

Демиденко П.П.

**Судовые
навигационные
радиолокационные
станции**

(учебное пособие)

Одесса – 2004

УДК 621.396.967:629.5

Демиденко П.П. «Судовые навигационные радиолокационные станции».

Учебное пособие. Одесса, 2004, 163 стр.

Предназначено для курсантов стационарной формы обучения судоводительской, радиотехнической специальностей и студентов-заочников, изучающих теорию и принцип построения судовых навигационных радиолокационных станций.

Рассмотрено и одобрено на Ученом совете факультета морского судовождения Одесской национальной морской академии, протокол №4 от 28 января 2004 года.

ISBN 966-8145-04

ЦЕНТР ПОДГОТОВКИ И АТТЕСТАЦИИ ПЛАВСОСТАВА
ул. Пастера, 16, г. Одесса, Украина, 65026
Телефон: +380(482) 23-83-59
Факс: +380(482) 23-01-96

Введение

Повышения эффективности работы морского флота ставит соответствующие требования к радиолокационным и радионавигационным приборам, установленным на мостике судна, которые должны обеспечивать надежную, качественную радиолокацию и радионавигацию, а также автоматическое управление движением судна.

Курсант должен знать радионавигационные приборы на уровне понимания теории их построения и эксплуатации; знать особенности их устройств; должен уметь грамотно эксплуатировать основное судовое радионавигационное оборудование, применяемое во время несения вахты и уметь анализировать полученную информацию.

Учебное пособие окажет помощь обучаемым в изучении дисциплины "Радионавигационные приборы и системы". Предназначено для курсантов стационарной формы обучения и студентов-заочников судоводительской специальности "Судовождение на морских путях".

1. Навигационные радиолокационные станции

Радиолокацией называется обнаружение с помощью электромагнитных колебаний различных объектов (целей), определение координат и параметров их движения.

Слово «локация» происходит от латинского слова «location» и обозначает «размещение», «расположение». Комплекс радиотехнических средств, выполняющий указанные выше задачи, называется радиолокационной станцией (РЛС), а для обеспечения безопасности мореплавания (в навигационных целях), иногда морские РЛС обозначают как навигационные РЛС – НРЛС. (Часто употребляется общее название «радиолокатор». В американской и английской литературе – radar – от слов *radio detection and ranging* – радиообнаружение и определение расстояния).

Радиолокационным объектом может быть любое физическое тело или группа тел, электрические и магнитные свойства которых (диэлектрическая и магнитная проницаемость, проводимость) отличаются от свойств среды, в которой распространяются радиоволны, излучаемые РЛС.

Радиолокационные объекты могут быть точечными и протяженными. Радиолокационное изображение на экране индикатора РЛС точечных целей (объектов) имеет одинаковые размеры и форму. А протяженного объекта – радиолокационное изображение практически повторяет в соответствующем масштабе форму и размеры этих объектов.

К точечным объектам относятся малоразмерные надводные цели, например – буй, веха с радиолокационным отражателем (или без него). Точечным объектом может быть и крупнотоннажное судно, если оно находится на большом расстоянии от РЛС.

Полезная информация о цели получается за счет поступившей в приемник РЛС радиоволны, отразившейся от цели.

В зависимости от того, каким образом поступает в приемник РЛС радиоволна от цели, существует пассивная и активная радиолокация.

РЛС пассивного действия состоит из (см. рис.1-1)



Рис.1-1. Упрощенная схема РЛС пассивного действия

высокочувствительной остронаправленной приемной антенны, приемника и индикатора.

Такого типа РЛС используется для приема сигналов, создаваемых тепловым радиоизлучением. Поэтому пассивная радиолокация называется еще и радиотеплолокацией (например, прием электромагнитных волн от звезд, Солнца, Луны и других тел. На этом принципе работают так называемые радиосекстанты).

Активная радиолокация может быть с пассивным ответом (первичная радиолокация) или с активным ответом (вторичная радиолокация).

РЛС активного действия с пассивным ответом содержит (см. рис.1-2) передатчик, который с помощью антенны излучает в пространство радиоволны. Если на пути этой радиоволны окажется объект, то радиоволна отразится, и часть ее попадает в антенну РЛС, откуда она поступает в приемник и с него – в индикатор.

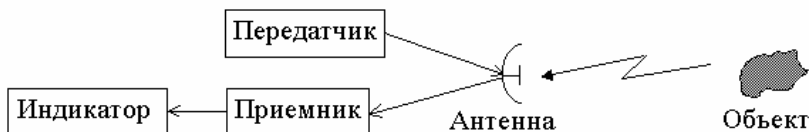


Рис.1-2. Упрощенная схема РЛС активного действия с пассивным ответом

Активная РЛС с активным ответом отличается от активной РЛС с пассивным ответом наличием на объекте или на заранее обусловленном пункте радиолокационного передатчика (ответчика), который отвечает на сигналы «запрашивающей» РЛС.

В зависимости от структуры излучаемых (зондирующих) радиолокационных сигналов различают РЛС непрерывного излучения колебаний и импульсные. (На судах гражданского флота, в подавляющем большинстве, применяются импульсные НРЛС).

1.1. Импульсная НРЛС. Принцип ее построения

Импульсная НРЛС периодически излучает через антенный переключатель с помощью антенны кратковременные радиоимпульсы (как правило, сверхвысокочастотные – СВЧ колебания), а в промежутке между излучениями этих импульсов отраженные СВЧ колебания попадают на ту же антенну, затем через антенный переключатель – в приемник. Усиленные и обработанные специальным образом отраженные импульсы воспроизводятся на индикаторе.

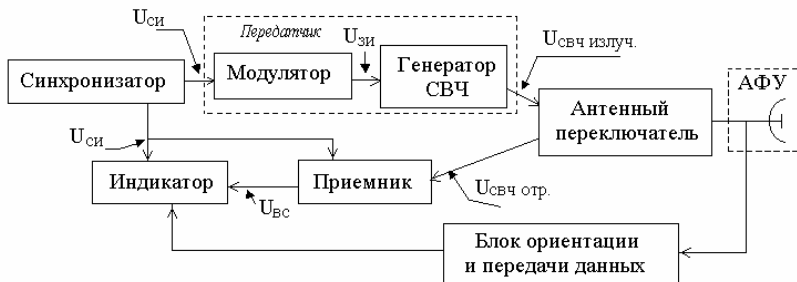


Рис.1-3. Упрощенная структурная схема импульсной НРЛС

Расстояние до цели D_u определяется уравнением $D_u = \frac{V_p \cdot t_D}{2}$,

где: V_p - скорость распространения электромагнитной волны (СВЧ колебаний) в свободном пространстве,

t_D - время распространения кратковременных радиоимпульсов от антенны до цели и обратно от нее к антенне. (При расчетах V_p

принимают равной скорости света $C = 3 \cdot 10^8$ м/с, то есть приведенная выше формула обычно записывается как

$$D_u = \frac{C \cdot t_D}{2}, \quad (1)$$

а направление на цель определяется угловым положением антенны (ее диаграммы направленности) относительно выбранного направления или плоскости.

Основные временные соотношения при работе импульсной НРЛС приведены на рис.1-4.

Синхронизатор вырабатывает последовательность кратковременных видеоимпульсов (так называемых синхронизирующих импульсов $U_{си}$ – см. рисунки 1-3, 1-4) для управления работой передатчика, приемника и индикатора НРЛС. Синхроимпульсы синхронизируют (согласовывают во времени) совместную работу указанных выше устройств НРЛС.

Передатчик НРЛС состоит из двух основных блоков – модулятора и генератора СВЧ колебаний, в качестве которого используется магнетрон.

Модулятор, под воздействием синхроимпульсов (рис.1-4, эпюра «а»), в зависимости от шкал дальности, формирует мощные запускающие импульсы (эпюра «б») определенной длительности (в современных НРЛС $\tau_{зи} = 0,07 \dots 1,0$ мкс), под воздействием которых генератор СВЧ колебаний генерирует мощные короткие радиоимпульсы (эпюра «в»).

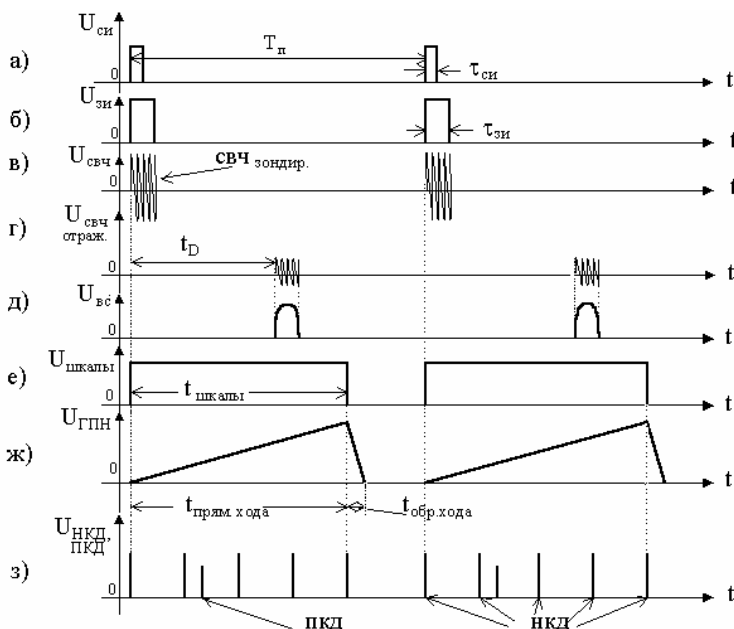


Рис.1- 4. Основные временные соотношения работы импульсной НРЛС

Антенный переключатель (АП) обеспечивает коммутацию одной антенны поочередно к передатчику и приемнику; защищает (блокирует) входные цепи приемника от мощных зондирующих СВЧ импульсов собственного передатчика (а также соседних НРЛС); закрывает выходные цепи передатчика при приеме отраженных сигналов от целей.

Антенно-фидерное устройство (АФУ) состоит из волноводного тракта, по которому через антенный переключатель из передатчика подаются мощные СВЧ колебания в антенну, а при приеме антенной отраженных сигналов от объектов, через АП поступают в приемник. Антенны НРЛС обладают, как правило, остронаправленным излучением (приемом) СВЧ импульсов.

Приемник усиливает принятые антенной отраженные сигналы от цели, (эпюра «г»), преобразует их в видеосигналы (эпюра «д») и затем подает их в индикаторное устройство.

В индикаторе с помощью электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) полученные в приемнике видеосигналы преобразуются в видимое изображение, формируются дополнительные информационные метки – неподвижные кольца (круги) дальности – НКД, подвижный круг дальности – ПКД, отметка курса – ОК, электронный визир направления

– ЭВН и некоторые другие вспомогательные метки (в зависимости от модели НРЛС).

Из индикатора, как правило, осуществляется управление работой НРЛС и контроль ее работоспособности.

Указанные выше сигналы и метки показаны на рис.1-5.

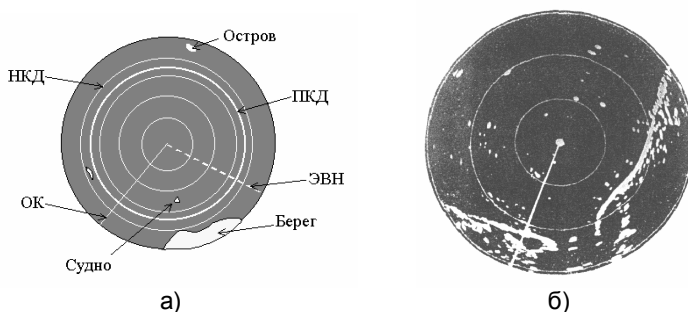


Рис.1-5. а) - условный общий вид навигационного изображения на ЭЛТ индикатора; б) - реальное изображение на ЭЛТ индикатора

Блок ориентации и передачи данных предназначен для передачи углового положения антенны в индикатор, формирования на ЭЛТ необходимой ориентации изображения и вида движения.

1.2. Радиолокационное изображение на ЭЛТ индикатора

1.2.1.Виды ориентации

Любая РЛС позволяет измерять дальности до объектов и их угловые координаты. В судовых НРЛС такими координатами являются курсовые углы (КУ) или пеленги.

Радиокурсовым углом (РКУ), определяемым на экране РЛС, называется угол, заключенный между отметкой линии курса и направлением на объект. РКУ отсчитывается от отметки линии курса, находящейся в диаметральной плоскости судна, и имеет значения 0° - 180° левого или правого борта. Направление на объект также можно определять с помощью радиолокационного пеленга (РЛП) представляющего собой угол между плоскостью географического меридиана и направлением на объект (рис. 1-6).

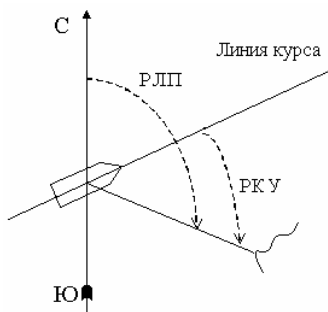


Рис.1-6. Определение РКУ и РЛУ

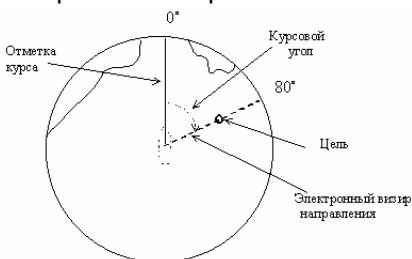
Пеленг отсчитывается по часовой

стрелке от направления на Север (в пределах 360°), которое выводится на индикатор НРЛС от гирокомпаса.

Измерение угловых координат основано на использовании направленных свойств антенны РЛС в горизонтальной плоскости, т. е. угол между линией курса и осью диаграммы излучения антенны, направленной на объект, будет курсовым углом, а угол между направлениями на Север и на объект - пеленгом.

В настоящее время в судовых НРЛС используется три вида ориентации – относительно диаметральной плоскости судна, т.н. ориентация по «КУРСУ», ориентация относительно Севера, т.н. ориентация по «СЕВЕРУ» («НОРДУ») и ориентация «КУРС СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ».

В последних двух случаях НРЛС обязательно должна быть сопряжена с гирокомпасом.



При ориентации по «КУРСУ» (см. рис.1-7) отсчет углового положения антенны осуществляется относительно диаметры судна и азимутальное направление на цель определяется курсoвым углом.

Отметка курса направлена вверх и находится на нуле отсчета неподвижной шкалы.

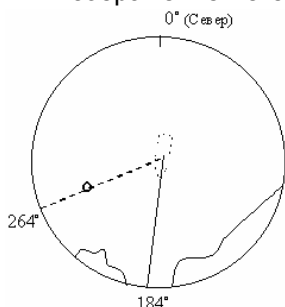
Рис.1-7.Пример радиолокационного изображения Визир направлен при ориентации по «Курсу» на цель, находящуюся на курсовом угле,

например, 80° правого борта. При изменении курса судна происходит смещение всего изображения. Отметка курса при этом остается неподвижной. Навигационное изображение на ЭЛТ при такой ориентации может быть смазанным из-за рыскания судна во время его движения, в то время как метка курса остается неподвижной. (Разновидностью ориентации по «КУРСУ» является ориентация «КУРС СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ»).

С введением в индикатор данных от гирокомпаса можно сохранить такое положение изображения, при котором северная часть компасного меридиана для изображаемой на экране области пространства будет находиться на одном и том же направлении при любом изменении курса судна.

Этот режим ориентации изображения называется стабилизацией относительно Севера или ориентацией по «СЕВЕРУ». В данном случае (см. рис.1-8) мнимая линия северной части компасного меридиана всегда будет направлена вверх.

Изображение не будет смещаться при изменении курса судна.



Изменять свое положение будет только линия отметки курса, направление которой соответствует курсу судна. Величина этого изменения зависит от угла поворота судна. В этом случае отсчет углового положения антенны НРЛС осуществляется относительно истинного меридиана («СЕВЕРА») и угловое положение цели определяется пеленгом. Изображение

ориентировано и стабилизировано

Рис.1-8. Пример радиолокационного изображения относительно Севера.

По неподвижной шкале отметка курса показывает курс судна, например, 184°. Визир направлен на ту же цель. Тогда по неподвижной шкале отсчитывается пеленг 264°.

При изменении курса судна изображение остается неподвижным, меняет положение только отметка курса судна.

Третий вид ориентации изображения «КУРС СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ» дает возможность стабилизации его относительно Севера и одновременной ориентации относительно курса. При этом линия отметки курса будет вновь направлена только вверх (см. рис.1-9), а изображение будет оставаться неподвижным. Линия отметки курса может смещаться при незначительных изменениях курса судна (в частности, при «рыскании»). (В некоторых НРЛС ориентир «Север» отображается подвижным маркером).

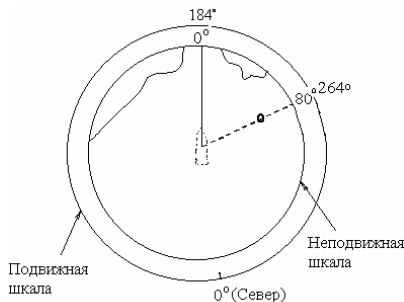


Рис.1-9. Пример радиолокационного изображения при ориентации по «Курсу стабилизированному»

1.2.2. Индикация относительного и истинного движения

В рассмотренных выше режимах индикации радиолокационного изображения судно имеет фиксированное место на экране — центр начала развертки. При этом оно считается неподвижным, а, следовательно, все окружающие объекты, изображаемые на экране, имеют видимое перемещение относительно судна, т. е. все они перемещаются с относительными скоростями по относительным

направлениям в масштабе установленного изображения. Этот режим называется режимом индикации относительно движения (ОД). Режим ОД, как правило, осуществляется при ориентации изображения относительно курса либо Севера, а также может быть одновременно ориентирован по курсу и стабилизирован по Северу.

В современных радиолокаторах используется также режим индикации истинного движения (ИД). В данном режиме центр начала развертки, принимаемый за отметку своего судна, перемещается по экрану со скоростью в направлении, соответствующими истинному курсу и скорости своего судна в масштабе изображения, стабилизированного относительно Севера. Основным достоинством данного режима является то, что все неподвижные объекты, окружающие судно, индицируются на экране как неподвижные, а отметки от подвижных объектов будут перемещаться по экрану не с относительными скоростями, как в режиме ОД, а с истинными и по истинным направлениям, соответствующим масштабу индицируемого изображения.

Для выполнения этого режима в НРЛС должен быть блок истинного движения в который поступают данные из гирокомпаса и лага. Как правило, этот режим осуществляется на шкалах до 8 миль включительно.

На рис.1-10 представлены возможные виды ориентации и индикации движения.



Рис.1-10. Возможные виды ориентации и индикации движения

Следует отметить, что согласно требованиям IMO SARП (ARPA) должны обладать двумя индикаторами, один из которых был с ориентацией на Север, а второй со стабилизацией изображения по курсу.

1.3. Эксплуатационные и технические характеристики НРЛС

1.3.1. Эксплуатационные характеристики

Эксплуатационные характеристики морских НРЛС определяют возможности их применения для решения навигационных задач как самостоятельно, так и во взаимодействии с другими радиоэлектронными средствами. К эксплуатационным характеристикам (иногда – «данным») относятся:

определяемые координаты и возможность получения траекторий движения целей;
 максимальная дальность действия – D_{max} ;
 минимальная дальность действия (обнаружения) – D_{min} ;
 разрешающая способность по определяемым координатам – по дальности – ΔD и по углу – $\Delta \alpha$;
 точность измерения определяемых координат;
 количество целей, информация о которых может обрабатываться одновременно;
 время приведения НРЛС в рабочее состояние с момента ее включения;
 помехозащищенность;
 надежность;
 работоспособность при различных механических и климатических условиях.

Максимальная дальность радиолокационного обнаружения зависит от технических параметров НРЛС, отражающих свойств объекта, состояния атмосферы, подстилающей (водной) поверхности и других причин.

Минимальная дальность действия НРЛС – то есть минимальное расстояние, при котором цель уже отображается на ЭЛТ, определяется длительностью зондирующего импульса, временем восстановления чувствительности приемника, инерционностью антенного переключателя, временем восстановления газового разрядника при переходе работы НРЛС из режима «передача» в режим «прием».

Из уравнения радиолокации: $D_u = \frac{C \cdot t_D}{2}$ следует,

что
$$t_D = \frac{2D}{C} . \quad (2)$$

Отсюда следует, что длительность зондирующего импульса τ_{zu} , согласно уравнению (2) определяет дистанцию

$$D(\tau_{3u}) = \frac{C \cdot \tau_{3u}}{2} = 150 \cdot \tau_{3u} , \quad (3)$$

где τ_{3u} [мкс].

Для коротких $\tau_{3u} \leq 1 \text{ мкс}$ принято считать, что время восстановления чувствительности приемника НРЛС $t_g \approx \tau_{3u}$.

В этом случае минимальная дальность действия определяется уравнением

$$D_{min} = 150(t_g + \tau_{3u}) \approx 300\tau_{3u} . \quad (4)$$

Уменьшаться минимальное расстояние будет и при укорочении волноводного тракта, так как при прохождении импульсов от приемоопередатчика в антенну (и обратно) потребуется меньше времени.

В современных НРЛС значение минимальной дальности лежит в пределах 20...50 метров.

Однако следует учитывать, что на реальную минимальную дальность действия НРЛС существенное влияние оказывают так называемая мертвая зона и теневые сектора. Из рис.1-11 видно, что мертвая зона – $D_{м.з.}$ зависит от высоты установки антенны НРЛС и ее ширины диаграммы направленности в вертикальной плоскости θ .

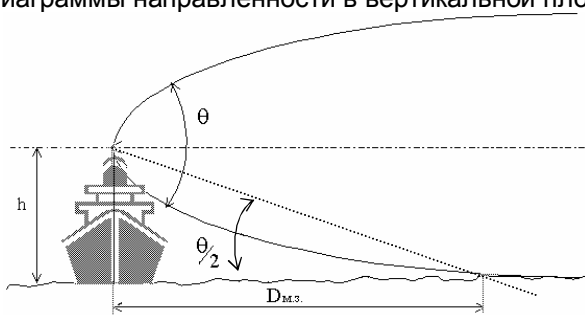


Рис.1-11. Определение мертвой зоны

На рис.1-11 обозначены: h - высота установки антенны судовой НРЛС, θ - ширина диаграммы направленности ее антенны в вертикальной плоскости.

$$D_{м.з.} = h \operatorname{ctg}(\theta/2). \quad (5)$$

Обычно вблизи индикатора НРЛС (или на нем) размещается рисунок, примерный вид которого показан на рис.1-12, с указанием мертвой зоны и теневых секторов (если они имеются). Для НРЛС с

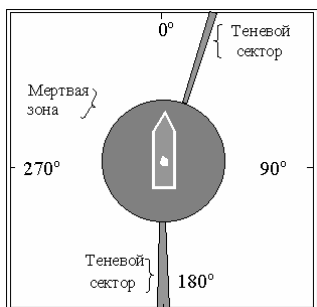


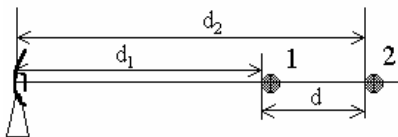
Рис.1-12. Примерное изображение наблюдаемыми целями, мертвой зоны и теневых секторов расположенными в одном направлении относительно НРЛС.

Обычно ΔD представляет собой реальную разрешающую способность по дальности. Она отличается от потенциальной $\Delta D_{nom.}$ из-за технических параметров НРЛС, то есть

$$\Delta D = \Delta D_{nom.} + \Delta D_i \quad (6)$$

где
$$D_{nom.} = \frac{c \cdot \tau_{3u}}{2}, \quad (7)$$

а ΔD_i – ухудшение разрешающей способности i -м устройством (блоком) НРЛС (например – из-за полосы пропускания приемника, характеристики ЭЛТ индикатора).



Условием разрешающей способности по дальности является выполнение соотношения $d \gg \Delta D$. Из рис.1-13 следует, что

Рис.1-13.
$$d = d_2 - d_1 = \frac{c \cdot t_2}{2} - \frac{c \cdot t_1}{2} = \frac{c}{2} (t_2 - t_1) = \frac{\Delta t \cdot c}{2}$$

Для раздельного приема сигналов от 1-й и 2-й цели необходимо, чтобы расстояние между ними d было больше ΔD , то есть $d \gg \Delta D$ или $\Delta t \gg \tau_{3u}$.

Часто разрешающую способность по дальности связывают с полосой пропускания приемника. Обычно, для идеальных прямоугольных импульсов $\tau_{3u} = \frac{1}{\Delta f}$, где Δf - эффективная полоса пропускания приемника НРЛС. Однако, из-за того, что в реальных

условиях зондирующий импульс носит форму гауссовой кривой,

$$\tau_{3u} = \frac{1,2}{\Delta f}.$$

$$\text{Отсюда} - \Delta D = \frac{c \cdot \tau_{3u}}{2} = \frac{c \cdot 0,6}{\Delta f}. \quad (8)$$

Разрешающая способность по дальности, определяемая уравнением (8) является потенциальной. На практике же разрешающая способность по дальности хуже из-за характеристики ЭЛТ индикатора, то есть из-за собственной разрешающей способности самой ЭЛТ $\Delta D_{инд.}$, которая определяется уравнением

$$\Delta D_{инд.} = d_n \cdot M, \quad (9)$$

где d_n – диаметр электронного пятна ЭЛТ,

M – масштаб шкалы дальности индикатора.

(Обычно $M = D_{max}/l$, где D_{max} – максимальное расстояние до цели, l – длина развертка ЭЛТ).

Поэтому реальная разрешающая способность НРЛС по дальности определяется уравнением

$$\Delta D_p = \Delta D + \Delta D_{инд} = \frac{c \cdot \tau_{3u}}{2} + d_n \cdot (D_{max}/l). \quad (10)$$

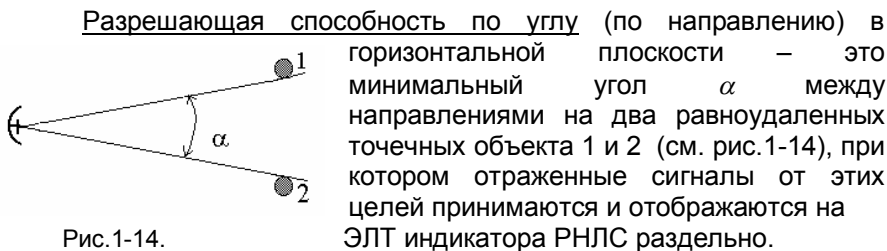


Рис.1-14.

Существует понятие реальной разрешающей способности α_p . Обычно она хуже потенциальной разрешающей способности α_0 , которая приблизительно равна ширине диаграммы направленности антенны НРЛС в горизонтальной плоскости, т.е. $\alpha_0 \approx \alpha_{гор}$, где $\alpha_{гор}$ – ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости на уровне 0,5 мощности излучения. (Существует формула, по которой можно приблизительно определить

$\alpha_{гор}$ (в градусах). Она выглядит так: $\alpha_{гор} \approx \frac{\lambda}{l_a}$. В этом уравнении λ –

длина волны передатчика НРЛС (в см), l_a – линейный размер антенны (в метрах).

На ухудшение разрешающей способности оказывает влияние и характеристика ЭЛТ индикатора - $\alpha_{инд}$. $\alpha_{инд}$ определяется выражением

$$\alpha_{инд} = 57,3 (d_n/r),$$

где d_n – диаметр яркостного пятна на экране ЭЛТ, образованного сфокусированным лучем ЭЛТ;

r – расстояние от центра развертки до цели.

Таким образом, $\alpha_p = \alpha_o + \alpha_{инд}$. (11)

Из уравнения (11) следует, что для того, чтобы улучшить разрешающую способность по углу (направлению), необходимо уменьшать длину волны λ , увеличивать линейный размер антенны l_a , уменьшать d_n – диаметр яркостного пятна экрана ЭЛТ и увеличивать диаметр ЭЛТ.

Разрешающая площадка НРЛС - S_p .

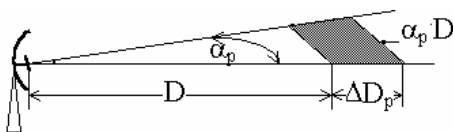


Рис.1-15.

Зная реальные разрешающие способности НРЛС по дальности и по углу, значение разрешающей площадки определяется как (см. рис.1-15):

$$S_p = \alpha_p \cdot D \cdot \Delta D_p, \quad (12)$$

где $\alpha_p \cdot D$ – ширина разрешающей площадки;

ΔD_p – длина разрешающей площадки.

Аналогично разрешающей площадке НРЛС определяется разрешающий объем НРЛС - V_p . В этом случае учитывается

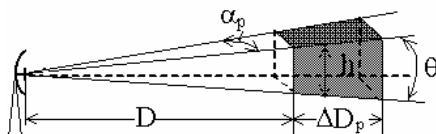


Рис.1-16.

«высота» объема h , определяемая дистанцией D и шириной диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости θ (см. рис.1-16).

Из рис.16 следует, что $h = 2D \cdot \text{tg}(\theta/2)$,

тогда $V_p = S_p \cdot h$.

Отсюда находим:

$$V_p = \alpha_p \cdot D \cdot \Delta D_p \cdot h = \alpha_p \cdot D^2 \cdot c \tau_{zu} \text{tg}(\theta/2). \quad (13)$$

Из уравнений (12), (13) следует, что если размеры цели меньше разрешающей площадки S_p (или разрешающего объема V_p), то цель считается точечной.

Реальная разрешающая способность современных НРЛС по дальности на шкалах 1-2 мили – не хуже 15-25 м, а по направлению – $0,8^\circ$ - $1,5^\circ$.

Точность измерения расстояния до цели определяется среднеквадратичной погрешностью (СКП) - δ . Зависит, в основном, длительностью зондирующего импульса и уровнем шума приемника.

На точность измерения расстояния оказывают влияния внутренние и внешние факторы.

К внутренним факторам, определяющим СКП, относятся:

δ_i , где $i = 1, 2, \dots, n$, СКП в i -м узле НРЛС;

δ_n - потенциальная СКП измерения дальности, определяемая

уравнением $\delta_n = \frac{\Delta D}{\sqrt{\pi q}} = \frac{c \tau_{3u}}{2\sqrt{\pi q}}$. (В этом уравнении q - отношение

энергии отраженного сигнала от цели к энергии шума приемника на его выходе – для сигналов гауссовой формы).

К внешним факторам, определяющим СКП, относятся:

δ_p - СКП распространения радиоволн, связанная с условиями их распространения;

δ_o - СКП, обусловленная флуктуацией кажущегося центра отражения.

Таким образом, суммарная СКП измерения расстояния будет определяться уравнением:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 + \delta_n^2 + \delta_p^2 + \delta_o^2}. \quad (14)$$

Обычно максимальная δ на шкалах 1-2 мили в современных НРЛС составляет около 40-50 м, а на остальных шкалах – около 1% установленной шкалы дальности.

Точность измерения направления φ также зависит от внутренних и внешних факторов.

Внутренняя (потенциальная) погрешность φ_n зависит от ширины диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости и от соотношения сигнал/шум на выходе приемника, то есть

$$\varphi_n = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi q}}. \quad (15)$$

К внутренним погрешностям относятся также и инструментальные погрешности НРЛС, возникающие при отсчете оператором азимута объекта на ЭЛТ индикатора и передаче данных вращения антенны в ИКО.

Внешняя погрешность. В современных НРЛС отраженные импульсы представляют собой пачку импульсов, следующих с интервалом, равным периоду повторения зондирующих импульсов - T_n .

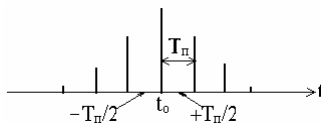


Рис.1-17.

Отраженный импульс, который должен появиться в момент t_0 (см. рис.1-17), может появиться не только в момент t_0 , но и момент, сдвинутым относительно t_0 на время $\pm T_n/2$. В результате появляется угловая погрешность, СКП которой равна

$$\varphi_o = \frac{\Omega \cdot T_n}{2\sqrt{3}}, \quad (16)$$

где Ω - угловая скорость вращения антенны [град/с].

Практически точность измерения направления равна

$$\varphi = \varphi_n + \varphi_o = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi q}} + \frac{\Omega \cdot T_n}{3,42} \quad (17)$$

или, в реальных условиях $0,8^\circ - 1^\circ$.

Надежность работы НРЛС – свойство НРЛС сохранять свои ЭТД в заданных (требуемых) пределах в течение определенного промежутка времени.

Количественно надежность работы НРЛС оценивается вероятностью безотказной работы в течение установленного времени или же числом часов наработки на отказ.

