

Важнейшую роль для обеспечения безопасности плавания в стесненных водах играет четкая организация службы на мостике («организация мостика»), включающая следующие элементы:

- усиление вахты на мостике за счет вызова дополнительных судоводителей;

- четкое распределение функциональных обязанностей между судоводителями, обеспечивающее параллельную обработку навигационной информации, представление ее в конечном и удобном для восприятия виде, что позволяет капитану сконцентрировать внимание на оценке обстановки и принятии оптимальных решений по управлению судном;

- дублирование всех основных элементов контроля за местоположением и движением судна (разными судоводителями, различными техническими средствами, разными методами);

самоконтроль и взаимный контроль помощников капитана при решении задач судовождения.

В самой идее «организации мостика» заложены принципы системного подхода. Главная цель такой системы — своевременно обнаружить возможную ошибку в любом звене и немедленно ее исправить. Капитан должен постоянно внушать своим помощникам, что они не только могут, но и обязаны немедленно обратить его внимание на любое сомнение в отношении безопасности судна.

Непосредственно управляет судном в стесненных водах капитан (либо подменяющий его на мостике старший помощник).

При этом, в соответствии с общей теорией, изложенной в п. 18.3, управление судном осуществляется на основе ускоренных (лоцманских) методов контроля за местоположением и движением судна (использование ведущей, ограждающей, контрольной изолиний, применение методов визуальной или радиолокационной глазомерной проводки судна). При нормальной видимости капитан обычно не занимается радиолокационным наблюдением. Однако при ограниченной видимости важность и значение радиолокационного наблюдения требуют, чтобы его осуществлял лично капитан.

Вахтенный помощник капитана выполняет в стесненных водах чисто штурманские обязанности — контролирует местоположение и движение судна обычными штурманскими методами и докладывает капитану о результатах обсерваций, положении судна относительно ЛЗП, направлении и скорости сноса, пеленге и дистанции на точку очередного поворота. При поворотах вахтенный помощник докладывает капитану о времени до поворота, о подходе к точке поворота, о выходе на контрольный пеленг (контрольную дистанцию), о выходе на новый курс после поворота. На сложных участках вахтенный помощник контролирует ограждающие пеленги и дистанции (особенно при расхождении с другими судами), докладывает о выходе на ограждающий параметр, о характере изменения пеленга на цель. Он же контролирует глубины по эхолоту, заполняет судовой журнал, выполняет другие обязанности вахтенного помощника в соответствии с Уставом и РШС-89. При этом важно отметить необходимость полного и детального владения обстановкой, позволяющего вахтенному помощнику в любой момент иметь собственное суждение об обстановке и последующих действиях.

Плавание судна должно осуществляться в строгом соответствии с предварительной прокладкой.

Поэтому необходимы непрерывный контроль, сравнение фактического движения судна с заданным, осуществление коррекции курса с тем, чтобы как можно точнее удерживать судно на ЛЗП, а исполнительная прокладка была максимально близка к предварительной. В случае нецелесообразности возвращения судна на ЛЗП выбирается новый путь и/или корректируются точки поворотов с соблюдением всех рекомендаций по выполнению предварительной прокладки.

В соответствии с требованиями ИМО и МАМС (табл. 8.1 и п. 18.7) при плавании в стесненных водах необходимы непрерывный контроль за местоположением и движением судна, практически мгновенная обработка навигационной информации; предельные (с $P=0,95$) погрешности определения текущего места судна не должны превышать 20% ширины судоходного канала, фарватера, безопасного прохода, а в широких проливах, на подходах к портам и узкостям – 50...200 м.

Счисление пути ведется, как правило, по предварительной прокладке. На реках, акваториях портов, узких и извилистых фарватерах, в иных районах, где маневрирование выполняется с дискретностью менее 5 мин, исполнительная прокладка ведется путем нанесения на карту только обсервованных точек, отметок на предварительной прокладке моментов прохождения (траверзов) береговых и плавучих ориентиров, поворотов с одного колена фарватера на другое с тем, чтобы не потерять ориентировку в навигационной обстановке. Для быстрой ориентировки рекомендуется иметь на мостике справочно-информационную (маршрутно-лоцманскую) карту района с курсами для плавания, ведущими, ограждающими, контрольными параметрами, расчетным временем лежания на курсе и другой необходимой оперативной информацией.

Навигационные определения места судна (обсервации), выполняемые вахтенным помощником капитана, играют в стесненных водах вспомогательную и дублирующую роль. Задача определения места судна сводится в большинстве случаев к установлению величины бокового отклонения судна от ЛЗП и ошибки в пройденном расстоянии. Поэтому при плавании постоянным курсом желательно так подбирать ориентиры, чтобы большая полуось эллипса ошибок ЭО (мысленно представляемого судоводителем) была направлена вдоль оси фарватера $ЭО_1$ при подходе к повороту – поперек фарватера $ЭО_2$ (рис. 20.13). Для определения места используются, как правило, простейшие визуальные и радиолокационные методы, не требующие больших затрат времени (в том числе комбинированные с использованием ведущей изолинии: створ и дистанция ориентира на острых курсовых углах, створ и секущий пеленг, створ и траверз ориентира и др.).

Для ускорения обсерваций в наиболее сложных районах могут быть заранее построены сетки изолиний.

В стесненных водах наиболее широко применяются ускоренные радиолокационные методы контроля за местоположением и движением судна [7] – в силу своей простоты, точности, оперативности, наглядности, возможности решать одновременно задачи навигации, управления судном, предупреждения столкновений без отрыва от наблюдения за навигационной обстановкой. Наиболее эффективно решение навигационных задач в стесненных водах с использованием механического визира с системой параллельных линий, выносного электронного визира, а также режима электронной карты в САРП.

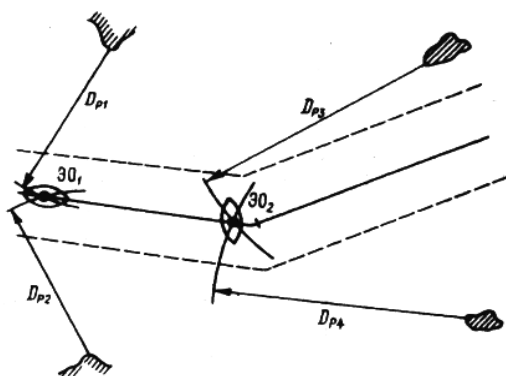


Рис. 20.13

Кроме того, управляя движением судна в соответствии с предварительной прокладкой, активно используя визуальный пеленгатор, визир и ПКД РЛС, установленные на заранее предвычисленные отсчеты, судоводитель получает возможность не прокладывать результаты измерений на карте, а лишь отмечать совпадение или расхождение измеренных навигационных параметров с расчетными. Такой «программированный контроль» за местоположением и движением судна в стесненных водах близок в известной степени и к лоцманским методам, и к обсервационному счислению (см. п. 18.3). Необходимо, однако, учитывать ограничения, связанные с особенностями радиолокационного изображения.

В хорошую видимость важную роль играют визуальные методы. По оценкам, зрительная система доставляет человеку до 90% всей получаемой им информации. Чем уже канал, чем ближе ориентиры и навигационные опасности, тем более эффективны визуальные методы по сравнению с радиолокационными.

В качестве ведущей, ограждающей, контрольной изолинии эффективно используется визуальный пеленг (см. рис. 18.6...18.10). Более простым визуальным методом является плавание на ориентир («Держать на маяк!»), когда рулевой все время удерживает продольную ось судна (практически — носовой флагшток) на заданном ориентире. Однако при наличии бокового сноса от ветра и/или течения судно будет двигаться по «кривой погони» (рис. 20.14) и получит одностороннее смещение с ЛЗП, что потенциально опасно.

Лучшим визуальным средством обеспечения плавания судна по прямолинейным фарватерам являются навигационные створы, искусственные или естественные.

При плавании по створам рекомендуется придерживаться определенных принципов, выработанных хорошей морской практикой:

1. При вступлении на входной створ с моря всегда следует взять пеленг створа и сравнить его с данным на карте, чтобы избежать промаха опознавания.

2. Поворот на линию створа следует по возможности производить мористее приемного буя, там, где ширина фарватера еще достаточно большая и ошибку в учете циркуляции судна легко исправить.

3. Выходить на створ рекомендуется под более острым углом.

4. Перед выходом на створ следует ориентировочно оценить поправку на снос и задавать курс рулевому с учетом этой поправки (см. формулу 20.27). Выйдя на створ, наблюдают за положением створных знаков и, заметив отклонение судна с оси створа, корректируют курс в ту или иную сторону, т. е. уточняют опытным путем фактическую поправку на снос (см. формулу 18.55).

5. При переходе с одного створа на другой необходимо намечать ТПКР с учетом циркуляции судна (в том числе под влиянием ветра и течения), тщательно привязывать ТПКР к береговым ориентирам секущими контрольными изолиниями и внимательно контролировать, как судно вписывается в поворот, увеличивая или уменьшая в случае необходимости угол перекладки руля. Промах в определении ТПКР, в оценке элементов поворотливости судна может повлечь за собой уклонение судна со следующего колена фарватера («проскочить» створ), т.е. сразу же создать опасную ситуацию.

6. Отклоняться с оси створа возможно только в том случае, если прилегающие глубины гарантируют безопасное плавание судна. На выходных каналах нефтепортов танкер в грузу, отклонившийся с оси канала на полосу встречного движения, может сесть на мель даже в пределах фарватера, так как полоса для судов, следующих в балласте, часто углубляется и контролируется менее тщательно, чем «грузовая» полоса.

7. В случае внезапной вынужденной остановки или постановки судна на якорь на створной линии либо вблизи нее капитан обязан выставить соответствующие огни или знаки, включить яркое освещение, подавать соответствующие звуковые сигналы и немедленно оповестить по радиотелефону ЦСУДС (капитана порта) и все суда, следующие по фарватеру.

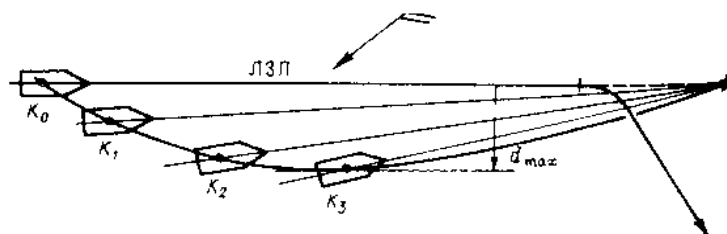


Рис. 20.14

Использование ПСНО. Предпочтение при выборе ориентиров для контроля за местоположением и движением судна следует отдавать наиболее характерным, расположенным на оконечностях береговой черты, хорошо опознаваемым и наблюдаемым визуально и/или на экране РЛС. В первую очередь используют штатное береговое ограждение (включая маяки и навигационные знаки на гидротехническом основании), затем — искусственные сооружения на суше (оконечности молов, приметные мачты, трубы, здания), основные ориентиры береговой черты (мысы, островки, приметные скалы) и только в последнюю очередь — плавучее ограждение.

Плавучее ограждение, безусловно, помогает судоводителю в ориентации и в обеспечении навигационной безопасности плавания, но только в том случае, если оно:

- находится в точно обозначенном штатном месте;
- имеет раскраску и световые характеристики, соответствующие указанным на карте и в навигационных пособиях;
- правильно и однозначно опознано судоводителем.

В противном случае оно не только не помогает, но и вводит судоводителя в заблуждение, создает аварийную ситуацию. Частая замена ПСНО, изменение характеристик их огней, установка новых плавучих знаков или перестановка старых на новое штатное место, повреждение или разрушение буйев проходящими судами резко снижают надежность ПСНО, особенно в тех случаях, когда информация об этих изменениях запаздывает. Кроме того, ПСНО могут быть перепутаны, снесены во время шторма либо при подвижке льда. Нередко выставляются «нештатные» буйи и вехи, имеющие специальное назначение и не упомянутые в навигационных пособиях, что также может дезориентировать судоводителя.

Наибольшую степень доверия среди ПСНО имеют плавучие маяки (плавмаяки) и буйи с радиолокационными маяками-ответчиками, так как положение их на штатном месте тщательно контролируется береговыми службами.

Положение буйев даже на подходном канале порта далеко не всегда тщательно контролируется (особенно в каналах с сильными переменными течениями).

Буйи и вехи в проливах, на удалении от портов, на открытых участках побережья контролируются в наименьшей степени, их смещение или поломка обнаруживается, как правило, с наибольшим опозданием. Поэтому судоводители должны твердо помнить: в районах, где береговые СНО позволяют надежно контролировать местоположение и движение судна, плавучее ограждение можно использовать только как вспомогательное средство, предварительно надежно опознав буйи и убедившись, что они находятся на своих штатных местах. Наиболее эффективный метод, позволяющий одновременно и опознать буйи, и проверить его нахождение на штатном месте, — это метод привязки (см. рис. 19.9).