1.3.2. Основные технические параметры

Технические характеристики обеспечивают выполнение эксплуатационных параметров.

К основным из них относятся:

λ - длина волны (обычно характеризуется в см);

f – частота заполнения зондирующего импульса (СВЧ колебания – чаще всего выражается в МГц);

$\tau_{зи}$ – длительность зондирующего импульса;

F_n – частота следования зондирующих импульсов;

T_n – период повторения (следования) зондирующих импульсов;

P_u – импульсная мощность передатчика;

$P_{np.min}$ – чувствительность приемника;

α, θ - направленность антенны соответственно горизонтальной и вертикальной плоскости (обычно измеряется в градусах);

Ω - скорость вращения антенны ;
 тип оконечного, воспроизводящего, устройства (индикатора);
 тип источника питания и потребляемая мощность.

Длина волны выбирается из соображений, чтобы НРЛС могла обеспечить:

- обнаружение как больших, так и малых надводных и наземных объектов в заданном радиусе действия НРЛС;
- работу НРЛС импульсами малой длительности;
- высокую направленность антенны в горизонтальной плоскости.

Эффективное отражение падающей энергии от объектов возможно только тогда, когда размеры объектов и радиусы кривизны отдельных его участков значительно больше длины волны передатчика НРЛС. В этом случае интенсивность отражения достигает заметной величины и определяется, главным образом, отражающими свойствами и размерами облучаемого объекта.

Исходя из размеров надводных объектов (буев, вех, шлюпок и др. объектов), для успешного их обнаружения используется

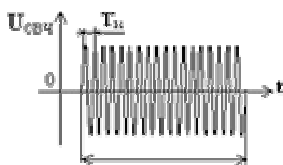


Рис.1-18.

коротковолновый участок УКВ диапазона (то есть СВЧ колебания – сантиметровый диапазон).

Для получения СВЧ радиоимпульса, с огибающей близкой к прямоугольной форме, каждый радиоимпульс должен содержать не менее n периодов колебаний (обычно несколько сотен - см. рис. 1-18).

Из рис.1-18 следует, что $\tau_u = n \cdot T_n$.

$$\text{Отсюда } f = \frac{1}{T_n} = \frac{n}{\tau_u}, \text{ так как } T_n = \frac{\tau_u}{n}.$$

Тогда длина волны СВЧ радиоимпульса определится формулой

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c \cdot \tau_u}{n}. \quad (18)$$

Например, при $n = 300$, $\tau_u = 0,1 \text{ мкс}$ $\lambda = 10 \text{ см}$, а при $\lambda = 3 \text{ см}$ в той же длительности импульса должно уложиться 1000 периодов колебаний. С другой стороны, направленные свойства антенны в горизонтальной плоскости связаны с длиной волны и линейными размерами антенны

$$\text{приближенной зависимостью} \quad \alpha \approx 60 \cdot \frac{\lambda}{d}, \quad (19)$$

где d - линейный размер антенны.

Например, при $\alpha=1^\circ$, $d=300\text{ см}$, $\lambda=5\text{ см}$. Из уравнений (18), (19) видно, что для того, чтобы НРЛС обладала высокой разрешающей способностью по дистанции и по углу, необходимо стремиться к уменьшению длины волны.

Однако существуют определенные ограничения минимальной длины волны, так как ее уменьшение приводит к уменьшению дальности действия НРЛС вследствие затухания СВЧ колебаний в атмосфере.

В настоящее время наибольшее распространение получили НРЛС с длинами волн 3,2 см и 9,8 см.

Частота следования импульсов F_n выбирается из условия однозначного определения дальности до цели и эффективного обнаружения объектов при круговом обзоре.

Для однозначного определения дальности до объекта необходимо выполнять такие условия:

1. Период следования СВЧ радиоимпульсов T_n должен быть больше суммы $t_{np.хода} + t_{обр.хода}$ пилообразного напряжения, вырабатываемого генератором пилообразного напряжения (см. рис. 1-19), то есть

$$T_n > (t_{np.хода} + t_{обр.хода}). \quad (20)$$

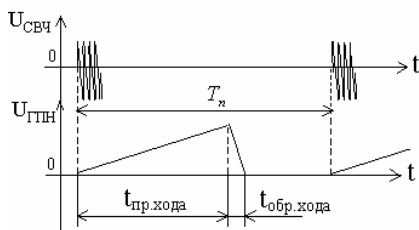


Рис. 1-19.

В свою очередь, длительность прямого хода развертки $t_{np.хода} = 2D_{max}/c$, где D_{max} - максимальная дальность действия НРЛС по шкале индикатора, а время обратного хода развертки равно $t_{обр.хода} \leq 0,25t_{np.хода}$. Тогда $T_n \geq 2,5 D_{max} / c$.

Отсюда находится частота повторения

$$F_n = 1/T_n \leq c / 2,5 D_{max}. \quad (21)$$

Уравнение (21) связывает D_{max} и минимальную частоту повторения F_n .

Реально, в НРЛС F_n выбирается в 8...10 раз меньше расчетной величины.

2. Частота следования (повторения) импульсов также выбирается исходя из таких требований: при заданной скорости обзора окружающего пространства нужно обеспечить облучение точечного объекта определенным, минимальным количеством N_{min} зондирующих импульсов, чтобы получить пачку отраженных СВЧ

импульсов в количестве, достаточном для обнаружения объектов с заданной вероятностью.

Время облучения точечной цели $t_{обл.}$ связано с α и угловой скоростью вращения антенны Ω зависимостью $t_{обл.} = \alpha / \Omega$. Следовательно – минимальное количество N_{min} зондирующих импульсов, облучающих цель за один оборот антенны, будет равно:

$$N_{min} = t_{обл.} / T_n = \alpha / (\Omega \cdot T_n) = (\alpha \cdot F_n) / \Omega.$$

Из полученного выражения получаем:

$$F_n \geq (N_{min} \cdot \Omega) / \alpha. \quad (22)$$

В современных НРЛС F_n на малых шкалах порядка 3000 имп/с, а на больших – 500 имп/с.

Мощность передатчика оказывает влияние на дальность действия НРЛС. Различают импульсную P_u и среднюю P_{cp} мощность передатчика.

Импульсная мощность – это мощность за время длительности зондирующего импульса.

Средняя мощность – это средняя мощность за период следования импульсов.

Для импульсов, близких к прямоугольной форме, (к ним можно отнести и зондирующие импульсы передатчика НРЛС) импульсная и средняя мощность связаны между собой соотношением:

$$P_u \tau_u = P_{cp} T_n. \quad (23)$$

Из этого уравнения следует, что $P_{cp} = P_u \cdot (\tau_u / T_n)$, где τ_u / T_n - коэффициент заполнения k .

В НРЛС средняя мощность P_{cp} измеряется единицами ватт, а импульсная мощность P_u - киловаттами (от 6 до 50 кВт).

Чувствительность приемника – является одним из важных факторов, определяющих дальность радиолокационного обнаружения и качество воспроизводимых сигналов НРЛС.

Чувствительность (– способность радиолокационного приемника выделять полезные сигналы с заданной вероятностью на фоне (при наличии) помех.

В сантиметровом и миллиметровом диапазоне волн шумы создают, в основном, антенна и сам приемник.

Основным фактором, определяющим чувствительность приемника, является уровень шумов приемника. Суммарный уровень шумов определяется их мощностью:

$$P_{ш} = k T_0 \Delta f N_u m, \quad (24)$$

где: k - постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T_0 - окружающая температура в абсолютных градусах;

Δf - полоса пропускания приемника;

$N_{ш}$ - коэффициент шума;

m - коэффициент различимости.

Δf - полоса пропускания приемника (спектр частот) для прямоугольных импульсов длительностью $\tau_{зи}$. Определяется уравнением $\Delta f = 1/\tau_{зи}$.

$N_{ш}$ - коэффициент шума, показывает, во сколько раз реальный приемник шумит больше, чем идеальный (не шумящий). Обычно $N_{ш} \approx 30 \dots 100$.

m - коэффициент различимости показывает необходимый для реальной работы минимум отношения для нормальной мощности сигнала P_c к мощности помех P_n на выходе приемника. m может достигать единицы, то есть $m = (P_c / P_n) = 1$.

В этом случае $P_c = P_n = P_{ш}$ или

$$P_c = kT_0 \Delta f N_{ш} m. \quad (25)$$

Чувствительность () оценивается в *ваттах* или *децибелах*.

Например, $= 10^{-12} \text{ Вт}$ или

$$P_{np. \min} = 10 \lg \frac{P(1 \text{ Вт})}{P_c(10^{-12} \text{ Вт})} = 120 \text{ дБ}.$$

(определяется, как правило, относительно опорной мощности, равной 1 Вт).

Антенна – характеризуется шириной диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскости, степенью подавления боковых лепестков, коэффициентом направленности, поляризацией излучаемой (принимаемой) электромагнитной волны.

Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости α (рис.1-20,а) для НРЛС 3,2 см диапазона составляет около $0,7^\circ \dots 1,2^\circ$ (для НРЛС 9,8 см диапазона - около $2,3^\circ$), а в вертикальной плоскости θ (рис.1-20,б) для обоих диапазонов – около $20^\circ \dots 22^\circ$.

Степень подавления боковых лепестков:

$$\gamma = 10 \lg(P_{\max. \delta} / P), \quad (26)$$

где: $P_{\max. \delta}$ - максимальная мощность бокового лепестка,

P - мощность основного лепестка.

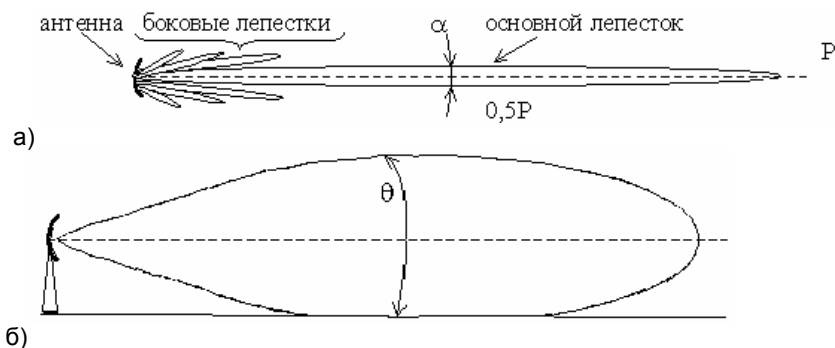


Рис.1-20. Диаграмма направленности антенны НРЛС:
а) – в горизонтальной плоскости; б) – в вертикальной плоскости

Для обеспечения нормальной работы НРЛС необходимо, чтобы $\gamma = -(20...30) \text{ дБ}$, то есть мощность боковых лепестков должна быть в 100...1000 раз меньше основной мощности.

Коэффициент направленности антенны – это число, которое показывает, во сколько раз созданная в заданном направлении мощность поля больше той, которая была бы при равномерном сферическом распределении.

Определяется уравнением
$$G_a = \frac{S_a \cdot 4\pi}{\lambda^2}, \quad (27)$$

где S_a – площадь раскрытия антенны.

Поляризация. Поляризация определяется плоскостью распространения составляющей (вектора) $\vec{E}$ электромагнитной волны. Существует вертикальная и горизонтальная поляризация.

Наибольшее распространение в НРЛС получили антенны с горизонтальной поляризацией.

Как правило, из-за свойств отражающей поверхности, поляризация отраженной волны не соответствует поляризации падающей волны и изменяется по случайному закону.

2. Отражающие свойства объектов

Если облучаемый объект по своим электрическим параметрам (например, проводимости, диэлектрической постоянной) существенно отличается от этих же параметров среды распространения радиоволн, то в нем возникают токи СВЧ, создающие вторичное (переизлучаемое) поле. Часть этой энергии снова попадает в антенну НРЛС.

Отражающие свойства объектов влияют на дальность радиолокационного обнаружения. Зависят, в основном, от материала объекта, его формы и размера, от длины облучаемой волны.

Количественно отражающие свойства объекта оцениваются эффективной поверхностью отражения (ЭПО) объекта.

ЭПО – это некоторая условная (эквивалентная) площадка S , которая, будучи помещенной на *облучаемый* объект перпендикулярно направлению распространения падающей СВЧ радиоволны, создает на входе приемника НРЛС плотность мощности отраженного сигнала равной плотности отраженной мощности от *реального* объекта.

Количественно ЭПО определяется таким образом.

Допустим, на объект площадью S (см. рис.2-1) падает мощность плотностью Π_1 . (Падающая плотность мощности определяется выражением $\Pi_1 = P_n / S_a$, где P_n - мощность передатчика, а S_a - площадь раскрытия антенны). Под ее воздействием объект переизлучает мощность P , равную

$$P = S \cdot \Pi_1. \quad (28)$$

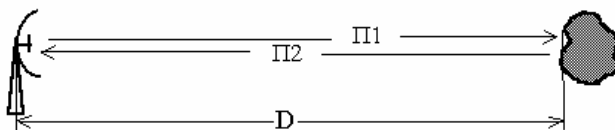


Рис.2-1

Часть этой энергии попадает обратно в антенну НРЛС плотность мощности которой определяется уравнением

$$\Pi_2 = \frac{P \cdot G}{4\pi \cdot D^2}, \quad (29)$$

где: G - коэффициент направленного действия антенны,

$4\pi \cdot D^2$ - площадь сферы радиусом D (D - расстояние от цели до антенны НРЛС).

Подставив уравнение (28) в уравнение (29), получим:

$$\Pi_2 = \Pi_1 G S / (4\pi D^2). \quad (30)$$

В полученном уравнении обозначим $GS = S_3$, где S_3 -эффективная поверхность отражения (ЭПО). Таким образом, уравнение (30) можно записать в виде $\Pi_2 = \Pi_1 S_3 / (4\pi D^2)$. Из этого уравнения определяется ЭПО:

$$S_3 = 4\pi D^2 \cdot (\Pi_2 / \Pi_1) \quad . \quad (31)$$

Из полученного уравнения видно, что для определения ЭПО необходимо знать расстояние до цели, а также падающий и отраженный поток мощности.

ЭПО относительно легко можно вычислить для объектов простых форм – металлического листа, шара, углового отражателя. При этом допускается, что они выполнены из однородного идеально проводящего материала (то есть – не имеют потерь).

ЭПО сложных объектов – судов, навигационных знаков и других целей определяется только экспериментально.

2.1. ЭПО простейшей формы

1. Пассивный полуволновый вибратор - $S_3 = 0,86\lambda^2$.
2. Плоский металлический лист, размеры которого значительно больше длины волны λ и он расположен перпендикулярно направлению распространения радиоволны:

$$S_3 = 4\pi \cdot \left(\frac{S^2}{\lambda^2} \right). \quad (32)$$

Например, при $S = 1 \text{ м}^2$, $\lambda = 3,2 \text{ см}$ $S_3 = 12265 \text{ м}^2$, а при $\lambda = 8 \text{ мм}$ – $S_3 = 196250 \text{ м}^2$.

При отклонении угла облучения от нормали ЭПО резко уменьшается. В этом случае она определяется уравнением вида:

$$S_3 = 4\pi \left(\frac{S^2}{\lambda^2} \right) \cdot \cos^2 \lambda \cdot \left[\frac{\sin \left(\frac{2\pi a \cdot \sin \alpha}{\lambda} \right)}{\frac{2\pi a \cdot \sin \alpha}{\lambda}} \right]^2, \quad \text{где } a - \text{сторона}$$

облучаемой плоскости, α - угол облучения.

3. Угловой отражатель со стороной a (см. рис.2-2). Для увеличения интенсивности отражения малоразмерных объектов (например - буев, вех и др.) в достаточно большом секторе облучения применяются искусственные угловые отражатели.

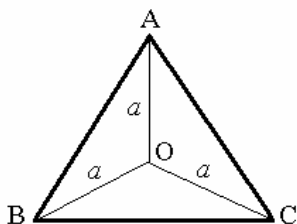


Рис.2-2.

ЭПО углового отражателя, у которого $\Delta AOB \perp \Delta BOC \perp \Delta AOC$, приблизительно равна площади шестиугольника, вписанного во внешний контур отражателя, определяемая уравнением $S = a / \sqrt{3}$. Тогда, согласно формуле (32)

ЭПО углового отражателя, будет равна $S_3 = 4\pi \frac{a^4}{3\lambda^2}$. Например,

при $a=0,4$ м и $\lambda = 3,2$ см $S_3=104,7\text{м}^2$. Если необходимо усилить интенсивность отражения во всех направлениях, то угловые отражатели устанавливают группами (по окружности). На рис.2-3 изображен пятиугольный комплект отражателей, смонтированных на буйе.

Существенное значение имеет точность выполнения и жесткость конструкции угловых отражателей. Например, отклонение внешнего края плоскостей отражателя на $\lambda/3$ от теоретического значения уменьшает мощность отраженного сигнала примерно на 50%.

4. Шар радиусом R . При $R \gg \lambda$ $S_3 = \pi R^2$.

При $R \ll \lambda$, что характерно для капель дождя, тумана и других целей, ЭПО

определяется уравнением $S_3 = 4 \left(\frac{2\pi R}{\lambda} \right)^4 \cdot \pi R^2$.

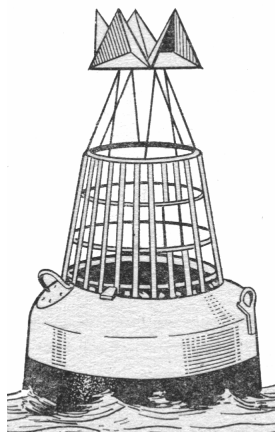


Рис.2-3. Комплект отражателей, смонтированных на буйе

2.2. ЭПО групповых объектов

Групповыми называются такие объекты, которые находятся и облучаются в пределах разрешающей площадки (см. уравнение 12).

В этом случае принимаемые отраженные сигналы представляют собой совокупность нескольких отраженных сигналов, отличающихся друг от друга по фазе и амплитуде, при этом их фазы и

амплитуды могут между собой суммироваться или вычитаться.

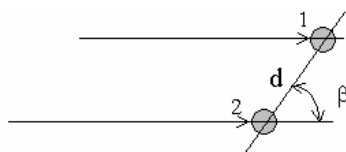


Рис.2-4.

Например, при облучении двух целей, изображенных на рис.2-4, ЭПО определяется уравнением,

$$S_3 = 4 S_{31} \cos^2 \left(\frac{2\pi d \cos \beta}{\lambda} \right),$$

где S_{31} - ЭПО одного объекта.

Отсюда следует важный вывод – при изменении взаимного положения первой и второй цели, могут изменяться β и d и тогда S_3 может изменяться от нуля до четырехкратного значения S_{31} .

2.3. ЭПО судов

Суда относятся к радиолокационным объектам сложной формы (корпус судна, мачты, трубы, надстройки, такелаж и др.). Поэтому СВЧ сигналы, отраженные от судна представляют собой результат интерференции большого количества колебаний, имеющих различные фазы и амплитуды.

ЭПО изменяется также и во время движения судна, при качке, изменении курса и т.п. ЭПО максимальна со стороны бортов и ее значение пропорционально площади сечения судна в диаметральной плоскости, и минимальна с носа и кормы. При этом ЭПО пропорциональна площади сечения в плоскости шпангоутов наибольшей ширины судна.

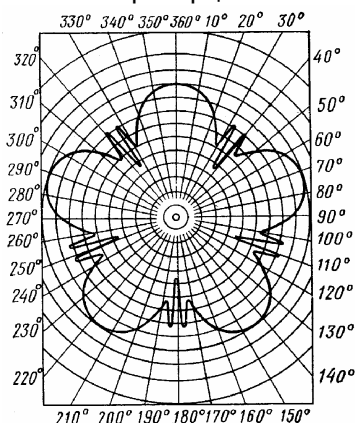


Рис.2-5. Пример изображения диаграммы ЭПО комплекта отражателей

Для наглядности ЭПО представляют в виде ее зависимости от углов облучения объекта в полярной системе координат. Например, на рис.2-5 показана диаграмма отражения (ЭПО) комплекта отражателей, изображенного на рис.2-3.

В качестве примера, на рис.2-6 приведена полярная диаграмма

изменения ЭПО танкера водоизмещением 10000 *t* при разных ракурсах облучения [1]. Диаграмма снималась в натуральных условиях, при спокойной поверхности моря, на расстоянии 7 миль, волнах $\lambda_1=8\text{мм}$ (кривая 1) и $\lambda_2=3,2\text{см}$ (кривая 2).

В табл. 1 приведены ориентировочные данные среднего значения эффективной поверхности отражения (рассеяния) для некоторых типов судов, знаков навигационного ограждения и других объектов в диапазоне сантиметровых волн, а также ориентировочные данные высоты объектов. Пользуясь приведенными данными, можно вычислить средние значения дальности радиолокационного наблюдения соответствующих целей или объектов.

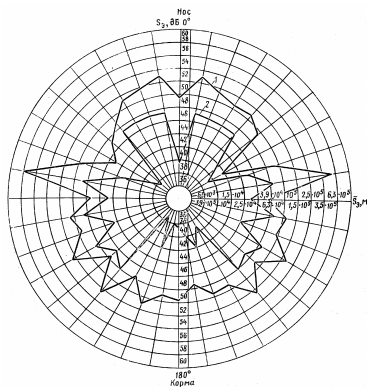


Рис.2-6.Пример изображения диаграммы ЭПО танкера

Табл. 1.

Средние значения эффективной поверхности отражения объектов в диапазоне сантиметровых волн

Тип объекта	$S_0, \text{м}^2$	$h, \text{м}$
Катер	75—250	2—4
Буксир	250—750	4—6
Траулер	$750—4 \cdot 10^3$	6—8
Судно малого тоннажа	$4 \cdot 10^3—12 \cdot 10^3$	8—10
Судно среднего тоннажа	$12 \cdot 10^3—3 \cdot 10^4$	10—14
Судно большого тоннажа	$3 \cdot 10^4—5 \cdot 10^4$	14—20
Буй без отражателя	1—10	1—2
Человек	0,8	

2.4. ЭПО распределенных объектов

Распределенными называются объекты, размеры которых превышают линейные размеры радиолокационного луча на местности. Делятся на *поверхностные* и *объемные*.

Поверхностные - это участки водной поверхности, суши. Отражение от поверхностных объектов (целей) может быть *зеркальным* и *рассеянным*.

Условием *зеркальной* поверхности (см. рис.2-7) является

выполнение соотношения
$$h < \frac{\lambda}{8 \sin \beta}.$$

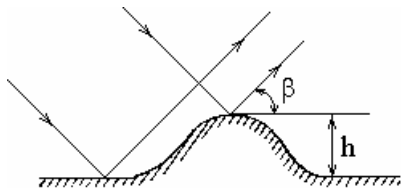


Рис.2-7.

В этом случае отражение практически подчиняется оптическим законам, то есть угол падения β равен углу отражения. Поэтому отраженная радиоволна, как правило, на антенну НРЛС не возвращается (за исключением нормально падающей радиоволны).

При зеркальном отражении СВЧ энергия в приемник НРЛС не поступает.

Если же $h > \frac{\lambda}{8 \sin \beta}$ - это шероховатая поверхность, создающая так называемое *рассеянное* отражение. При рассеянном отражении радиоволны распространяются в разные направления, и часть отраженной энергии поступает в приемник НРЛС.

На дальних расстояниях (то есть угол β минимален) правая часть уравнения $h < \frac{\lambda}{8 \sin \beta}$ увеличивается, а h уменьшается. Таким

образом, на больших расстояниях волнение от моря сказывается не существенно, в то время как на малых расстояниях $(0 \div 6)$ миль – волнение сказывается существенно.

ЭПО водной поверхности. Зависит от разрешающей площадки НРЛС (см. уравнение 12) и коэффициента направленности отражающей поверхности в направлении антенны НРЛС. Определяется уравнением

$$S_o = S_p \cdot G = G \cdot \alpha D \frac{c \tau_{zu}}{2}, \quad (33)$$

где S_p - разрешающая площадка НРЛС;

G -коэффициент направленности отражающей поверхности в направлении антенны НРЛС. Его величина зависит от степени волнения (высоты и направления волны) и может изменяться от 0 до 1.

Из уравнения (33) следует, что помехи от взволнованной поверхности могут быть снижены путем увеличения разрешающей способности НРЛС, то есть использованием зондирующих импульсов малой длительности и применение антенн с более узкой шириной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости.

Объемными распределенными объектами являются совокупность большого числа элементарных отражателей, заполняющих некоторый объем, воспроизводимых радиолокатором как один объект. К таким объектам относятся взвешенные в атмосфере жидкие и твердые частицы (дождь, град, туман, грозовые облака и др.).

ЭПО объемного объекта равна произведению числа элементарных отражателей, заключенных в данном объеме, в котором они воспринимаются как один объект, на эффективную площадь рассеяния одного элементарного отражателя.

ЭПО объемной цели определяется уравнением

$$S_o = S_k N V_p, \quad (34)$$

где S_k — ЭПР одной элементарной цели (например - дождевой капли);

N — количество элементарных целей в разрешающем объеме;

V_p — общий объем, в котором все элементарные цели воспринимаются как один объект (см. уравнение 13).

Тогда ЭПО объемной цели равно:

$$S_o = S_k N \cdot \alpha D^2 c \tau_{zu} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}. \quad (35)$$

Если, например, в зоне дождя находится какой-либо объект, например судно, то отражение от дождевых капель может создать значительную помеху на экране индикатора для распознавания отраженного от судна сигнала. Эту помеху можно несколько снизить укорочением длительности импульсов РЛС и использованием антенны с большей направленностью (меньшим углом α_c). При этом мощность сигнала от судна практически не снизится, а мощность помех из-за отражения от дождевых капель уменьшится.

Помехи от дождевых капель можно также значительно уменьшить, применяя для облучения объектов электромагнитное поле с круговой поляризацией.

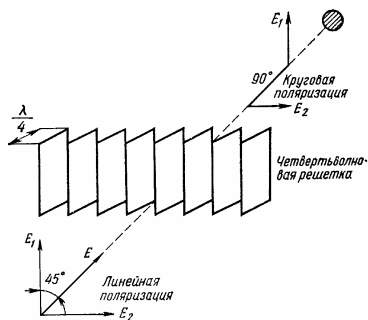


Рис.2-8.

На практике поле с круговой поляризацией получают с помощью специальной поляризационной решетки из четвертьволновых металлических пластин, расположенных под углом 45° к вектору электрической составляющей поля падающей линейно поляризованной волны (рис. 2-8). Такая решетка размещается обычно в раскрыве рупорной антенны [12].

В этом случае падающая волна разлагается на две взаимно перпендикулярные линейно

поляризованные составляющие поля с одинаковой амплитудой. Одна из составляющих будет ориентирована параллельно пластинам решетки, а вторая - перпендикулярно. Последняя сквозь пластины решетки проходит свободно. Для параллельной составляющей поля пластины решетки представляют волновод. Поскольку фазовая скорость поля в волноводе больше, чем в свободном пространстве, при прохождении через решетку параллельная составляющая поля будет опережать по фазе перпендикулярную составляющую. Величина фазового сдвига между полями будет зависеть от расстояния между пластинами и размера пластин решетки в направлении распространения радиоволн. Эти размеры выбираются таким образом, чтобы на выходе решетки параллельная составляющая опережала перпендикулярную составляющую поля на угол 90° . Тогда после прямого прохождения решетки линейно поляризованное поле антенны преобразуется в поле с круговой поляризацией, поскольку между составляющими поля имеет место пространственный и фазовый сдвиг на 90° .

После отражения энергии от дождевых капель или иных объектов сферической формы параллельная составляющая поля, проходя решетку в обратном направлении, получит дополнительное опережение по фазе на 90° относительно перпендикулярной составляющей отраженного поля. Тогда на входе антенны РЛС обе составляющие взаимно компенсируются, так как их амплитуды при отражении от объектов сферической формы одинаковы, а фазы противоположны.

Если в зоне дождя находится объект, например судно, то из-за несимметричной формы отражающего объекта, отличной от сферической, отраженное поле будет иметь эллиптическую поляризацию. В результате, после прохождения через поляризационную решетку суммарное поле на входе антенны

радиолокатора будет создавать отраженный сигнал, интенсивность которого определяется разностью амплитуд вертикальной и горизонтальной составляющих вторичного поля, создаваемого судном при отражении энергии. Опыт показывает, что использование поля с круговой поляризацией подавляет отражение от дождевых капель примерно на 20—25 дБ, при ослаблении полезного сигнала на 6—8 дБ.

3. Дальность действия НРЛС в свободном пространстве

Дальность действия НРЛС в свободном пространстве определяется максимальным расстоянием между НРЛС и объектом, который должна обнаружить НРЛС.

Под дальностью действия НРЛС в свободном пространстве подразумевается дальность, зависящая от технических характеристик НРЛС и от отражающих свойств облучаемого объекта [1,9,10]. (Влияние атмосферы, формы Земли и подстилающей поверхности, при этом, не учитываются).

Определим максимальную дальность - $D_{\max}$.

Если бы антенна была ненаправленной, то есть представляла собой изотропный излучатель, то она создавала бы при импульсном излучении мощностью P_u плотность потока мощности на

поверхности сферы у объекта
$$\Pi = \frac{P_u}{4\pi D^2},$$

где: P_u - импульсная мощность передатчика;

$4\pi D^2$ - площадь поверхности сферы радиусом D .

Но, так как реальная антенна характеризуется коэффициентом

направленного действия $G_a = \frac{S_a \cdot 4\pi}{\lambda^2}$, где S_a - площадь раскрытия

антенны то, благодаря коэффициенту направленности, на объект

воздействует плотность потока мощности (см. рис.2-1.)
$$\Pi_I = \frac{P_u G_a}{4\pi D^2}.$$

Под воздействием этого (падающего) потока мощности объект переизлучает (так как на его поверхности возникают СВЧ токи) в пространство мощность, определяемая уравнением

$$P = \Pi_I \cdot S_3 = \frac{P_u G_a}{4\pi D^2} \cdot S_3,$$
 где S_3 - эффективная поверхность отражения

цели.

Эта мощность создает в окружающем пространстве, то есть – и на раскрыве (поверхности) антенны НРЛС плотность потока мощности, равную

$$P_2 = \frac{P}{4\pi D^2} = \frac{P_u G_a}{(4\pi)^2 D^4} \cdot S_\vartheta.$$

В свою очередь, учитывая, что антенна обладает определенным коэффициентом усиления G_a (см. уравнение 27), то есть

$$S_a = \frac{G_a \lambda^2}{4\pi}, \quad (36)$$

то на вход приемника (под воздействием плотности потока мощности

$$P_2) \text{ воздействует мощность } P_{np} = P_2 \cdot S_a = \frac{P_u G_a S_a}{(4\pi)^2 D^4} \cdot S_\vartheta.$$

Подставив в полученное уравнение уравнение (36), получим

$$P_{np} = \frac{P_u G_a^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 D^4} \cdot S_\vartheta. \quad \text{А с учетом потерь в антенно-волноводном}$$

тракте НРЛС, характеризующихся η_1 - к.п.д. передающего тракта и η_2 - к.п.д. приемного тракта (обычно $\eta_1 \approx \eta_2 \approx 0,8 \dots 0,9$) получим:

$$P_{np} = \frac{P_u G_a^2 \lambda^2 \eta_1 \eta_2}{(4\pi)^3 D^4} \cdot S_\vartheta. \quad (37)$$

При условии, что приемник обладает максимальной чувствительностью, то есть $P_{np} = P_{np.\min}$, из уравнения (37) находим, что $D_{\max}$ равно:

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_u G_a^2 S_\vartheta \lambda^2 \eta_1 \eta_2}{(4\pi)^3 P_{np.\min}}}. \quad (38)$$

Уравнение (38) называют еще *уравнением дальности НРЛС в свободном пространстве*. Из него видно, что $D_{\max}$ зависит от импульсной мощности передатчика, чувствительности приемника, длины волны, к.п.д. НРЛС, а также зависит от ЭПО объекта.

3.1. Влияние отражений от подстилающей поверхности (водной, земной) на дальность действия НРЛС

На дальность действия НРЛС влияет отражение радиоволн от подстилающей поверхности, а также сферичность Земли.

Рассмотрим влияние подстилающей поверхности моря исходя из рис.3-1.

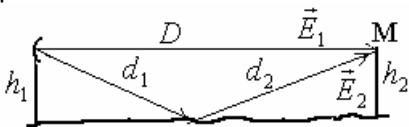


Рис.3 -1.

Когда длина волны НРЛС значительно меньше h_1, h_2 (где h_1 - высота установки антенны относительно поверхности моря,

h_2 - высота облучаемого объекта), то СВЧ импульсы НРЛС достигают

объект и отражаются от него двумя путями: непосредственно и путем отражения от водной поверхности. То есть, на объект высотой h_2

поступает поле напряженностью $\vec{E}_0$, состоящее из поля

напряженностью $\vec{E}_1$ (поступающему по кратчайшему пути D) и поля

напряженностью $\vec{E}_2$, проходящему, из-за отражения от подстилающей поверхности, путь $d_1 + d_2$. Следовательно, в точке

сложения "М" сигналы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ не идентичны. Из-за отражения от

поверхности $\vec{E}_2$ приобретает фазовый сдвиг ϕ относительно $\vec{E}_1$ вследствие скачка фазы φ при отражении от подстилающей

поверхности и фазы β , зависящей от разности пути Δd прохождения СВЧ импульсов, где $\Delta d = (d_1 + d_2) - D$. Таким образом

$$\phi = \varphi + \beta.$$

Обычно, при отражении от водной поверхности радиоволны с горизонтальной поляризацией $\vec{E}_0$, приобретают фазовые сдвиги

$\varphi = \pi = 180^\circ$, и $\beta = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda}$, при этом $\vec{E}_2$ еще и ослабляется за счет соприкосновения с водой. (Ослабление характеризуется коэффициентом ρ . Для воды $\rho \approx 1$). Таким образом

$$\vec{E}_2 = \rho \vec{E}_1 e^{-j\phi}. \quad (39)$$

Из рис. 3-1 следует, что $\Delta d \approx \frac{2h_1 h_2}{D}$. Тогда $\beta = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda D}$ (40)

С учетом уравнений (39) и (40) в точке сложения "М" $\vec{E}_0$ равно:
 $\vec{E}_0 = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{E}_1 + \rho \vec{E}_1 e^{-j\phi}$. После преобразования этого уравнения и, перейдя к амплитудным значениям, можно записать, что
 $E_0 = 2E_1 \cos \frac{\phi}{2} = 2E_1 \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\beta}{2} \right) = 2E_1 \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D} \right) = 2E \sin \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D}$. (41)

Из уравнения (41) видно, что напряженность поля E_0 в точке приема (облучения) изменяется по синусоидальному закону, причем она зависит от высоты антенны, высоты цели, расстояния между ними и длины излучаемой волны. При этом, если значение $\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D}$

кратно $\frac{\pi}{2} + n\pi = \pi \left(\frac{1}{2} + n \right)$, где $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$, то $\sin \rightarrow \max = 1$ и $E_0 = 2E_1$, то есть – напряженность в точке облучения будет максимальна и равна $2E_1$. Если же $\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D}$ кратно $n\pi$, то $\sin \rightarrow \min = 0$ и $E_0 = 0$.

На рис.3-2 показан график зависимости отношения $\frac{E_0}{E_1}$ в

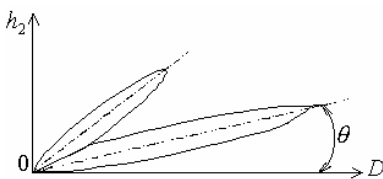


Рис.3-2.

координатах h_2, D при фиксированной высоте h_1 антенны НРЛС. Для обнаружения низкорасположенных надводных объектов большое значение имеет наклон максимума нижнего лепестка, то есть угол места θ . Его

величина определяется из условия первого максимума суммарного поля
 $\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D} = \frac{\pi}{2}$. (42)

Тогда, допуская, что при $h_2 \ll D$, $\operatorname{tg} \theta \approx \theta$ из рис.3-2 получим: $\theta = \frac{h_2}{D}$.

Подставив значение $h_2 = \theta \cdot D$ в уравнение (42), получим $\theta = \frac{\lambda}{4h_1}$ или,

$$\text{в градусах} - \theta^\circ = 14,4 \frac{\lambda}{h_1}. \quad (43)$$

В диапазоне сантиметровых волн угол θ° имеет очень малую величину. Благодаря этому данный диапазон волн обеспечивает обнаружение низкорасположенных надводных объектов (знаки навигационного ограждения, шлюпки, малые суда, низкий берег и пр.)

Уравнение (41) описывает значение напряженности электрической составляющей радиоволны E_0 в точке облучения объекта "М". Но, ведь и сам объект переизлучает радиоволну и часть ее попадает на антенну НРЛС. В этом случае отраженная мощность на входе приемника будет равна:

$$P_{omp} = P_{np} \left[\left(2 \sin \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D} \right)^2 \right]^2. \quad (44)$$

Так как реально $D \gg h_1$ и $D \gg h_2$, то можно принять, что $\sin \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D} \approx \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D}$. Тогда уравнение (44) можно записать в виде

$P_{omp} = P_{np} \frac{(4\pi)^4 (h_1 h_2)^4}{\lambda^4 D^4}$. Подставив в полученное уравнение значение P_{np} (см. уравнение (37) без учета к.п.д. волноводного тракта), получим:

$$P_{omp} = \frac{P_u G_a^2 S_g \lambda^2}{(4\pi)^3 D^4} \cdot \frac{(4\pi)^4 (h_1 h_2)^4}{\lambda^4 D^4} = \frac{P_u G_a^2 S_g 4\pi (h_1 h_2)^4}{\lambda^2 D^8}.$$

Допустив, что $P_{omp} = P_{np.min}$, получим D'_{max} .

$$D'_{max} = \sqrt[8]{\frac{P_u G_a^2 S_g 4\pi (h_1 h_2)^4}{P_{np.min} \lambda^2}}. \quad (45)$$

Из формулы (45) видно, что отражение СВЧ радиоимпульса от поверхности существенно уменьшает дальность действия НРЛС в зоне, лежащей ниже первого лепестка максимума диаграммы

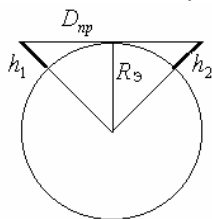
направленности. Увеличение импульсной мощности передатчика и чувствительности приемника НРЛС на максимальную дальность скажется незначительно, так как между ними зависимость пропорциональна $\sqrt[8]{}$, а не $\sqrt[4]{}$ (как в уравнении 38).

Увеличить $D'_{\max}$ можно за счет понижения первого лепестка, то есть за счет уменьшения θ . Для этого необходимо уменьшать λ и увеличивать высоту установки антенны НРЛС h_1 . Однако, уменьшение длины волны передатчика λ ведет к увеличению поглощения радиоволны в атмосфере, а увеличение h_1 приводит к увеличению мертвой зоны. Поэтому, при расчете максимальной дальности действия НРЛС всесторонне учитывают взаимосвязи между всеми техническими данными НРЛС.

3.2. Влияние сферичности Земли на дальность действия НРЛС

В диапазоне сантиметровых (особенно миллиметровых) радиоволн дифракция (способность радиоволн огибать выпуклую поверхность Земли) выражена очень слабо [2,5]. Поэтому эти радиоволны распространяются практически прямолинейно.

Для определения прямолинейного распространения таких радиоволн воспользуемся рис.3-3. Из него следует, что



$$D_{np} = \sqrt{(R_3 + h_1)^2 - R_3^2} + \sqrt{(R_3 + h_2)^2 - R_3^2}, \quad (46)$$

где R_3 - эффективный радиус Земли.

Уравнение (46), вследствие того, что $D_{np} \gg h_1$ и

Рис.3-3 $D_{np} \gg h_2$, можно записать: $D_{np} = \sqrt{2R_3} \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$

или, с учетом коэффициента рефракции k_p , равным для стандартной атмосферы $k_p = 1,33$ и радиуса Земли $\approx 6370 \text{ км}$, $R_3 = 1,33 \cdot 6370 = 8472,1 \text{ км}$.

С учетом того, что

1 морская миля = 1852 метра и, принимая значения высот h_1 и h_2 в метрах, находим значение дальности прямой радиолокационной "видимости" с учетом сферичности Земли в морских милях.

$$D_{np} = 2,22 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (47)$$

3.3. Влияние атмосферы на дальность действия НРЛС

Атмосфера может изменять распространения СВЧ радиоволны от их прямолинейного распространения, а также поглощать и рассеивать энергию СВЧ колебаний.

В радиолокации, на отображение навигационной обстановки, могут сказываться такие явления, как *субрефракция* и *сверхрефракция*.

Характер и величина атмосферной рефракции зависят от значения вертикального градиента коэффициента преломления по

высоте - $\frac{dn}{dh}$,

где $n = \sqrt{\varepsilon_0}$ - изменение коэффициента преломления (ε_0 - диэлектрическая проницаемость);
 h – высота.

Субрефракция – (см. рис.3-4) возникает при условии $\frac{dn}{dh} > 0$. При этом

явлении луч СВЧ колебаний изгибается вверх (луч “а”), что приводит к реальному уменьшению дальности действия (обнаружения целей) НРЛС.

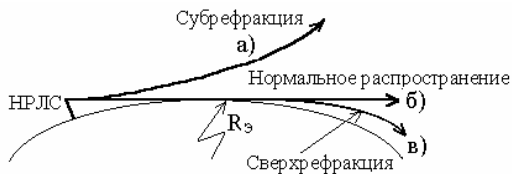


Рис.3-4

Это явление может происходить на высоких широтах, когда холодная масса воздуха проходит над более теплой поверхностью (например, ветер дует над открытой водой после

прохождения его надо льдом).

Сверхрефракция– (см. рис.3-4, луч “в”) возникает при условии $\frac{dn}{dh} < 0$. При этом явлении СВЧ колебания изгибаются вниз.

Сверхрефракция может происходить, если воздух, пройдя над теплой сушей, проходит над относительно холодным морем. Сверхрефракцию можно ожидать вблизи суши и в умеренной и тропической зонах. Она может проявиться в открытом море, далеко от берегов, особенно в районах пассатов.

В результате сверхрефракции значительно увеличивается дальность обнаружения объектов (больше, по сравнению с нормальным распространением СВЧ импульсов – луч “б”, рис.3-4).

Сверхрефракция встречается достаточно часто [2,15]. В Ла-Манше, например, ветер обычно дует со стороны суши. Весной и летом, когда температура суши часто выше, чем температура воды, сверхрефракцию можно ожидать почти все время. В Средиземном море, которое также окружено сушей, сверхрефракция наблюдалась девять дней из десяти в течение весны и лета.

Чем больше разница температур между воздухом и морем, тем больше будут проявляться эти явления.

Волноводный канал (ducting). Если лучи СВЧ импульсов преломляются далее, то они могут отражаться поверхностью суши или моря, затем преломляться вниз опять, снова отражаться и т.д. (см. рис.3-5).



Рис.3-5.

Это явление приводит к образованию *волноводного канала* распространения СВЧ импульсов. Проявляется на очень больших расстояниях, достигая иногда сотни морских миль.

Волноводный канал может образоваться на высотах несколько сот метров: два прилегающих слоя воздуха могут иметь настолько различные коэффициенты преломления, что верхний слой повторно отражает излученный импульс. Таким образом, импульс НРЛС и его эхо может распространяться на очень большое расстояние.

Именно это явление может вызывать необъяснимое изображение навигационной ситуации на индикаторе НРЛС.

На дальность действия НРЛС существенно сказывается затухание энергии радиоволн в кислороде, парах воды, гидрометеорах и др. С укорочением длины волны затухание увеличивается. Максимальное поглощение энергии парами воды происходит на $\lambda=1,34$ см и 0,16 см, а кислородом – на $\lambda = 0,5$ см и 0,25 см.

Затухание радиоволн, вызванное дождем, туманом, снегом, происходит по двум причинам. Во-первых, капли воды в атмосфере – несовершенный диэлектрик для сантиметровых волн, поэтому возбуждаемые в них колебания расходятся на тепло (тепловая потеря энергии); во-вторых, происходит отражение и рассеяние радиоволн.

4. Радиолокационные импульсные передатчики

Передатчик импульсной РЛС (рис.4-1) содержит следующие основные элементы: генератор сверхвысокой частоты (ГСВЧ), модулятор, источник питания (выпрямитель). Генератор вырабатывает мощные кратковременные импульсы колебаний сверхвысокой частоты. В диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн генераторами СВЧ являются магнетроны.

Управление колебаниями генератора осуществляется модулятором устройством, которое состоит из импульсного модулятора и подмодулятора.

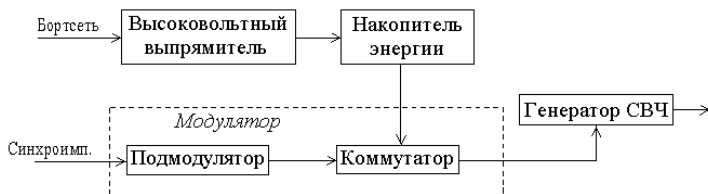


Рис.4-1. Упрощенная функциональная схема радиолокационного передатчика

4.1. Особенности магнетронных генераторов

Магнетрон представляет собой электровакуумный двухэлектродный прибор с электромагнитным управлением [4,10].

В передатчиках судовых радиолокационных станций применяют многорезонаторные магнетроны. Разрез такого типа магнетрона показан на рис. 4-2. Основой конструкции магнетрона является анодный блок 2, представляющий собой массивный медный цилиндр, в котором выточено по окружности четное число цилиндрических резонаторов 5.

Резонаторы сообщаются с внутренней полостью магнетрона, называемой пространством взаимодействия, с помощью прямоугольных пазов 6. Связь магнетрона с внешней нагрузкой осуществляется посредством проволоочной медной петли 8. Эта петля одним концом припаяна к стенке одного из резонаторов, а другим присоединена к внутреннему проводу 9

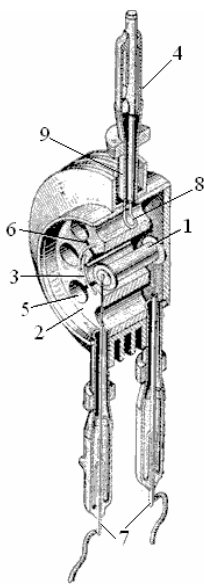


Рис. 4-2. Устройство магнетрона

короткой коаксиальной линии, проходящему через стеклянный спай 4 в волновод.

В центре анодного блока расположен цилиндрический оксидный подогревный катод 1. Этот катод имеет значительный диаметр для получения достаточного эмиссионного тока.

С обеих сторон катода расположены так называемые охранные диски, улучшающие структуру поля у краев анодного блока и препятствующие утечке электронов из пространства взаимодействия в торцовые области магнетрона. Катод укреплен внутри магнетрона с помощью держателей 7, которые служат одновременно выводами тока.

Держатели проходят через стеклянные спаи в цилиндрических трубках, укрепленных на фланце. Имеющееся на держателе утолщение выполняет роль высокочастотного дросселя препятствующего выходу высокочастотной энергии через выводы накала.

С торцевой стороны анодного блока имеются связи — проводники 3, соединяющие сегменты анодного блока. Для охлаждения магнетрона на его наружной поверхности имеются ребра, обдуваемые вентилятором. Исходя из условий удобства охлаждения, безопасности обслуживания и облегчения отвода высокочастотной энергии, анодный блок заземляется, а к катоду прикладываются импульсы высокого напряжения отрицательной полярности. Магнитное поле магнетрона создается обычно постоянными магнитами, не показанными на рис.4-2. Эти магниты, изготовленные из специальных сплавов, создают сильное магнитное поле.

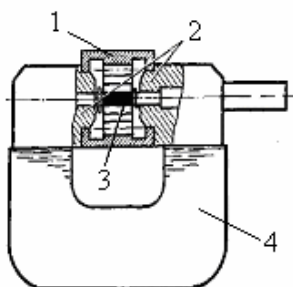


Рис. 4-3. Пакетированный магнетрон:

1 — медный анодный блок;

2 — ферромагнитные полюсные наконечники;

3 — катод; 4 — магнит

На практике широко применяются пакетированные магнетроны (см. рис.4-3), у которых магнитная система является составной частью конструкции самого магнетрона. У пакетированных магнетронов полюсные наконечники входят с торцов внутрь магнетрона.

Этим уменьшается воздушный зазор между полюсами, а, следовательно, и

сопротивление магнитопровода, что позволяет сократить размеры и массу магнитной системы магнетрона.

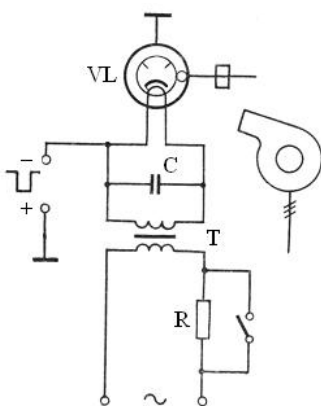


Рис.4-4. Схема магнетронного генератора

В качестве примера, на рис. 4-4 приведена одна из схем магнетронного генератора.

В состав схемы входят: магнетрон, магнитная система, трансформатор накала и система охлаждения анодного блока магнетрона. Схема магнетронного генератора содержит три цепи: сверхвысокочастотную, анодную и накальную. Токи СВЧ циркулируют в резонаторной системе магнетрона и в связанной с ней внешней нагрузке.

Импульсный анодный ток проходит от положительного зажима модулятора, через анод-катод магнетрона, на отрицательный зажим модулятора.

Величина этого тока определяется по формуле

$$I_a = \frac{I_{cp}}{\tau_u F_u \alpha},$$

где I_{cp} — среднее значение анодного тока, А;

τ_u — длительность импульсов, с;

F_u — частота следования импульсов, имп/с;

α — коэффициент формы импульсов (для прямоугольных импульсов равен единице).

Ток накала протекает по цепи, состоящей из вторичной обмотки трансформатора Т и нити подогрева катода. Обычно напряжение накала магнетрона равно 6,3 В, но ввиду того, что катод работает в режиме усиленной электронной бомбардировки, питание катода требуется только для разогрева катода перед подачей высокого напряжения на анод. После подачи анодного напряжения напряжение накала обычно уменьшают автоматически с помощью резистора R до 4 В.

В схеме на рис. 4-4, модулирующий импульс напряжения с выхода модулятора подается на катод магнетрона. Вторичная обмотка трансформатора накала по отношению к корпусу генератора находится под высоким напряжением.

Чтобы не исказить заметно форму модулирующих импульсов, емкость вторичной обмотки трансформатора накала должна быть возможно меньше.

Важным показателем качества работы магнетронного генератора является стабильность частоты генерируемых колебаний. Основными причинами, вызывающими отклонение частоты магнетрона, являются непостоянство и несогласованность нагрузки, непостоянство электрического режима, например: изменения анодного напряжения или анодного тока, колебания температуры анодного блока. Различают следующие два вида изменения частоты:

а) медленное колебание частоты, когда в течение промежутка времени, равного длительности отдельного импульса, частота практически остается постоянной;

б) быстрое изменение частоты, при которой нельзя пренебречь уходом частоты даже во время генерации каждого отдельного короткого импульса.

Медленное изменение частоты происходит при вращении антенны, при плавном изменении напряжения источников питания, при изменении окружающей температуры. Такого вида нестабильность частоты не искажает спектр генерируемого импульса, а несколько сдвигает его. Влияние на работу станции такого ухода частоты можно уменьшить применением в приемнике автоматической подстройки частоты. При быстром изменении частоты наблюдается искажение формы частотного спектра импульса и расширение полосы частот. Это может привести к снижению дальности действия радиолокационной станции, так как значительная доля энергии импульса может оказаться вне полосы пропускания приемного устройства.

Стабильность частоты магнетрона может быть повышена, если длина волноводной линии, соединяющей магнетрон с антенной, не будет превышать некоторую критическую величину, определяемую по формуле

$$l_{kp} = \frac{c}{2\pi\lambda F_c} \cdot \lambda_g K_{\partial\partial},$$

где λ — длина волны РЛС;

λ_g — длина волны в волноводе;

$K_{\partial\partial}$ — коэффициент бегущей волны волноводной линии;

c — скорость распространения радиоволн;

F_c — коэффициент затягивания частоты магнетрона, Гц/°.

Поскольку на практике длина волноводной линии по условиям установки передатчика и антенны может превышать критическую, в волноводный тракт РЛС вводят специальное устройство, называемое фазорегулятором. Фазорегулятор представляет собой отрезок прямоугольного волновода с меняющимися размерами

поперечного сечения. При изменении размеров поперечного сечения меняется фазовая скорость электромагнитных волн и, следовательно, электрическая длина волноводной линии.

Из рис. 4-1 видно, что модулятор состоит из подмодулятора и коммутатора.

В качестве накопителя энергии, в НРЛС 50-х - 70-х годов разработки прошлого столетия чаще всего используется конденсатор и, реже, накопительная линия [9].

Рассмотрим некоторые особенности построения импульсных модуляторов.

4.2. Импульсный модулятор с накопительным конденсатором

Упрощенная схема импульсного модулятора с накопительным конденсатором показана на рис.4-5. Такого типа модулятор использовался в НРЛС "Дон" [9].

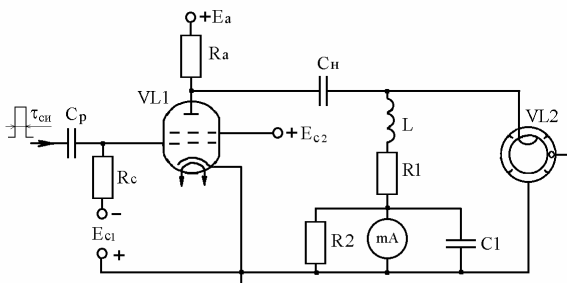


Рис.4-5. Упрощенная схема импульсного модулятора с накопительным конденсатором

Принцип работы импульсного модулятора с накопительным конденсатором заключается в следующем. Накопительный конденсатор C_n , при подаче на управляющую сетку тетрода VL1 большого отрицательного напряжения (порядка $-800B$), заряжается по цепи $+E_a - C_n - L - R_1 - R_2$ до напряжения $+(14+16) kB$.

(Этому значению соответствует $+E_a$). Одновременно подмодулятор формирует импульсы положительной полярности, близкие к прямоугольной форме, длительностью τ_{3u} .

При их поступлении на управляющую сетку VL1 (при этом положительная амплитуда τ_{3u} должна быть больше отрицательного напряжения на управляющей сетке), радиолампа открывается, и накопительный конденсатор C_n разряжается на магнетрон по цепи: VL1 - C_n - VL2 - корпус. На зажимах магнетрона (VL2) «анод-катод»

создается отрицательный модулирующий импульс высокого напряжения, под воздействием которого магнетрон генерирует СВЧ колебания.

Для измерения тока магнетрона последовательно с индуктивностью L и резистором $R1$ включен миллиамперметр, шунтированный резистором $R2$ и конденсатором $C2$.

4.3. Импульсные модуляторы с накопительной линией

Другим типом импульсного модулятора, применяемого в НРЛС, является модулятор с накопительной линией.

Накопительная линия выполняет в таком модуляторе следующее:

- служит накопителем энергии;
- является цепью, формирующей прямоугольные импульсы требуемой длительности.

В качестве накопительной линии (длинной линии) применяются: отрезки разомкнутого на конце коаксиального кабеля с емкостными свойствами, искусственные длинные линии цепочечного типа, искусственные длинные линии из последовательно соединенных параллельных контуров [1].

В модуляторах с накопительной линией коммутирующие приборы работают только на замыкание, поэтому в модуляторах данного типа применяются газоразрядные приборы или полупроводниковые приборы (тиристоры).

Из приборов газоразрядного типа наибольшее распространение получили водородные тиратроны, обладающие рядом преимуществ по сравнению с другими типами газонаполненных приборов. К ним относятся:

- малое время ионизации и деионизации;
- возможность коммутации коротких импульсов;
- положительная пусковая характеристика, то есть для запирания тиратрона не требуется подачи на сетку отрицательного напряжения;
- водородный тиратрон способен работать при различной окружающей температуре и в момент зажигания имеет наибольшее падение напряжения, поэтому мощность, рассеиваемая на аноде тиратрона, невелика.

К недостаткам тиратрона относятся:

- малое обратное напряжение, что приводит к необходимости применять импульсные трансформаторы для повышения напряжения, подаваемого на магнетрон;

- ограничение в выборе более высокой частоты следования импульсов из-за инерционности (времени деионизации) тиратрона.

Схемы модуляторов с накопительной линией разделяются по виду источника питания (с зарядом накопителя от источника постоянного тока и с зарядом от источника переменного тока) и по схеме накопления энергии.

Модуляторы с накопительной линией с зарядом от источника переменного тока применяются в тех случаях, когда необходимо, чтобы частота следования (F_{zu}) импульсов НРЛС соответствовала частоте источника питания переменного напряжения и сами модуляторы выполняли роль синхронизатора НРЛС.

Однако на практике значительно большее распространение получили схемы модуляторов с питанием от источника постоянного напряжения.

4.3.1. Упрощенная схема модулятора с накопительной линией

Ее схема представлена на рис.4-6. Модулятор содержит коммутационную лампу – водородный тиратрон VL1, накопительную линию НЛ (разомкнутую на конце), импульсный трансформатор ИТ, магнетрон VL2, зарядное сопротивление $R_{зар}$ [7].

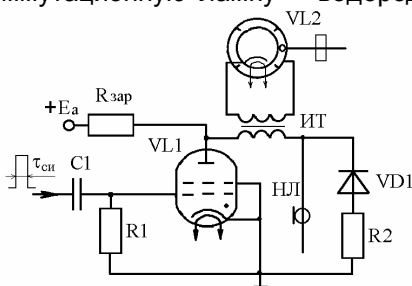


Рис.4-6. Упрощенная схема модулятора с накопительной линией

Анод тиратрона включен в цепь $+E_a - R_{зар}$ - первичная обмотка ИТ – накопительная линия НЛ. Вторичная обмотка ИТ подключена к катоду магнетрона. При отсутствии управляющих сигналов (синхроимпульсов длительностью τ_{cu}), тиратрон заперт, так как напряжение на его управляющей сетке равно нулю.

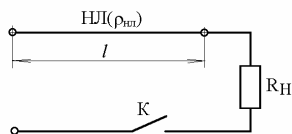


Рис.4-7.

Условно схему, приведенной на рис.4-6 можно представить рис. 4-7.

На этом рисунке К – коммутатор, выполняет роль разомкнутого тиратрона, так как коммутатор не замкнут; R_H – сопротивление нагрузки.

Из-за того, что магнетрон включен в схему (см. рис.4-6) через ИТ,

сопротивление нагрузки $R_H = \frac{R_M}{n^2}$,

где R_M - статическое сопротивление магнетрона;

n - коэффициент трансформации ИТ.

Накопительная линия (НЛ) через $R_{зар}$ заряжается от источника питания до величины E (см. рис.4-8,а).

При подаче на сетку тиратрона поджигающего импульса длительностью $\tau_{си}$, тиратрон поджигается, его сопротивление резко уменьшается и начинается разряд НЛ на нагрузку (первичную обмотку ИТ), величина которой $R_H = \rho$, где ρ - волновое сопротивление НЛ.

Разрядный ток НЛ (см. рис.4-8,б), при $R_H = \rho$ равен

$$i_p = \frac{E}{(\rho + R_H)} = \frac{E}{2\rho} = \frac{E}{2R_H}.$$

Этот ток создает на нагрузке напряжение $U_H = i_p \cdot R_H = \frac{R_H \cdot E}{2R_H} = \frac{E}{2}$

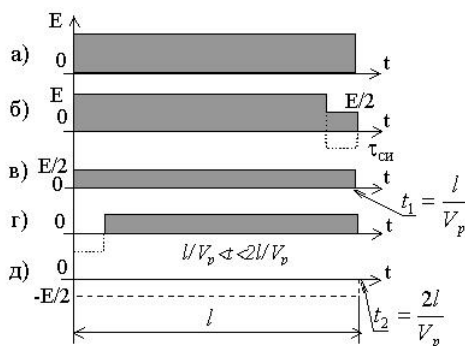


Рис.4-8.

(см. рис.4-8,б). По мере разряда последующих емкостей распределенных емкостей длинной линии НЛ, разрядная волна будет перемещаться вдоль НЛ от ее начала к разомкнутому концу.

В момент времени $t_1 = \frac{l}{V_p}$ (где V_p - скорость

распространения радиоволны вдоль НЛ), волна достигает разомкнутого конца НЛ

(см.рис.4-8,в), отражается без изменения величины и знака и начинает распространяться к нагрузке (рис.4-8,г). Через время $t_2 = \frac{2l}{V_p}$ волна

напряжением $-\frac{E}{2}$ доходит до нагрузки (первичная обмотка трансформатора ИТ).

Так как сопротивление нагрузки согласовано с формирующей линией, то волна напряжения не должна отражаться от нагрузки НЛ и линия оказывается разряженной (рис.4-8,д). На зажимах первичной

обмотки ИТ формируется прямоугольный импульс напряжения амплитудой $-\frac{E}{2}$ длительностью $t_u = \frac{2l}{V_p}$. Этот импульс передается вторичной обмоткой ИТ на магнетрон.

Из приведенного выше следует, что *требуемая длительность* $t_u = \tau_{zu}$ *обеспечивается путем соответствующего выбора длины НЛ*. Например, для формирования $\tau_{zu} = 0,1 \mu\text{с}$, необходима длина НЛ $l = 15$ метров.

Для защиты модулятора от перенапряжений, к НЛ подключен защитный диод VD1 с нагрузочным сопротивлением R2, которое снимает остаточное (возможное) отрицательное напряжение с НЛ.

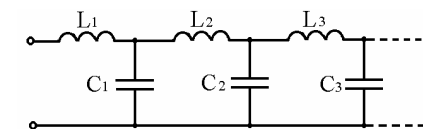


Рис.4-9. Схема искусственной длинной линии

Для получения импульсов большей длительности, в качестве НЛ используют искусственные длинные линии, состоящие из

сосредоточенных элементов L и C (см. рис.4-9).

Длительность импульсов, формируемая такой линией равна $\tau_{zu} = 2n\sqrt{LC}$, где n - количество звеньев (обычно $n = 5 \dots 6$), а L и C - соответственно индуктивность и емкость звена. (Такой тип модулятора применялся в НРЛС серии "Океан").

4.4. Импульсный линейный модулятор

Упрощенная схема импульсного линейного модулятора приведена на рис.4-10.

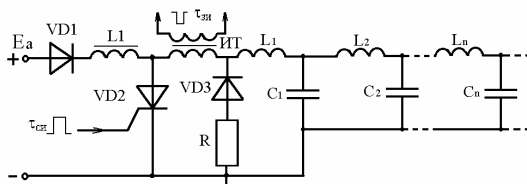


Рис.4-10. Упрощенная схема импульсного линейного модулятора

Импульсный линейный модулятор состоит из зарядного диода VD1, катушки зарядной индуктивности L_1 , накопительной линии $L_n C_n$, импульсного трансформатора ИТ тиристора VD2 и защитной цепочки VD3-R.

Принцип работы импульсного линейного модулятора заключается в следующем: в исходном состоянии тиристор VD2 заперт [1,12]. В этом случае от высоковольтного источника питания $+E_a$, через диод VD1, зарядной

индуктивности L_1 происходит заряд накопительной линии (цепочки) $L_n C_n$ до напряжения $+E_a$. При подаче положительного τ_{cu} отпирается тиристор VD_2 . Протекающий через него ток разряда уменьшает сопротивление тиристора VD_2 и происходит разряд накопительной линии $L_n C_n$ через первичную обмотку импульсного трансформатора ИТ.

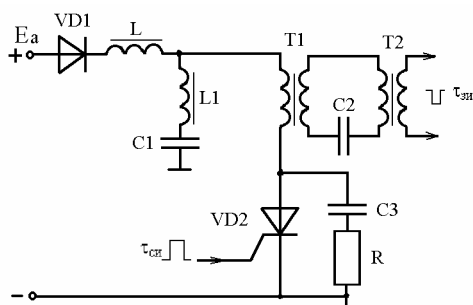
Модулирующий импульс напряжения длительностью τ_{zu} , снимаемый со вторичной обмотки ИТ, подается на магнетрон. Длительность формируемого импульса зависит от параметров n - звеньев накопительной линии $L_n C_n$, то есть $\tau_{zu} = 2n\sqrt{LC}$.

4.5. Импульсный магнитный модулятор

В этой схеме (рис.4-11) в качестве коммутирующего элемента используется катушка нелинейной индуктивности.

Такие модуляторы называются импульсными магнитными модуляторами.

Импульсный магнитный модулятор состоит из катушки нелинейной индуктивности (дроссель) L_1 , накопительной емкости C_1 , нелинейного трансформатора T_1 , накопительного конденсатора C_2 и импульсного трансформатора T_2 .



Эта схема является развитием линейного импульсного модулятора, только длительность и амплитуда управляющего импульса, воздействующего на магнетрон, формируется постепенно, а именно – последовательно. В этой схеме используется свойство нелинейной индуктивности.