Судоводитель должен твердо знать систему расстановки ПСНО в районе плавания судна с тем, чтобы, обнаружив визуально только один буй (веху), мог с уверенностью указать, в каком направлении от судна находится навигационная опасность и какой маневр необходимо предпринять. Следует быть особенно внимательным там, где действуют различные системы: адаптировавшись к одной системе, судоводитель может допустить грубый промах в определении типа знака и направления на опасность, попав в район действия другой системы.

При визуальной проводке судна по фарватеру, огражденному ПСНО, число буюв (или пар буюв), которое может наблюдаться одновременно, зависит от расстояния между буюями l_{3H} и их оптической дальности видимости $D_{опт}$ при данном состоянии атмосферы:

$$n \geq \frac{2 D_{опт}}{l_{3H}}$$

т.е. при $D_{опт} \geq 2/l_{3H}$ судоводитель сможет наблюдать на любом участке канала не менее четырех буюв (или четырех пар буюв – при латеральной системе) одновременно. Для судоводителя наиболее приемлем такой вариант расстановки ПСНО, при котором в любой точке канала он мог бы наблюдать 2...3 пары буюв одновременно. Следует, однако, заметить, что $D_{опт}$ зависит не только от метеорологической дальности видимости: она серьезно ухудшается на фоне ярких береговых огней. В дневное время необходимо учитывать наблюдающиеся у побережья дымку, миражи, смог, в особенности в районах крупных промышленных центров. Если

$$D_{опт} < \frac{l_{3H}}{2}$$

то непрерывный контроль за движением судна с помощью буюв становится невозможным.

Дальность радиолокационного наблюдения морского бую без пассивного радиолокационного отражателя (ПРЛО) составляет 2...4 мили, с ПРЛО – 6...8 миль. Однако при волнении более 2...3 баллов эхо-сигналы буюв теряются в засветке от волн.

В режиме ИД эхо-сигналы буюв легче обнаруживаются на фоне засветки, чем в ОД, так как эхо-сигнал появляется каждый раз в одной и той же точке и усиливается послесвечением экрана РЛС.

Приемы глазомерной проводки судна по огражденным фарватерам зависят от вида и габаритов фарватера, характера расстановки буюв, используемых методов (визуальная или радиолокационная проводка).

При использовании радиолокационных методов механический или электронный визир разворачивается параллельно линии буюв на экране:

$$R_B = ПУ_{ЗД} - \Delta ГК$$

При осевой системе ограждения фарватера следует вести судно возможно ближе к линии буюв, но так, чтобы они всегда оставались левее курса. Можно вести судно и по линии осевых буюв (с тем чтобы их эхосигналы на экране РЛС перемещались бы прямо по визирной линии), обходя каждый буй на безопасном расстоянии и вновь возвращаясь на осевую линию. Визуальный контроль может дополняться пеленгованием буюв по носу ($ГКП_H$) и по корме ($ГКП_K$), откуда боковое отклонение судна с оси фарватера, м:

$$d_{\perp} = 32(ПУ_{зад} - ИП_H)D_1$$

или более точно

$$d_{\perp} = 16(ГКП_K - ГКП_H)D_1$$

где D_1 – дистанция до буя, мили.

Если фарватер огражден парными буями, т.е. по латеральной системе, то для следования по оси фарватера достаточно удерживать судно посередине между буями (симметрия расположения эхосигналов буюв относительно визирной линии). Для следования по правой стороне фарватера необходимо корректировать курс так, чтобы расстояния между линией визира и правыми (по ходу) буями были заметно меньше, чем между визиром и левыми буями. Если судно выходит на линию буюв, это означает выход на бровку фарватера. Визуальная проводка по прямолинейному фарватеру, огражденному парными буями, аналогична по технологии исполнения плаванию по перспективному створу.

Плавание по буям необходимо совмещать с контролем по береговым ориентирам, со счислением пути судна по предварительной прокладке, отметками (Т/ОЛ) в моменты прохождения буюв, уточнением путевой скорости и времени до очередного поворота. Поворот по буям без такого дублирующего контроля опасен.

Плавание на рейдах и постановка на якорь. Па подходах к портам и на рейдах возможны скопления судов, стоящих на якоре, дрейфующих, движущихся различными курсами и скоростями, в том числе выполняющих сложные маневры (например, съёмка с якоря с одновременным набором скорости и плавным разворотом), которые трудно понять при радиолокационном наблюдении. Суда, стоящие на якоре, могут затенять подвижные цели, внезапное появление которых на малых дистанциях может быть опасным.

Поэтому условия плавания требуют не только тщательного и непрерывного контроля за местоположением и движением своего судна, но и не менее тщательного наблюдения для предотвращения столкновений с другими судами. Задача особенно усложняется в ночное время, при ограниченной видимости, при сильных ветре и течении, при малых скоростях движения.

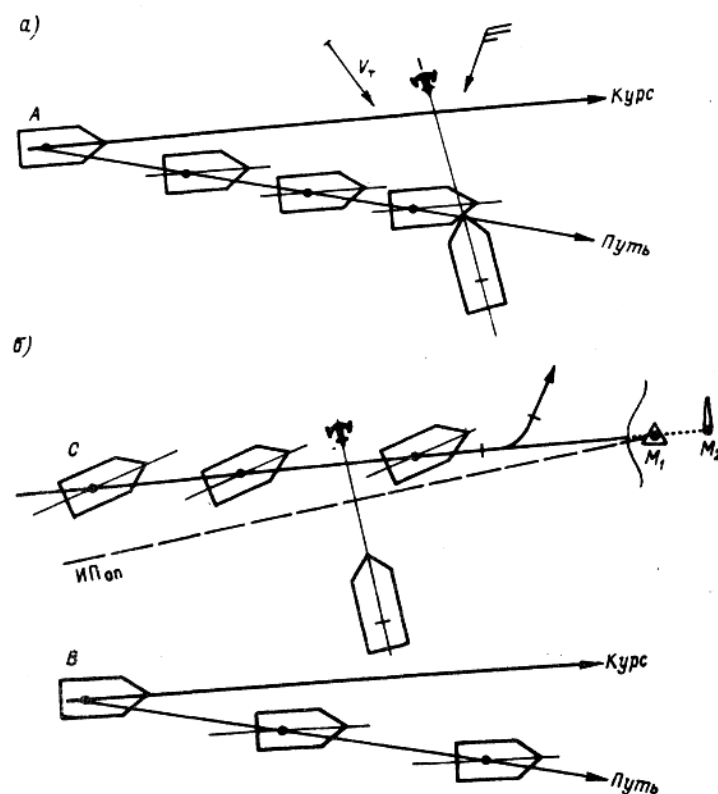


Рис. 20.15

Неучет или неверный учет влияния гидрометеорологических факторов — одна из основных причин столкновений с судами, стоящими на якоре (рис. 20.15,а). Само положение судна, стоящего на якоре, является очевидным индикатором направления преобладающего сноса. Поэтому, чтобы избежать столкновения, лучше проходить по корме у стоящих на якоре судов (судно В на рис. 20.15,б).

Если же судно вынуждено проходить по носу у стоящих на якоре судов (судно С), то следует курс прокладывать на безопасном расстоянии, принимать необходимую поправку на снос и непрерывно контролировать движение судна с помощью удачно подобранного створа (M_1M_2) либо с помощью ведущего пеленга. Намеченный заранее опасный пеленг определяет границу, за которую судно не должно заходить ни при каких обстоятельствах.

Навигационное обеспечение постановки судна на якорь включает в себя выбор места якорной стоянки, планирование выхода судна в заданную точку, вывод судна в точку отдачи якоря, постановку судна на якорь, определение места точки отдачи якоря, контроль безопасности якорной стоянки.

Если якорное место не регламентировано портовыми правилами и не указано лоцманом-оператором ЦСУДС (ПРДС), то при выборе места якорной стоянки надо учитывать:

навигационные условия (глубины, их достоверность, рельеф дна, грунт, наличие достаточной акватории, в том числе для съёмки с якоря при сильном ветре);

гидрометеорологические условия (защищенность от господствующих или ожидаемых ветров, волнения, отсутствие сильных течений);

удаленность от судопотока, рекомендованных курсов и фарватеров;

цель и продолжительность якорной стоянки;

техничко-эксплуатационное состояние якорного устройства судна, его ограничения.

По всей площади вероятного места судна и в течение всего времени якорной стоянки должна обеспечиваться безопасная глубина

$$H_{\delta} \geq H_{\min} = 1.2T_{\max} + 0.7h_B \quad (20.39)$$

где $T_{\max}$ – максимальная осадка судна; h_B – максимально возможная высота волны.

При изменении направления ветра и/или течения судно может разворачиваться на якорь-цепи, поэтому необходима свободная акватория, характеризуемая радиусом безопасности R_{δ} вокруг намеченной точки отдачи якоря: $R_{\delta} = M_0 + x + L + \Delta l_{\text{яц}} + \Delta R_{\text{нз}}$, где $\widehat{M}_0$ – предельная погрешность выхода судна в намеченную точку отдачи якоря; L – длина судна; $\Delta R_{\text{нз}}$ – навигационный запас (например, я на случай дрейфа судна на якоре); $\Delta l_{\text{яц}}$ – возможное дополнительное вытравливание якорь-цепи при ухудшении погоды; x – горизонтальная проекция вытравленной якорь-цепи; если якорная цепь вытравлена без избытка, т.е. цепь не лежит на грунте, то

$$x \approx \sqrt{l_{\text{я.ц.}}^2 - H^2} \approx l_{\text{яц}}$$

здесь $l_{\text{яц}}$ – длина вытравленной якорь-цепи; H – глубина моря в точке отдачи якоря.

Если, согласно рекомендациям, вытравливается $l_{\text{яц}} = (4...5)H$, то $R \approx 4H + 2L$.

Проведенный из намеченной точки отдачи якоря круг радиусом R_{δ} не должен касаться опасной изобаты, определяемой формулой (20.39). Выбранное место якорной стоянки должно быть тщательно изучено по картам и навигационным пособиям.

Промежуточные курсы подхода к точке якорной стоянки должны, как правило, совпадать с рекомендованными курсами, створами, ведущими пеленгами ориентиров. Курс выхода непосредственно в точку отдачи якоря следует располагать против ветра, течения или их равнодействующей (рис. 20.16).

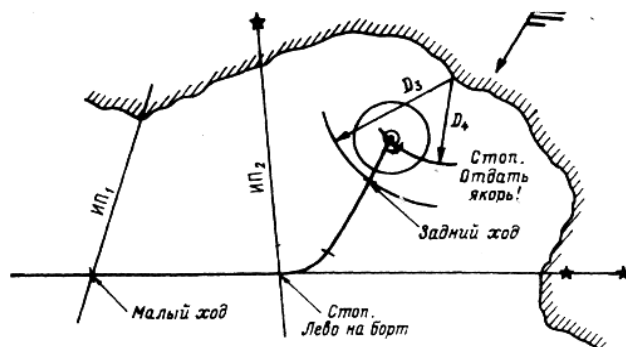


Рис. 20.16

Если неизбежен подход по ветру (или по течению), то к месту якорной стоянки следует выходить несколько в стороне от намеченной точки, а затем с помощью руля развернуть судно в направлении точки отдачи якоря. Все точки поворотов, точки изменения режимов хода, точка отдачи якоря должны быть закреплены на местности секущими изолиниями. Реверсы рассчитывают таким образом, чтобы в момент отдачи якоря судно имело небольшое поступательное движение назад.

В момент отдачи якоря положение судна определяется одним из наиболее точных методов. Для контроля за безопасностью якорной стоянки следует также взять (и записать в журнал) контрольные створы, пеленги и дистанции до береговых ориентиров (в двух-трех различных направлениях) и в дальнейшем систематически проверять их, чтобы своевременно обнаружить дрейф судна на якорю. ПКД РЛС выставляется так, чтобы он касался эхо-сигналов заданного контрольного ориентира или береговой черты. При наличии САРП используется специальный режим «контроль якорной стоянки».

Во время якорной стоянки как на мостике, так и в машинном отделении несут только ходовые вахты. Машина должна находиться в готовности, срок которой устанавливает капитан судна в зависимости от конкретной обстановки.

Вахтенный помощник капитана обязан обеспечить непрерывное квалифицированное наблюдение как за состоянием погоды, так и за окружающей обстановкой, движением других судов, поведением ближайших стоящих на якорю судов, характером разворота, рыскания и отсутствием дрейфа на якорю собственного судна.

Даже самая благоприятная якорная стоянка при определенных изменениях гидрометеоусловий может оказаться небезопасной, и важно не упустить момент для принятия соответствующих действий (потравливания дополнительного количества якорь-цепи, отдачи второго якоря, перевода машины в постоянную готовность, перемены места якорной стоянки, выхода в открытое море).