Рис.4-11. Схема импульсного магнитного модулятора

(Если сердечник индуктивности L_1 насыщен, его магнитная проницаемость мала и тогда его индуктивное сопротивление минимально. И – наоборот, при ненасыщенном состоянии магнитная проницаемость имеет большую величину, индуктивность в этом случае увеличивается, то есть увеличивается индуктивное сопротивление).

Принцип работы заключается в следующем. В исходном состоянии тиристор VD_2 заперт. В этом случае накопительный конденсатор C_1 через нелинейный дроссель L_1 заряжается до напряжения $+E_a$. Если открыть VD_2 , емкость C_1 через насыщенный

дроссель L1, открытый VD2 разряжается на первичную обмотку нелинейного трансформатора T1. Индуцируемое во вторичной обмотке T1 импульсное напряжение заряжает накопительный конденсатор C2. К концу его заряда сердечник трансформатора T1 насыщается (то есть сопротивление вторичной обмотки T1 становится минимальным) и конденсатор C2 начинает разряжаться на первичную обмотку импульсного трансформатора T2. Во вторичной (повышающей) обмотке этого трансформатора возникает управляющий импульс τ_{zu} , воздействующий на катод магнетрона.

τ_{zu} определяется временем разряда C2 через первичную обмотку T2 или $\tau_{zu} \approx 0,7C2R_{(первич.обмотки\ T2)}$.

C2 включают в схему, если необходимо сформировать $\tau_{zu} \leq 0,1\text{мкс}$.

Если же $\tau_{zu} > 0,1\text{мкс}$, тогда вместо C2 в схеме используют формирующую линию, аналогичной схеме, приведенной на рис.4-6.

(Такие типы модуляторов применяются в НРЛС серии “Наяда”, “Миус”) [12].

5. Антенно-волноводные устройства судовых НРЛС

Антенно-волноводные устройства (АВУ) судовых НРЛС предназначены для излучения мощных СВЧ колебаний, формируемых в передатчике, приема отраженных от целей СВЧ колебаний малой мощности и передачи этих колебаний в тракт приемника. Обычно АВУ состоит из антенны и волноводного тракта.

Основные требования к антеннам:

- возможность кругового, равномерного обзора;
- высокая направленность действия и обеспечение необходимых параметров диаграммы направленности (ДН);
- минимальная интенсивность боковых лепестков;
- широкая полоса пропускания частот, удовлетворяющая излучаемым импульсам длительностью от 0,07 мкс до 1,0 мкс;
- достаточная механическая прочность и жесткость в сочетании с минимальной массой, размерами и парусностью.

Диаграмма направленности антенны показывает зависимость плотности потока мощности (Π) или амплитуды напряженности поля антенны (E) от направления в пространстве при постоянном расстоянии до точек наблюдения.

Для сравнения направленных свойств антенны характеристики направленности приравнивают к единице, то есть относят их к максимальным значениям напряженности поля или плотности потока мощности в направлении максимального излучения и записываются в виде:

$$E(\alpha, \theta) = E_{\max} \cdot F(\alpha, \theta) ;$$

$$\Pi(\alpha, \theta) = \Pi_{\max} \cdot F(\alpha, \theta),$$

где $E_{\max}$ и $F_{\max}$ - максимальные значения соответствующих величин.

Наряду с формульной зависимостью ДН существует и более наглядный способ ее изображения – графический метод. Часто, в главных плоскостях, нормированные ДН изображают в полярной (рис.5-1,а) или прямоугольной системе координат (рис.5-1,б).

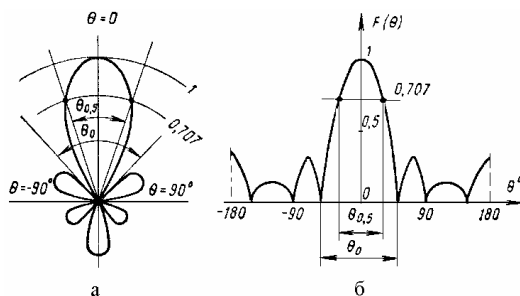


Рис.5-1.

половиной мощности характеризует

Угол $\theta_{0,5}$, (а также угол $\alpha_{0,5}$ - в горизонтальной плоскости) на уровне

соответственно ширину диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскости.

Полярные диаграммы направленности более наглядны. На них хорошо отображаются боковые и задние лепестки.

Направление максимального излучения при $\alpha = 0^\circ$ и $\theta = 0^\circ$. Линия пересечения диаграмм в вертикальной и горизонтальной плоскостях называется осью диаграммы направленности.

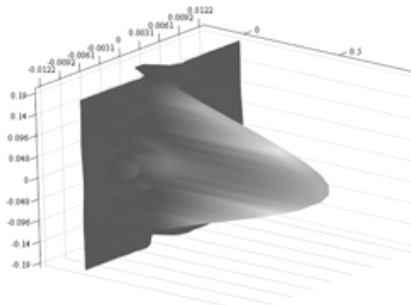


Рис.5-2.

На рис.5-2 приведена расчетная диаграмма направленности для антенны с размерами: в вертикальной плоскости – 15 см, размахом – 300см, при длине волны 3,2см, $\alpha = 1,4^\circ$, $\theta = 22^\circ$ [21].

В судовых НРЛС наибольшее распространение получили рупорно-щелевые и линзовые антенны.

В более ранних моделях НРЛС использовались так называемые *рупорно-параболические антенны* (первые модели НРЛС “Донец”, “Океан”, рис.5-3).

В таких антеннах в качестве отражателя используется конструкция, представляющая собой усеченную параболу, в фокусе которой размещен выход волновода, заканчивающегося рупором.

Рупор на выходе волновода устанавливается из таких соображений. Если осуществлять излучение (то есть облучать параболическое зеркало) открытым концом волновода, эффективность излучения в этом случае будет небольшой, так как

существует несогласованность волнового сопротивления волновода и свободного пространства. В этом случае часть энергии будет отражаться обратно в волновод [6].

На рис.5-4 (антенна НРЛС “Океан-01”) видно, что угол “падения” γ_1 излучаемых СВЧ колебаний равен углу “отражения” γ_2 этих колебаний.

Раскрыв рупора, как правило, герметизирован пенопластиковой крышкой, посаженной на эпоксидную смолу или другой радиопрозрачный клей [7].

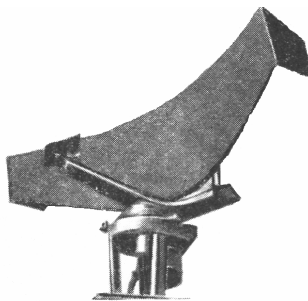


Рис.5-3.

Чтобы устранить воздействие зеркала параболоида на рупорный облучатель, применяют облучение рефлектора под углом γ_1 относительно нормали к плоскости параболоида (рис.5-4). Для этой цели рефлектор наклоняется относительно вертикальной плоскости на угол γ_1 , а облучатель (рупор) располагается на фокальной линии под углом $\gamma_1 + \gamma_2$ относительно горизонтальной плоскости. Тогда облучатель не будет находиться на пути распространения энергии, отраженной от зеркала параболоида.

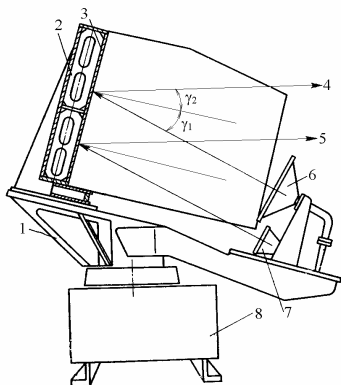


Рис.5-4.

Величина угла наклона γ_1 выбирается в пределах $10^\circ \div 15^\circ$. Параболические рефлекторы делают иногда не сплошными, а решетчатыми (продувными), это уменьшает массу и парусность антенны. Чтобы избежать просачивания энергии сквозь отверстия зеркала, размер отверстий практически

берется равным около $0,1\lambda$. При этом утечка энергии сквозь отверстия составляет не более 2—3%. Решетчатую конструкцию параболического рефлектора применяют на более длинных волнах, где площадь зеркала при заданной направленности может быть очень большой. В диапазоне волн короче 10 см применять решетчатые конструкции отражателей нецелесообразно, так как малые отверстия забиваются гарью, снегом, льдом и пр. От этого увеличивается просачивание энергии через зеркало.

На рис. 5-4 показаны:

1- кронштейн; 2- сечение зеркала отражателя антенны; 3- отражающая поверхность; 4- направление излучения 10-см диапазона; 5- направление излучения 3-см диапазона; 6- излучатель 10-см диапазона; 7- излучатель 3-см диапазона; 8- корпус привода антенны.

Достоинство рупорно-параболических антенн - их простота и хорошие технические данные.

Недостаток – большая парусность, габариты и масса.

5.1. Щелевые и линзовые антенны

Если в любой стенке волновода определенным образом прорезать узкую щель на расстоянии друг от друга около $\lambda/2$ (в морских НРЛС – в узкой стенке, см. рис.5-5), то она может излучать (принимать) СВЧ колебания.

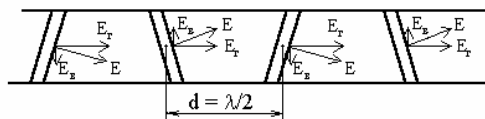


Рис.5-5. магнитного поля $\vec{H}$ ориентирован

вдоль щели, а вектор электрического поля $\vec{E}$ - перпендикулярно щели. Антенна с такой щелью называется *щелевой*. Однако антенна с одной щелью является маломощной и обладает слабой направленностью. Поэтому, для того, чтобы антенна могла излучать необходимую мощность и обладала хорошими техническими параметрами, в стенке волновода (обычно в узкой) создают N щелей, расположенных друг относительно друга под разным наклоном (угол $10^\circ - 15^\circ$).

Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости такой антенны определяется уравнением $\alpha^\circ = 101/N$, где N - количество щелей.

Из рис.5-5 видно, как формируется горизонтальная составляющая электрического поля $\vec{E}_H$. Сложив вектора электрического поля $\vec{E}$, возникающих в щелях, получим $\sum E_H$, а $\sum \vec{E}_B \approx 0$. Так как $\sum \vec{E}_B \approx 0$ практически не компенсируется, то в антенне увеличивается интенсивность боковых лепестков, то есть ухудшается направленность антенны в горизонтальной плоскости.

Для подавления $\vec{E}_B$, в волноводе, на расстоянии $d = \lambda_{крим}/2$ размещаются фильтры (перегородки), сквозь которые E_H проходит без потерь, а $\vec{E}_B$ излучаться не сможет, так как эти фильтры для этой составляющей представляют большое сопротивление.

На практике применяют так называемые *рупорно-щелевые* антенны [3].

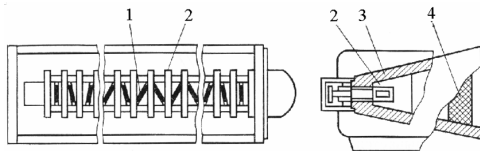


Рис.5-6.

По своим свойствам она аналогична полуволновому симметричному вибратору [1,9]. Только в щелевом излучателе вектор

На рис. 5-6 показана схема построения рупорно-щелевой антенны, где: 1- щель; 2- фильтр подавления вертикальной составляющей $\vec{E}_B$ электрического поля; 3- рупор; 4- радиопрозрачная герметическая пластина.

Щелевые излучатели формируют диаграмму направленности в горизонтальной плоскости, а внешний рупор, внутри которого находится излучатель – диаграмму направленности в вертикальной плоскости.

Для поглощения отраженной волны в щелевом излучателе, на его конце подсоединен специальный поглотитель.

В новых моделях НРЛС (например, НРЛС “Печора-2” [12]) используется *линзово-щелевая* антенна. Она состоит из слабо направленного облучателя 1 (см. рис.5-7) и линзы 2 (плосковыпуклой “а” или плосковыгнутой “б”). Линза изготавливается из диэлектрического радиопрозрачного материала (полистирол, фторпласт). С помощью линзы электромагнитная волна облучателя преобразуется в плоскую волну, формирующую заданную диаграмму направленности.

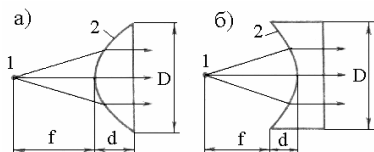


Рис.5-7.

Размер D определяет угол раскрытия диаграммы направленности в вертикальной плоскости: $\theta^\circ = 51\lambda / D$.

Толщина линзовой антенны d выбирается исходя из соотношения

$d = (0.15 \div 0.2)D$. Фокусное расстояние f , на котором располагается облучатель от плоскости линзы, $f \approx 0.5D$.

На практике находят применение комбинированные *линзово-щелевые* антенны. В этом типе антенны диаграмма направленности в горизонтальной плоскости формируется, как обычно, прорезанными в узкой стенке волновода щелями, а в вертикальной плоскости – с помощью линзовой диэлектрической антенны.

Антенны такого типа имеют меньшую массу и парусность при тех же размерах раскрытия в горизонтальной плоскости, что и у рупорно-щелевых антеннах.

На рис.5-8 показаны фото общего вида рупорно-щелевой антенны “а” и щелевой антенны “б”, находящейся под радиопрозрачным материалом и, одновременно совмещенной с приемопередатчиком.



Рис.5-8. а) рупорно-щелевая антенна; б) щелевая антенна, совмещенная с приемопередатчиком

5.2. Антенные переключатели

При использовании в РЛС одной общей антенны, как для передачи, так и для приема радиолокационных сигналов, обязательным является наличие антенного переключателя (АП). Переключатель осуществляет коммутацию антенны с передачи на прием и обратно и защищает вход приемника от проникновения чрезмерно большой мощности сверхвысокой частоты. Источником этой мощности является собственный передатчик РЛС, а также могут быть соседние РЛС, работающие на одной и той же частоте. Влияние соседних РЛС может сказываться как при включенной, так и при полностью выключенной собственной РЛС.

К антенным переключателям предъявляются следующие требования:

- в момент передачи мощность, просачивающаяся на вход приемника, должна быть как можно меньше. На волнах сантиметрового диапазона, где применяются смесители на полупроводниковых диодах, величина попадающей на вход мощности не должна превышать 0,1 Вт. При большей мощности диод может выйти из строя;

- АП должен быть быстродействующим. Время срабатывания не должно превышать сотых долей микросекунды. В противном случае сильно увеличивается просачивающаяся на вход приемника мощность и возрастает минимальная дальность РЛС из-за увеличения времени восстановления чувствительности приемника;

- потери мощности при передаче и, особенно при приеме отраженных сигналов должны быть минимальными.

Применяемые в настоящее время в судовых РЛС антенные переключатели можно условно разделить на коммутационные или ответвительные (ОАП), балансные или мостовые (БАП) и ферритовые (ФАП) [1,9].

Схема балансного антенного переключателя с разрядниками блокировки передатчика (РБП) показана на рис. 5-9.

В него входят: две волноводные линии, два щелевых моста ЩМ1 и ЩМ2 и два высокочастотных газовых разрядника – разрядники блокировки передатчика (РБП). (Щелевой мост представляет собой два отрезка волноводной линии прямоугольного сечения с общей узкой стенкой. Волноводные отрезки связаны между собой щелью, вырезанной в общей узкой стенке волновода).

Принцип действия балансного антенного переключателя основан на соотношении фаз и амплитуд радиолокационных сигналов, распространяющихся в волноводных отрезках линий, снабженных щелевыми мостами со связью по узкой стенке. При подаче СВЧ колебаний из передатчика в канал 1 (см. рис.5-9,а) мощность $P_{пер}$ будет распределяться поровну между каналами 1 и 2 с

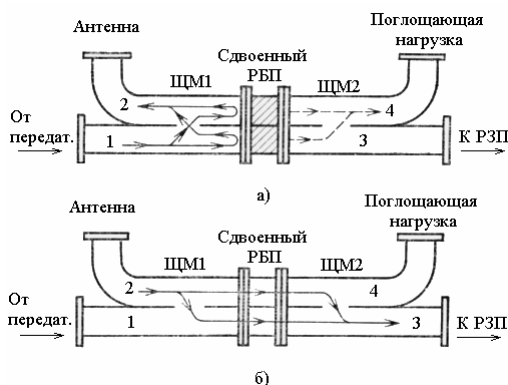


Рис. 5-9. Схема балансного антенного переключателя

помощью моста ЦМ1. При этом мощность колебаний в канале 2 будет отставать по фазе относительно канала 1 на 90° .

Под действием мощных колебаний передатчика оба разрядника замкнутся и закоротят оба волноводных канала 1 и 2. Энергия, отраженная от замкнутых разрядников РБП нижнего и верхнего каналов, изменяясь синфазно, будет передаваться в антенну через

канал 2. Отраженная энергия каналов 1 и 2 на выход передатчика распространяться не сможет, так как, складываясь в канале 1, она получает фазовый сдвиг, равный 180° .

В связи с тем, что некоторая часть энергии передатчика может просачиваться через РПБ в каналы 3 и 4 и попадать на вход приемника, в схеме предусмотрен второй целевой мост ЦМ2 (см. рис. 5-9, б). Энергия канала 3, проходя через ЦМ2 в канал 4, складывается с энергией канала 4, имея одинаковую фазу, и поглощается нагрузкой. Энергия канала 4, проходя через ЦМ2, оказывается в противофазе с энергией канала 3 и в сторону приемника не распространяется. Таким образом, вход приемника оказывается, в какой-то мере, защищенным от просачивающейся через РПБ мощности передатчика.

При приеме отраженных сигналов (см. рис. 5-9, б) РПБ остаются разомкнутыми и, имея достаточно высокую добротность, пропускают без потерь принятые сигналы в каналы 3 и 4. Проходя ЦМ1 и ЦМ2, энергия каналов 2 и 3 оказывается в противофазе с энергией канала 4. Энергия каналов 2 и 4, проходя через ЦМ2, будет суммироваться с энергией в канале 3 с одной и той же фазой и поступать на вход приемника.

В антенных переключателях типа ФАП используются необратимые элементы — ферриты, поэтому их часто называют ферритовыми антенными переключателями. Феррит представляет собой ферромагнитный полупроводник, обладающий электрическими свойствами диэлектрика и магнитными свойствами ферромагнитного металла.

Магнитные показатели ферритов могут регулироваться изменением их намагниченности. Малая электропроводность обеспечивает

значительное уменьшение потерь энергии на вихревые токи, что позволяет применять ферриты в диапазоне сверхвысокой частоты.

Используя ферриты в волноводах, можно создать устройство с различными характеристиками для передаваемой по волноводу электромагнитной энергии в зависимости от направления последней.

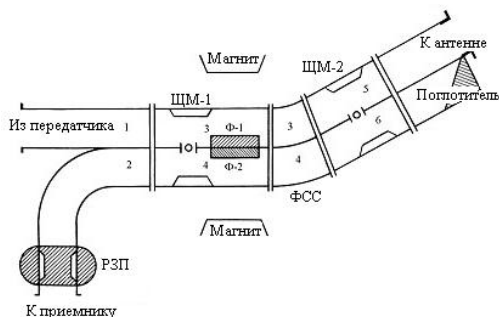


Рис.5-10. Ферритовый антенный переключатель

Ферритовый антенный переключатель (рис.5-10) состоит из двух симметричных щелевых мостов ЩМ-1 и ЩМ-2 и двухканальной волноводной секции с помещенными внутри каждого канала ферритами Ф-1, Ф-2, выполняющими роль ферритовых

фазовращателей.

На внешней части волноводной

секции находится постоянный магнит, поле которого воздействует на ферриты. Кроме того, имеются фазосдвигающая секция (ФСС), поглотитель (поглощающая нагрузка - ПН) и разрядник защиты приемника (РЗП). Ферриты регулируются так, чтобы при распространении энергии со стороны передатчика феррит Ф-2 создает отставание фазы электромагнитного поля на 90° по отношению к фазе поля, проходящего через феррит Ф-1. При распространении же энергии со стороны антенны и поглощающей нагрузки феррит Ф-1 создает отставание поля по фазе на 90° по отношению к фазе поля, проходящего через феррит Ф-2.

Фазосдвигающая секция представляет собой двухканальный волноводный переход, устроенный так, что путь, проходимый волной по каналу 3, короче на четверть волны, чем путь по каналу 4. При этом волна канала 4 будет отставать по фазе на 90° от волны, идущей по каналу 3.

При передаче зондирующих импульсов переключатель работает следующим образом. Энергия из передатчика, распространяясь по каналу 1 щелевого моста ЩМ-1, делится пополам между каналами 3 и 4. В приемник энергия не попадает, так как канал 2 приемника с помощью РЗП развязан от канала передатчика. Волна, входящая в канал 4, через щелевой мост ЩМ-1 будет отставать по фазе на 90° относительно волны, распространяющейся через канал 3. При прохождении через феррит Ф-2 фаза волны в канале 4 получит дополнительное отставание по фазе на угол 90° относительно волны в канале 3. Таким образом, на выходе фазосдвигающей секции волна

канала 4 отстает по фазе относительно канала 3 на угол, равный 270° .

Проходя щелевой мост ЩМ-2, энергия из канала 4 поступает в канал 5 антенны, куда одновременно поступает и энергия из канала 3. Поскольку при прохождении моста ЩМ-2 энергия канала 4 получает дополнительное отставание по фазе на 90° , то в канал антенны 5 энергия из каналов 3 и 4 поступает в фазе. Одновременно энергия волн, поступающая в канал 6 поглощающей нагрузки из каналов 3 и 4, оказывается в противофазе и компенсируется, не отражаясь. В случае появления расфазирования в каналах 3 и 4 остаточная энергия будет затрачиваться в поглощающей нагрузке.

При приеме отраженных сигналов энергия, выйдя из антенного канала 5 в щелевой мост ЩМ-2, делится пополам между каналами 3 и 4. Приходя в канал 4, энергия получит отставание по фазе на угол 90° относительно энергии в канале 3. После прохождения фазосдвигающей секции энергия канала 4 дополнительно будет отставать по фазе от энергии в канале 3 еще на угол 90° . Одновременно энергия в канале 3, проходя через феррит Ф-1, получит отставание по фазе относительно энергии в канале 4 на угол 90° . Тогда на входе щелевого моста ЩМ-1 разность фаз между энергией канала 3 и энергией канала 4 оказывается равной 90° . Благодаря этому энергия принятых отраженных сигналов, проходя через щелевой мост ЩМ-1 из канала 3 в канал 2, оказывается в фазе с энергией канала 4 и, суммируясь, поступает через РЗП на вход приемника. Энергия из канала 4, проходящая в канал 1 передатчика, получив отставание по фазе на 90° , оказывается в противофазе с энергией, поступающей в канал 1 из канала 3. Следовательно, принятые отраженные сигналы на вход передатчика не попадут.

5.3. Высокочастотные газовые разрядники

Высокочастотные газовые разрядники являются одними из важных составляющих антенных переключателей. Различают два вида высокочастотных газовых разрядника: разрядники защиты приемника (РЗП) и разрядники блокировки передатчика (РБП) [1,9].

РЗП применяется потому, что при излучении мощных СВЧ колебаний щелевые мосты антенного переключателя пропускают на приемник не более $1/1000$ энергии зондирующего импульса. Однако этой энергии достаточно для повреждения кристаллических диодов смесителя приемника. При приеме же отраженных СВЧ импульсов РЗП должны пропускать сигналы малой мощности с незначительными вносимыми потерями.

Типичная конструкция РЗП приведена на рис.5-11.

РЗП представляет собой герметичную волноводную секцию, состоящую из двух связанных четвертьволновых резонансных

фильтров, каждый из которых включает емкостный элемент в виде усеченного конуса и индуктивный элемент в виде диафрагмы [6].

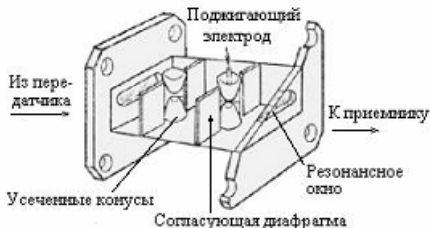


Рис.5-11. Типичная конструкция РЗП

Электроды конусной формы расположены друг относительно друга на расстоянии $\lambda/4$.

Для уменьшения времени срабатывания (восстановления) РЗП заполняется смесью водорода и паров воды под небольшим давлением.

В зазорах между усеченными конусами формируется электрическое поле с большим значением напряженности, так как вторая пара электродов, расположенных ближе к выходу находится под напряжением около $-800В$. В период передачи мощного зондирующего импульса оно вызывает быструю ионизацию газа, вследствие чего полное сопротивление разрядника для передаваемого сигнала оказывается очень малым.

Под воздействием зондирующего импульса передатчика из-за быстрой ионизации замыкается пара поджигающих электродов (находящаяся под напряжением около $-800В$). Образовавшаяся отраженная волна от этой пары электродов создает высокое пробивное напряжение на входной паре электродов. Возникшая при разряде плазма, обладая высокой проводимостью, закорачивает вход РЗП и, таким образом, защищает вход приемника от проникновения мощных СВЧ импульсов передатчика.

Важными параметрами РЗП являются малые *величины потерь в дуге и время восстановления*.

Часть поступающей энергии передатчика, поглощаемая разрядником, называется потерями в дуге, а время, требуемое для деионизации разрядника после прекращения импульса — временем восстановления. (Время восстановления влияет на такой эксплуатационный параметр НРЛС, как минимальная дальность обнаружения целей). Как правило, проектирование РЗП с минимизацией потерь в дуге и малым временем восстановления не согласуется с требованием минимизации энергии в начальном выбросе и мощности плоской части просачивающегося импульса. Кроме того, в приемниках с малым уровнем собственного шума необходимо (во избежание значительного увеличения коэффициента шума приемника), чтобы потери при приеме, обусловленные конструкцией разрядника и разрядом через поджигающий электрод, были очень малы.

Основным типом разрядника блокировки передатчика РБП является наполненная газом замкнутая четвертьволновая секция,

входное окно которой герметизировано стеклянной пластиной, прозрачной для электромагнитных колебаний СВЧ. При подаче большой мощности СВЧ газ ионизируется, и полное входное сопротивление разрядника падает до малой величины. При приеме сигналов полное входное сопротивление РБП велико. Вследствие резонансных свойств полоса пропускания РБП меньше, чем РЗП с отражательными разрядниками. В то же время РБП дают возможность переключать более высокие мощности, чем РЗП. РБП и РЗП используются обычно совместно с направленными ответвителями, образуя компактные широкополосные балансные антенные переключатели.

На рис. 5-9 и 5-10 приведены примеры использования РЗП и РБП в РЛС. Функции переключения в этих устройствах выполняются предварительным РЗП или РБП, а непосредственная защита приемника осуществляется дополнительным РЗП. Распределение функций переключения и защиты приемника между независимыми разрядниками позволяет оптимизировать каждую из этих функций. Предварительные РЗП и РБП рассчитываются на малые потери в дуге и эффективную передачу большой мощности на антенну в пределах широкой полосы частоты, в то время как дополнительные РЗП рассчитываются на зажигание при низком уровне мощности. При этом в предварительных РЗП не требуется иметь поджигающие электроды. В некоторых типах НРЛС, наряду с РЗП для защиты входа приемника используется электромагнитная заслонка (ЭМЗ) [9, 12].

ЭМЗ представляет собой электромагнит, который опускает (вынимает) штырь в волноводной секции антенного переключателя. Как правило, ЭМЗ располагается в антенном переключателе впереди РЗП.

При включенной НРЛС, когда подается напряжение поджига на РЗП, штырь с помощью электромагнита вынимается из волноводной секции и СВЧ волна, через РЗП, поступает на вход приемника – в смесительную камеру.

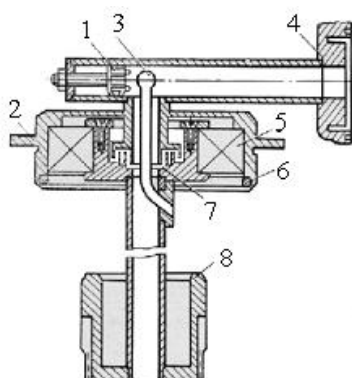
Когда же НРЛС находится в нерабочем состоянии (отсутствует напряжение поджига на РЗП и питание ЭМЗ) штырь ЭМЗ опускается в волноводную секцию, создавая при этом короткое замыкание в линии, ведущей к приемнику.

5.4. Вращающийся переход

Вращающийся переход предназначен для передачи (приема) СВЧ колебаний от неподвижной части волноводного тракта к подвижной антенной части. Основой его являются два элемента: волноводно-коаксиальный переход и бесконтактное дроссельное соединение коаксиальной части. Коаксиальная часть перехода присоединяется

перпендикулярно к широкой стенке волноводной части на расстоянии четверти длины волны от короткозамкнутого конца, так что энергия, отраженная от этого конца, складывается с энергией, распространяющейся в прямом направлении. Центральный проводник коаксиальной части заканчивается в волноводе зондом. Размеры, конфигурация и место установки зонда в волноводе выбраны так, чтобы обеспечивалось наилучшее согласование структуры электромагнитных полей обеих частей перехода, что сопровождается минимальными потерями, отражениями и быстрым затуханием возбуждающихся на переходе волн высших порядков.

На рис.5-12, в качестве примера, показан вращающийся переход щелевой антенны АЗ диапазона 3,2 см НРЛС "Океан-01" [7]. На нем изображены:



1 — поршень регулировки перехода; 2—фланец установки на полый вал привода антенны; 3 — зонд перехода; 4 — фланец к антенному тракту; 5— подшипник; 6 — пружинное кольцо удержания подшипника; 7— дроссельное соединение между неподвижной прямоугольной частью и круглой вращающейся частью; 8 — круглый фланец с резьбой под накидную гайку мачтового тракта.

В конструкции бесконтактного соединения внешних проводников коаксиальной части используется

Рис.5-12. Вращающийся переход щелевой антенны

известное свойство полуволновых отрезков линий передач, заключающееся в том, что

входное сопротивление отрезка, закороченного на конце, близко к нулю, а токи в середине отрезка практически отсутствуют. Коаксиальные проточки в утолщенных стенках соприкасающихся внешних проводников представляют собой свернутый отрезок полуволновой линии, закороченной на конце. Зазор в месте поворота линии на 180° не мешает нормальному функционированию линии, так как токи в этом месте отсутствуют. С другой стороны, сопротивление зазора во внешнем проводнике коаксиальной части перехода равно нулю, поскольку зазор является входом замкнутой на конце полуволновой линии. Таким образом, разрыв внешнего проводника не препятствует прохождению тока по нему от неподвижной части к подвижной и в обратном направлении.

При работе НРЛС на излучение, СВЧ импульсы (частотой f_c) от магнетрона по волноводному тракту через антенный переключатель (АП) поступают в антенну, а из нее – в пространство. При наличии на пути распространения СВЧ импульсов объектов, которые обладают свойством отражения, часть энергии СВЧ импульсов попадает в антенну, а из нее – по волноводному тракту снова в антенный переключатель, который должен уже переключиться с передачи на прием, тем самым, через разрядник защиты приемника (РЗП) подключает антенну ко входу приемника.

РЗП (см. рис.5-10) вместе с АП обеспечивает согласование входа приемника с волноводом, а также защищает чувствительные диоды смесителя УПЧ от СВЧ импульсов, превышающих по мощности допустимый порог для диодов. (В некоторых моделях НРЛС, для защиты диодов смесителя УПЧ, когда НРЛС обесточена, применяется электромагнитная заслонка, которая располагается впереди РЗП).

В приемнике НРЛС производится преобразование поступающих из антенны отраженных от объектов импульсов СВЧ в более низкую (обычно 60 МГц) промежуточную частоту $f_{пч}$, которая усиливается относительно низкочастотными усилителями, называемые усилителями промежуточной частоты (УПЧ). УПЧ состоит из нескольких каскадов, расположенных после преобразователя частоты, в которых на промежуточной частоте происходит основное усиление слабых сигналов, принимаемых от объектов. Детекторный каскад преобразует импульсы, заполненные промежуточной частотой, в видеоимпульсы, которые усиливаются видеоусилителем и поступают в видеосмеситель индикатора.

Кроме того, в приемнике применяются временная регулировка усиления (ВРУ), укорочение видеоимпульсов с помощью дифференцирующей цепи с малой постоянной времени (МПВ), автоматическая подстройка частоты с помощью блока АПЧ и некоторые другие регулировки.

6.1. Преобразование частоты

Преобразование частоты в радиолокационном приемнике производится с помощью кристаллических диодных смесителей, размещенных в специальных волноводных секциях, к которым подводятся непрерывные колебания СВЧ от гетеродина (частотой f_c) и отраженные импульсы из антенны (частотой f_c) (или ослабленные импульсы магнетрона — в смесителе АПЧ). Гетеродин, смеситель УПЧ приемника и смеситель АПЧ располагаются в одном общем блоке СВЧ, в котором конструктивно размещен и антенный переключатель.

В качестве маломощного непрерывно работающего генератора СВЧ в приемниках чаще всего используют отражательный клистрон или генератор на диоде с объемным эффектом (ГДОЭ), получивший название диод Ганна.

Отражательный клистрон представляет собой вакуумный прибор, конструктивно объединенный в одно целое с объемным резонатором [9]. Частота колебаний клистрона в основном обусловлена собственной частотой резонатора и, в некоторой степени, — величиной напряжения на отражательном электроде. Поэтому для изменения частоты клистрона в широких пределах (несколько сот мегагерц) применяют механическую настройку, в процессе которой изменяют размеры и форму резонатора. Изменение напряжения на отражателе позволяет регулировать частоту колебаний клистрона в пределах нескольких десятков мегагерц.

Регулировка напряжения на отражателе клистрона может осуществляться вручную с помощью потенциометра РПЧ, размещенного на панели управления индикатора, или автоматически от блока АПЧ, находящегося в приемнике НРЛС.

Диод Ганна, представляет собой пластину однородного кристалла арсенида галлия размером порядка $0,1 \times 0,15$ мм, на обе поверхности которой нанесены невыпрямляющие металлические (омические) контакты [23].

Процесс преобразования постоянного тока в энергию колебаний СВЧ в ГДОЭ, в отличие от диодов с p - n переходом, происходит во всем объеме полупроводника. Когда приложенное к полупроводнику напряжение окажется больше определенной критической величины, между контактами в узком слое полупроводника образуется очень сильное электрическое поле и у катода создается дипольный объемный заряд, называемый электрическим доменом, который является некоторой эквивалентной емкостью. Домен с определенной скоростью перемещается от катода к аноду и, достигнув анода, исчезает. Частота появления и исчезновения домена зависит от толщины пластинки. В моменты появления и исчезновения домена ток в цепи диода резко изменяется, то есть имеет импульсный характер. Первая гармоника импульсного тока возбуждает колебания в объемном резонаторе. Под действием постоянного напряжения, приложенного к диоду, при малой длине полупроводника в нем создается сильное электрическое поле, способствующее возникновению колебаний СВЧ.

Генератор СВЧ с использованием диода Ганна — это сочетание диода с объемным резонатором. Частота генератора зависит от размера кристалла, приложенного напряжения, объема резонатора и может изменяться как механическим, так и электрическим способом. Существуют генераторы на диодах Ганна в диапазоне частот 1 ... 40

ГГц. Мощность генерируемых колебаний может быть получена от сотни милливатт в непрерывном режиме до единиц ватт, а в импульсном режиме — десятки и сотни ватт.

6.1.1. Смесители на СВЧ диодах

Обычные электронные лампы в качестве смесителей на СВЧ не применяются из-за сравнительно большого времени пролета электронов (относительно периода колебаний) и большой межэлектродной емкости самой лампы (ее параллельное подключение к контуру понижает частоту собственных колебаний). Поэтому в качестве смесителей применяются СВЧ кремниевые диоды. Они обладают миниатюрными электродами, которые создают малую емкость, несмотря на очень малое расстояние между ними. Диоды характеризуются малым уровнем собственного шума. Вольтамперная характеристика СВЧ кремниевого диода содержит нелинейный участок, благодаря чему становится возможным смешивание на нем двух частот, одновременно поступающих в цепь диода. Преобразование частоты происходит наилучшим образом (ток разностной частоты в цепи диода при этом максимален), если рабочая точка диода выбрана на нелинейном участке с наибольшей крутизной. Выбор рабочей точки обычно осуществляется регулировкой уровня колебаний, подводимых от гетеродина.

Колебания промежуточной частоты $f_{пч} = f_c - f_s$, равной 60 МГц (иногда, в некоторых моделях НРЛС применяют промежуточную частоту равную 30 МГц), выделяют с помощью колебательного контура, настроенного на эту частоту и включенного в цепь диода. Размещается диод в волноводом таким образом, чтобы его внутренний проводник был расположен вдоль силовых линий электрического поля подводимых к волноводу колебаний.

Смеситель на одном диоде. В таком смесителе (рис.6-2) диод, конструктивно оформленный в виде небольшого патрончика цилиндрической формы, устанавливается внутри волновода посередине его широкой стенки. Гнездо, в которое устанавливается диод, обеспечивает контакт с обоими выводами диода. В данной схеме один вывод соединен с волноводом, то есть, с корпусом, другой — с внутренней жилой коаксиального кабеля.

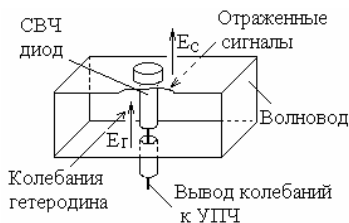


Рис.6-2.

Колебания гетеродина и отраженные импульсы СВЧ из антенны поступают в волновод с разных его концов или с одной стороны. Регулировку уровня колебаний

гетеродина осуществляют attenuатором, установленным в волноводе, через который они подаются (на рис.6-1 attenuатор не изображен).

Входной контур УПЧ, настроенный на промежуточную частоту, при протекании по нему тока разностной (промежуточной) частоты $f_{пч}$, выделяет напряжение промежуточной частоты $U_{пч}$, которое за счет индуктивной связи поступает на вход первого каскада УПЧ.

Недостатком рассмотренного смесителя является сравнительно большой уровень шумов на его выходе из-за детектирования диодом колебаний гетеродина, которые имеют не постоянную, а хаотически изменяющуюся амплитуду. Изменение амплитуды происходит с частотой, попадающей в полосу частот контура УПЧ, поэтому на нем выделяется переменное (непрерывно действующее) напряжение шумов $U_{ш}$, которое мешает выделению слабых импульсов промежуточной частоты. Для уменьшения влияния шумов гетеродина и ослабления влияния эхо-сигналов на частоту гетеродина в судовых РЛС используется балансная схема преобразователя (см. рис.6-3). Основой этой схемы является *двойной волноводный тройник*, через широкую стенку которого поступают отраженные импульсы, а через узкую подводятся колебания от гетеродина. В симметричных точках обоих плеч располагаются кристаллические детекторы-смесители ($VD1, VD2$).

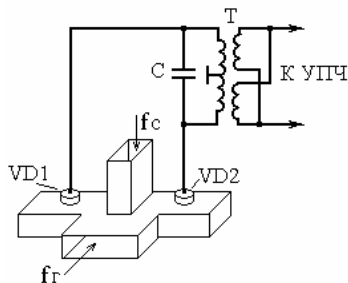


Рис.6-3.

С выхода этих детекторов снимаются импульсы ПЧ, которые затем поступают в УПЧ.

Двойной волноводный тройник характерен тем, что сигналы достигают детекторов, расположенных на одинаковом расстоянии от входа, со сдвигом по фазе, равным 180° , а колебания гетеродина поступают на оба детектора в фазе.

Возникающий в результате преобразования ток промежуточной

частоты, например, через диод $VD1$ имеет фазу $\varphi_{np1} = \varphi_c - \varphi_z$, а ток

через диод $VD2$ — фазу $\varphi_{np2} = \varphi_c + 180^\circ - \varphi_z = \varphi_{np1} + 180^\circ$.

Благодаря этому токи промежуточной частоты в контуре будут складываться. Тогда, токи шумов гетеродина, проходя через контур во встречном направлении, будут вычитаться. Следовательно, токи шумов гетеродина при надлежащей симметрии плеч схемы не создают напряжения шумов на входе УПЧ приемника, сохранив при этом полезный сигнал.

Балансная схема преобразователя в настоящее время широко применяется в судовых РЛС.

6.2. Усилитель промежуточной частоты

Усиление импульсов промежуточной частоты, поступающих из смесителя, производится многокаскадным транзисторным УПЧ, контуры которого настроены на фиксированную частоту 60 МГц и имеют полосу пропускания до 4...18 МГц.

Импульсы на входе приемника в зависимости от расстояния до объекта и его отражающей поверхности изменяются по мощности в $10^{10} \dots 10^{12}$ раз (на 100 ... 120 дБ) или по амплитуде напряжения в $10^5 \dots 10^6$ раз. Равномерное усиление приемника в таком диапазоне входных напряжений иметь не обязательно, так как в индикаторе РЛС используют ЭЛТ, у которых управляющий сигнал, превышающий шум в 3 ... 5 раз, вызывает насыщение яркости луча на экране.

В настоящее время в приемниках РЛС применяют линейные и логарифмические УПЧ, отличающиеся друг от друга характером амплитудных зависимостей выходного напряжения от входного.

Приемник РЛС должен осуществлять усиление импульсных сигналов при минимальных искажениях формы импульсов, поступающих на его вход. Это требует правильного выбора промежуточной частоты и полосы пропускания тракта УПЧ. Широкополосность радиолокационных приемников снижает их чувствительность из-за возрастания уровня шумов, маскирующих слабые полезные сигналы, а также не позволяет получить высокий коэффициент усиления в каждом каскаде. Это требует увеличения числа каскадов УПЧ.

УПЧ характеризуются:

- значением промежуточной частоты;
- коэффициентом усиления на рабочей частоте;
- шириной полосы пропускания;
- избирательностью, показывающей, во сколько раз уменьшается усиление при заданной расстройке.

Для сохранения формы огибающей усиливаемых импульсов ПЧ обычно выбирается равной 60 МГц. Такое значение обеспечивает также необходимую избирательность приемника, облегчает выделение видеосигналов при детектировании, позволяет получить требуемое усиление в каждом каскаде УПЧ.

В подавляющем большинстве случаев ширина полосы пропускания радиолокационного приемника по ПЧ выбирается из соотношения

$$\Delta f_{пч} = (0,8 \div 1,4) / \tau_u ,$$

где значение коэффициента в числителе зависит, главным образом, от формы амплитудно-частотной характеристики приемника, влияющей на искажения формы импульса.

Для обеспечения требуемого усиления в УПЧ применяется большое число каскадов (около 10). Обычно, при переключении шкал дальности, в НРЛС изменяется длительность излучаемых СВЧ импульсов. Поэтому, для расширения полосы пропускания каскада УПЧ, при уменьшении длительности излучаемых СВЧ импульсов на малых шкалах, искусственно уменьшают резонансное сопротивление контура, включая параллельно ему сопротивление.

В приемниках судовых РЛС обычно применяют двухконтурные каскады, обеспечивающие более высокую эффективность при длительностях импульсов менее 1 мкс.

6.2.1. Выбор полосы пропускания приемника

Полоса пропускания приемника определяет:

искажения формы импульсов, влияющие на точность измерения координат и разрешающие способности РЛС;

величину отношения *сигнал/шум* на выходе приемника (реальную чувствительность), влияющую на дальность действия.

Линейные искажения формы импульсов (огибающей) происходят в результате ограничения пропускаемого приемником спектра импульсов, что является неизбежным результатом частотно-избирательных свойств приемника. Они проявляются в растягивании фронтов импульсов и уменьшении его амплитуды на выходе.

По мере расширения полосы пропускания длительность фронта и спада импульсов уменьшается, а, следовательно, сокращается общая длительность, а форма приближается к исходной — прямоугольной, однако при этом возрастает уровень шума.

Оптимальной полосой пропускания приемника называется такое ее значение, при котором отношение сигнал/шум на выходе приемника становится максимальным. Теоретические и практические исследования показали, что оптимальная полоса пропускания определяется отношением

$$\Delta f_{опт.} = 1,37 / \tau_u \quad (48)$$

При этом форма импульса на выходе приемника близка к колоколообразной, а амплитуда не достигает максимума входного импульса на 10 — 20%.

Под отношением сигнал/шум понимается отношение амплитуды импульса к эффективному напряжению шумов, то есть при выполнении

соотношения (48) достигается максимум отношения мощности сигнала к мощности шумов на выходе приемника. Поэтому для станций дальнего обнаружения полоса пропускания приемника близка к оптимальной. Если же к РЛС предъявляются требования высокой точности и подробности воспроизведения информации, то полоса пропускания приемника в несколько раз расширяется и может достигать значения $\Delta f_{нч} = (3 \div 5) / \tau_u$.

Такая широкая полоса пропускания используется в береговых РЛС для проводки судов в порты.

6.2.2. Детекторы и видеоусилители

Детектирование — преобразование колебания ПЧ в огибающую, соответствующую полезному сигналу, то есть процесс, обратный модуляции. В морских РЛС в передатчике используется амплитудная модуляция и, соответственно, в приемнике - амплитудный детектор. Амплитудное детектирование обеспечивает:

получение огибающей модулированного колебания (видеоимпульса) из радиоимпульса ПЧ;

отделение полезного видеосигнала от колебаний ПЧ.

Амплитудный детектор включает три основных элемента:

нелинейный элемент (диод);

сопротивление нагрузки;

фильтр (емкость нагрузки).

При воздействии на нелинейный элемент радиоимпульса ПЧ на сопротивлении нагрузки выделяется положительный видеоимпульс с пульсациями, которые сглаживаются фильтром, находящимся между детектором и видеоусилителем. Получаемый видеоимпульс является основой получаемой в РЛС полезной информации.

Видеоусилители применяются в РЛС для усиления сигналов, поступающих с выхода детектора приемника, до уровня, обеспечивающего нормальную работу оконечных устройств РЛС, в частности электронно-лучевых индикаторов. Для того чтобы при воспроизведении сигналов терялось как можно меньше полезной информации, необходимо, чтобы в видеоусилителе обеспечивалось равномерное усиление во всей полосе частот, соответствующей видеоимпульсу.

6.3. Автоматическая подстройка частоты

При отклонении промежуточной частоты от своего номинального значения резко понижается усиление приемника и уменьшается дальность

действия РЛС. Отклонения ПЧ от номинала вызываются нестабильностью частоты генератора СВЧ (магнетрона) передатчика и гетеродина приемника. Эта нестабильность обусловлена изменением питающих напряжений, параметров резонансных систем, нагрузки магнетрона из-за асимметрии вращающихся соединений волноводного тракта антенны, изменении температурных режимов и других дестабилизирующих факторов.

Для поддержания постоянной ПЧ необходимо поддерживать постоянной разность частот гетеродина и передатчика. Обычно этого добиваются путем подстройки гетеродина. Подстройка частоты осуществляется автоматически с помощью блока автоматической подстройки частоты (АПЧ). Часто предусматривается и ручная регулировка частоты (РРЧ), но действие ее замедленно, поэтому она используется как резервная.

Наибольшее распространение в навигационных РЛС получила двухканальная схема АПЧ. В этой схеме (см. рис. 6-1) для подстройки частоты используется небольшая часть мощности зондирующих импульсов, подаваемая непосредственно от магнетронного генератора через делитель мощности – аттенюатор. Эта схема имеет отдельный смеситель и УПЧ для канала АПЧ.

В результате преобразования на выходе смесителя АПЧ возникают колебания разностной частоты. Если частота магнетрона или гетеродина отклонится от номинала, то разностные частоты на входе блока АПЧ и на входе УПЧ приемника будут отличаться от номинального значения ПЧ. При этом на выходе блока АПЧ появляется напряжение $U_{упр.}$, которое будет увеличивать или уменьшать напряжение на управляющем элементе гетеродина (отражателе клистрона или варикапе – при использовании диода Ганна) в зависимости от того, в какую сторону отклонилась разностная частота. Это изменение напряжения вызывает изменение частоты гетеродина таким образом, чтобы уменьшилось отклонение разностной частоты от значения ПЧ, то есть от резонансной частоты УПЧ.

Блок АПЧ, кроме смесителя АПЧ и УПЧ, содержит частотный дискриминатор и управляющее устройство. Частотный дискриминатор служит для получения напряжения рассогласования с полярностью, зависящей от знака расстройки и величины, пропорциональной величине расстройки,

$$\Delta f = f_{np} - f_{np.n.},$$

где $f_{np.n.}$ — номинальное значение промежуточной частоты приемника.

В качестве дискриминаторов или частотных различителей применяют частотные детекторы.

Зависимость выходного напряжения $U_{вых}$ дискриминатора от расстройки Δf , называемая статической характеристикой дискриминатора

$U_{\text{вых}} = f(\Delta f)$, показана на рис.6-4.

На участке *a*, *b*, который является рабочим, характеристику принято считать прямолинейной. При больших отклонениях частоты от номинального значения характеристика искривляется и имеет падающие участки. Это происходит из-за уменьшения напряжения на контурах вследствие значительного ухода частоты от резонансной.

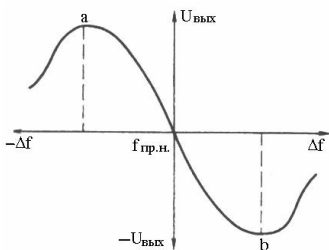
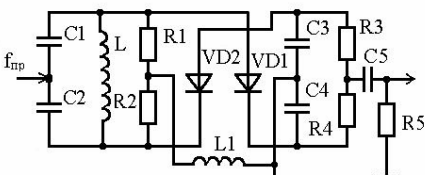


Рис.6-4.

В приемниках судовых РЛС применяют двухтактные дискриминаторы с настроенными контурами на полупроводниковых диодах и схемы с расстроенными контурами.

Принципиальная схема дискриминатора с расстроенными контурами показана на рис.6-5. Конденсаторы *C1* и *C2* совместно с общей индуктивностью *L* образуют два последовательных контура *LC1* и *LC2*, настроенных соответственно на частоту



$$f_1 = f_{\text{гр.н.}} - \Delta f \quad \text{и}$$

$$f_2 = f_{\text{гр.н.}} + \Delta f.$$

Рис.6-5. Принципиальная схема дискриминатора с расстроенными контурами

Если частота колебаний, поступающих на

вход дискриминатора с УПЧ, равна номинальному значению $f_{\text{гр.н.}}$, то сопротивление Z_H обоих контуров одинаково (рис.6-6,а). На диоды *VD1* и *VD2* действует одинаковое по величине напряжение, и напряжение, снимаемое с резистора *R5*, равно нулю.

Когда частота колебаний на входе дискриминатора понижается и оказывается равной f_1 сопротивление последовательного контура *C1L* (см. рис. 6-5) будет минимально, а сопротивление контура *C2L* оказывается большим. На зажимах диода *VD1* напряжение будет увеличиваться, и проходящий через него ток будет заряжать конденсатор *C4*. После окончания импульса конденсатор *C4* разряжается через *R4*, *C5* и *R5*. На резисторе *R5* возникает напряжение положительной полярности, снимаемое на управляющую схему.

При повышении разностной частоты до значения f_2 сопротивление контура *C2L* становится минимальным, а контура *C1L* увеличивается. В этом случае проходящий через диод *VD2* ток будет заряжать конденсатор *C3*. Последний, разряжаясь через *R5*, *C5* и *R3*, создает на

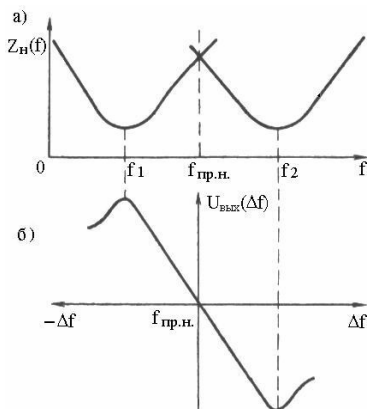


Рис.6-6.

резисторе $R5$ напряжение отрицательной полярности.

Таким образом, в зависимости от знака и значения отклонения разностной частоты гетеродина и сигнала (магнетрона), напряжение на выходе дискриминатора будет изменяться согласно характеристике, показанной на рис.6-6,б.

Управляющее устройство изменяет частоту гетеродина в зависимости от напряжения рассогласования, вырабатываемого дискриминатором.

Если в качестве гетеродина используется отражательный клистрон, то управляющее устройство АПЧ должно обеспечить изменение напряжения $U_{упр.}$ на управляющем элементе гетеродина в зависимости от значения и знака отклонения промежуточной частоты от номинального значения так, чтобы она приближалась к номинальной, а напряжение рассогласования стремилось к нулю.

Схемы управляющих устройств разделяются на следящие, или беспоисковые, и ищущие, или поисковые.

Следящие схемы осуществляют автоподстройку в более широких пределах только тогда, когда скорость изменения промежуточной частоты меньше скорости срабатывания АПЧ. Поэтому следящие системы применяются в тех НРЛС, где не ожидается быстрых изменений частоты магнетрона или клистронного гетеродина.

В качестве управляющих устройств следящих схем применяют усилители постоянного тока или видеоусилители с пиковым детектором на выходе. Усилитель служит для повышения чувствительности канала АПЧ к изменениям частоты, то есть увеличения крутизны характеристики дискриминатора. Для получения постоянного управляющего напряжения постоянная времени выходной цепи дискриминатора $C1R1$ и $C2R2$ должны быть больше периода T_u следования импульсов.

6.4. Временная регулировка усиления

Эффективным средством борьбы с помехами, появляющимися от морского волнения, а также от близкорасположенных объектов, является временная автоматическая регулировка усиления (ВАРУ). (Дальше будет применяться аббревиатура ВРУ, так как уровень

“автоматической” регулировки определяется вручную самим оператором).

Временная регулировка усиления (ВРУ) необходима для выравнивания интенсивности сигналов от объектов, расположенных на разных расстояниях от антенны НРЛС, тем самым обеспечивает одинаковое (равномерное) воспроизведение на экране индикатора целей, находящихся на различных дистанциях. Дело в том, что энергия, отраженная от объектов, расположенных на небольшом расстоянии от НРЛС, на несколько порядков больше, чем от удаленных. Поэтому чувствительный приемник НРЛС будет перегружен сигналами от близких объектов, в частности - от морских волн, в то время как эхо-сигналы от малоразмерных целей (например - буи, малые суда, катера, шлюпки) могут быть подавлены и своевременно не обнаружены.

ВРУ формирует управляющее напряжение (напряжение смещения в каскадах УПЧ) так, чтобы усиление приемника возрастало с увеличением дистанции до объекта. Практически управляющее напряжение ВРУ имеет экспоненциальную характеристику.

Принцип формирования напряжения ВРУ заключается в том, что одновременно с излучением зондирующего СВЧ импульса (рис.6-7), автоматически включается схема ВРУ приемника, которая формирует импульс, состоящий из прямоугольного импульса (длительность которого равна длительности зондирующего импульса) и экспоненциальной составляющей.

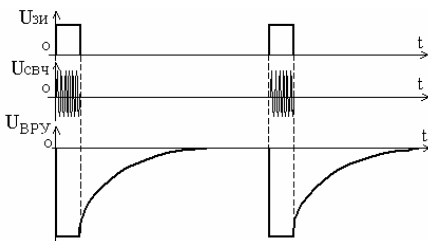


Рис.6-7.

Прямоугольная составляющая сигнала ВРУ запирает усилительные каскады приемника на время излучения мощного СВЧ импульса, а экспоненциальная составляющая плавно, по экспоненте, постепенно открывает усилительные каскады, тем самым увеличивает усиление приемника во времени (то есть – по дальности).

Одна из возможных схем формирования импульса ВРУ приведена на рис.6-8. Схема запускается положительным запускающим импульсом. Отрицательный импульс со вторичной обмотки трансформатора Т через резистор R1 и диод VD2 заряжает емкость C1. (Диод VD1 стабилизирует импульс по амплитуде).

После окончания действия запускающего импульса емкость $C1$ разряжается через резистор $R2$ и потенциометр $R3$ на базу эмиттерного повторителя. Таким образом, отрицательный импульс ВРУ через разделительную емкость $C2$ поступает на управляющие входы

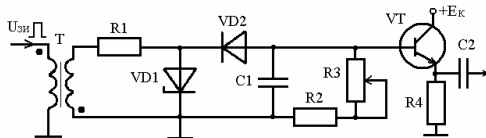


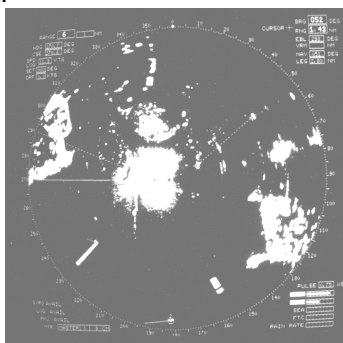
Рис.6-8.Схема формирования импульса ВРУ

усилительных каскадов УПЧ.

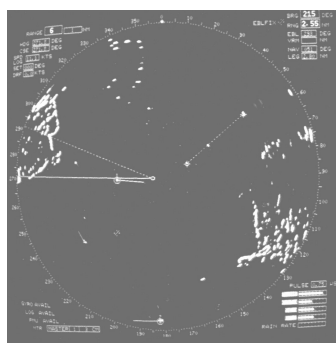
Оператор с помощью схемы ВРУ, изменяя величину потенциометра $R3$, может отрегулировать усиление приемника таким образом, что объекты с одинаковой эффективной поверхностью отражения или рассеяния, находясь на разных дистанциях, будут воспроизводиться на экране ЭЛТ индикатора с одной и той же интенсивностью.

Другим важным достоинством ВРУ является возможность устранения помех, вызываемых отражением от взволнованной поверхности моря, которые постепенно убывают с расстоянием и являются однородными для различных направлений. На рис.6-9 показаны примеры навигационного изображения индикатора САРП фирмы Raytheon.

На рис.6-9,а приведен снимок дисплея, на котором отображена радиолокационная картина во время движения судна между Данией и Швецией, с ветром, превышающим 15 узлов и бальностью моря 3 балла.



а)



б)

Рис.6-9.

Диапазон шкалы установлен - 6 морских миль. Усиление установлено 40 % от максимального значения, а органы управления подавления помех от волн и от дождя выключены. Обратите внимание, что помехи

от морских волн простираются от 1,8 на 2 мили от собственного судна (центра развертки), а за ними - в направлениях от 320° до 35° отображаются беспорядочно разбросанные ледяные поля.

(Утолщенные линии в направлениях 155° и 230° представляют собой сигналы от радиолокационных маяков-ответчиков).

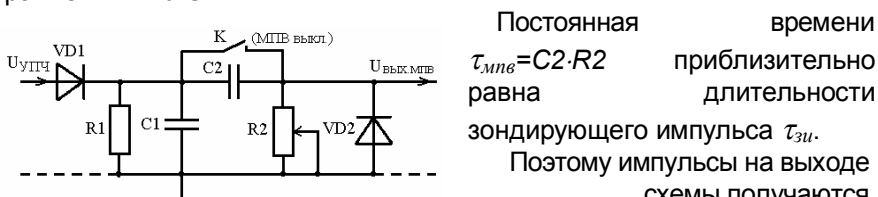
При включении органа управления подавления помех от дождя и от морских волн (см. рис.6-9,б), радиолокационное изображение становится достаточно "чистым". Помехи от волнения моря и льдов исчезли. Все цели остаются, а цели, предварительно замаскированные в помехах видны достаточно ясно.

6.5. Малая постоянная времени

На работу НРЛС вредное влияние оказывают сигналы, отраженные от дождя либо мокрого снег, которые создают достаточно мощное отражение и поэтому создают интенсивную засветку на экране индикатора. Эхо-сигналы от осадков вызывают засветку экрана в виде вуалеобразной, мягко окаймленной области, чем-то напоминающей вату, интенсивность которой зависит от интенсивности осадков (см. ниже рис.6-12,а). Поэтому эхо-сигналы от судов или береговой черты в зоне осадков могут быть не обнаружены на экране индикатора НРЛС.

Для борьбы с данными помехами, а в некоторых случаях для увеличения разрешающей способности по дальности и для того, чтобы получить более четкое изображение береговых и портовых сооружений путем отображения только передних, в основном отражающих поверхностей сооружений, в приемниках НРЛС широкое распространение получила схема малой постоянной времени (МПВ), которая представляет собой дифференцирующую цепочку (см.рис.6-10).

Включается она после детектора, по желанию оператором НРЛС, органом управления, который обычно выводится на панель управления НРЛС.



Постоянная времени
 $\tau_{мпв} = C2 \cdot R2$
 приблизительно
 равна
 длительности
 зондирующего импульса $\tau_{зи}$.

Поэтому импульсы на выходе
 схемы получаются
 кратковременными

Рис.6-10.Схема дифференцирующей цепочки (укороченными) положительной и отрицательной полярности. Длительность этих импульсов тем меньше, чем меньше установлена величина сопротивления резистора R2 (предусмотрена ее регулировка с панели управления). Дiode VD2,

подключенный параллельно резистору R2, срезает импульсы отрицательной полярности, а положительные видеоимпульсы создают на экране индикатора изображение.

На рис. 6-11 показаны временные диаграммы напряжений на входе

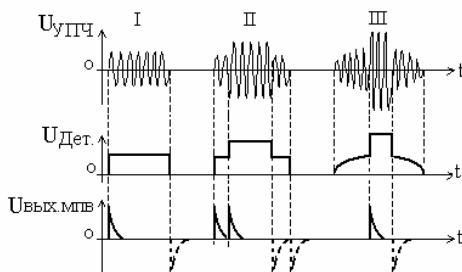


Рис.6-11.

детектора $U_{УПЧ}$, на его выходе $U_{Дет.}$ и после цепи МПВ ($U_{ВЫХ.МПВ}$) для трех различных ситуаций: при подаче на вход одиночного отраженного импульса (ситуация I), двух сливающихся импульсов (ситуация II), а также при наложении на отраженный импульс длительной помехи, например дождя или мокрого снега, (ситуация III).

Ситуация II на рис.6-11

указывает на то, что использование МПВ способствует увеличению разрешающей способности НРЛС по дальности. То есть, когда на вход видеодетектора приемника поступают два неразрешаемых по дальности импульсных сигнала по промежуточной частоте, то, подвергая дифференцированию суммарный видеоимпульс, на выходе цепочки МПВ получают два остроконечных импульса положительной полярности создающих на экране индикатора две раздельно светящиеся отметки (импульсы отрицательной полярности срезаются диодом VD2 практически на нулевом уровне и на изображение на экране не влияют).

Ситуация III указывает на то, что эхо-сигналы, например, от капель дождя во всей зоне засветки имеют одинаковую интенсивность, в то время как эхо сигналы от целей, находящихся в зоне осадков, отличаются, как правило, большей интенсивностью из-за лучшей отражающей способности.

Так как дифференцирующая цепочка “работает” по фронтам видеосигналов, а из рис.6-11 видно, что крутизна фронта от осадков мала, то в процессе дифференцирования остается только продифференцированные короткие импульсы от эхо-сигнала цели. То есть на экране индикатора будет отображаться только цель.

Цепь МПВ включают в схему по мере надобности.

На рис.6-12,а приведено изображение при выключенной МПВ. При постоянном ее включении уменьшается амплитуда видеоимпульсов на выходе приемника, поэтому изображение на экране НРЛС получается менее ярким. Из-за укорочения импульсов при дифференцировании теряется информация о протяженности целей, а береговая черта может иметь разрывы и опознавание ее

становится затруднительным (рис.6-12,б). В таких случаях следует увеличивать усиление приемника, наблюдая одновременно за изображением навигационной обстановки на экране (рис.6-12,в).

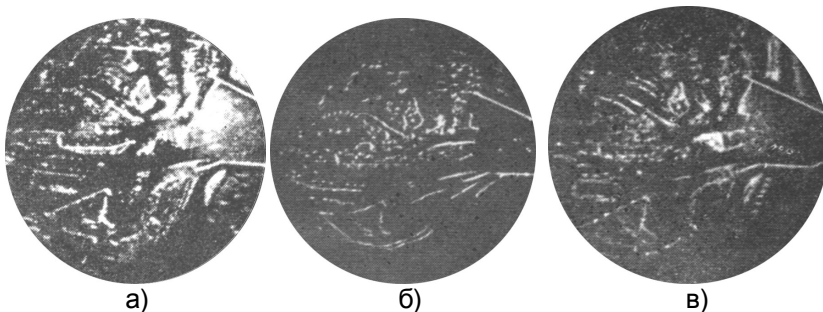


Рис.6-12.

6.6. Логарифмический усилитель

При воздействии на вход приемника мощных сигналов или помех происходит его перегрузка. В частности, помехи от дождя или взволнованной морской поверхности маскируют полезные сигналы. Если амплитуды помех превышают амплитуду полезного сигнала, то без специальных методов выделения сигнала его обнаружить невозможно. Затруднительно обнаружение полезного сигнала и в случае, если амплитуды помех ниже уровня максимальной амплитуды сигнала, но их количество велико, например, в условиях отражения от морских волн. Чтобы радиолокационный приемник не достигал насыщения при изменении входных сигналов в широких пределах, то есть обладал большим динамическим диапазоном, в судовых РЛС применяют устройства, мгновенно регулирующие усиление приемника, предотвращая его насыщение.