20.5. Навигационные особенности плавания по внутренним водным путям

Многие морские порты расположены на реках и удалены от моря на десятки и сотни миль, поэтому морские суда и особенно суда смешанного (река – море) плавания часто используют внутренние водные пути (ВВП).

Как правило, на ВВП действуют национальные (иногда, как на р. Дунай, – международные) Правила плавания, существенно отличающиеся от принятых на море и отражающие специфику местных условий плавания.

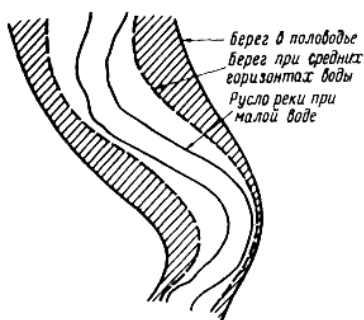


Рис. 20.17

Необходимо твердо знать и тщательно соблюдать эти правила, обращая особое внимание на границы их действия: по разные стороны этой границы огни, знаки, сигналы могут иметь различные значения, а одна и та же ситуация может потребовать различного маневра. По реке, как правило, морское судно проводит лоцман; при этом морской лоцман может сменяться речным, иногда речные лоцманы меняются несколько раз.

В отличие от морского канала, река является естественным водным путем, имеющим сложную конфигурацию русла, извилистый фарватер переменной ширины, сложные и незакономерные перепады глубин, сложную систему переменных течений, непривычную для морского судоводителя систему СНО (а часто – и полное отсутствие СНО).

Условия плавания на реках существенно изменяются в зависимости от сезона и погодных условий (рис. 20.17). В период весеннего половодья (или в результате сильных дождей) подъем воды увеличивает глубины, заливаются поймы, берега реки зрительно раздвигаются, а изгибы русла спрямляются. Скорости течений резко возрастают, появляются сильные свальные течения в сторону поймы, «воложек» и проранов.

Поверхностные течения обычно совпадают с направлением речной долины, а придонные – с направлением русла, что создает сложные и незакономерные воздействия на корпус судна и затрудняет судовождение. Посадки на мель становятся особенно опасны, так как после спада воды судно может «обсохнуть» до следующего половодья.

При спаде воды глубины уменьшаются, открываются затопленные ранее берега и острова, появляются сильные течения с поймы в сторону русла, в районе яров и приглубых берегов образуются суводи и майданы.

В меженный (сухой) период горизонты воды наиболее низки, глубины – минимальны, судовой ход сужается до размеров коренного русла реки, что затрудняет судовождение, усиливает гидродинамические эффекты (отрыскивание судна от отмели на глубокую воду, присасывание судов при расхождении).

Естественная конфигурация речного русла обуславливает сложные и незакономерные перепады глубин. Относительно большие глубины перемежаются мелководными лимитирующими участками (рис. 20.18), определяющими максимальную проходную осадку судна. Если плавание судна между морем и портом за одну полную воду затруднено или: невозможно, то участок с большими глубинами (яма) используется для безопасного отстоя судна на время малой воды.

Судовой ход (т.е. фарватер) на реках сравнительно узок, извилист и изменчив, располагается обычно не по середине речного русла, а смещается к приглубому берегу, нередко переходя от одного берега к другому (перевалы). В общем случае судовой ход представляет собой сложное чередование прямолинейных и криволинейных участков, плесов, перевалов и перекатов, условия плавания по которым различны. С течением времени под влиянием течений, перемещающих массы грунта и создающих наносы, меняются положение и конфигурация островов, мелей, песчаных кос, меняется и положение судового хода в русле реки.

Русло реки, судовой ход, глубины могут существенно отличаться от показанных на навигационных картах. Сложный характер приливов, неожиданные и трудно прогнозируемые подъемы и спады воды затрудняют контроль глубин. Поэтому следует всегда стремиться уточнять положение опасностей, глубины на лимитирующих участках, официально установленную проходную осадку у лоцмана и портовых властей.

Скорость течения в поперечном сечении реки имеет максимальные значения на самом глубоком участке профиля и убывает по мере уменьшения глубины (рис. 20.19,а). На изгибах речного русла струя наиболее сильного течения обычно смещается к приглубому «вогнутому» берегу, а у мелководного «выпуклого» берега скорости течения невелики; за «выпуклым» берегом могут возникать противотечения (рис. 20.19,б). Сильные свальные течения возникают на перекатах – мелководных каменистых грядах или россыпях, пересекающих русло под углом к общему направлению течения и вызывающих отклонение течения от одного берега к другому.

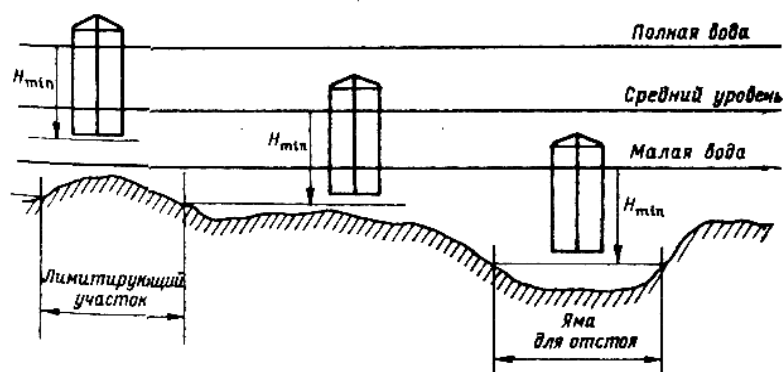


Рис. 20.18

Наиболее сложная система течений наблюдается на устьевых участках рек в районах с сильными приливами. Во время прилива течения могут быть направлены в реку, а во время отлива — в сторону моря, складываясь со скоростью речного течения.

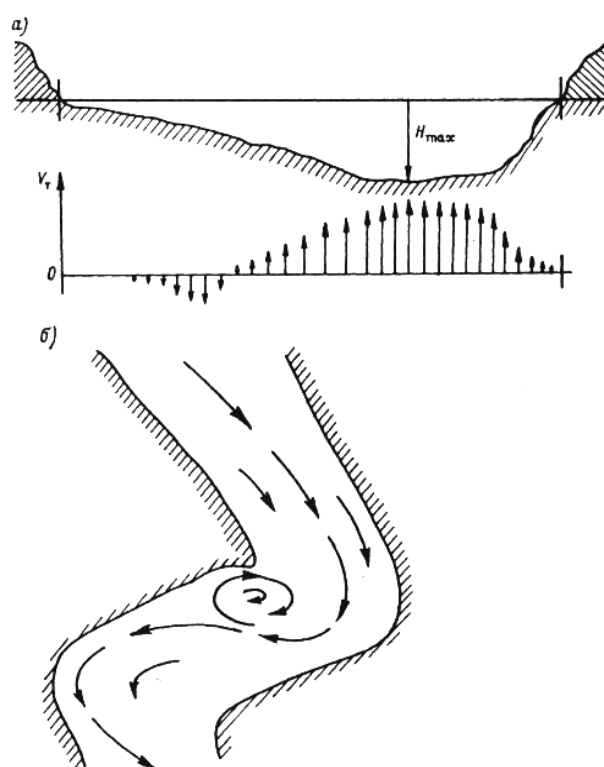


Рис. 20.19

Наиболее сложная система течений наблюдается на устьевых участках рек в районах с сильными приливами. Во время прилива течения могут быть направлены в реку, а во время отлива — в сторону моря, складываясь со скоростью речного течения.

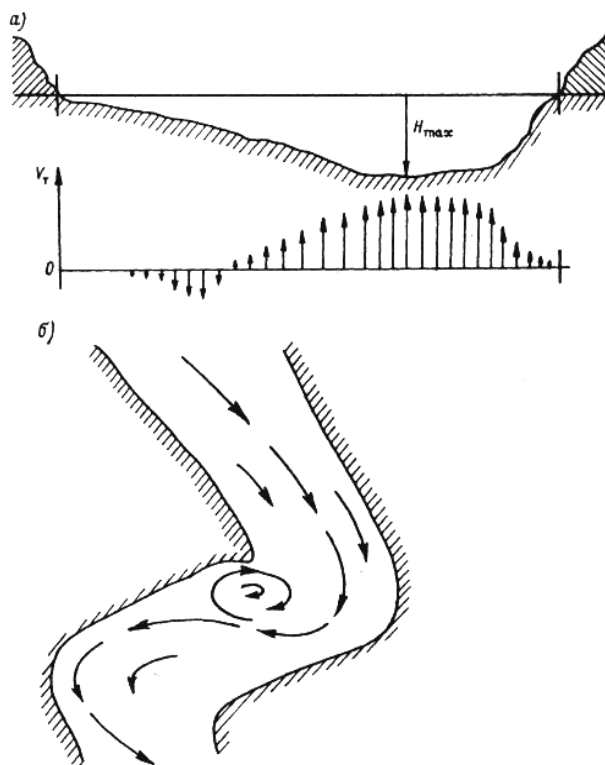


Рис. 20.19

Течения минимальны в период смены направления около моментов полной и малой воды. С учетом имеющихся глубин вход в реку лучше в период прилива, а выходить из нее — при отливе. В зависимости от расположения лимитирующего участка (или шлюза) вход в реку осуществляется либо непосредственно перед наступлением полной воды, либо несколько раньше.

Выбор наивыгоднейшего пути определяется соображениями безопасности движения своего судна и других судов, требованиями Правил плавания, а также соображениями экономичности: выбранная трасса движения должна обеспечивать минимальное время перехода. Правила плавания обычно закрепляют принцип правостороннего разделения встречных судопотоков. При отсутствии встречных судов можно следовать серединой судового хода, в особенности если эта линия «закреплена» на местности навигационным створом (искусственным или естественным). При появлении встречного судна необходимо держаться правой (по ходу) стороны фарватера на безопасном расстоянии от бровки (учитывая эффект гидродинамического взаимодействия судов и возможного зарыскивания от мелководного берега на глубокую воду).

При плавании по течению выгоднее вести судно по участкам с наибольшими скоростями течения, а против течения — по участкам с наименьшими скоростями течений, однако мелководье ограничивает возможности отклонения судна от оси судового хода, а Правила плавания четко ограничивают зону маневрирования при выборе наивыгоднейшего пути.

Перевалы, где судовой ход переходит от одного берега к другому, имеют, как правило, достаточную ширину, большие глубины, малую кривизну фарватера, обставляются перевальными либо створными знаками и ПСНО, поэтому прохождение перевалов сложностей не вызывает. Необходимо лишь принимать и корректировать поправку на снос, так как при движении по перевалу судно пересекает струю течения под косым углом.

Мелководные перекаты отличаются малыми глубинами, малой шириной судового хода, сильными свальными течениями, а выше и ниже переката судовой ход обычно круто поворачивает. Поэтому особенно важно правильное и своевременное выполнение поворота при заходе на перекат (и в особенности — при плавании по течению). При небольшом запасе воды под килем перекат проходят на пониженной скорости, при условии сохранения управляемости судна.

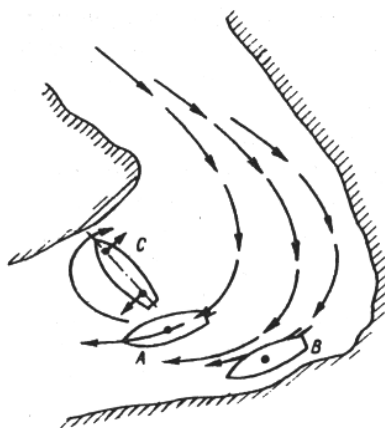


Рис. 20.20

На наиболее сложных перекатах расхождение и обгон запрещены; судно, следующее против течения, пропускает судно, следующее по течению.

Особого внимания в речном плавании требуют повороты. Наиболее сложно выполнение поворота при плавании по течению (рис. 20.20), так как прижимное течение и сильная центробежная сила на повороте пытаются навалить судно на вогнутый берег (судно В). При подходе к повороту рекомендуется уклониться в сторону выпуклого берега и уменьшить ход, а при вхождении в поворот — прибавить скорость, контролируя расстояние до берега и «раскат» кормы на повороте. Предпочтительно переключать руль так, чтобы радиус циркуляции был несколько меньше, чем радиус кривизны судового хода

При плавании против течения поворот выполнять легче, так как управляемость судна улучшается, а центробежная сила уменьшается. Перед поворотом рекомендуется несколько уклониться от оси судового хода в сторону выпуклого берега.

Крутые повороты следует выполнять так, чтобы не поставить судно под углом к главной струе течения: если носовая и кормовая части судна окажутся под воздействием разных по скорости струй течения, то судно может потерять управляемость и развернуться поперек фарватера (судно С). Поворот лучше выполнять на пониженной скорости и так, чтобы диаметральной плоскость судна в процессе поворота все время оставалась бы параллельной струям течения, т.е. чтобы радиус циркуляции был возможно ближе к радиусу поворота речного русла (судно А).