Если изменения напряжения помех по характеру аналогичны изменениям шумов приемника, то напряжение этих помех можно “сжать” до уровня шумов приемника независимо от интенсивности помех.

Известно, что среднее значение выходного напряжения приемника $U_{\text{вых}}$ уменьшается с ростом дальности, а величина флюктуации остается постоянной [10]. Для того чтобы ослабить помехи, необходимо флюктуации сжать до уровня собственных шумов приемника. Для этой цели в судовых НРЛС широко используют метод автоматической регулировки усиления приемника по логарифмическому закону. В связи с тем, что сжатие целесообразно только для мощных сигналов, флюктуации которых превышают уровень собственных шумов

приемника, оптимальная амплитудная характеристика такого приемника или усилителя должна быть линейной для сигналов, лежащих ниже определенного уровня, и логарифмической для сигналов, превышающих этот уровень. Тогда закон изменения выходного напряжения $U_{вых}$ в зависимости от входного $U_{вх}$ должен иметь следующий вид:

$$\frac{dU_{вых}}{dU_{вх}} = \frac{a}{U_{вх}},$$

где: a — коэффициент пропорциональности.

После интегрирования этого выражения получим

$$U_{вых} = a \int \frac{dU_{вх}}{U_{вх}} = a \ln U_{вх} + C_0.$$

Если обозначить через U_H и k_H соответственно входное напряжение и коэффициент усиления каскада, соответствующие началу логарифмического участка амплитудной характеристики, как показано на рис. 6-13, то

$$U_{вых.H} = U_H \cdot k_H = a \ln U_H + C_0. \text{ Отсюда } - C_0 = U_H \cdot k_H - a \ln U_H.$$

Полагая коэффициент $a = U_H \cdot k_H = \text{const}$, имеем

$$U_{вых} = U_H \cdot k_H \left(\ln \frac{U_{вх}}{U_H} + 1 \right).$$

Тогда при входном напряжении, равном $U_{вх} < U_H$, амплитудная характеристика приемника является линейной, а при условии, что $U_{вх} > U_H$, характеристика будет логарифмической (ЛАХ).

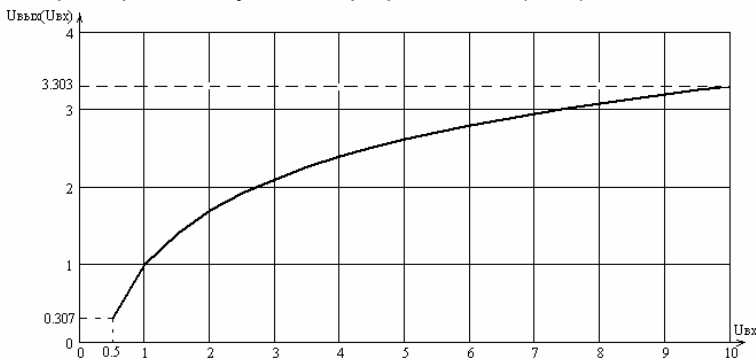


Рис.6-13. Пример ЛАХ

Принцип получения ЛАХ (см. рис. 6-14) заключается в следующем:
 все каскады должны быть одинаковы;
 амплитудные характеристики каскадов до насыщения линейны;
 при насыщении $U_{вых}$ не зависит от $U_{вх}$ каскада;
 суммирование осуществляется линейно.

Линейно-логарифмическими характеристиками могут обладать как УПЧ, так и видеосушители приемников.

Возможны различные схемы, обеспечивающие получение логарифмической характеристики в УПЧ. Наиболее распространена схема логарифмического УПЧ с последовательным детектированием сигналов отдельных каскадов усиления и их суммированием (рис. 6-14).

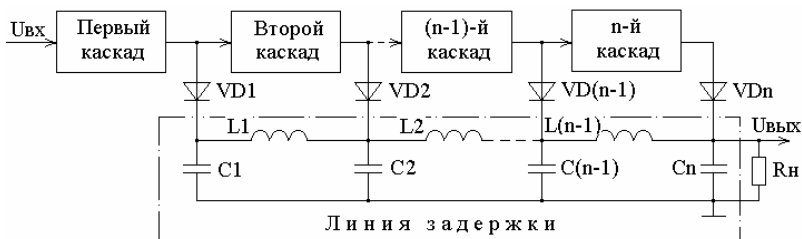


Рис. 6-14. Схема логарифмического УПЧ

Суммарный сигнал выделяется на общей нагрузке R_n , с которой поступает на дифференцирующую цепь с малой постоянной времени, как в линейном УПЧ.

Линия задержки позволяет всем импульсам с выхода диодов $VD1—VD_n$ приходить к нагрузке одновременно (учитывается задержка в каждом каскаде УПЧ). Амплитудная характеристика каскадов линейна для малых амплитуд и имеет ограничение при каком-то значении $E_{огр}$. Следовательно, импульсы большой амплитуды ограничиваются и на сумматор поступают с одинаковой амплитудой, равной $E_{огр}$. Входные импульсы различной амплитуды (в большом диапазоне изменения) ограничиваются в различных каскадах УПЧ (самый слабый — в последнем, самый сильный — в первом), и прирост амплитуды выходных импульсов при большой амплитуде происходит в меньшей степени, чем при малой амплитуде. В результате амплитудная характеристика состоит из отдельных линейных участков с постепенно уменьшающимся наклоном (см. рис. 6-13), приближаясь по форме к логарифмической характеристике.

Применение логарифмического УПЧ с дифференцирующей цепью, имеющей малую постоянную времени (МПВ), позволяет снизить уровень отражений от моря и дождя до уровня собственных шумов.

После дифференцирующей цепи с МПВ из выходного сигнала УПЧ исключается постоянная составляющая (удаляется среднее

значение), и амплитуда помех от моря будет при любых расстояниях на одном уровне с шумом.

Следовательно, на выходе логарифмического УПЧ помехи значительно ослаблены, а амплитуды слабых и сильных отраженных импульсов выравниваются; регулировка усиления в процессе работы не требуется.

Для более эффективного подавления помех от моря применяется ВРУ, которая осуществляется в нескольких линейных каскадах, включенных перед логарифмическим УПЧ.

Динамический диапазон входных сигналов логарифмических УПЧ может достигать 100 дБ, и более. Динамический диапазон выходных сигналов может быть сжат от 30—40 дБ до 3—4 дБ. Преимуществом логарифмических усилителей является также их безынерционность, способность реагировать как на регулярные, так и на случайные помехи, способность мгновенно восстанавливать чувствительность после воздействия сильных помех.

7. Индикаторы кругового обзора НРЛС

Индикатор кругового обзора (ИКО) предназначен для:

1. Воспроизведения на ЭЛТ ИКО радиолокационного изображения характеризующее надводную остановку на основе информации, получаемой от приемника НРЛС, лага и гироскопа.
2. Измерения координат надводных объектов.
3. Оперативного управления работой НРЛС и контроля ее работоспособности.

ИКО является окончательным звеном НРЛС. Информацию с ИКО “снимает” визуально штурман – оператор. Она же может поступать в специализированную вычислительную машину для определения параметров движения целей.

Информация ИКО может воздействовать на зрение или на слух оператора. Наибольшее распространение в НРЛС получили ИКО со зрительным съемом информации.

По положению объектов и своего судна на ЭЛТ ИКО можно судить о навигационной обстановке.

ИКО классифицируется по следующим признакам:

- по типу используемых ЭЛТ;
- по назначению НРЛС;
- по методу получения отметки цели;
- по типу применяемой развертки.

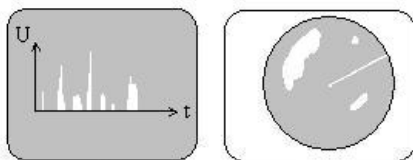
По типу используемых ЭЛТ – с электростатическим или с магнитным управлением электронного луча.

ЭЛТ с электростатическим управлением луча более экономичны, имеют малую массу. Однако на таких трубках сложно создать большую площадь отображения информации.

Преимущества ЭЛТ с магнитным управлением – возможность получения большего отклонения электронного луча и большей яркости электронного пятна при лучшей его фокусировке.

В зависимости от назначения индикатора ЭЛТ могут быть с различным послесвечением (от долей секунд до минут).

По назначению – в зависимости от типа НРЛС – обнаружения, обзора земной или водной поверхности, точного определения координат и т.п.



а)

б)

Рис.7-1.

По методу получения отметки цели – индикаторы с амплитудной (рис.7-1,а) или яркостной отметкой (рис.7-1,б).

По числу определяемых координат – одно, двух и трехкоординатные (трехмерные) индикаторы.

По типу применяемой развертки – ЭЛТ с линейной, круговой, радиально-круговой и спиральной разверткой, а также с разверткой в прямоугольных координатах: дальность – азимут; дальность – угол места; азимут – угол места и др.

В индикаторах судовых РЛС применяют ЭЛТ с длительным послесвечением экрана и электромагнитными фокусировкой, центровкой, отклонением луча. Модуляция луча яркостная, то есть яркость пятна на экране ЭЛТ изменяется в соответствии с амплитудой поступающих сигналов [1,4,10].

Работа ЭЛТ требует определенных напряжений и токов, подводимых к ее внутренним электродам и внешним катушкам, размещаемым на горловине ЭЛТ. К электродам ЭЛТ подводятся напряжения накала катода, первого и второго анодов, модулирующее напряжение.

Напряжение накала катода обеспечивает эмиссию электронов с него, за счет которой и создается электронный луч. Движение тонкого пучка электронов (луча) с катода к экрану обусловлено высокими напряжениями на первом и втором анодах, однако оно становится возможным лишь при определенном модулирующем напряжении между катодом и сеткой-модулятором ЭЛТ.

В исходном состоянии на сетке относительно катода действует отрицательное напряжение несколько десятков вольт, запирающее ЭЛТ. При уменьшении отрицательного напряжения на сетке ЭЛТ отпирается, то есть появляется электронный луч, вызывающий свечение люминофора экрана. По мере уменьшения этого отрицательного напряжения увеличивается количество электронов в луче и яркость свечения экрана возрастает. Между сеткой и катодом ЭЛТ прикладываются все напряжения, которые создают видимое на экране изображение. В качестве этих напряжений используются видеоимпульсы приемника, импульсы НКД, ПКД, отметки курса, подсветки развертки и электронного визира, а также постоянное напряжение, запирающее ЭЛТ и определяющее исходный уровень яркости луча развертки на экране. Регулировка общей яркости луча обычно осуществляется потенциометром, размещенным на панели управления НРЛС.

На горловине ЭЛТ располагаются катушки фокусировки, смещения и отклонения луча.

Фокусирующая катушка создает магнитное поле, направленное вдоль оси ЭЛТ, обеспечивающее движение электронного луча к экрану по скручивающейся спирали. При этом устраняется взаимное отталкивание электронов в луче и при определенном значении напряженности магнитного поля обеспечивается наибольшая их концентрация (фокусировка) у поверхности экрана. Дополнительная фокусировка луча может осуществляться постоянным магнитом,

размещаемым на горловине ЭЛТ. При работе НРЛС регулировка фокусировки луча обычно не требуется.

Катушки смещения и отклонения луча вызывают отклонение луча по радиусу экрана ЭЛТ, поэтому их магнитные поля должны быть также радиальными (электронный луч отклоняется в плоскости, перпендикулярной магнитным силовым линиям). В современных НРЛС катушки смещения и отклонения практически идентичны между собой.

Каждая из них представляет собой систему взаимно перпендикулярных неподвижных катушек, создающих два взаимно перпендикулярных магнитных поля которые вызывают радиальные отклонения луча в направлениях $0 - 180^\circ$ и $90 - 270^\circ$ азимутального круга экрана индикатора. В катушки смещения подаются постоянные токи, направление и величины которых определяют соответственно - в каком направлении и, на какое расстояние будет смещен центр развертки.

В катушки ЭЛТ отклонения подаются пилообразные импульсы токов развертки одинаковой длительности. Соотношение амплитуд импульсов этих токов обуславливает направление радиального отклонения луча на экране. При синусно-косинусном законе изменения амплитуд пилообразных токов в зависимости от угла направления антенны обеспечивается радиально-круговая развертка.

ЭЛТ вместе с катушками помещают в экран, устраняющий влияние на электронный луч посторонних магнитных полей. Экран трубки закрыт светофильтром из органического стекла, защищающим лицо и глаза оператора от ультрафиолетовых лучей. Светофильтр улучшает условия наблюдения при постороннем освещении и, кроме того, служит защитой при взрыве трубки.

Экран снабжен обычно неподвижным азимутальным кругом, нулевое деление которого расположено в верхней (передней) части индикатора. В некоторых НРЛС применяют накладной отражательный (зеркальный) планшет, который размещен над экраном и позволяет вести на нем прокладку местоположения эхосигналов.

В индикаторах НРЛС, выпускаемых в последние годы, в качестве ЭЛТ используют телевизионные кинескопы со строчной горизонтальной разверткой (рис.7-2).

В центральной части экрана кинескопа создается яркое, в том

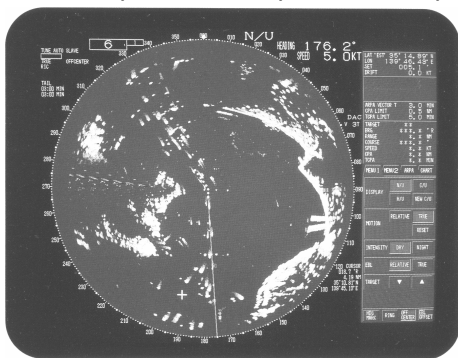


Рис.7-2.

числе и цветное, радиолокационное изображение, а по краям экрана - дополнительная буквенно-цифровая информация различного характера.

Преобразование радиально-круговой развертки в телевизионную развертку осуществляется с помощью микропроцессоров и устройств памяти большой емкости.

В НРЛС широкое применение получили ЭЛТ с радиально-круговой разверткой, с магнитным управлением электронного луча. Этот тип развертки позволяет легко воспринимать оператором информацию и идентифицировать (сравнивать) с визуально наблюдаемой обстановкой в районе нахождения судна.

Функциональная схема ИКО приведена на рис.7-3, а ее основные временные соотношения электрических процессов – на рис.7-4.

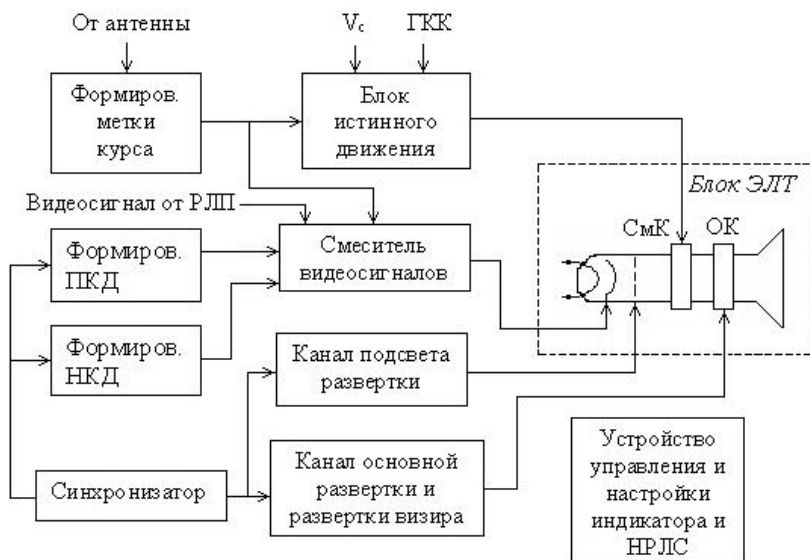


Рис. 7-3. Функциональная схема индикатора кругового обзора

Блок ЭЛТ состоит из электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), отклоняющей системы (ОС) и смещающих катушек (СМК). На ЭЛТ отображаются: навигационная обстановка, метки дальности, линия электронного визира – электронный визир направления (ЭВН), отметка курса.

Канал основной развертки и развертки визира вырабатывает импульсы пилообразного напряжения для создания основной развертки на различных шкалах дальности и развертки электронного визира направления.

Формирователи НКД и ПКД предназначены для формирования неподвижных кругов (колец) дальности и подвижного круга (кольца) дальности.

Блок истинного движения (ИД) обеспечивает создание этого режима. Для этого в блок должны поступать данные о скорости судна и гирокомпасного курса. Информация из блока ИД поступает в смещающие катушки. (Данные о скорости судна и его курсе, в случае неисправности лага или гирокомпаса, можно ввести вручную).

Устройство управления и настройки индикатора и НРЛС – выполняет такие функции:

- включает и выключает НРЛС;
- настраивает и регулирует изображение на ЭЛТ индикатора;
- осуществляет оперативное управление НРЛС;
- контролирует работоспособность НРЛС и др.

Ориентация. Подавляющее большинство НРЛС обладает двумя видами ориентации – по “Курсу” и по “Северу” (“Норду”).

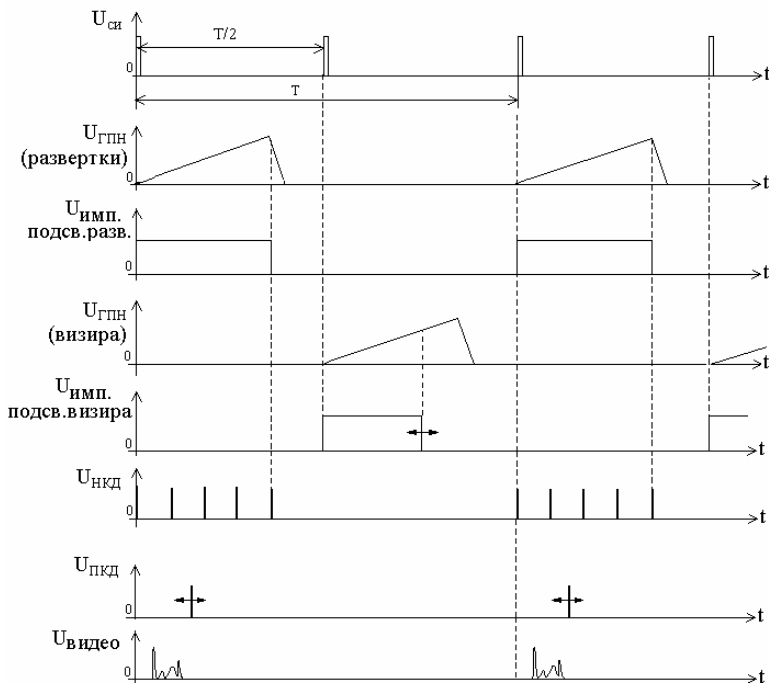


Рис.7-4. Основные временные соотношения электрических процессов в индикаторе

Пилообразные импульсы основной развертки и развертки визира создают в ОС магнитные поля, под воздействием которых происходит

отклонение электронного луча по радиусу от центра к периметру трубки.

В зависимости от способа создания вращающегося магнитного поля применяют ИКО с вращающейся отклоняющей катушкой (ОК) и с неподвижными ОК.

Если отклоняющие катушки неподвижные, то для получения вращающейся развертки дополнительно происходит модуляция пилообразных импульсов по закону синуса и косинуса угла поворота антенны. Если же используется вращающаяся отклоняющая катушка (в старых разработках НРЛС) – то она вращается на горловине ЭЛТ со скоростью вращения антенны.

В зависимости от шкал дальности изменяется только длительность пилообразного импульса одновременно с длительностью подсвета прямого хода развертка (основной развертки или развертки визира). Амплитуда же пилообразных импульсов сохраняется постоянной, независимо от шкал дальности. Однако, для обеспечения режима истинного движения (ИД) или ручного смещения центра развертки, амплитуда пилообразного напряжения на соответствующих шкалах несколько больше, чем на шкалах, где отсутствуют эти режимы.

7.1. Образование развертки в ИКО

Отклонение луча из центра экрана ЭЛТ по радиусу к его краю требует подачи в катушку отклонения импульса пилообразного тока с амплитудой, достаточной для отклонения луча на весь радиус экрана. Для получения постоянной скорости отклонения луча импульс развертки должен иметь линейный передний фронт, длительность которого определяет масштаб изображения (шкалу дальности) индикатора. Поэтому схема развертки должна обеспечивать получение пилообразных импульсов развертки различной длительности. Одновременно с подачей пилообразных импульсов в отклоняющую катушку на ЭЛТ должен подаваться импульс подсветки, который отпирает трубку только на время прямого хода луча (рис.7-4).

Отклонение луча развертки на экране трубки должно происходить *синхронно и синфазно* с вращением антенны, обеспечивая возможность получения необходимого вида ориентировки изображения.

Синхронность вращения луча развертки и антенны означает одинаковое число их оборотов за один и тот же период.

Синфазность - одинаковые положения диаграммы направленности антенны и линии развертки, отсчитываемые соответственно относительно: диаметральной плоскости и нуля азимутального круга - при ориентировке по курсу или относительно

меридиана и нуля азимутального круга - при ориентировке по Северу. Из этого следует, что при ориентировке по курсу связь схемы развертки осуществляется только с антенной.

При ориентировке по Северу необходима связь, как с антенной, так и с гирокомпасом, причем гирокомпас должен вызывать дополнительный разворот линии развертки на угол, равный курсу собственного судна.

При ориентировке «стабилизированный курс» гирокомпас будет разворачивать луч на угол, равный изменению курса судна с момента включения этой ориентировки.

Основные блоки для получения развертки и взаимосвязь между ними были приведены на рис.7-3.

Сложность устройства блоков линии развертки, связи с антенной и гирокомпасом зависит от способа передачи угловых данных из антенны и гирокомпаса и, кроме того, от того - предусмотрен в индикаторе электронный визир направления или нет.

Применявшиеся ранее схемы отклонения луча с вращающейся отклоняющей катушкой [9] в настоящее время не используются, так как делают невозможным формирование электронного визира направления. Поэтому будет рассмотрен лишь способ получения развертки в ИКО с неподвижными катушками отклонения.

Наиболее часто для передачи вращения из антенны в индикатор используют вращающийся трансформатор, в ротор которого подают пилообразный импульс тока, а с двух взаимно перпендикулярных статорных катушек снимают пилообразные токи на катушки отклонения. Ротор вращающегося трансформатора связывают непосредственно с осью антенны. Иногда вращающийся трансформатор устанавливают в индикаторе и обеспечивают его синхронно-синфазное вращение с антенной с помощью электромеханической следящей системы.

7.1.1. Формирование развертки с помощью двух неподвижных отклоняющих катушки

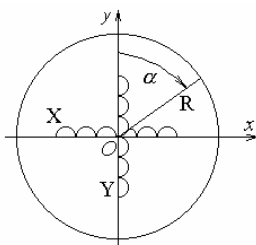


Рис.7-5.

Обозначив условно одну катушку за X, а вторую – за Y, расположим их в системе координат xOy , соответственно по оси Ox и по оси Oy (см. рис.7-5). Используя уравнение положения вектора R в полярной системе координат, можно записать, что:

$$x_m = R \sin \alpha; \quad y_m = R \cos \alpha$$

Таким образом, изменяя угол α (в свою

очередь зависящий от углового положения антенны - $\alpha = \Omega t$, где Ω - угловая скорость вращения антенны), можно, подавая в катушки X и Y напряжение пилообразной формы, в любой момент времени создавать радиально - круговую развертку в ортогональных катушках.

Возникающие в катушках X и Y токи зависят от чувствительности ЭЛТ – k , числа витков каждой катушки - ω . Поэтому токи в катушках соответственно равны:

$$I_{mX} = \frac{R}{k\omega} \cdot \sin \Omega t, \quad I_{mY} = \frac{R}{k\omega} \cdot \cos \Omega t$$

При пропускании через ортогональные катушки пилообразных токов, промодулированных вращением антенны по синусоидальному и косинусоидальному законам, вектор результирующего магнитного поля $\vec{\Phi}_p$, являющийся суммой магнитных потоков катушек X и Y ($\vec{\Phi}_p = \vec{\Phi}_X + \vec{\Phi}_Y$), будет вращаться с постоянной частотой, равной частоте вращения антенны.

Принцип получения радиально-круговой развертки с помощью двух взаимно перпендикулярных катушек отклонения показан на рис.7-6 [24].

Для создания радиально-круговой развертки в ортогональных катушках существует два способа:

- а) расщепление фазы огибающей вращения антенны после генератора развертки (например – НРЛС типа “Наяда”) [1,3,12];
- б) расщепление фазы огибающей вращения антенны до генератора развертки (например – НРЛС типа “Океан”) [7].

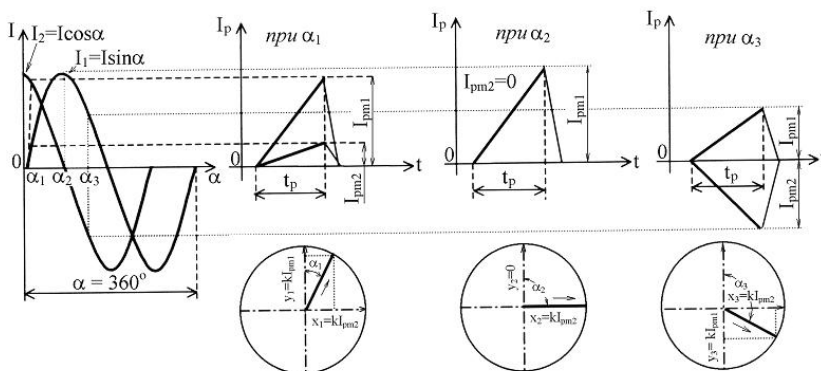


Рис.7-6.

Упрощенная схема реализации расщепление фазы огибающей вращения антенны после генератора развертки приведена на рис.7-7.

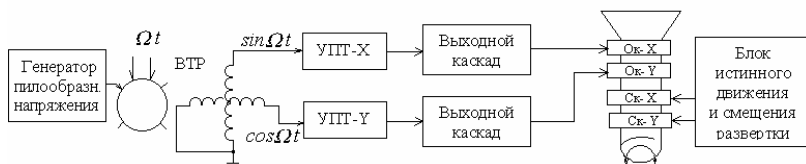


Рис.7-7.

На рисунке соответственно обозначено: ВТР – вращающийся трансформатор, ротор которого непосредственно связан с осью антенны; УПТ-Х, УПТ-У – усилители постоянного тока по осям Х и У; Ок-Х, Ок-У, Ск-Х, Ск-У- отклоняющие и смещающие катушки по соответствующим осям.

Второй способ формирования радиальной вращающейся развертки - расщепление фазы огибающей вращения антенны до генератора развертки (например – НРЛС типа “Океан”) показан на рис.7-8, а основные физические процессы и их временные соотношения приведены на рис.7-9.

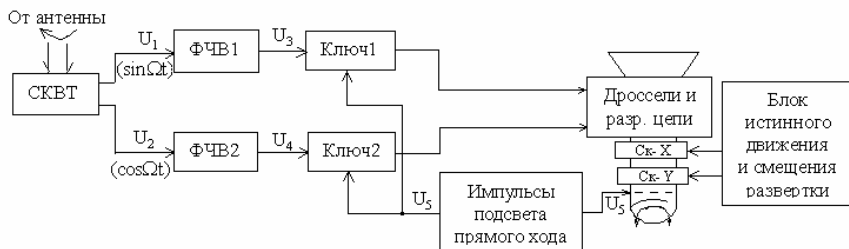


Рис.7-8.

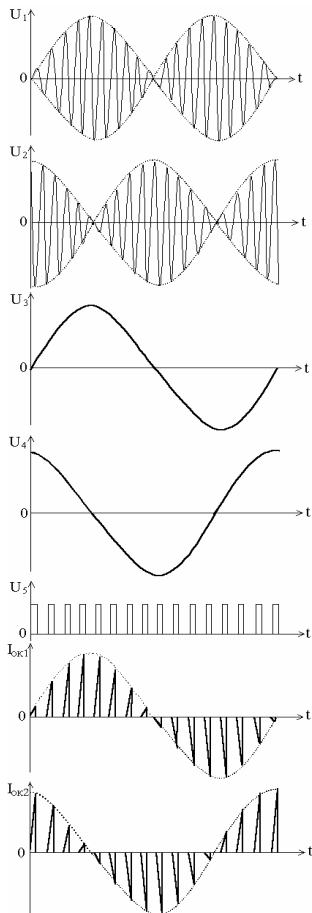
На рис. 7-8 обозначено – СКВТ – синусно-косинусный вращающийся трансформатор, ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель.

Физический процесс, проходящий в приведенной выше схеме, иллюстрируется временными диаграммами (рис.7-9).

СКВТ формирует два амплитудно-модулированных гармонических колебаний частотой 400 Гц, с амплитудами, пропорциональными синусу и косинусу угла поворота антенны (U_1 и U_2 соответственно). ФЧВ выделяет огибающую напряжений U_1 и U_2 – соответственно напряжения U_3 и U_4 .

Полученные напряжения подаются на ключи 1 и 2, на вторые входы которых поступают прямоугольные импульсы напряжением U_5 , длительность которых пропорциональна выбранной шкале дальности

(одновременно эти же импульсы подаются на управляющий электрод ЭЛТ, открывая тем самым трубку).



С выхода ключей, промодулированные таким образом прямоугольные импульсы, подаются в блок дросселей и разрядных цепей. В этом блоке формируются пилообразные импульсы радиальной развертки (токи $I_{ок1}$ и $I_{ок2}$), используя при этом следующее свойство дросселя (индуктивности): известно [25], что при подаче напряжения в катушку индуктивности, ток в индуктивной цепи нарастает по экспоненциальной кривой от нуля до максимума, который зависит от напряжения и сопротивления цепи.

В данной схеме блок дросселей формирует лишь начальный участок этой кривой, обеспечивая этим самым необходимую линейность развертки. Для того чтобы к началу очередного прямого хода развертки ток предыдущего хода развертки уменьшился до нуля, применяются разрядные цепи.

Во время разряда (обратный ход развертки) луч электронно-лучевой трубки не должен оставлять следа на экране. Для этого ЭЛТ запирается на время обратного хода и открывается на время прямого хода развертки.

Рис. 7-9.

7.1.2. Цифровая развертка НРЛС

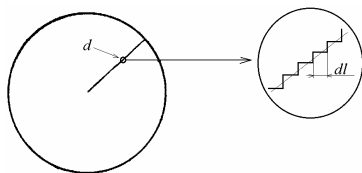


Рис. 7-10

В цифровой развертке непрерывное радиально-круговое перемещение луча на ЭЛТ заменяется линейно-ступенчатым перемещением луча в виде ступенчатой функции. Размер дискретного перемещения луча dl

должен быть в 2-3 раза меньше

диаметра d сфокусированного луча на экране ЭЛТ (см. рис.7-10). В этом случае реальная развертка воспринимается глазом как непрерывная.

Ступенчатая функция формируется путем приращения двух цифровых пилообразных функций с крутизной нарастания пропорциональной синусу и косинусу угла поворота радиально-круговой развертки.

Упрощенная функциональная схема генератора цифровой развертки приведена на рис.7-11.

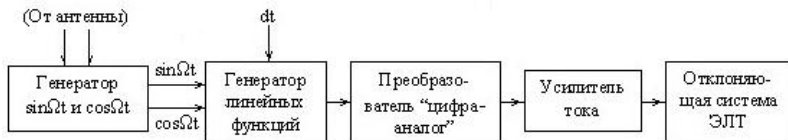


Рис.7-11.

Из рисунка видно, что схема состоит из цифрового генератора синуса и косинуса угла поворота антенны, генератора линейных функций, на который поступают также и кванты дистанции dt , преобразователя "цифра-аналог", усилителя тока и отклоняющей системы, состоящей из двух неподвижных, закрепленных на горловине ЭЛТ катушек, создающих взаимно-перпендикулярное магнитное поле.

Генератор линейных функций формирует коды линейных функций с крутизной, пропорциональной $\sin \Omega t$ и $\cos \Omega t$, а также масштабу изображения I_m / l ,

где: I_m - максимальный ток отклонения луча ЭЛТ,

l - длина развертки.

Преобразователь "цифра-аналог" функционирует согласно уравнений:

$$i_x = \int \frac{I_m}{l} \sin \Omega t dt = -\frac{I_m}{l\Omega} \cos \Omega t,$$

$$i_y = \int \frac{I_m}{l} \cos \Omega t dt = \frac{I_m}{l\Omega} \sin \Omega t.$$

После усиления полученных токов в усилителе тока, они создают в отклоняющей системе радиально-круговую развертку цифровым способом.

7.2. Вспомогательные метки – НКД, ПКД

В НРЛС дальность до объекта с низкой точностью определяется с помощью неподвижных колец (кругов) дальности – НКД, а точное определение возможно с помощью подвижного кольца (круга) дальности – ПКД. (Иногда в литературе эти импульсы обозначаются как НВД и ПВД – неподвижные визиры дальности и подвижный визир дальности).

Сформированные метки НКД и ПКД отображаются на линии развертки сигнала, а ПКД – еще и на электронной линии развертки визира. Для этого импульсы НКД и ПКД (синхронно с запускающими импульсами) подаются на модулятор или катод ЭЛТ.

На линиях развертки сигнала и визира НКД и ПКД отображаются в виде ярких, коротких по длительности, точек диаметром 0,8...1,0 мм. Для этого их длительность должна быть около 0,05...0,07 мкс. Подаются на модулятор (или катод) ЭЛТ только во время прямого хода развертки, поэтому при ее вращении создаются видимые кольца (круги).

Для точного измерения дистанции до объекта импульс ПКД совмещается с отсчетным устройством.

7.2.1. Способы формирования НКД

Число НКД зависит от модели НРЛС. Как правило, в современных НРЛС развертка делится на четыре (иногда может быть другое количество) равных отрезка ΔD . При этом, число импульсов НКД определяется уравнением, (оно является общим не только для

случая четырех равных отрезков)
$$n = \frac{D_{\max}}{\Delta D} + 1.$$

Добавочная метка НКД “+1” в приведенном уравнении необходима в качестве нулевой (отсчетной) точки дистанции. В НРЛС ею является центр развертки.

Каждая метка формируется из одного периода следования импульсов, который определяется уравнением
$$T_0 = \frac{2\Delta D}{c}.$$

Частота собственных колебаний источника формирования НКД (определяющая расстояние ΔD от одной точки к другой) равна

$$f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{c}{2\Delta D}. \quad (49)$$

Один из способов формирования НКД представлен на схеме рис.7-12.



Рис.7-12.

На рис.7-13 приведена упрощенная принципиальная схема генератора ударного возбуждения (ГУВ).

Период затухающих колебаний в колебательном контуре LC определяется уравнением (49).

Исходное состояние ГУВ: VT заперт отрицательным смещением на базе.

Происходит протекание тока по цепи $+E_k - R3 - L1$. Одновременно

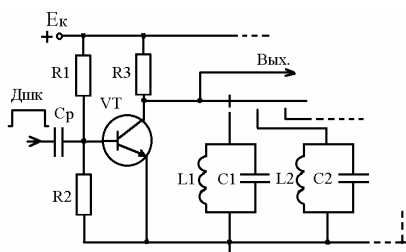


Рис.7-13.

заряжается конденсатор $C1$. При подаче на базу VT положительного импульса подсвета прямого хода развертки (длительность этого импульса равна длительности выбранной шкале дальности), транзистор открывается и в подключенном контуре (например $L1C1$) возникает затухающий колебательный процесс. Эти колебания поступают в усилитель-

ограничитель, в котором они усиливаются и ограничиваются по амплитуде, то есть формируются импульсы трапецеидальной формы (см. рис.7-14).

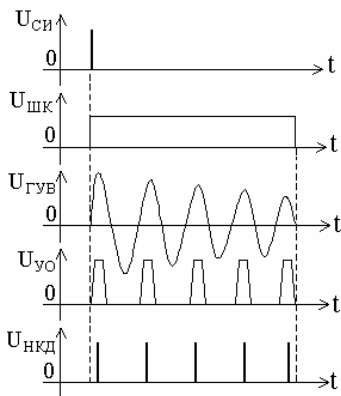


Рис.7-14.

Далее полученные импульсы поступают в выходной каскад, в котором происходит формирование кратковременных импульсов длительностью $0,05...0,07 \mu\text{с}$, которые и подаются на модулирующее устройство ЭЛТ (как правило - через видеосмеситель ИКО).

В качестве выходного каскада чаще всего используется блокинг-генератор.

Малая длительность НКД (так же, как и длительность ПКД) необходима для того, чтобы длительность самого импульса не занимала

информативную часть ИКО. (Например, в радиолокации импульсу длительностью 0,05мкс соответствует расстояние 7,5 м).

Существует ряд других способов формирования НКД. Например, в НРЛС серии “Океан”, для формирования импульсов НКД используется стабилизированный кварцем блокинг-генератор, опорная частота которого равна 323230 имп/с [7].

Период следования этих импульсов равен: $T = \frac{1}{323230} = 3,09 \mu s$, что

соответствует

$$\Delta D = \frac{cT}{2} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 3,09 \cdot 10^{-6} \text{ с}}{2} = 464 \text{ м} = 0,25 \text{ мили}.$$

Первоначальные импульсы этого блокинг-генератора с периодом следования 3,09 мкс используются, как правило, на шкале 1 мили (четыре НКД). Структурная схема формирования НКД таким способом приведена на рис.7-15.

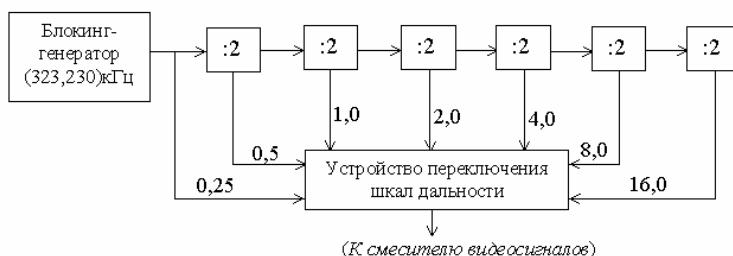


Рис.7-15.

(В качестве делителей выходной частоты блокинг-генератора используются триггера. Цифры на выходе блокинг-генератора и триггеров указывают на расстояние между НКД).

Способ формирования НКД в НРЛС “Наяда-5” в какой-то мере аналогичен способу формирования НКД в НРЛС серии “Океан”. Отличие заключается только в том, что в качестве опорной частоты используются тактовые импульсы с частотой $f=8.09 \text{ МГц}$, что соответствует расстоянию $\Delta D=0,01$ мили. ($\Delta D=0,01$ мили соответствует цене цифрового счетчика дальности).

Для получения непосредственно НКД, частота $f=8.09 \text{ МГц}$ делится на 25. В результате получается $f=323 \text{ кГц}$, что соответствует $\Delta D=0,25$ миль для шкалы дальности 1 мили. В последующих шести делителях на 2 формируются НКД для остальных шести шкал дальности – 2;4;8;16;32;64 мили.

Структурная схема формирования НКД в НРЛС “Наяда-5” приведена на рис.7-16.

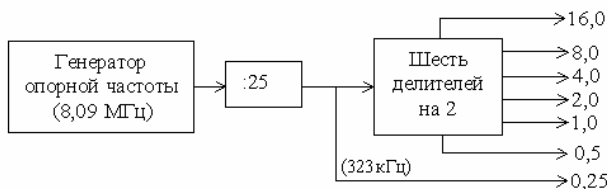


Рис.7-16.

7.2.2. Способы формирования ПКД

Подвижное кольцо (круг) дальности (ПКД) – это кольцо, радиус которого может изменяться с помощью специального органа управления. Радиус кольца оператор может изменять до тех пор, пока наружная его часть не коснется отметки выбранного на экране НРЛС эхо-сигнала. При этом указатель шкалы отсчетного механизма дальности покажет расстояние до данного эхо-сигнала, выраженное в милях с точностью до десятых долей. (В современных радиолокаторах измеренное расстояние индицируется с помощью электронных цифровых счетчиков).

Отметка подвижного кольца дальности создается специальным генератором, который запускается и синхронизируется импульсами от общего задающего генератора НРЛС.

Формирование ПКД заключается в создании одного импульса, временное положение которого можно изменять относительно начала развертки (начала отсчета дистанции до цели). Эта временная задержка определяет точно дистанцию до цели согласно формуле

$$D = \frac{c \cdot t_3}{2},$$

где t_3 - время задержки импульса ПКД относительно начала развертки.

Кратковременный импульс ПКД, близкий к прямоугольной форме, обычно подается в смеситель видеосигналов индикатора НРЛС, где и создает на экране индикатора светящуюся яркостную отметку, которая при вращении антенны образует кольцо (круг) дальности. Следовательно, радиус кольца дальности может изменяться в большую или меньшую сторону. Таким образом, подвижное кольцо дальности может быть использовано в НРЛС как основное дальномерное устройство.

В судовых НРЛС получили распространение такие способы формирования ПКД:

- а) фазометрический - в НРЛС 50...60-х годов разработки;
- б) компараторный (метод сравнения напряжений);
- в) комбинированный (сочетание способов а) и б));
- г) цифровой.

В качестве примера на рис. 7-17 приведена схема индуктивного фазовращателя с расщеплением магнитного поля, применяемого в *фазометрическом* способе. Индуктивный фазовращатель состоит из статорной обмотки L и двух катушек $L1$ и $L2$, создающих фазовый сдвиг протекающих через них токов на 90° .

Изменение фазы выходного напряжения, пропорциональное углу поворота роторной катушки получается таким образом. Через статорную обмотку L протекает ток $i = I \sin \omega t$. В роторных обмотках $L1$ и $L2$ индуцируются напряжения

$$E_1 = -M_1 \cdot \cos \theta \cdot \frac{di}{dt} = -I\omega M \cos \theta \cdot \cos \omega t$$

$$E_2 = -M_2 \cdot \sin \theta \cdot \frac{di}{dt} = -I\omega M \sin \theta \cdot \cos \omega t$$

Роторные обмотки нагружены на квадратурную цепь, состоящую из конденсатора $C1$ и резистора $R1$. Выходное напряжение U_0 снимается со средней точки квадратурной

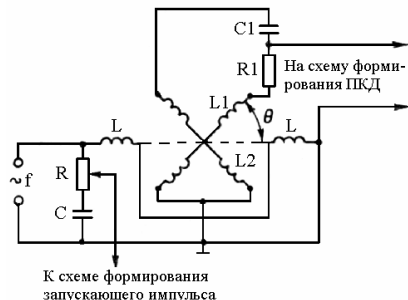


Рис.7-17.

цепи. При условии $R1 = \frac{1}{\omega C1}$ выходное напряжение будет изменяться по закону

$$U_0 = E_1 + E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I\omega M \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4} - \theta\right).$$

(Квадратурная цепь также обеспечивает постоянство амплитуды выходного напряжения при любых изменения угла поворота θ - от 0° до 360°).

Частота питающего напряжения f связана с максимальным

измеряемым расстоянием $D_{\max}$ соотношением $f = \frac{1}{T} = \frac{c}{2D_{\max}}$,

поскольку полное перемещение отметки ПКД (круга), считая от начала линии развертки, будет соответствовать измеряемому расстоянию от нуля до $D_{\max}$.

Схема формирования импульсов ПКД от фазовращателя содержит фазовращатель, селекторный каскад, усилитель-ограничитель, дифференцирующую цепочку и ждущий блокинг-генератор, который, собственно, и формирует кратковременный импульс ПКД.

Основное достоинство этого метода – возможность измерения временной задержки с высокой точностью. Относительная погрешность измерения времени задержки $\sigma = 10^{-5} \div 10^{-4}$,

где: $\sigma = \frac{\Delta t_3}{t_{3\max}}$,

Δt_3 – абсолютная погрешность измерения времени задержки;

$t_{3\max}$ – максимальное время, на которое задерживается импульс.

Принцип формирования ПКД *компараторным* способом (методом сравнения напряжений) приведен на схеме рис.7-18 и объясняется временными диаграммами (рис.7-19).

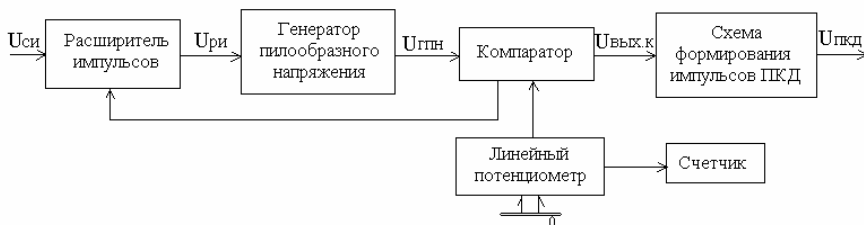


Рис.7-18. Функциональная схема формирования ПКД компараторным способом

Импульс синхронизации запускает расширитель импульсов, собранный по схеме триггера. Триггер управляет работой ГПН, выполненного по схеме с зарядной емкостью.

Длительность импульсов $U_{ри}$ определяет предел изменения задержки в данном устройстве (рис. 7-19).

С выхода ГПН линейно изменяющееся напряжение поступает на сравнивающее устройство — компаратор. На другой вход компаратора подается постоянное опорное напряжение U_0 , снимаемое с линейного потенциометра дальности. Величина этого напряжения устанавливается органом управления, определяющим положения отметки ПКД на экране

индикатора (в разных моделях НРЛС он имеет свое название).

Компаратор сравнивает величины пилообразного и опорного напряжений и в момент равенства $U_{гпн} = U_0$ выдает на своем выходе импульс, который запускает выходной блокинг-генератор, формирующий импульс ПКД. Кроме того, импульс компаратора подается

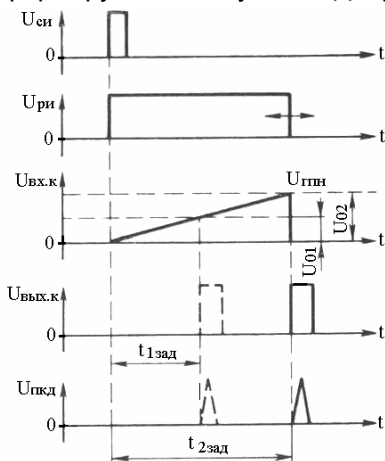


Рис.7-19.

на триггер, возвращая его в исходное состояние, этим самым подготавливая схему для приема следующего импульса запуска.

Время задержки визира дальности относительно начала развертки (например, $t_{1зад}$, $t_{2зад}$) будет зависеть от величины опорного напряжения линейного потенциометра (U_{01} , U_{02}).

Проградуировав угол поворота потенциометра в милях, можно непосредственно на счетчике получать измеряемое расстояние до объекта. В качестве выходного каскада формирования задержанного импульса могут применяться блокинг-генераторы

или усилители – обострители.

Примером *комбинированного* (совместного) использования двух методов служит канал формирования ПКД в НРЛС серии “Океан 01”, “Океан М” [12].

Следует отметить, что нелинейность развертки в одинаковой степени оказывает влияние как на радиолокационное изображение и неподвижные кольца дальности, так и на ПКД станции. Поэтому при использовании подвижного кольца дальности как основного дальномерного устройства необходимо проверять точность его работы.

Точность работы подвижного дальномера, как правило, определяется путем совмещения его отметки с отметками неподвижных колец дальности [26]. Это допускается потому, что неподвижные кольца дальности калибруются значительно точнее и сохраняют эту точность гораздо дольше, чем подвижный дальномер. Путем поочередного совмещения отметки подвижного дальномера с наименьшим и наибольшим по дальности неподвижным кольцом можно произвести калибровку подвижного дальномера. Если в обоих случаях отсчеты подвижного дальномера соответствуют значениям дальности совмещенных колец, можно полагать, что и промежуточные отсчеты расстояний будут совпадать.

Если же показания не совпадают, то регулятором управления

подвижным дальномером на шкале дальности устанавливается правильное расстояние. При этом отметки подвижного дальмера и выбранного неподвижного кольца дальности совпадать не будут. Если отметку подвижного дальмера с помощью специальных регулировочных устройств совместить с отметкой выбранного неподвижного кольца дальности, то показания дальмера будут соответствовать правильному значению измеряемой дистанции. Это регулирование производится посредством специального подстроечного сопротивления, позволяющего изменять радиус подвижного кольца дальности в определенных пределах. Регулятор данного сопротивления, как правило, находится на внутренней панели индикатора, и оператор им пользуется только при калибровке подвижного дальномерного устройства. Подобное регулирование выполняется вначале по наименьшему, а затем по наибольшему неподвижному кольцу дальности установленной масштабной шкалы. Далее проверка осуществляется для каждой масштабной шкалы дальности, а при необходимости оператор может отрегулировать подвижное дальномерное устройство изложенным ранее способом.

Цифровой способ формирования ПКД. Упрощенная функциональная схема этого способа приведена на рис.7-20 и состоит из таких основных блоков:

- а) блок формирования опорных тактовых импульсов;
- б) блок формирования временного интервала $t_{\text{зад}}$;
- в) блок счетчика дистанции с цифровым отсчетом;
- г) блок формирователя импульса ПКД.

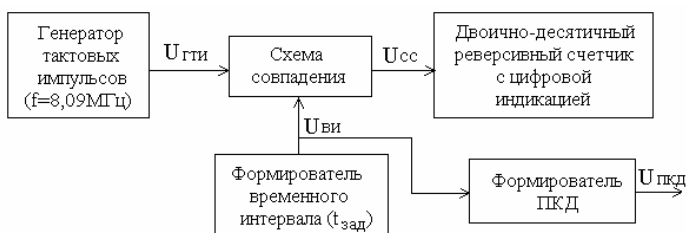


Рис.7-20. Функциональная схема формирования ПКД цифровым способом

Генератор тактовых импульсов вырабатывает опорные тактовые импульсы с частотой $f=8,09 \text{ МГц}$, (что соответствует $\Delta D=0,01 \text{ мили}$), которые подаются в схему совпадения. На эту же схему поступает (см. рис.7-21) прямоугольный импульс $U_{\text{ви}}$ из блока формирования временного интервала $t_{\text{зад}}$, длительность которого определяется выведенным для

оператора потенциометром управления ПКД.

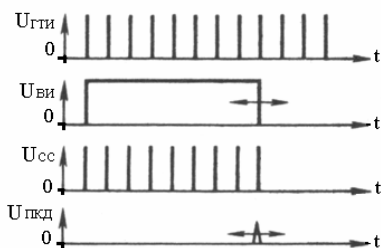


Рис.7-21.

С выхода схемы совпадения последовательность импульсов (U_{CC}) подается в блок счетчика дистанции с цифровым отсчетом, на индикаторе которого отображается дистанция до цели с точностью отсчета, определяемой частотой тактовых импульсов (в данном примере - 0,01 миль). Одновременно фронтом импульса временного интервала формируется импульс ПКД короткой длительности.

7.3. Формирование отметки курса

Практически все современные НРЛС обладают двумя видами ориентации – относительной диаметральной плоскости судна и относительно истинного меридиана (соответственно ориентация по “КУРСу” и по “СЕВЕРу”).

В любом из указанных видов ориентации необходимо формировать отметку курса (ОК). На рис.7-22 в качестве примера приведена одна из схем, с помощью которой формируется отметка курса.

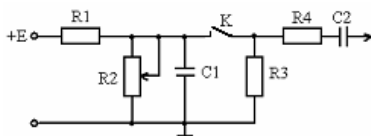


Рис.7-22.

Принцип работы схемы заключается в следующем. Пока контакт “К” (он расположен в районе редуктора антенны) разомкнут, от источника питания +E через резистор R1 происходит заряд емкости C1. В момент, когда ось диаграммы направленности

вращающейся антенны совпадает с диаметральной судна, контакт “К” замыкается и конденсатор C1 разряжается на резистор R3. Отрицательный скачок этого напряжения через резистор R4 и разделительный конденсатор C2 подается на катод электронно-лучевой трубки, создавая при этом на индикаторе НРЛС яркую радиальную развертку. (Обычно за время действия этого импульса происходит 3...5 прямых ходов радиальной развертки. Этим самым создается яркая линия отметки курса).

Яркость свечения ОК регулируется потенциометром R2. Точное совпадение диаграммы направленности антенны с диаметральной плоскостью судна достигается путем регулировки контактной группы

“К” в блоке антенны. В некоторых НРЛС в качестве контакта “К” используется геркон.

8. Радиолокационные системы с активным ответом

8.1. Общая характеристика

При плавании вблизи берегов в условиях ограниченной видимости часто возникает необходимость определения места судна по береговому ориентирам, знакам навигационного ограждения, буям. Слаборазличимы также сигналы от малых судов, яхт, шлюпок и других целей с малой ЭПО. Использование искусственных радиолокационных отражателей для улучшения их наблюдаемости становится малоэффективным на фоне засветок от морской поверхности, береговой черты и др. Увеличение ЭПР отражателями ограничивается их габаритными размерами, массой, парусностью, что затрудняет их установку на малых объектах. Кроме того, опознавание объекта по эхо-сигналу, воспроизводимому на экране ИКО НРЛС, затруднено, а иногда и невозможно.

Эффективно решать задачи выделения сигналов на фоне помех и опознавания объектов по отметкам на экране ИКО позволяют радиолокационные устройства с активным ответом, образующие совместно с НРЛС систему вторичной радиолокации (СВРЛ). Это устройство, получившее название “ответчик”, излучает ответные сигналы только после приема запросных сигналов судовой НРЛС. Для повышения помехоустойчивости системы запросные сигналы излучаются еще и специальными запросчиками [3].

Активный ответ позволяет значительно увеличить дальность радиолокационного наблюдения объектов с малой ЭПР, так как мощность сигналов запроса и ответа убывает пропорционально квадрату расстояния до объекта, а не четвертой степени, как это имеет место при приеме отраженных (пассивных) сигналов. Отсутствие флуктуации ответного сигнала повышает также точность определения координат объектов, снабженных ответчиком. Кодирование ответа позволяет осуществлять обмен информацией между судами, а также значительно облегчить выделение полезных сигналов на фоне помех.

Дальность обнаружения сигналов ответчика в свободном пространстве определяется из условия приема запросных и ответных сигналов и определяется понятием *дальности действия* радиосистемы [8].

Дальность действия является одной из важнейших характеристик большинства радиосистем. Под *дальностью действия* понимают максимальное расстояние $D = D_{\max}$, на котором принимаемый сигнал достигает минимально допустимого (порогового)

уровня $P_c = P_{cmin}$, еще достаточного для выполнения системой основных функций с качественными показателями не хуже заданных.

Рассмотрим максимальную дальность действия радиолиний, применяемых в радиосистемах различного назначения: радиолинии связи, радиолинии с активным ответом.

Дальность действия радиолинии связи. Радиолиния связи состоит из передатчика и приемника радиосигнала. Предположим, что в радиолинии используются радиоволны длиной λ , мощность излучаемых передающей антенной колебаний P_u , ее коэффициент усиления $G_{перед.}$, коэффициент усиления приемной антенны $G_{ан.}$, а чувствительность приемника (мощность порогового сигнала) $P_{пр. min}$.

Известно, что плотность потока мощности, создаваемого излучаемым сигналом в месте расположения приемной антенны на расстоянии D от передающей антенны, определяется уравнением

$\Pi = \frac{P_u G_{перед.}}{4\pi D^2}$. Тогда мощность сигнала в приемной антенне будет

$$\text{равна } P = \Pi \cdot S_{ан.} = \frac{P_u G_{перед.} S_{ан.}}{4\pi D^2} = \frac{P_u G_{перед.} \cdot G_{ан.} \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2}, \quad (50)$$

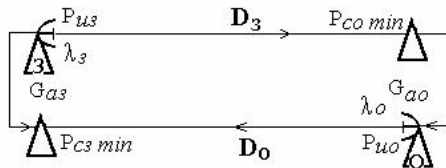
где $S_{ан.} = \lambda^2 \cdot G_{ан.} / 4\pi$ - эффективная площадь приемной антенны.

При увеличении дальности D мощность принимаемого сигнала падает и достигает некоторого порогового уровня $P_c = P_{cmin}$, ограничивающего максимальное значение дальности радиолинии. Из уравнения (50) следует, что

$$D_{max} = \sqrt{\frac{P_u G_{перед.} G_{анн.} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{cmin}}}. \quad (51)$$

Мощность P_{cmin} должна быть достаточной для извлечения информации с заданной достоверностью при наличии помех, включая и собственный шум приемника, приведенный к его входу.

Радиолиния с активным ответом. Радиолиния с активным ответом (рис. 8-1) состоит из двух радиолиний связи: линии запроса D_3



и линии ответа D_0 .

Рис.8-1.

На рис.8-1 обозначено: P_{uz} и P_{uo} - соответственно излучаемая мощность передатчика запросчика и ответчика; $P_{co \min}$ и $P_{cz \min}$ - минимально допустимые уровни сигналов приемника (чувствительность) ответчика и запросчика; G_{az} и G_{ao} - коэффициенты усиления соответствующих антенн (запросчика и ответчика) и λ_z , λ_o - длины волн запросчика и ответчика.

Для каждой из них можно найти максимальную дальность действия по формуле (51), присвоив параметрам, относящимся к линиям запроса и ответа, соответствующие индексы, то есть, максимальная дальность приема запросного сигнала определяется уравнением

$$D_{z \max} = \sqrt{\frac{P_{uz} G_{az} G_{ao} \lambda_z^2}{(4\pi)^2 P_{co \min}}}, \quad (52)$$

а максимальная дальность приема ответного сигнала уравнением

$$D_{o \max} = \sqrt{\frac{P_{uo} G_{az} G_{ao} \lambda_o^2}{(4\pi)^2 P_{cz \min}}}. \quad (53)$$

При расстоянии $D > D_{z \max}$ сигналы запросчика не смогут “запустить” ответчик, а при $D > D_{o \max}$ ответный сигнал не будет обнаружен.

Результирующая дальность действия системы определяется радиолинией с наименьшей дальностью действия. Для того чтобы сделать каналы запроса и ответа равнонадежными, а систему – сбалансированной, необходимо обеспечить выполнение равенства

$$D_{z \max} = D_{o \max}.$$

Если в запросчике и ответчике для передачи и приема используют одну антенну, а частоты запросного и ответного сигналов близки, то есть $\lambda_z \approx \lambda_o$, то $G_{az} \approx G_{ao}$. Отсюда найдем условие баланса системы:

$$P_{uz} / P_{cz \min} \approx P_{uo} / P_{co \min}. \quad (54)$$

Это уравнение позволяет выбрать мощность передатчика и чувствительность приемника ответчика при заданных характеристиках запросчика (судовой РЛС).

Если условие (54) не выполняется, то максимальная дальность действия СВРЛ определяется по наименьшему из получаемых по формулам (52) и (53).

В реальных условиях дальность наблюдения ответных сигналов СВРЛ будет зависеть не только от технических характеристик запросчика и ответчика, но и от условий распространения радиоволн: высот установки антенн, состояния морской поверхности, метеоусловий и других факторов.

Влияние подстилающей (морской) поверхности на дальность действия СВРЛ проявляется в том, что напряженность поля в точке приема равна векторной сумме прямого сигнала и отраженного от морской поверхности. Самым неблагоприятным является случай противофазности этих сигналов. Наблюдаемое при этом интерференционное замирание может привести к потере запросных (или ответных) сигналов на расстояниях меньших, чем это определяется уравнениями (52) и (53). Глубина замираний определяется отношением отраженного сигнала к прямому. Последнее зависит от состояния морской поверхности, длины волны излучения, поляризации и угла падения электромагнитной волны. Наиболее сильно замирание проявляется в штиль.

По характеру решаемых задач и области применения СВРЛ можно выделить следующие системы:

- навигационного обеспечения;
- радиолокационного наблюдения;
- контроля за движением судов;
- предупреждения столкновений.

Характер решаемых задач определяет соответствующие требования к системе. СВРЛ, используемые в настоящее время, разделяются на радиолокационные маяки-ответчики (РМО) и судовые запросчики-ответчики (СЗО) [3].

РМО, называемый также РАКОН (название “РАКОН” – эта аббревиатура составлена из первого и последнего слогов двух английских слов *radar* – радиолокатор и *beacon* – радиомаяк), представляет собой приемопередающее устройство, излучающее ответные сигналы (кодовое сочетание) при поступлении на вход приемника зондирующих импульсов судовых РЛС. Они предназначены для улучшения радиолокационной наблюдаемости и опознания объектов, обладающих малыми ЭПР, а также для обозначения “особых” точек.

СЗО в отличие от РМО излучает ответный кодированный сигнал лишь при приеме кодированного запроса от специального запросчика. Функциональные возможности такой системы значительно шире. Помимо задач, решаемых РМО, СЗО позволяет осуществить обмен навигационной и другой информацией между судами или между судном и береговым центром управления движением.

8.2. Радиолокационные маяки-ответчики

Назначение РМО предполагает их работу с любой судовой РЛС. Согласно требованиям Регистра и Конвенции-60 по безопасности мореплавания все суда водоизмещением более 500 *рег. т* должны быть оснащены РЛС трехсантиметрового диапазона волн. Для судовых РЛС в этом диапазоне Регламентом радиосвязи отведена полоса частот 9320—9500 МГц. Следовательно, приемник РМО должен иметь полосу пропускания, ширина которой $\Delta f = (9500 - 9320)$ МГц = 180 МГц.

Чувствительность его приемника выбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимую дальность работы с любой РЛС и в то же время не допустить срабатывание РМО от помех. Ответные сигналы РМО принимаются только в том случае, если их несущая частота попадает в полосу пропускания приемника запрашивающей РЛС. Приемники каждой РЛС настраиваются на прием отраженных сигналов и имеют полосу пропускания 4—20 МГц. Для приема сигналов РМО необходимо, чтобы их частота в процессе излучения ответа изменялась в пределах возможной настройки приемника РЛС, то есть от 9320 до 9500 МГц. Сигналы от РМО при этом будут видны на экране ИКО судовой РЛС вместе с сигналами, отраженными от пассивных объектов.

Изменение (качание) частоты ответного сигнала РМО может быть быстрым, когда полная перестройка осуществляется в течение каждого ответного импульса, и медленным, когда перестройка происходит за относительно длительный период (60—120 с). Последний метод нашел более широкое применение, так как позволяет точнее измерить дистанцию, а сигналы от таких РМО в меньшей степени “засоряют” экран ИКО. Ответные сигналы наблюдаются периодически: через каждые 15—30 оборотов антенны РЛС в течение 2—3 оборотов.

В зависимости от места установки РМО его антенная система может быть всенаправленной или секторной.

Первые опыты по созданию и использованию РМО были проведены еще в 50-х годах, но несовершенство элементной базы сдерживало их широкое применение. В 70-х годах в связи с бурным развитием полупроводниковой электроники интерес к этим системам вновь возрос. Ведущими в области радиолокационной техники фирмами были разработаны серии РМО для установки на береговых и плавучих объектах. В Советском Союзе промышленностью в 60-х годах был освоен выпуск РМО типа “Огонек”. Позднее был разработан

новый тип универсального РМО, выполненного полностью на полупроводниковых элементах.

Опыт эксплуатации РМО с качанием частоты позволил выявить недостатки такой системы:

слабую наблюдаемость ответных сигналов в условиях интенсивных помех от моря, гидрометеоров и окружающих объектов;

наличие секторных и круговых засветок на экране ИКО РЛС, “маскирующих” эхо-сигналы;

малую степень распознавания сигналов.

Массовое и бесконтрольное применение РМО могло привести к чрезмерному засорению радиолокационного изображения. Поэтому вопросы использования СВРЛ специально рассматривались Подкомитетом по безопасности мореплавания ИМО. В соответствии с рекомендациями ИМО Международная ассоциация маячных служб регламентировала технические характеристики (табл. 2) и область применения РМО с качанием частоты.

Их применение ограничено навигационным обеспечением береговых и плавучих знаков, опасностей. В исключительных случаях разрешена их установка на судах, стесненные в маневрировании или перевозящие опасные грузы.

Все РМО разделены на три класса:

большой дальности (до 25 миль);

средней дальности (8—15 миль);

малой дальности (до 6 миль).

РМО большой дальности предусматривается устанавливать на береговых навигационных знаках на высоте более 30 м над уровнем моря, средней дальности — на плавучих маяках, навигационных знаках или на береговых знаках на высоте менее 30 м над уровнем моря, малой дальности — на буйках или знаках, ограждающих входы в порты, фарватеры.

Зондирующие импульсы судовой РЛС через всенаправленную антенну *А*, через антенный переключатель *АП* поступают на вход приемника, состоящего из видеодетектора *ВД* и видеоусилителя *ВУ*. Усиленные сигналы с выхода приемника подаются на пороговое устройство *ПУ*. В случае превышения сигналом порогового уровня производится запуск кодирующего устройства *КУ*. В некоторых случаях между пороговым и кодирующим устройствами помещается схема анализа регулярности следования импульсов запроса, которая повышает помехоустойчивость ответчика. В *КУ* предусматривается возможность изменения кодовой комбинации импульсов, соответствующей буквам кода Морзе.