Поворот судна на обратный курс называется оборотом. Место и направление оборота выбираются с учетом габаритов фарватера, направления и силы течения и ветра, а также особенностей поворотливости судна. Чтобы течение помогало развернуть судно, при движении по течению оборот следует делать из места более сильного течения («стрешня») в сторону слабого течения (тиховод), (рис. 20.21,а), а при движении против течения – из тиховода в стрешень (рис. 20.21,б).

При сильном ветре оборот рекомендуется выполнять на ветер: в случае дачи судоводитель может остановить машину и дать задний ход, да ветер будет сносить судно обратно на фарватер.

Вставать на якорь следует всегда против течения.

При управлении судном судоводитель ориентируется по знакам береговой и плавучей навигационной обстановки, естественным и искусственным ориентирам, решая одновременно две главные навигационные задачи:

1) оценить расположение судового хода в пределах речного русла «закрепить» его на местности с помощью имеющихся ориентиров;

2) оценить местоположение судна относительно оси (или бровки) судового хода и направление его движения, корректируя курс так чтобы удерживать судно в пределах фарватера на его оси или на заданном траверзном расстоянии от бровки.

Особое значение при плавании по ВВП играет глазомерный анализ окружающей обстановки, непосредственная зрительная оценка взаиморасстояния объектов. Визуальная ориентировка хорошо согласуется с практикой повседневной жизни, проводка судна с ее помощью часто надежнее и безопаснее, а судоводитель быстро овладевает навыками такой проводки.

Глазомер всегда связывается с представлением об особых морских качествах судоводителя, и это представление не устарело. Чувство пространства не основывается на подражании, а целенаправленно формируется в процессе систематических тренировок, сопоставления глазомерных наблюдений с инструментальными.

Не следует, однако, и переоценивать возможности глазомера. Ошибки глазомерных определений дистанций очень индивидуальны и зависят от уровня практической натренированности судоводителя, удаленности объектов, времени суток, погодных условий.

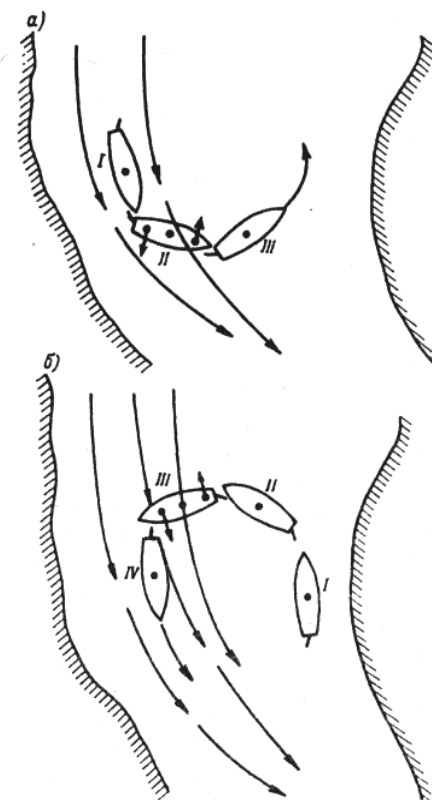


Рис. 20.21

Возможна неправильная оценка ситуации и за счет новизны впечатлений: судоводителю, впервые проходящему самостоятельно узкий фарватер, он кажется уже, чем на самом деле. Такое же восприятие у судоводителя, перешедшего с малого судна на большое.

Однообразный вид речных берегов, сходство островов, отсутствие хороших ориентиров затрудняют ориентировку, поэтому особенно важно контролировать и отмечать на карте прохождение каждого поворота, острова, приметного ориентира; это простое правило предохраняет судоводителя от потери ориентировки.

В ночное время ориентировка существенно усложняется: теряется перспектива судового хода, снижается глубина пространственного зрения, трудно определить, какие огни расположены ближе, а какие — дальше. Создается ложная иллюзия близости берегов, особенно если они высокие, лесистые и отбрасывают тень. Для повышения безопасности плавания в ночное время рекомендуется вести судно ближе к середине судового хода, при необходимости подсвечивая правый (по ходу) берег слабым прожектором около траверза.

Ночная ориентировка существенно облегчается при использовании РЛС (следует, однако, иметь в виду, что береговая черта может не совпадать с ее изображением на карте вследствие изменения уровня воды).

Специфической особенностью речного плавания является проход судов под мостами. Мостовой пролет ограничивает допустимую габаритную высоту судна. Мостовые опоры сужают ширину свободного прохода, стесняют речной поток и увеличивают скорость течения.

Особенно усложняется проход под мостами на повороте судового хода и при наличии свальных течений.

Следуя под мост, необходимо иметь полную уверенность, что габаритная высота судна (включая мачты, антенны, трубы) меньше подмостового габарита при данном уровне воды. В необходимых случаях принимается дополнительный балласт либо судно специальным образом дифферентуется, чтобы уменьшить габаритную высоту. Применяются также устройства «заваливания» судовой мачты.

Обгон в районе моста, а также расхождение судов у однопролетных мостов запрещены, поэтому необходимо убедиться, что проход под мост свободен и разрешен.

Проходить под мост следует строго под тем пролетом, который предназначен Правилами плавания для прохода в данном направлении (обычно на мостах предусмотрена соответствующая сигнализация). На подходах к мосту часто выставляются направляющие ПСНО, упрощающие ориентировку. Путь судна выбирается по середине судоходного пролета и перпендикулярно мосту с принятием необходимой поправки на снос и ориентировкой по искусственному или естественному створу (в том числе ночью – по огням мостового створа). При наличии свального течения или ветра рекомендуется держаться несколько ближе к мостовой опоре, со стороны которой действует снос.

В районах разводных и наплавных мостов, паромных переправ движение часто регулируется специальными сигнальными знаками, семафорами, светофорами. Проход возможен только при разрешающем сигнале. Обычно требуется снижать ход. Специальные сигналы устанавливаются и для прохода мимо работающих земснарядов.

Глава 21

НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЛАВАНИЯ ПРИ ОСОБЫХ ОБСТОЯТЕЛЬСТВАХ

21.1. Навигационные особенности плавания при ограниченной видимости

Дальность метеорологической видимости является важнейшим фактором, определяющим условия и возможности визуального наблюдения и оптические дальности обнаружения объектов в море. Метеорологическая видимость определяется прозрачностью атмосферы и зависит от метеорологических условий (туман, дымка, парение моря, осадки – дождь, снегопад, морось). Шкала метеорологической видимости приведена в табл. 51 МТ-75 (табл. 21.1). В табл. 21.2 приведена дальность видимости огней. До различной силы, соответствующая дневной видимости черного предмета на фоне неба.

Таблица 21.1

Балл	До, мили	Словесная характеристика видимости	При каких условиях преимущественно наблюдается днем
0	0... 0,025	Очень плохая видимость	Очень сильный туман
1	0,025...0,1		Сильный туман, очень густой снег
2	0,1...0,3		Умеренный туман, сильный снег
3	0,3...0,5	Плохая видимость	Слабый туман, умеренный снег, сильная мгла
4	0,5...1,0		Умеренный снег, очень сильный дождь, умеренная дымка (мгла)
5	1...2	Средняя видимость	Слабый снег, сильный дождь, слабая дымка (мгла)
6	2...5		Умеренный дождь, очень слабый снег, слабая дымка (мгла)
7	5...11	Хорошая видимость	Слабый дождь
8	11...27	Очень хорошая видимость	Без осадков
9	Более 27	Исключительная видимость	Совершенно чистый воздух

Вероятностная оценка появления тумана по маршруту предстоящего перехода производится с помощью лоций, гидрометеорологических атласов и пособий. Более надежной является метеорологическая информация, передаваемая по радио. Предупреждения о тумане передаются отечественными радиостанциями как штормовые предупреждения.

Контроль фактической видимости в районе плавания судна является одной из важнейших обязанностей помощника капитана. Следует считать, что метеорологическая видимость ухудшается или ухудшилась, если в дневное время: размывается и исчезает горизонт; не видны береговые ориентиры, которые должны быть видимы при их геометрической дальности; не видны суда, которые наблюдаются на экранах РЛС на дистанциях, меньших их геометрической дальности видимости;

ясно видна полоса тумана или дождя, к которой идет судно.

Аналогичным образом, в ночное время при ухудшении видимости огни, Луна, звезды размываются и исчезают; не видны береговые огни, которые должны быть видимы при их нормальной дальности видимости; не видны огни судов, наблюдаемых на экране РЛС на дистанциях 3...5 миль от судна, либо вокруг этих огней образуется ореол; от судовых огней появляются лучи, секторы, полосы, столбы света.

Согласно МППСС-72 [Правило 3 (е)], термин «ограниченная видимость» означает любые условия, при которых видимость ограничена из-за тумана, мглы, снегопада, сильного ливня, песчаной бури или по каким-либо другим подобным причинам».

Таблица 21.2

Балл	До, мили	Сила света огня, кд				
		3,5	8,6	25	50	100
		Оптическая дальность видимости огня, мили				
0	0...0,025	0,052	0,057	0,063	0,066	0,071
1	0,025...0,1	0,150	0,167		0,207	0,221
2	0,1...0,3	0,286	0,325	0,381	0,416	0,452
3	0,3...0,5	0,465	0,490	0,621	0,691	0,767
4	0,5...1,0	0,670	0,810	0,972	1,112	1,253
5	1...2	0,956	1,183	1,485	1,750	1,976
6	2...5	1,336	1,809	2,457	2,932	3,440
7	5...11	1,668	2,322	3,348	4,077	4,924
8	11...27	1,960	2,862	4,401	5,616	7,181

Таким образом количественного выражения понятия *ограниченная видимость* в Правиле не дано; это связано как с неоднородным состоянием атмосферы при явлениях, ограничивающих видимость, так и с отсутствием инструментальных методов измерения состояния видимости (хотя при определенных обстоятельствах более точная оценка состояния видимости может быть получена с помощью РЛС измерением расстояний до объектов в момент визуального обнаружения).

Обычно ограниченной считают видимость в пределах дальности видимости судовых навигационных огней, т.е. 3 мили и менее. Вместе с тем уже при видимости 5 миль благоразумно и целесообразно, по меньшей мере, держать машину в готовности к реверсам. В случае переменной видимости всегда следует учитывать ее минимальное значение.

Малая видимость затрудняет или вообще исключает возможность визуальной ориентировки и визуального наблюдения окружающей обстановки. Процесс судовождения осложняется, повышается вероятность навигационных аварий, и даже современные РТС судовождения не дают оснований считать хорошую и плохую видимость равнозначной. Это в особенности относится к условиям плавания в стесненных водах, где визуальная ориентировка и визуальные лоцманские методы судовождения играют важнейшую роль.

При первых признаках ухудшения видимости, при входе в зону ограниченной видимости или при приближении к ней вахтенный помощник капитана обязан выполнить ряд мероприятий, рекомендованных хорошей морской практикой, МППСС-72, руководящими документами по безопасности мореплавания [9], в том числе:

- предупредить капитана;

- начать подачу сигналов, оповещающих туман, включить ходовые огни, предписываемые МППСС-72, и выключить либо затемнить огни, мешающие наблюдению;

- перейти на ручное управление рулем и выставить матроса-впередсмотрящего (имея в виду, что матрос-рулевой наблюдателем считаться не может);

- включить РЛС и САРП, начать радиолокационное наблюдение;

- предупредить вахтенного механика о возможных изменениях режима работы судовой энергетической установки (СЭУ), проверить связь с машинным отделением, сличить часы на мостике и в машинном отделении;

- при необходимости перевести СЭУ в маневренный режим либо, сообразуясь с обстановкой, уменьшить скорость судна до безопасной;

- включить УКВ-радиостанцию на дежурный канал связи и внутри-судовую трансляционную связь;

- определить место судна, при необходимости включить эхолот;

- сделать отметку времени на курсограмме и распечатку реверсо-граммы;

- сличить курсы по гироскопическому и магнитному компасам;

- проверить закрытие дверей в водонепроницаемых переборках;

по указанию капитана вызвать на мостик подвахтенных судоводителей для усиления вахты и дополнительных наблюдателей;

до прибытия капитана на мостик руководствоваться МППСС-72 и местными правилами плавания.

В условиях ограниченной видимости на мостике обязан находиться капитан (либо подменяющий его старший помощник капитана), который управляет судном и руководит всеми действиями вахтенной службы. Обязанности остальных судоводителей определяются принятой в пароходстве (судоходной компании) схемой распределения обязанностей на мостике в сложных условиях плавания.

Безопасное плавание судна при ограниченной видимости обеспечивается тщательным контролем за местоположением и движением судна, усиленным и непрерывным радиолокационным, зрительным, слуховым наблюдением, строгим выполнением требований МППСС-72 и местных правил плавания, следованием безопасной скоростью, учетом возможностей и ограничений применяемых технических средств и особенностей района плавания.

Условия видимости существенным образом влияют на выбор безопасного и наивыгоднейшего пути судна. Часто оказывается рациональным изменить заранее намеченный путь (даже с учетом его удлинения) с тем, чтобы проходить на большем расстоянии от навигационных опасностей. Проход на «круглых» расстояниях от навигационных ориентиров позволяет упростить радиолокационный контроль за местоположением и движением судна (см. рис. 19.11). С навигационной точки зрения наиболее эффективно располагать курсы по середине прохода между навигационными опасностями, берегами, бровками фарватера (если это не противоречит правилам плавания).

Скорость судна должна быть всегда безопасной; выбор безопасной скорости производится на основе общих принципов, рассмотренных в гл. 19 и 20, в соответствии со складывающейся обстановкой. Выбранная скорость не является постоянной и должна корректироваться при изменении условий и обстоятельств плавания.

Однако следует избегать частых изменений скорости, в особенности если поблизости находятся другие суда, чтобы не вводить их в заблуждение и не усложнять решение задачи расхождения судов. Многие «радиолокационные столкновения» явились следствием чрезмерной скорости судов при плохой видимости, когда из-за перерывов в радиолокационном наблюдении встречное судно обнаруживалось с большим опозданием либо вообще не было обнаружено. Повторное (помимо Правила 6) указание о необходимости плавания безопасной скоростью, включенное в Правило 19 МППСС-72, подчеркивает, что именно при ограниченной видимости оно и должно особенно тщательно выполняться.

Одновременно пункт в Правилах 19 дополнен новым и очень важным требованием об обязанности держать машину в состоянии готовности к немедленному маневру.

За исключением случаев, когда установлено, что опасности столкновения нет, каждое судно, которое услышит, по-видимому впереди своего траверза, туманный сигнал другого судна или которое не может предотвратить чрезмерное сближение с другим судном, находящимся впереди траверза, должно уменьшить ход до минимального, достаточного для удержания судна на курсе, и следовать с крайней осторожностью, а если это необходимо – остановить движение.

Следует иметь в виду, что при изменении скорости судна в общем случае изменяется угол сноса течением и ветром. Поэтому, снизив (или увеличив) скорость, судоводитель должен выбрать вариант дальнейших действий: либо сохранить прежний путь ($ПУ = const$), приняв к учету новую поправку на снос и задав рулевому новый ГKK, либо следовать прежним курсом ($ГKK = const$), проложив на карте новый путь с учетом нового угла сноса.

В гл. 6 было показано, что часть погрешностей счисления возрастает пропорционально времени плавания. Поэтому на одинаковом отрезке пути погрешности счисления при ограниченной видимости будут в общем случае больше, чем при хорошей видимости, как из-за снижения скорости, так и из-за дополнительных погрешностей в учете маневрирования судна.

Контроль за местоположением судна осуществляется с использованием радиотехнических и гидроакустических средств: РЛС (САРП), ПИ РНС, эхолота, в отдельных случаях – судового радиопеленгатора. Место судна следует определять чаще, чем при хорошей видимости. В прибрежном плавании и стесненных водах резко возрастает роль ускоренных радиолокационных методов контроля за местоположением и движением судна.

Эффективное использование навигационного эхолота позволяет не только контролировать глубины под килем, но и удерживать судно за пределами выбранной ограждающей изобаты. Появляются проекты оборудования крупнотоннажных судов эхолотом-гидролокатором, который (в отличие от существующих эхолотов) позволял бы обнаруживать подводные опасности впереди по курсу.

При подходе к берегу в местах, где установлены комбинированные радиомаяки, можно получить приближенное расстояние до них, сравнивая время прихода радио- и звукового сигнала. Устанавливаемые на буйях, плавмаяках, береговых СНО звукосигнальные установки позволяют также обнаружить приближение судна к опасности (источнику звука), получить приближенную ориентировку положения судна относительно опасности.

Подход к берегу (району навигационных опасностей) при ограниченной видимости выполняется на самой малой скорости, при которой* сохраняется управляемость судна, с соблюдением необходимых мер предосторожности.

Любой маневр должен производиться на основе анализа всей имеющейся информации и быть безопасным во всех отношениях – и с точки зрения предотвращения посадки судна на мель, и с точки зрения предотвращения столкновения его с другими судами и объектами. Эффективность выполняемого маневра должна тщательно контролироваться до тех пор, пока опасность не будет пройдена и оставлена позади.

Если принятые меры предосторожности, состав и ограничения судового оборудования, навигационная обстановка не позволяют обеспечить безопасное плавание судна, следует стать на якорь, лечь в дрейф либо развернуться на обратный курс для выхода в безопасный район.

21.2. Навигационные особенности ледового плавания

Плавание во льдах – один из наиболее сложных и опасных видов плавания. Практически все моря, омывающие побережье России, замерзают, хотя и на разный срок. Особой сложностью отличается плавание судов в морях Северного Ледовитого океана, на трассе Северного морского пути. Освоение и развитие арктических экономических районов страны – объективный исторический процесс, и задача морского транспорта – гарантированное транспортное обеспечение этого процесса. Поскольку значительная часть замерзающих морей лежит в широтах 50...60° и выше, специфика плавания во льдах сочетается с особенностями плавания в высоких широтах.

Кроме того, особую опасность представляет неожиданная встреча с плавающими льдами и айсбергами в северной и южной частях Атлантического и Тихого океанов. Строгого разделения навигационной ледовой опасности на арктическую, внутренних морей и открытых вод океанов нет, однако кроме большого комплекса общих мер нужно учитывать специфику ледовых условий в районе плавания.

Необходимым условием обеспечения безопасности ледового плавания является наличие достоверной информации о метеорологических и ледовых условиях по маршруту предстоящего перехода. Основная справочная информация содержится в соответствующих руководствах для плавания, лоциях, справочных ледовых картах, ледовых атласах и других специальных ледовых пособиях. Кроме того, в большинстве стран, где прилегающие морские воды замерзают (либо наблюдаются дрейфующий лед, айсберги), ведется сбор ледовой информации с использованием всех средств наблюдения (ИСЗ, авиации, судов и береговых станций).

Оперативная ледовая информация передается потребителям в виде навигационных предупреждений (по каналам всемирной и национальных систем передачи навигационных предупреждений) и в виде ледовых карт, прием которых осуществляется факсимильной аппаратурой.

Ледовая информация должна в основном содержать следующие сведения:

- положение и состояние кромки льда;
- общую характеристику ледовых условий на всем протяжении предстоящего пути;

предполагаемые изменения этих условий на ближайшие несколько дней; рекомендуемые курсы для самостоятельного плавания судов исходя из существующих или предполагаемых ледовых условий.

Имея подобную информацию, необходимо нанести вероятные границы кромки льда (или границы распространения дрейфующих льдов и айсбергов) на навигационные карты, произвести анализ изменений ледовой обстановки под влиянием гидрометеорологических факторов за истекший период и на ближайшую перспективу. В последующем этот анализ должен уточняться как по мере поступления новой информации, так и на основе судовых наблюдений. В свою очередь, в соответствии с Конвенцией СОЛАС-74 капитан судна обязан давать оперативную информацию о наблюдаемых им изменениях ледовой обстановки.

Разрешение на самостоятельное плавание во льдах суда, имеющие соответствующий ледовый класс Регистра, получают от руководства ледовыми операциями в данном районе и/или от руководства парокходства (судоходной компании). Судно должно быть полностью подготовлено к ледовому плаванию. Для предохранения от повреждения винторулевого комплекса судно должно иметь достаточную осадку кормой (заглубление винта и руля должно превышать вероятную толщину льда) и небольшой дифферент. Для судов в грузу создание дифферента около 1 м на корму обеспечит не только большую защиту руля и винта от повреждения, но и лучшую «всхожесть» судна на лед; при плавании в мелкобитом льду на мелководье, напротив, считается целесообразным иметь небольшой дифферент на нос. Судно не должно иметь крена. Порядок подготовки судна к ледовому плаванию определяется соответствующими руководящими и нормативными документами [9]. При подготовке к плаванию во льдах следует исходить из того, чтобы быть готовым к неожиданным аварийным ситуациям.

Как только судно войдет в зону вероятной встречи со льдом, необходимо:

- заблаговременно предупредить вахтенного механика о переводе СЭУ в маневренный режим работы;

- сверить часы на мостике и в машинном отделении;

- проверить действие средств сигнализации, связи, УКВ-радиостанции, РЛС, внутрисудовой связи;

- убрать выступающий из корпуса выдвижной датчик лага;

- подготовить и проверить ледовые прожекторы для обеспечения плавания в сумерках и ночью;

- проверить состояние водонепроницаемых закрытий, уровень воды в льялах, льяльных колодцах и танках;

- включить вторую рулевую машину, если совместная работа двух рулевых машин технически возможна, перейти на ручное управление рулем, проверить запасное и аварийное рулевое управление;

- установить безопасную скорость движения;

- включить РЛС, начать усиленное радиолокационное и зрительное наблюдение за обстановкой.

Все внимание судоводителей на этом этапе должно быть обращено на своевременное обнаружение льдов, положение которых часто известно лишь приблизительно. Это особенно важно во время тумана, снегопада, темноты, т.е. при плавании в условиях ограниченной видимости.

Признаками близости льда могут служить «ледяное небо» (белесоватые отсветы на низких облаках, принимающие все более отчетливый характер и захватывающие большую часть неба), понижение температуры воды и воздуха, уменьшение или отсутствие зыби вдали от берегов при свежем продолжительном ветре (если лед – с наветренной стороны), появление льдин на значительных пространствах воды с подветренной стороны кромки льда и пр. В безоблачные дни при ветре со стороны льда повышенная рефракция зрительного луча, как бы поднимающая изображение отдельных предметов, позволяет обнаруживать изображение льда на фоне нижней части неба на расстоянии, превышающем дальность видимого горизонта. Наличие льда часто выдается туманом, нависающим в прикромочных участках, а в теплую погоду – холодным ветром, дующим со стороны льда.

Днем при хорошей видимости лед обнаруживается обычно на достаточно большом расстоянии в виде узкой белой полосы на горизонте, которая кажется сплошной даже в том случае, если лед сильно разрежен. Ночью и при ограниченной видимости основным средством обнаружения льдов и контроля за ледовой обстановкой становится судовая РЛС на малых (до 6 миль) шкалах дальности.

Радиолокатор позволяет уверенно обнаруживать кромку ледяных полей и отдельно плавающие крупные льдины с расстояния 2...3 миль, а отдельные небольшие льдины и скопление битого льда – с 1...2 миль. Отдельные льдины, кромки которых сглажены, на экране РЛС можно не увидеть вообще, особенно при волнении. Различные образования молодого льда в большинстве случаев также не просматриваются на экране, хотя иногда отдельные его виды (блинчатый лед) могут наблюдаться до 0,5...1,0 мили. Что касается ровного льда, то обычно отраженные сигналы наблюдаются только от его кромки; при этом, если море взволновано, кромка льда на экране РЛС определяется по контрасту.

Дальность радиолокационного обнаружения айсбергов – главной ледовой опасности в открытых водах океанов – зависит от многих причин: размеров, формы, направления облучения (форма и поверхность айсберга с разных сторон, как правило, различны), температуры воздуха и воды, степени волнения и др. Пониженная рефракция, часто возникающая из-за низких температур воздуха в районе нахождения айсберга, может настолько искривить путь радиолуча, что даже большие айсберги могут оказаться необнаруженными на малых расстояниях.

Обычно большие айсберги с крутым передним склоном обнаруживаются на расстояниях до 10...15 миль, в то время как низкие айсберги и обломки айсбергов (представляющие собой монолиты льда) – лишь на расстояниях до 3...5 миль, преимущественно при гладком штилевом море.

Однако даже при незначительной ряби заметить их бывает трудно, а усиление волнения и ветра все более затрудняет радиолокационное обнаружение айсбергов.

Так как в условиях беспокойного моря дальность радиолокационного обнаружения всех видов льда значительно понижается, то при ограниченной видимости и морском волнении наличие РЛС не исключает обычных мер предосторожности, принятых при плавании в зонах вероятной встречи со льдом.

Уменьшение скорости судна в соответствии со складывающейся обстановкой — необходимая предосторожность. Безопасной будет считаться такая скорость, при которой в случае обнаружения льда останется достаточный резерв времени для снижения скорости до такой величины, когда судно не получит повреждений при контакте корпуса со льдом. Таким образом, безопасная скорость определяется надежной дальностью обнаружения льдов, величиной инерции данного судна, прочностью корпуса и сплоченностью льдов. Особую осторожность необходимо проявлять, подходя в условиях нормальной видимости к наветренной (сплоченной) кромке ледяных массивов, так как встреча со льдом может быть совершенно внезапной, а поэтому — очень опасной. Встреча мелких льдин из предосторожности всегда должна расцениваться как признак близости более крупного льда.

Вахту на мостике при ледовом плавании обычно несут два судоводителя, один из которых — капитан или старший помощник капитана — управляет судном, а вахтенный помощник выполняет штурманские обязанности, наблюдает за ледовой обстановкой, обеспечивает связь и сигнализацию, выполняет распоряжения капитана. При временной остановке во льдах на судне несут ходовую вахту.

Обнаружив лед, необходимо принять решение о характере дальнейших действий, избрать дальнейший путь в соответствии с фактической обстановкой. В большинстве случаев длинный путь по чистой воде или по разреженному льду выгоднее короткого пути в сплоченном льду.

Поэтому надо всемерно стремиться избегать встречи со льдом, обходить скопление льдов, а при неизбежности такой встречи — учесть все имеющиеся сведения о ледовых условиях с целью изыскания пути в обход труднопроходимого льда. Решение о проходе через разреженный лед принимается с учетом потребного на проход времени и анализом динамики развития ситуации: не может ли этот разреженный лед вскоре уплотниться и стать непроходимым для судна?

При этом учитывается конфигурация берегов, расположение островов, направление ветра и течений, характер дрейфа льдов; Обходить скопление льда, границы которого видны, рекомендуется с наветренной стороны, а при безветрии — с наиболее благоприятной стороны. Так, генеральный принцип плавания в Северной Атлантике — чем дальше на север, тем больше льда, поэтому при отсутствии достоверной информации о расположении ледовых полей и их кромок оптимальное маневрирование предполагает уходить южнее, оставляя обнаруженный лед к северу.

Входить в лед необходимо и возможно только тогда, когда очевидно, что иного пути нет, лед проходим для судна, а погодные условия благоприятны для плавания во льдах.

Если лед разрезен, то проход через него не представляет особых затруднений; требуется лишь внимательное отношение к маневрированию среди льдин. При неизбежном столкновении со льдом следует брать льдину только на штевень, оберегая бортовую обшивку; чем крупнее формы льда, тем опаснее столкновение с ним. Сильно восторошенные льдины нередко имеют подводные выступы – «тараны», которые могут при ударе вызвать повреждение корпуса судна.

При подходе ко льду с подветренной стороны ледовая обстановка на первый взгляд более благоприятна (кромка льда расплывчата, лед за кромкой редкий), однако реальная опасность заключается в том, что лед, дрейфуя, может окружить и зажать судно. Надо учитывать также направление и скорость ветра, который может быстро изменить обстановку. Тем не менее, если вход во льды неизбежен и расположение их позволяет выбирать путь движения, то лучше входить в лед, идя против ветра, так как с подветренной стороны лед более разрезен.

При подходе судна с наветренной стороны вход в лед может оказаться затруднительным, лед в наветренной кромке обычно сплочен, а движение льдин на волне и зыби может стать причиной опасных ударов в корпус судна. Необходимо вначале пройти вдоль кромки льда в поисках глубокой излучины или выступающего угла кромки, под защитой которых накат волн ощущается меньше. Пересекать линию кромки надо по возможности под прямым углом и на малом ходу, учитывая, что действие ветра и зыби с кормовых курсовых углов ухудшает управляемость судна.

Входить в лед не рекомендуется при плохой видимости, если ясного представления о состоянии льдов по пути следования при торошении льдов, при дрейфе льда в сторону близко расположенных навигационных опасностей, при неблагоприятном прогнозе погоды на ближайшее время, а также когда сплочение и толщина льда опасны для судна. Если безопасный вход в лед невозможен, капитан отводит судно от кромки льда и ожидает улучшения обстановки.

Плавание судна во льдах осуществляется с безопасной для данных условий скоростью по разводьям, полыньям и среди наиболее разрезанного льда в общем направлении, близком к выбранному генеральному курсу. Не следует значительно уклоняться от рекомендованного генерального курса, если нет уверенности, что такое отклонение выведет судно на чистую воду и оно вскоре вернется на желаемый путь. Тем не менее, если наблюдаемые разводья по направлению не совпадают с генеральным курсом, то обычно лучше идти более длинным путем по разводьям, чем избирать кратчайший путь в более сложных ледовых условиях. При этом следует стараться выполнять такие отклонения, когда они достаточно значительны и длительны, по возможности в обе стороны от генерального курса, чтобы в итоге свести отклонение от намеченного пути к минимуму.

При выборе цепи разводий необходимо тщательно оценивать ледовую обстановку, учитывая косвенные признаки наличия чистой воды и льда за пределами видимости («водяное» и «ледяное» небо), с тем, чтобы не привести судно в «ледовый мешок» – разводье, из которого нет выхода. Перемычки между разводьями форсируют в наиболее слабом и удобном для прохода месте, под прямым углом.

При плавании в сплоченных льдах (7...9 баллов) задача сводится к умению обнаружить и использовать участки наиболее легкопроходимого льда: небольшие разводья и пятна воды среди сплоченного льда, полосы сравнительно разреженного льда, полосы более слабого, менее торосистого или более разрушенного льда. Необходимо определить закономерность в расположении легкопроходимых участков, а если ее не обнаружено, то пробиваться от одного слабого участка к другому, придерживаясь генерального направления движения. Бели же лед простирается на значительное расстояние, причем необходимость продолжать движение не диктуется обстоятельствами плавания, то следует лечь в дрейф в ожидании улучшения ледовой обстановки либо форсировать льды с ледоколом.

Когда, следуя во льдах, судно по навигационным условиям может уклоняться от курса в обе стороны, такие отклонения рекомендуется делать в основном на ветер, так как при свежем и длительном ветре проходимость льдов там всегда будет лучше; при этом судно выводится из зоны опасных сжатий льда при наличии в подветренном направлении берега или каких-либо навигационных опасностей.

Уклоняться под ветер можно только в тех случаях, когда судоводитель знает, что в этом направлении имеются значительные пространства чистой воды или редкого льда. При начале процессов торошения необходимо постараться вывести судно из сплывающегося льда в наветренном направлении или в сторону открытого моря, а при невозможности движения – выбрать безопасное место стоянки, лучше среди мелкобитого льда, и периодически работать машиной вперед и назад.

При плавании вблизи берегов часто используют прибрежные полыньи, образующиеся в результате отхода льдов от побережья под влиянием ветров и течений; существующие изгибы берега, острова, бухты могут служить защитой от напора льдов с моря. У побережья таяние льда и последующее его взламывание и разрежение происходят значительно раньше и интенсивнее, нежели в открытом море, а отжимные ветры могут быстро очистить полынью ото льда, поэтому плавание в береговой полынье обычно возможно значительно ранее, чем вдали от берега. Плавание вблизи берега при наличии льда, плохой видимости и по малым глубинам требует большого внимания и осторожности. Плавание становится опасным, когда прижимные ветры гонят лед к берегу, так как сжатия льда в прибрежной полосе обычно сильнее сжатий в открытом море и судно может быть выдавлено льдом на мель.

В качестве защиты при нажиме льда с моря можно пользоваться стамухами – крупными ледяными торосистыми образованиями, сидящими на грунте на глубинах до 15...20м. Если возможности укрыться нет, судно должно стремиться уйти как можно дальше от берега в разреженный лед или на чистую воду, а при необходимости – запросить помощь ледокола.

Важнейшей задачей при плавании во льдах являются выбор и поддержание оптимальной скорости движения судна. *Ледовая паспортная скорость*, определяемая на полигонах, – это скорость, которую новое судно способно развивать на разных режимах работы СЭУ в типовых ледовых условиях. Максимальные значения паспортных ледовых скоростей ограничиваются либо мощностью СЭУ (достижимая скорость), либо прочностью корпуса судна (допустимая скорость). Безопасная возможная скорость находится из сопоставления достижимой и допустимой скоростей (берется меньшее значение) и характеризует максимальную скорость, которую судно может развивать в заданных ледовых условиях, не получая серьезных ледовых повреждений при случайных или намеренных ударах в лед.

Предел безопасной скорости зависит, с одной стороны, от конструкции, прочности и водоизмещения судна, а с другой стороны, – от характера (сплоченности и толщины) преодолеваемого льда и условий видимости. Вопрос о пределе безопасной ледовой скорости конкретного судна в конкретных природных условиях должен решаться самими судоводителями на основе опыта плавания во льдах.

Если в сплоченном льду движение судна замедляется даже при увеличении частоты вращения движителей, то необходимо, не ожидая остановки судна, отойти назад.

Контроль за местоположением и движением судна при плавании во льдах основывается на тех же принципах, что и в любых других условиях, однако необходимо учитывать целый ряд специфических особенностей.

Так, в высоких широтах и при маневрировании гироскопический и магнитный компасы работают менее надежно. С увеличением широты уменьшается направляющая сила чувствительного элемента, гирокомпас приближается к пределу рабочей зоны по широте. Для гирокомпаса «Амур-М» диапазон широт составит 0...70°; для «Курс-4» и «Курс-4М» 0...75°; для «Курс-5» 0...80°; для «Веги» 0...85°.

Инерционная погрешность гирокомпаса в средних широтах после однократного маневрирования обычно не превышает 2...3° и ощущается в пределах 40...50 мин. При плавании в высоких широтах и на больших скоростях инерционная погрешность может сохраняться до 1,5 ч после окончания маневра. При маневрировании во льдах в широтах 75...80° возможно накопление инерционных погрешностей до 10...15° для обычных непериодических компасов. Надежность работы магнитного компаса снижается малой величиной горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, резкими изменениями магнитного состояния судна, вызываемыми частыми магнитными бурями, большими величинами и изменчивостью, магнитного склонения и др.

В широтах более 85° использование компасов становится невозможным.

Судно движется во льдах с переменными скоростями, причем судить о скорости судна во льдах по частоте вращения винта нельзя. Невозможно использовать любые лаги с выстреливаемым из корпуса чувствительным элементом и гидродинамические лаги со штевневым приемным устройством. Неустойчиво работают гидроакустические доплеровские лаги, особенно в сплоченном льду, при выползании корпусом на лед, при отработке заднего хода. Достаточно стабильно работает во льдах лишь модернизированный вариант лага ИЭЛ-2М.

Визуально скорость судна относительно льда, уз, можно определить, замечая время t , с, прохождения льдиной траверза двух точек (базы) судна с расстоянием l , м, между ними:

$$V = 3600 \frac{l}{1852t} = 1.94 \frac{l}{t} \quad (21.1)$$

Применимы и обычные радиолокационные способы определения скорости судна.

Способ определения скорости судна во льдах **СКП определения скорости, %**

Планширный лаг	2...5
Лаг – визир	2...8
Лаг ААНИИ.	2
Индукционный лаг.	2
Радиодоплеровский лаг.	0,1...3
Гидроакустический доплеровский лаг...	0,1...2
Судовая РЛС	1...3

Частые смены курсов и режима работы СЭУ, случайные изменения скорости судна во льдах предельно затрудняют счисление координат судна. При наличии автосчислителя (автопрокладчика) часто необходимо вводить в него скорость судна вручную. Классическим методом является предложенное адмиралом С.О. Макаровым «пятиминутное счисление»: по истечении каждой пятой минуты фиксируют курс (до $\pm 1^\circ$) и скорость судна, близкие по значению курсы (10...20°) и пройденные по ним расстояния осредняют, рассчитывают и прокладывают на карте генеральный курс и путь судна за час. С.О. Макаров подчеркивал, что «как бы грубы приемы ни были, со счислением все же лучше, чем без счисления, и, войдя в лед, надо заставлять себя вести пятиминутные записи, иначе можно совершенно потерять уверенность в знании своего места».

Использование РЛС по методу привязки позволяет полностью отказаться от счисления и существенно повысить точность судовождения. Имея исходную точку и наблюдая по РЛС ориентир P_1 (айсберг, приметную льдину, торос и т.п.), наносят положение ориентира на карту и при любом маневрировании используют его для определения места судна в любой момент времени. До исчезновения P_1 на карту наносят следующий ориентир и т.д.

Следует, однако, иметь в виду, что каждая последующая привязка увеличивает СКП наблюдений [см. формулы (19.35)...(19.37)], дополнительные погрешности вносит неучтенный дрейф используемых ориентиров.

Требуемая частота навигационных наблюдений зависит от условий плавания. В прибрежном плавании необходимо определять место судна через 20...30 мин, а в наиболее сложной обстановке – через 5...10 мин.

Основным методом навигационных наблюдений в прибрежном плавании является радиолокационный метод, позволяющий определять место судна без отрыва от наблюдения за обстановкой. Однако из-за берегового припая льда, гряды торосов, окаймляющих берег и повторяющих очертания береговой черты, затрудняется опознавание ориентиров, возможны большие ошибки объекта, приводящие к ошибкам навигационных наблюдений и навигационным авариям. Необходимо на маяках и других ориентирах, используемых на ледовых трассах, устанавливать радиолокационные маяки-ответчики.

Особенно тщательно необходимо контролировать местоположение и движение судна при плавании на малых глубинах в прибрежной полынье.

Применение визуальных методов навигационных определений в полярных районах затруднено из-за частых туманов и ограниченной видимости. Характерные черты берега обычно маскируются снегом и льдом; создается ландшафт, монотонно однообразный на протяжении десятков и сотен миль. Снег покрывает сушу и покрытую льдом воду совершенно одинаково, поэтому береговую линию бывает трудно различить. Нередко небо, сушу, горизонт, лед и все объекты невозможно отличить друг от друга вследствие особого полярного явления – «выбеливания». Другое атмосферное явление в полярных районах – «многократное отражение» – вызывает настолько большие искажения, что горизонт и все объекты (в том числе и на береговой черте) представляются значительно смещенными, и судовождение с ориентировкой по элементам берега вообще становится опасным. Кроме того, визуальные навигационные определения требуют выхода судоводителя на открытое крыло мостика для работы с пеленгатором.

При ледовом плавании широко используются радионавигационные методы с учетом технических характеристик и ограничения РНС (см. гл. 16 и 16).

Прокладка ведется на путевых навигационных картах в нормальной проекции Меркатора, а в широтах более 83...85° – в поперечной проекции Меркатора либо в стереографической проекции.

Тактика ледового плавания, плавание судна во льдах под проводкой ледокола рассматриваются в специальных руководствах [3].

21.3. Навигационные особенности плавания при поисково-спасательных операциях

Считается общепринятой нормой для моряков и прямой обязанностью капитанов морских судов принимать все возможные меры для оказания помощи в тех случаях, когда люди (или даже один человек) терпят бедствие в море. Эти обязанности излагаются в Правиле V/10 СОЛАС-74, а вопросы организации поисково-спасательных операций – в специальных руководствах ИМО IMCOSAR и MERSAR [13]. В зависимости от сложившейся ситуации судно может осуществлять поиск людей, терпящих бедствие, либо самостоятельно, либо по указаниям координатора поиска.

Эффективность поиска зависит от правильного определения границ района, в котором находится терпящее бедствие судно (летательный аппарат) или люди с потерпевшего аварии объекта. Основа для расчета поиска – погрешности определения координат.

Если будет обнаружена работа аварийного радиобуя или судовой радиостанции, то поисково-спасательные средства будут выходить непосредственно в точку его нахождения по ведущему радиопеленгу.

Еще проще решается задача, если аварийный объект наблюдается визуально или на экране РЛС.

Однако в большинстве случаев спасатели располагают лишь координатами места бедствия $A_0(\varphi_0, \lambda_0)$ известными с СКП M_0 , зависящей от способа определения места бедствия (погрешность выставления координат места бедствия в АПСТБ, СКП определения координат на самом бедствующем судне перед передачей сигнала бедствия, СКП системы КОСПАС–САРСАТ и др.). Для системы КОСПАС–САРСАТ на частоте $f = 121,5$ МГц $\widehat{M}_0 = 9$ миль, а на $f = 406$ МГц – $\widehat{M}_0 = 2,7$ мили с вероятностью $P = 90\%$.

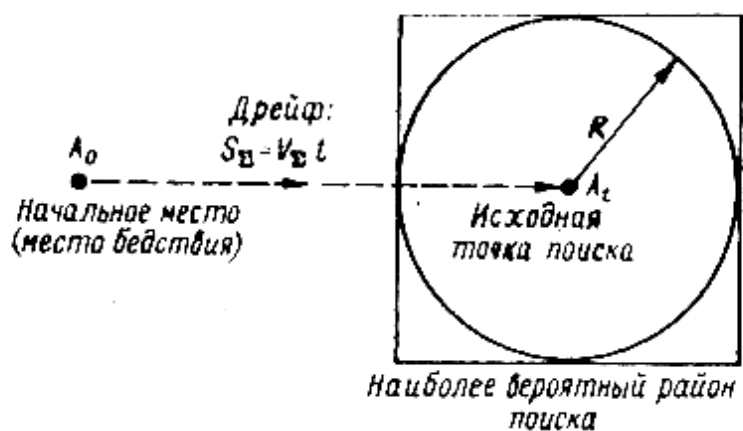


Рис. 21.1

Если место бедствия определяется по радиопеленгам с двух других судов, то

$$M_0 = \sqrt{\left(\frac{m_{II}}{57,3}\right)(D_1^2 + D_2^2) + M_{01}^2 + M_{02}^2} \quad (21.2)$$

где m_{II} – СКП пеленгования, град; D_1, D_2 – расстояния от обоих судов до места бедствия, мили; M_{01}, M_{02} – СКП текущего места каждого судна в момент пеленгования, мили.

Располагая координатами места бедствия D , необходимо определить исходную точку поиска – наиболее вероятное местонахождение объекта поиска A_t в заданный момент времени с учетом предполагаемого воздействия дрейфа с тех пор, как установлено первоначальное место бедствия (рис. 21.1). Под термином дрейф в данном случае понимается результат общего воздействия ветра, течения и/или прилива, которые могут вызвать изменения местонахождения объекта поиска.

Скорость ветрового дрейфа судна с застопоренными машинами или спасательной шлюпки, уз,

$$V_{др} = K_v W \quad (21.3)$$

где W – скорость ветра в районе бедствия, м/с; K_v – коэффициент скорости дрейфа, зависящий от парусности судна и соотношения надводной и подводной боковой поверхности, для большинства судов

$$K_v = 0,120 \dots 0,145 \text{ уз с/м} \quad (21.4)$$

Наиболее вероятное направление дрейфа принимается совпадающим с направлением ветра, хотя фактически оно может отличаться на $25 \dots 40^\circ$. Средняя скорость дрейфа укомплектованного людьми спасательного плота показана на рис. 21.2: без плавучего якоря кривая – 1, с усовершенствованной системой баллаستировки – 2, с плавучим якорем – 3, с плавучим якорем, но без тента – 4.

Другой составляющей влияния ветра является ветровое течение, время развития которого (6...20 ч) зависит от глубины моря, а скорость, уз, оценивается приближенной формулой

$$V_{BT} = \frac{A_v}{\sqrt{\sin \varphi W}}$$

где φ – широта места; A_v – ветровой коэффициент: $A_v = 0,025$ при $W \leq 7$ м/с и $A_v = 0,045$ при $W = 8 \dots 20$ м/с.

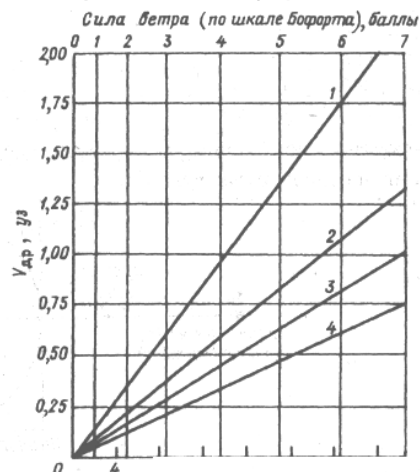


Рис. 21.2

Направление ветрового течения отклоняется от линии действия ветра вправо – в северном полушарии и влево – в южном полушарии на угол от 45° в открытом море до 20...30° вблизи берега.

При развитом волнении на малые суда (шлюпки) действует также «волновое течение» (табл. 21.3).

Наконец объект поиска сносится существующими в данном районе постоянными или приливо-отливными течениями V_T . Суммарная скорость дрейфа объекта поиска V_Σ находится после геометрического сложения всех имеющихся составляющих:

$$\bar{V}_\Sigma = \bar{V}_{ДР} + \bar{V}_{ВТ} + \bar{V}_{ВОЛН} + \bar{V}_T; \bar{S}_\Sigma = \bar{V}_\Sigma t$$

Отложив от A_0 вектор $\bar{S}_\Sigma$, получим исходную точку поиска A_t СКП оценки суммарного дрейфа объекта поиска, мили,

$$M_{ДР} = t \sqrt{m_v^2 + \left(\frac{m_\tau V_\Sigma}{57.3} \right)^2}$$

где t – время с момента определения координат A до выхода поискового судна в исходную точку поиска, ч; m_v, m_τ – СКП оценки скорости, уз, и направления, град, вектора суммарного дрейфа объекта поиска.

Отсюда радиус вероятного района поиска, мили,

$$R = \sqrt{M_0^2 + M_{ДР}^2}$$

Таблица 21.3

Осадка -----	Высота волны, м			
	2	4	6	8
	Скорость «волнового течения», уз			
0	0,4	0,5	0,6	0,8
2	0,2	0,4	0,5	0,7
5	0,1	0,2	0,4	0,5

Таким образом, размеры района поиска зависят от точности определения координат места бедствия, времени с момента их последнего определения, степени воздействия гидрометеорологических факторов и точности их учета при расчете исходной точки поиска. Необходимо использовать любые технические возможности для уточнения координат, определения направления и скорости дрейфа объекта поиска с тем, чтобы сузить границы района поиска. При отсутствии более достоверной информации *MERSAR* рекомендует принимать $R = 10$ миль и построить квадрат по касательным к этой окружности (см. рис. 21.1). Этот район можно расширять по мере прибытия поисковых средств. При координируемом поиске исходная точка и район поиска указываются координатором поиска.

С течением времени район поиска расширяется и смещается по направлению вероятного дрейфа. В зависимости от обстоятельств и имеющейся информации может оказаться целесообразным расширение района поиска в каком-либо одном направлении (секторе).

По прибытии в исходную точку необходимо без задержки начать поиск, используя соответствующую схему поиска (рис. 21.3). В руководстве *MERSAR* рекомендуются следующие стандартные схемы поиска: поиск одним судном по расширяющемуся квадрату (рис. 21.3,а) и по секторам (рис. 21.3,б), поиск параллельными галсами двумя, тремя, четырьмя судами (рис. 21.3,в, г, д соответственно), совместный поиск судном и летательным аппаратом (рис. 21.3,е). Цифрами на рисунке обозначены исходная точка поиска 1, направление дрейфа 2, подходной курс 3. При поиске принимаются во внимание такие факторы, как вид объекта поиска, метеоусловия, состояние моря, время суток, положение солнца, способности наблюдателей, применяемые технические средства и пр. Показанные на рис. 21.3 схемы базируются на визуальном поиске, однако применимы и в других ситуациях. Выбор той или иной схемы определяется простотой ее осуществления и числом судов, участвующих в поисковой операции.

Дальность обнаружения объекта поиска зависит от характера самого объекта, подаваемых им сигналов (ракета, фальшфейер, дым, передатчик автоматического радиобуя, судовая радиостанция и т.д.), применяемых технических средств обнаружения (визуальный поиск, бинокль, радиолокатор, радиопеленгатор, аппаратура ночного видения), физические условия наблюдения. Различают зоны вероятного и достоверного обнаружения (рис. 21.4). Зона вероятного обнаружения (зона В) определяется максимально возможной дальностью обнаружения D_{MAX} соответствующей наиболее благоприятному сочетанию физических условий наблюдения; в пределах этой зоны обнаружение объекта может произойти либо не произойти.

Зона достоверного обнаружения (зона Г) соответствует такой дальности D_{MIN} , при которой вероятность обнаружения $P_{ОБН} \approx 1$, т.е. возможность того, что объект поиска, оказавшийся в этой зоне, не будет обнаружен, практически исключена. С учетом этого выбирается расстояние между поисковыми галсами. Обычно дальность визуального обнаружения $D_{ОБН}$ меньше дальности метеорологической видимости. Зависимость $D_{ОБН}$ мили, от времени суток (при ясной погоде, $e=6\text{м}$ с использованием бинокля) показана ниже:

Оценочная величина дальности радиолокационного обнаружения D_{PO} , мили, объекта для нормальных атмосферных условий и при высоте антенны 30 м показана ниже:

Объект	D_{PO} мили
Судно – 10 тыс. бр. рег. т.....	18
Судно – 1000 бр. рег. т.....	8,4
Судно – 200 бр. рег. т.....	7,7
Шлюпка длиной 9 м.....	2,7

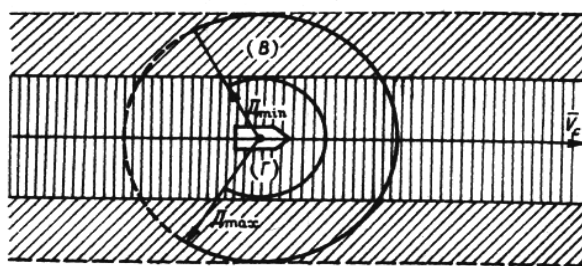


Рис. 21.4

Для высоты антенны 15 м $D_{обн}$ объекта указана в гл. 17.

Планирование поиска должно включать оценку дальности обнаружения, причем это должно делаться со значительным запасом, так как если дальность обнаружения завышена, то расстояние между галсами, выбранное на основании такой оценки, может оказаться слишком большим и не обеспечит обнаружения объекта

В начале поиска рекомендуется использовать расстояния между галсами, приведенные в *MERSAR* (табл. 21.4), принимая во внимание вид объекта поиска и метеоусловия. Расстояние между галсами может быть несколько уменьшено для увеличения вероятности обнаружения объекта поиска или несколько увеличено для просмотра большего района поиска в заданное время.

При радиолокационном поиске суда обычно движутся свободным строем фронта, поддерживая интервалы в пределах полуторакратной дальности радиолокационного обнаружения.

Все участвующие в поиске суда должны стремиться к точному соблюдению установленных интервалов.

Чтобы обеспечить скоординированный поиск методом параллельных курсов, все суда должны двигаться с одинаковой скоростью (обычно максимальная скорость самого тихоходного судна, участвующего в поиске). При ухудшении видимости скорость поиска обычно снижается, интервалы между судами сокращаются, поэтому район поиска может быть ограничен по дайне и/или ширине с учетом вероятного направления и скорости дрейфа.

Таблица 21.4

Объект поиска	Метеорологическая видимость,				
	3	5	10	15	20
	Расстояние между продольными галсами поиска, мили				
Человек в воде	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7
Спасательный плот					
вместимостью, чел.:					
4	2,3	3,2	4,2	4,9	5,5
6	2,5	3,6	5,0	6,2	6,9
15	2,6	4,0	5,1	6,4	7,3
25	2,7	4,2	5,2	6,5	7,5
Шлюпка длиной, м:					
5	1,1	1,4	1,9	2,1	2,3
7	2,0	2,9	4,3	5,2	5,8
12	2,8	4,5	7,6	9,4	11,6
42	3,2	5,6	10,7	14,7	18,1

Судоводители должны обеспечить движение поисковых судов строго по намеченным галсам, используя наиболее точные, надежные, оперативные методы контроля за местоположением и движением судна.

Поисковые галсы выдерживаются наиболее точно, если возможно использование ведущих линий положения: гиперболы РНС при «ручных» ПИ, параллели и меридианы при АПИ, «параллельное индексирование» при радиолокационных методах, электронные линии и электронные карты при использовании САРП и т.д. При радиолокационных методах одно из судов, поставленное на якорь, может служить в качестве ориентира для обеспечения координирования других поисковых судов.

Если ведется поиск человека, упавшего за борт, то судно разворачивается на обратный курс и с максимальной точностью придерживается своего прежнего пути. В районе вероятного нахождения человека поиск организуется на указанных выше принципах.

Поиск следует продолжать до тех пор, пока существует надежда на спасение потерпевших бедствие либо пока не будет получено официальное распоряжение о прекращении поиска.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.	3
Раздел I. ОСНОВЫ НАВИГАЦИИ	5
Глава 1. Основные понятия навигации	6
1.1. Фигура и модели Земли.....	6
1.2. Системы координат.	9
1.3. Разность широт и разность долгот	13
1.4. Счет направлений в море относительно истинного меридиана и диаметральной плоскости судна.....	14
1.5. Географическая дальность видимости горизонта	17
1.6. Географическая дальность видимости предметов	19
1.7. Влияние гидрометеорологических факторов на дальность видимости горизонта, предметов и огней	21
Глава 2. Использование компасов для определения направлений в море. Определение скорости и пройденного расстояния	25
2.1. Основные сведения о земном магнетизме	25
2.2. Использование магнитного компаса.....	28
2.3. Использование гироскопических курсоуказателей.....	30
2.4. Определение поправок компасов и контроль за их работой в море.....	32
2.5. Морские единицы длины и скорости.	36
2.6. Скорость судна и принципы ее измерения.	38
2.7. Определение относительной скорости и расстояния	40
2.8. Определение скорости и расстояния с помощью абсолютного лага	48
Раздел II. КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЕКЦИИ И МОРСКИЕ КАРТЫ.....	50
Глава 3. Меркаторская проекция	51
3.1. Локсодромия.....	51
3.2. Требования, предъявляемые к морской навигационной карте	55
3.3. Теория меркаторской проекции	56
3.4. Построение меркаторской карты	62
Глава 4. Другие виды картографических проекций, применяемых в навигации	64
4.1. Перспективные проекции. Общие сведения.	64
4.2. Гномоническая проекция	65
4.3. Стереографическая проекция.....	66
4.4. Поперечная цилиндрическая проекция.....	69

Глава 5. Морские навигационные карты	72
5.1. Классификация морских карт.....	72
5.2. Степень доверия к морским навигационным картам	74
5.3. Использование для судовождения карт других стран.....	76
Раздел III. СЧИСЛЕНИЕ ПУТИ СУДНА.	82
Глава 6. Графическое счисление (прокладка)	83
6.1. Элементы счисления и их характеристика. Прокладка при отсутствии дрейфа и течения	83
6.2. Циркуляция судна. Учет циркуляции судна при прокладке	86
6.3. Дрейф судна. Учет дрейфа при прокладке.....	91
6.4. Учет постоянного течения при прокладке	99
6.5. Учет приливо-отливного течения	105
6.6. Совместный учет дрейфа и течения	107
6.7. Навигационные методы определения пути судна	109
6.8. Точность графического счисления.	111
Глава 7. Аналитическое счисление	116
7.1. Основные формулы аналитического счисления.....	116
7.2. Использование аналитического счисления в судовождении.....	120
7.3. Точность аналитического счисления.....	123
Раздел IV. ВИЗУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ	
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА СУДНА В МОРЕ	125
Глава 8. Изолинии и линии положения.	126
8.1. Общие понятия	126
8.2. Изолинии и линии положения	126
8.3. Градиенты навигационных параметров. Смещение изолиний	128
8.4. Требования к точности навигационных наблюдений	131
8.5. Оценка точности навигационных наблюдений	133
Глава 9. Определение места судна по пеленгам и горизонтальным углам.	138
9.1. Определение места по двум пеленгам.....	138
9.2. Определение места по трем пеленгам.....	142
9.3. Определение места судна по двум горизонтальным углам.....	147
9.4. Требования к определению поправки компаса.	150
Глава 10. Определение места судна по расстояниям.	152
10.1. Определение расстояний в море	152
10.2. Определение места судна по измеренным расстояниям.....	156

Глава 11. Определение места судна по разновременным линиям положения.....	159
11.1. Определение места судна по крьюйс-пеленгу	159
11.2. Определение места судне по крьюйс-расстоянию	162
11.3. Методы повышения точности определения места судна по разновременным линиям положения	162
11.4. Общее графическое решение задачи определения места судна по разновременным линиям положения	166
Глава 12. Комбинированные и частные случаи определения места судна	168
12.1. Определение места судна по пеленгу и расстоянию.....	168
12.2. Другие комбинированные способы определения места судна	169
12.3. Использование одной линии положения. Связь между счислением и обсервацией.....	171
Раздел V. ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В НАВИГАЦИИ.	173
Глава 13. Определение места судна по радиопеленгам.	174
13.1. Общие понятия.....	174
13.2. Радиокурсовой угол. Истинный радиопеленг.	176
13.3. Определение радиодевиации	177
13.4. Изолинии при радиопеленговании	178
13.5. Ортодромическая поправка	179
13.6. Способы прокладки радиопеленгов на морских навигационных картах	183
13.7. Точность радиопеленгования и определения места по радиопеленгам	184
Глава 14. Использование радиомаяков направленного действия.	187
14.1. Принцип действия секторного радиомаяка	187
14.2. Основные эксплуатационные данные секторных радиомаяков	190
14.3. Способы получения места судна	192
14.4. Использование других радиомаяков направленного действия.....	193
Глава 15. Использование гиперболических радионавигационных систем	195
15.1. Общая характеристика гиперболических РНС	195
15.2. Определение места с помощью фазовой РНС средней дальности действия.....	197
15.3. Определение маневренных элементов судна с помощью фазовых РНС.....	207
15.4. Определение места с помощью импульсно-фазовых РНС.....	208
15.5. Определение места с помощью сверхдлинноволновой фазовой РНС	219

Глава 16. Определение места судна	
с помощью навигационных спутников	228
16.1. Основные закономерности движения ИСЗ.	228
16.2. Орбиты ИСЗ и их особенности	230
16.3. Методы определения места судна	
с помощью навигационных спутников	234
16.4. Использование спутниковой РНС доплеровского типа	241
16.5. Эксплуатационные характеристики спутниковой РНС	245
16.6. Дополнительные навигационные задачи.....	247
16.7. Использование спутниковых РНС на средневисоких орбитах	249
16.8. Использование электронных карт.....	257
Глава 17. Использование судовых	
радиолокационных станций в навигации	266
17.1. Виды индикаций изображения на экране РЛС	
и особенности их использования.....	266
17.2. Основные эксплуатационные данные РЛС	271
17.3. Чтение радиолокационного изображения.	282
17.4. Определение места судна с помощью РЛС.....	289
17.5. Использование средств автоматической	
радиолокационной прокладки в навигации	294
17.6. Непрерывный контроль за движением судна	
при плавании в стесненных водах с помощью РЛС	298
Раздел VI. МЕТОДЫ НАВИГАЦИИ	
В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЛАВАНИЯ.	304
Глава 18. Общая характеристика методов навигации.	305
18.1. Безопасная глубина, ее оценка и контроль	305
18.2. Безопасная полоса движения судна.	313
18.3. Методы контроля за местоположением и движением судна	318
18.4. Общие задачи навигационного обеспечения	330
Глава 19. Плавание в открытом море	338
19.1. Выбор и расчет наивыгоднейшего пути.....	338
19.2. Навигационное обеспечение плавания в открытом море	349
19.3. Навигационное обеспечение плавания при подходе к	
побережью	353
19.4. Навигационное обеспечение прибрежного плавания.....	365
Глава 20. Плавание в стесненных водах	
и районах регулирования движения судов.	372
20.1. Общая характеристика условий плавания в стесненных водах.....	372
20.2. Транспортный поток судов и плавание в судопотоке.....	379
20.3. Плавание в районах регулирования движения судов.	389
20.4. Навигационное обеспечение плавания в стесненных водах.	396
20.5. Навигационные особенности плавания по внутренним	
водным путям.....	414

Глава 21. Навигационное обеспечение плавания	
при особых обстоятельствах	422
21.1. Навигационные особенности плавания при ограниченной видимости	422
21.2. Навигационные особенности ледового плавания.	427
21.3. Навигационные особенности плавания при поисково-спасательных операциях.....	436
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	449

АВТОРЫ

Баранов Юрий Константинович (1924 – 1996 гг.), кандидат технических наук, профессор, декан Судоводительского факультета Государственной Морской Академии имени адмирала С. О. Макарова, штурман дальнего плавания.

Гаврюк Михаил Иванович (1928 – 1996 гг.) кандидат технических наук, профессор, начальник кафедры Судовождения Государственной Морской Академии имени адмирала С. О. Макарова, капитан дальнего плавания.

Песков Юрий Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры Судовождения Новороссийской Государственной Морской Академии.

Логиновский Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, начальник кафедры Судовождения Государственной Морской Академии имени адмирала С. О. Макарова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербах Н. В. Определение скорости судна и поправки лага. М.: Транспорт, 1988. 94 с.
2. Баранов Ю. К. Использование радиотехнических средств в морской навигации. М.: Транспорт, 1988. 208 с.
3. Безопасность плавания во льдах / Под ред. А.П.Смирнова. М.: Транспорт, 1993. 335 с.
4. Груздев Н. М., Колчин Г. А., Леонидов Р. Л. Навигация. М.: Воениздат, 1980. 382 с.
5. Лесков М. М., Баранов Ю. К., Гаврюк М.И. Навигация. М.: Транспорт, 1986. 360 с.
6. Математические основы судовождения / Кожухов В. П., Жухлин А.М., Кондрашихин В. Т. и др. М.: Транспорт, 1993. 200 с.
7. Песков Ю. А. Использование РЛС в судовождении. М.: Транспорт, 1986. 144 с. Практическое кораблевождение / Под ред. А.П.Михайловского. КнД.Л.: ГУНиО МО, 1988. 896 с.
8. РШС-89. М.: В/О «Мортехинформреклама», 1990. 64 с.
9. Управление судном / Под ред. В. И. Снопкова. М.: Транспорт, 1991. 359 с. Яскевич А. П., Зурабов Ю. Г. Комментарии к МППСС-72. М.: Транспорт, 1990. 479 с.
10. Общие положения об установлении путей движения судов (N 9036). Л.: ГУНиО МО, 1981. 25 с.
11. Руководство для торговых судов по поиску и спасанию (*MERSAR*). М.: В/О «Мортехинформреклама», 1982. 135 с.