В соответствии с кодовой последовательностью запускается передатчик, состоящий из модулятора *М* и СВЧ-генератора перестраиваемой частоты *Г*. Далее ответные СВЧ-сигналы через всенаправленную антенну *А* излучаются в пространство и достигают запрашивающей РЛС. В современных РМО в качестве модулятора используются мощные транзисторы, а в качестве СВЧ-генератора широкое применение получили лавинопролетные диоды и диоды Ганна. Перестройка частоты осуществляется изменением емкости

p—п - перехода варикапа, включенного в колебательный контур генератора.

Для приема запросных и излучения ответных сигналов могут быть использованы и две антенны. Одна подключается к приемнику, а вторая – к передатчику. В этом случае в РМО отсутствует антенный переключатель.

Необходимый режим качания частоты задается генератором пилообразного напряжения *ГПН*, работающим в автоколебательном режиме. Управление его работой осуществляется схемой принятия решения *СПР*, которая по заранее заданному алгоритму включает РМО в активный режим или переключает в режим ожидания.

Контроль полосы излучаемых колебаний осуществляется с помощью двух резонаторов высокой добротности *Р1* и *Р2*, настроенных на крайние частоты рабочего диапазона. Когда рабочая частота достигает частоты настройки одного из резонаторов, происходит изменение направления качания частоты СВЧ-генератора.

Схема блокировки *СБ* вырабатывает импульсы, запирающие приемник на время обработки запросного и излучения ответного сигналов. Тем самым предотвращаются самовозбуждение ответчика и искажение ответного сигнала запросными импульсами других РЛС.

Изображение ответного сигнала РМО на экране ИКО НРЛС при некодированном ответе имеет вид, показанный на рис. 6-9,а –

утолщенные линии в направлениях 155° и 230° . Поскольку ответный сигнал излучается с некоторой задержкой, обусловленной прохождением сигналов по цепям ответчика, он воспроизводится на расстоянии, большем фактического. Иногда для улучшения наблюдения ответного сигнала относительно отметок берега вводится дополнительная задержка. Время задержки указывается на картах и в лоциях для каждого РМО и учитывается при определении расстояний. Кроме того, указываются координаты ответчика, код его ответного сигнала, минимально допустимое приближение к нему и другие параметры.

Недостаток РМО с качанием частоты - невозможность освободиться от их сигналов, когда надобность в них отпадает. Этот недостаток устраняется при переходе на фиксированную частоту ответа, находящуюся вне полосы частот, отведенной для работы РЛС. Применение РМО с фиксированной частотой ответа (РМО-Ф) обеспечивает:

раздельное и совместное наблюдение радиолокационных эхо-сигналов и сигналов ответчика на экране ИКО;

раздельную и совместную обработку этих сигналов на ЭВМ;

высокую степень опознавания;

высокую защищенность ответных сигналов от помех на рабочей частоте НРЛС.

Для работы РМО-Ф выделены полосы частот: в трехсантиметровом диапазоне волн $9300...9320$ МГц; в десятисантиметровом — $2900...2920$ МГц. Эти полосы находятся на краю диапазона частот, отведенного для судовых НРЛС. Это сделано для того, чтобы при приеме сигналов РМО-Ф мог быть использован антенно-волноводный тракт НРЛС. Специальная приставка (дополнительный гетеродин) обеспечивает прохождение сигналов по приемному тракту НРЛС. Для эксплуатирующихся НРЛС такая модернизация не вызывает трудностей даже в судовых условиях, а в современных НРЛС прием сигналов РМО-Ф предусмотрен заводом-изготовителем.

В 1980 г. ИМО рекомендовано использование РМО-Ф для обозначения характерных точек пологих берегов, навигационных ограждений, подходов к портам, береговых объектов. Ответчики разделены на два типа:

A — ближнего действия (до 10 миль);

B — дальнего действия (10—30 миль).

Выбор типа запрашиваемого маяка осуществляется автоматически в зависимости от установленной на ИКО шкалы дальности. Это достигается селекцией зондирующих импульсов РЛС

по длительности в приемнике РМО-Ф. Структурная схема РМО-Ф и принцип работы незначительно отличаются от РМО с качанием частоты (см. рис. 8-2).

8.3. Радиолокационный ответчик

Радиолокационный ответчик (РЛО или SART – аббревиатура английских слов Search and Rescue Radar Transponder) обеспечивает определение местоположения судов, терпящих бедствие, посредством передачи сигналов, которые на экране радиолокационной станции представлены серией точек, расположенных на равном расстоянии друг от друга в радиальном направлении. РЛО работает в диапазоне 9,2 ... 9,5 ГГц [14].

РЛО может быть запущен любой НРЛС X-диапазона (3,2 см) в пределах дальности приблизительно 8 морских миль (НРЛС S – диапазона не могут обнаруживать РЛО) [14,22]. Каждый импульс НРЛС, излучаемый антенной и принятый РЛО может запустить передатчик РЛО для передачи ответа. Приемник РЛО сканирует диапазон возможных частот со скоростью 0,4 мс, а при получении сигнала от НРЛС скорость сканирования по диапазону уменьшается до 7,5 мс. Этот процесс повторяется двенадцать законченных циклов. В некоторый момент частота РЛО будет соответствовать тактовой частоте НРЛС в пределах ширины полосы пропускания радиолокационного приемника РЛО. Если РЛО находится в пределах дальности, на развертке радиолокационного индикатора будут отображаться 12 меток, одинаково расположенных примерно на расстоянии 0,64 морских мили друг от друга. При этом отметка, ближайшая к центру развертки, будет указывать на расстояние до объекта, а остальные метки будут направлены от объекта к периметру ЭЛТ (см. рис.8-3,а).

Когда же расстояние до РЛО уменьшится приблизительно до 1 мили, на ЭЛТ индикатора могут показывать также 12 отметок, которые из-за уменьшения времени ответа принимают вид дуг (см. рис.8-3,б).

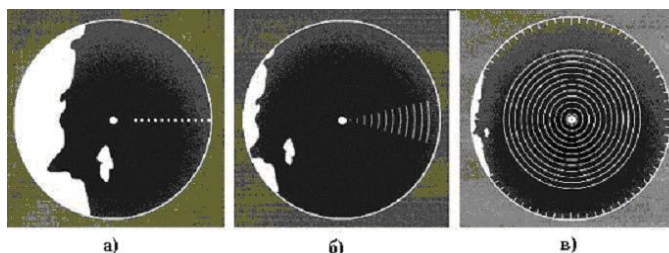


Рис.8-3. Объект с РЛО на расстоянии: а - больше одной мили от

НРЛС; б – меньше одной мили; в – вблизи НРЛС

Для того чтобы увидеть большее количество точек ответа и отличить РЛО от других целей, при поиске РЛО предпочтительно использовать шкалу дальности 6 или 12 миль. Такой выбор обусловлен тем, что общая длина сигнала ответа РЛО, состоящая из 12 точек, может увеличиваться приблизительно до 9,5 миль от позиции РЛО.



Рис.8-4.

На каждом борту любого пассажирского судна и грузового судна валовой вместимостью 500 рег. тонн и более должно иметься, по крайней мере, два РЛО. На судах валовой вместимости от 300 до 500 рег. тонн должен быть, по крайней мере, один РЛО.

РЛО должны быть установлены в таких местах, откуда они могут быть быстро перенесены в спасательную шлюпку или плот. Высота установленной антенны ответчика должна быть, по крайней мере, на 1 метр выше уровня моря. При этом он обеспечивает нормальную работу на расстоянии не менее 5 морских миль при запросе судовой НРЛС, антенна которой установлена на высоте 15 метров и не менее 30 морских миль при запросе авиационного радара с мощностью импульса не менее 10 κBm , установленного на борту летательного аппарата, находящегося на высоте 1000 м.

Эксплуатационные требования к РЛО изложены в Резолюции А. 697(17) ИМО.

В соответствии с выдержками из этой

Резолюции РЛО должен:

- обеспечивать ручное включение и выключение, индикацию в режиме готовности, иметь плавучий линь;
- выдерживать сбрасывание в воду с высоты 20 метров;
- быть водонепроницаемым на глубине 10 метров не менее 5 минут;
- оборудован визуальными или звуковыми средствами для определения нормальной работы и предупреждения терпящих бедствие о том, что РЛО приведен в действие НРЛС;
- иметь достаточную емкость батареи для работы в режиме ожидания 96 часов и 8 часов при непрерывном облучении импульсами радара частотой 1 $\kappa Гц$. (Дата замены батарей указана на наружной стороне корпуса РЛО. Батареи питания следует менять через половину срока их службы).

- сохранять работоспособность в диапазоне температур от $-20^{\circ} C$ до $+55^{\circ} C$;

- высота установки РЛО должна быть по крайней мере 1 метр над поверхностью моря;

- срабатывать на расстоянии до 5 миль при облучении НРЛС с высотой антенны 15 метров и при облучении самолетной РЛС мощностью 10 кВт на расстоянии до 30 миль с высоты 1000 метров.

На рис. 8-4. показана одна из моделей РЛО фирмы McMurdo (Великобритания).

8.3.1. Некоторые замечания при работе с РЛО

1. Ошибки дальности РЛО.

Когда видны ответы только от 12 видеосигналов (РЛО на расстоянии большее чем 1 миля), позиция, в которой находится первая точка, может быть вне истинного места РЛО на расстоянии 0,64 мили [22]. Когда дальность уменьшается и увеличивается скорость приема ответных сигналов, ошибка будет составлять не более чем 150 метров от истинного места.

2. Влияние ширины полосы пропускания НРЛС.

Обычно ширина полосы пропускания НРЛС согласована с длительностью излучаемого импульса и изменяется при переключении шкалы дальности, связанной с длительностью импульса. Узкие полосы 3-5 МГц используются с длинными импульсами на больших шкалах дальности, а широкие полосы пропускания 10-25 МГц с короткими импульсами на малых дальностях.

Ширина полосы радара меньше чем 5 МГц уменьшит сигнал РЛО, поэтому предпочтительно использовать среднюю ширину полосы для гарантированного приема сигналов РЛО.

3. Влияние боковых лепестков диаграммы направленности антенны НРЛС.

При приближении к РЛО, боковые лепестки антенны НРЛС могут показывать ответы РЛО как ряд дуг или концентрических колец. Они могут быть удалены при помощи регулирования подавления помех от моря и местных предметов, хотя может быть полезно наблюдать такие сигналы, поскольку они могут быть упростить обнаружение в условиях отражений, и подтвердят, что РЛО находится около судна.

4. Настройка НРЛС.

Чтобы увеличивать видимость РЛО в условиях отражений, настройка НРЛС может быть загрублена для уменьшения отражений. НРЛС с автоматической настройкой частоты не позволяют выполнить загрубление.

5. Усиление.

Для максимальной дальности обнаружения РЛО должна использоваться нормальная установка усиления для большой дальности, с видимой зернистостью фоновых шумов.

6. Подавление помех от моря, от дождя.

Для оптимальной дальности обнаружения РЛО эти регуляторы должны быть установлены на минимум.

Некоторые НРЛС имеют автоматические/ручные средства управления подавлением помех моря, местных предметов и от дождя. Поскольку функции управления автоматическим подавлением помех могут быть различны у разных производителей, рекомендуется первоначально использовать ручное управление, пока не будет обнаружен РЛО.

Эффект от автоматического управления сигналом ответа РЛО может быть виден только при сравнении с ручным управлением.

7. Метеорологические условия.

Мертвый штиль может привести к множественности импульсов, отражаемых от поверхности моря. Высокие волны могут дать возможность приема на больших расстояниях, но из-за случайной высоты радара и РЛО обнаружение будет спорадическим, из-за пропадания сигнала.

Устранение влияния моря и отражений дождя будет зависеть от используемого радара, и навыка оператора.

9. Навигационные РЛС с использованием эффекта Доплера

Принцип действия НРЛС с использованием эффекта Доплера состоит в том, что при относительном движении НРЛС и объекта частота принимаемых отраженных сигналов не остается постоянной, а изменяется по определенному закону. Это свойство было открыто в 1842 г. австрийским физиком Х. Доплером [10].

Явление эффекта Доплера можно объяснить без использования специальной теории относительности на основе простейших соотношений кинематики. На рис.9-1 изображен зондирующий радиоимпульс длительностью τ_u , начало излучения которого происходит в момент $t = 0$. Он достигает цели, находящейся в момент излучения сигнала на расстоянии D_o , в момент $t_3/2$ (пересечение графиков пройденного расстояния от времени для излученного радиоимпульса $D = ct$ и для цели $D = D_o + v_p t$).

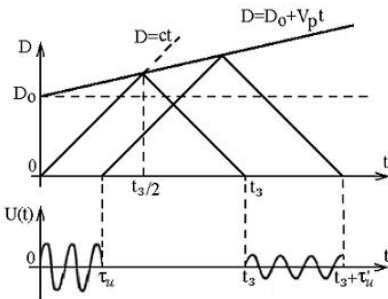


Рис.9-1.

Срез (тыл) импульса возвращается в момент времени $t_3 + \tau_u'$, где $\tau_u' > \tau_u$ (для этого случая, когда $v_p > 0$). Как видно из приведенного рисунка,

$$t_3 = 2c^{-1}(D_o + v_p t_3 / 2);$$

$$t_3 + \tau_u' - \tau_u = 2c^{-1} \cdot [(D_o + v_p \tau_u) + v_p (t_3 + \tau_u' - \tau_u) / 2].$$

Отсюда $\tau_u' = \tau_u (1 + v_p / c) / (1 - v_p / c)$, то есть *изменяется временной масштаб – импульс расширяется при $v_p > 0$ (удаление) и сужается при $v_p < 0$ (сближение).*

Точно также преобразуется период следования импульсов и период вторичных колебаний:

$$T_n' = T_n (1 + v_p / c) / (1 - v_p / c) \quad \text{и} \quad T_o = T_c (1 + v_p / c) / (1 - v_p / c),$$

откуда можно найти частоту отраженного сигнала: $f_o = 1 / T_o$.

Так как практически $v_p \ll c$, то разложение в ряд Маклорена дает

$$f_o = f_c (1 - 2v_p / c + 2v_p^2 / c^2 - \dots),$$

где f_c - частота излучаемого радиосигнала.

Пренебрегая членами второго порядка малости и выше, получим

$$f_o \cong f_c (1 - 2v_p / c) \quad (55)$$

Существует два равноправных и взаимосвязанных определения эффекта Доплера в радиолокации [10]:

1. Эффект Доплера заключается в изменении фазы отраженного сигнала в соответствии с изменением расстояния до цели.

2. Эффект Доплера состоит в изменении частоты отраженных колебаний в соответствии со скоростью движения цели. Величина изменения частоты зависит от скорости и направления относительного перемещения РЛС и объекта, а также от длины волны (частоты) радиолокационной станции.

В НРЛС с использованием эффекта Доплера (ДРЛС) передатчик излучает зондирующие сигналы в виде непрерывных немодулированных колебаний частотой f_c . Частота f_o сигналов, отраженных от объекта и попадающих в приемную антенну РЛС, будет отличаться от частоты f_c зондирующих сигналов на величину так называемой доплеровской частоты F_D , то есть:

$$f_o = f_c \pm F_D. \quad (56)$$

Знак плюс соответствует сближению РЛС и объекта, а минус — удалению.

Ослабленные зондирующие сигналы и принимаемые отраженные сигналы, поступая на вход приемника, создают биения с разностной частотой $f_c \pm f_o$ и после детектирования на выходе приемника получаются колебания доплеровской частоты, которая

равна
$$F_D = |f_c \pm f_o| = \frac{2|v_p|}{\lambda}, \quad (57)$$

где v_p — радиальная составляющая скорости перемещения объекта;

λ — длина волны зондирующих сигналов ДРЛС.

Если выразить длину волны в сантиметрах, а радиальную скорость объекта — в км/ч, то расчетная формула доплеровской частоты в герцах примет вид: [11]

$$F_D = 55,6 \cdot \frac{2|v_p|}{\lambda}.$$

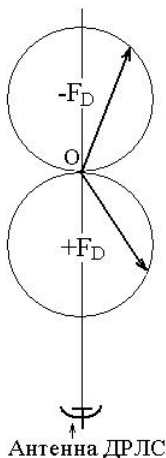


Рис.9-2.

Зависимость доплеровской частоты от направления движения объекта (цели), находящегося в точке О, может быть охарактеризована диаграммой в полярных координатах, представленной на рис.9-2 [11].

В этой диаграмме радиус-вектор характеризует направление движения объекта, а длина вектора — значение доплеровской частоты с учетом знака. Увеличение доплеровской частоты отмечено на диаграмме знаком плюс, а уменьшение — знаком минус.

Эффект Доплера вызывает смещение частотного спектра отраженного сигнала, который можно иллюстрировать графиками (рис.9-3).

Если допустить, что зондирующий и отраженный сигналы представляют собой синусоидальное колебание бесконечной длительности, то частотный спектр характеризуется одной спектральной линией.

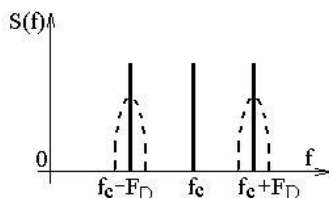


Рис.9-3.

Приближение и удаление объекта относительно РЛС вызывает соответствующий сдвиг частоты отраженных сигналов от $f_{o \min} = f_c - F_D$ до $f_{o \max} = f_c + F_D$. Следовательно, спектральные линии будут

перемещаться по оси частоты f , как

показано на рис.9-3.

В связи с тем, что отраженный сигнал практически представляет собой синусоидальное колебание конечной длительности, а также из-за флуктуации эффективной поверхности отражения (ЭПО) объектов, сканирования луча антенны и ускорения объектов спектр отраженного сигнала будет несколько шире (отмечено штрихами).

Доплеровские РЛС с непрерывным излучением сигналов широко используются для измерения путевой скорости самолетов, скорости ветра, скорости автомобильного транспорта и пр.

В последнее время доплеровские РЛС начали широко использовать в судовождении для измерения скорости причаливания судов. Это объясняется тем, что появление крупнотоннажных судов, в частности танкеров водоизмещением 150—200 тыс. т и более,

вызвало необходимость принятия мер, предотвращающих повреждения при швартовке таких судов к причалу.

Оснащение судов подруливающими устройствами, использование швартовых буксиров и тому подобные меры не решают проблемы полностью. При швартовке судоводитель должен иметь исчерпывающую информацию о положении судна относительно причала и его скорости. Применяемые до настоящего времени визуальные методы определения скорости судна и расстояния до причала по береговым предметам при швартовке крупнотоннажных судов становятся непригодными. Многие из существующих причалов не могут выдержать соприкосновения с ними судна водоизмещением 150—200 *тыс. т*, если его скорость превышает 3—5 *м/мин*. Следовательно, возникает необходимость в точном измерении скорости судна, достигающей 0,5—1 *м/мин* [11].

Структурная схема доплеровской РЛС (ДРЛС) показана на рис. 9-4. Она содержит: генератор непрерывных немодулированных

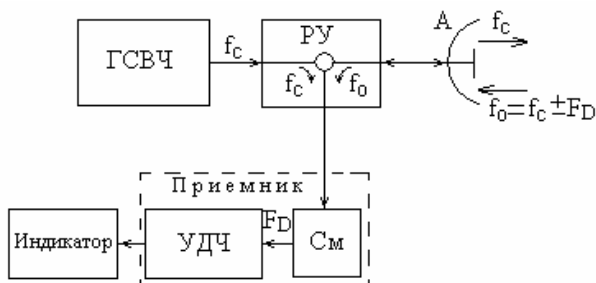


Рис.9-4. Структурная схема доплеровской РЛС

колебаний сверхвысокой частоты f_c (ГСВЧ), развязывающее устройство РУ, направленную антенну А, смеситель См, усилитель доплеровской частоты УДЧ и индикатор. Зондирующие колебания сверхвысокой частоты f_c через развязывающее устройство попадают в антенну одновременно, после ослабления в развязывающем устройстве, подаются на вход смесителя приемника.

Отраженные сигналы с частотой $f_o = f_c \pm F_D$ поступают на вход смесителя и смешиваются с частотой зондирующих сигналов f_c . Возникающие биения разностной частоты создают на выходе смесителя доплеровскую частоту F_D , усиливаемую каскадами УДЧ.

Индикатором служит устройство, измеряющее доплеровскую частоту. Поскольку радиальная скорость объекта v_p и доплеровская

частота связаны между собой линейной зависимостью $v_p = F_D \cdot \frac{\lambda}{2}$,

то указанный индикатор — частотомер может быть отградуирован в единицах скорости (например, *метрах в минуту*). Практически при использовании доплеровской РЛС в качестве измерителя скорости движения объектов оказывается необходимым выяснить, в каком направлении движется объект относительно ДРЛС, то есть объект приближается или удаляется.

Эта задача выполняется несколькими способами. Например, с помощью отдельных фильтров, настроенных на частоты $f_o = f_c - F_D$ и $f_o = f_c + F_D$, лежащие по обе стороны частоты зондирующего сигнала f_c . В первом случае частота отраженного сигнала оказывается ниже частоты f_c , следовательно объект удаляется от ДРЛС. Во втором случае наоборот — частота отраженных сигналов оказывается выше частоты f_c , следовательно объект приближается к ДРЛС.

Знак доплеровской частоты можно определить также фазовым методом, путем обработки принятых отраженных сигналов в двухканальной схеме приемного устройства [11].

9.1. ДРЛС типа “Истра” для измерения скорости причаливания судов

Устройство типа “Истра” представляет собой доплеровскую РЛС для измерения скорости причаливания судна. В состав комплекта ДРЛС “Истра” входят следующие приборы: радиолокатор (РЛ), индикаторный прибор (ИП), тумба (Т), распределительный щит (РЩ), соединительный ящик (СЯ), агрегат питания (АП) типа АТО-1-400 [13].

Прибор РЛ является датчиком частот скорости и представляет собой переносной доплеровский радиолокатор. Конструктивно прибор РЛ выполнен в водозащищенном исполнении и хранится во внутренних помещениях судна в укладочном ящике.

Прибор ИП предназначен для выдачи информации об измеряемой скорости. Он имеет водозащищенное исполнение и устанавливается стационарно на крыльях мостика.

Прибор Т предназначается для установки и закрепления на нем переносного радиолокатора. Прибор Т устанавливается на палубе стационарно вблизи обоих бортов, в носовой, средней и кормовой частях судна. Снабжен поворотным устройством с фиксаторами для наведения прибора РЛ на цель по азимуту и углу места. Обычно в комплект ДРЛС входит два прибора РЛ и два или четыре прибора Т. Во время плавания судна верхняя часть тумбы (поворотный механизм и кабель питания) закрываются защитным кофляком.

Распределительный щит (прибор РЩ) предназначается для соединения приборов, контроля напряжения сети. Приборы станции

соединяются между собой проложенными на судне кабельными линиями.

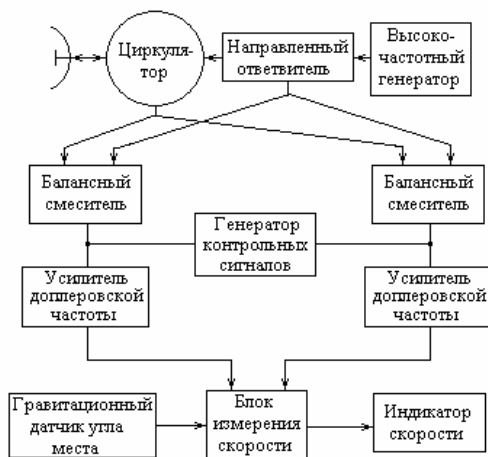


Рис.9-5. Структурная схема переносного доплеровского радиолокатора

Прибор РЛ - переносный доплеровский радиолокатор, структурная схема которого представлена на рис. 9-5, содержит следующие элементы: высокочастотный генератор непрерывных колебаний 3-см диапазона волн мощностью 10 мВт с использованием диода Ганна; развязывающее устройство, состоящее из направленного ответителя и циркулятора, которые обеспечивают работу приемопередатчика ДРЛС на одну общую антенну с

шириной диаграммы направленности 6° веерного типа; двухканальное приемное устройство, состоящее из смесителей, усилителей доплеровской частоты, генератора контрольных сигналов.

Кроме этого, в состав схемы ДРЛС входят: блок измерения скорости, индикаторы скорости и гравитационный датчик угла места. Характеристика приемных каналов квадратурная, то есть, при приеме отраженных сигналов от приближающегося или удаляющегося объекта на выходе смесителей приемника создаются два идентичных колебания доплеровской частоты с разностью фаз $+90^\circ$ или -90° .

После усиления колебания доплеровской частоты поступают в блок измерения скорости, содержащий на выходе стрелочный прибор, отградуированный в метрах в минуту с нулем посередине. Отклонение стрелки прибора вправо соответствует сближению ДРЛС с отражающим объектом; отклонение стрелки влево — удалению отражающего объекта.

При измерении скорости причаливания судна по сигналам, отраженным от причальных сооружений, уровень мощности сигналов сильно флуктуирует и, как показали измерения, может достигать 30 дБ и более [13]. Поэтому в последних моделях ДРЛС "Истра" индикаторное устройство содержит логическую схему для анализа принимаемых сигналов. Это позволяет повысить надежность работы

индикатора и исключить сбои при измерении скорости причаливания судна.

Для исключения ошибки в измерении скорости, вызываемой наведением прибора РЛ при швартовке под большим углом места к горизонту, в схеме ДРЛС предусмотрен гравитационный датчик угла места с потенциометром, включенным в схему индикатора скорости. При наведении прибора РЛ под углом к горизонту изменяется значение сопротивления датчика, корректирующего показания прибора.

В табл. 3 приведены технические характеристики ДРЛС “Истра” [12].

Табл. 3

Технические характеристики ДРЛС “Истра”	
Технические характеристики	Значения
Несущая частота передатчика, ГГц	9,48
Излучаемая мощность, мВт	10
Ширина диаграммы направленности антенны, град	6
Диапазон измеряемых скоростей, м/мин	0-105;0-30;0-15
Точность измерения скорости, %	
Дальность действия, м:	10
максимальная	
минимальная	800
Угол наведения датчика скорости, град:	0,5
в вертикальной плоскости	
в горизонтальной плоскости	10-45
Коррекция ошибки в измерении скорости при наклоне прибора РЛ в вертикальной плоскости	90
Информация о направлении наведения РЛ на индикаторном приборе	Имеется
Контроль работоспособности прибора РЛ по имитатору доплеровского сигнала	Имеется
Источник питания	Имеется
	От судовой сети

Перед швартовкой приборы РЛ устанавливаются на носовую и кормовую тумбы того борта, которым судно швартуется к причалу. Если размеры причала не позволяют измерять скорость причаливания с двух точек, то прибор РЛ устанавливается на тумбу, находящуюся в средней части судна.

После включения станции и проверки ее работоспособности оператор наводит прибор РЛ на какой-либо объект причала, хорошо отражающий сигналы в заданном направлении, и отсчитывает скорость причаливания со стрелочного прибора индикаторного устройства прибора РЛ. Затем полученные данные о курсовом угле на отражающий объект, величине скорости и ее знаке транслируются на индикаторы ИП с двух приборов РЛ, обеспечивающих раздельное измерение скорости носа и кормы судна.

10. Судовые средства автоматической радиолокационной прокладки

Проблема предупреждения столкновений судов является одной из важнейших на морском флоте, что определяется, прежде всего, высоким уровнем навигационной аварийности в результате столкновений. Ежегодно в мировом флоте в результате столкновений терпят аварии несколько сот морских транспортных судов, что вызывает значительные убытки, связанные с гибелью, как самих судов, так и перевозимых ими грузов, а также с сопровождающими их аварии, загрязнением окружающей водной среды.

Актуальность решения рассматриваемой проблемы возросла в связи с повышением интенсивности судоходства, увеличением размеров и скоростей движения судов и значительным ростом их стоимости.

Для предупреждения столкновений судов, на национальном и международных уровнях в начале 70-х годов были приняты меры для широкого оснащения судов средствами радиолокационной техники;

организовано специальное практическое обучение судоводителей на радиолокационных тренажерах.

Одновременно для повышения эффективности применения РЛС ИМО приняло решение об оснащении крупнотоннажных судов средствами, автоматизирующими процесс ведения радиолокационной прокладки и облегчающими решение задачи по предупреждению столкновений судов. Подобные устройства стали впервые использоваться на судах около 35 лет тому назад.

Были разработаны и испытаны различные типы судовых средств автоматического предупреждения столкновений судов. Среди них применялись как простые устройства, предназначенные для сигнализации о появлении отметки цели (судна) на экране РЛС (или оценки опасности столкновений с ними), так и сложные системы, имевшие в своем составе специализированные ЭВМ и служащие не только для автоматизации радиолокационной прокладки, но и для выбора оптимального маневра для безопасного расхождения с приближающимися судами [18].

Были рекомендованы к применению два типа оборудования: устройства оценки опасности сближения судов и средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП или ARPA – аббревиатура английских слов **A**utomatic **R**adar **P**lotting **A**id). Именно последние средства, начиная с 1984 года определены ИМО [Резолюция Ассамблеи А.422(XI), ИМО, ноябрь 1979 г.] как обязательные для установки на крупнотоннажных судах. В настоящее время ими оснащено тысячи судов мирового флота. (Обновленные требования к САРП изложены в Резолюции А.823(19), принятой 23

ноября 1995 года, и приведены в Приложении 3). Средства автоматической радиолокационной прокладки некоторое время выпускались в двух вариантах — в составе отдельного автоматизированного радиолокационного индикатора (АРИ) или в качестве автоматизированной радиолокационной станции (АРЛС)

В первом варианте АРИ являлся независимым прибором, сопрягаемым с обычными навигационными РЛС. Он имел в своем составе специализированную ЭВМ или использовал общую ЭВМ системы комплексной автоматизации процессов судовождения. При этом варианте индикатор РЛС использовался для решения обычных навигационных задач, а АРИ дублировал его, выдавая на свой экран первичную радиолокационную информацию и дополнительно все данные, получаемые в результате радиолокационной прокладки.

Во втором варианте АРЛС оснащалась специализированной ЭВМ, которая позволяла наряду с выполнением обычных навигационных функций вести автоматическую радиолокационную прокладку. При этом вся получаемая информация выдавалась на общий индикатор кругового обзора.

Первая аппаратура автоматической радиолокационной прокладки была разработана в СССР в 1975 году и внедрена в составе комплексной системы автоматизации процессов судовождения «Бриз-1», предназначенной для оснащения крупнотоннажных танкеров типа «Крым». Кроме них ею были оборудованы контейнеровозы типа «Капитан Смирнов» и ряд других судов. С учетом опыта эксплуатации этой аппаратуры и проведенных на судах морского флота испытаний различной зарубежной техники были разработаны автоматизированный индикатор «Бриз-Е» и автоматизированная станция «Океан-С» [16]. Эти средства начали устанавливаться на судах морского флота с 1983 года. Для оснащения малотоннажных судов в СССР выпускались также радиолокационное устройство оценки опасности сближения судов типа «Альфа» («Ольха»).

Кроме отечественной аппаратуры на многих судах морского флота установлены также зарубежные средства автоматической радиолокационной прокладки «Data Bridge» (норвежской фирмы «Norcontrol»), «Digiplot» (фирмы «Iotron», США), «CAS» (фирмы «Sperry», США), фирм Krupp Atlas (Германия) [17], Furuno (Япония) и ряд других средств.

10.1. Требования к средствам автоматической радиолокационной прокладки

В настоящее время основным техническим средством для решения задач, связанных с предупреждением столкновений судов в условиях ограниченной видимости является РЛС. Однако применяемые сейчас в РЛС оконечные устройства - индикаторы не гарантируют необходимой эффективности и требуют дополнительных устройств с использованием средств вычислительной техники для автоматизации обработки радиолокационной информации. Использование ЭВМ позволяет более полно реализовать потенциальные возможности судовых РЛС, избежать субъективных ошибок судоводителя при интерпретации опасных ситуаций.

Автоматизированные системы предупреждения столкновений судов выполняют следующие функции [19]:

- автоматическое обнаружение целей, наблюдаемых в зоне, окружающей судно;

- автоматический или ручной захват (выбранных по желанию штурмана) обнаруженных целей и их автосопровождение, то есть непрерывное измерение их координат;

- определение параметров движения автосопровождаемых целей (курс и скорость) и элементов сближения (дистанция кратчайшего сближения $D_{кр}$ и время до точки кратчайшего сближения $T_{кр}$);

- отображение на индикаторе кругового обзора вместе с основной (первичной) радиолокационной информацией векторов скорости встречных целей и другой информации, характеризующей текущую ситуацию (признак степени опасности каждой цели, начала маневра встречной цели и др.), а также на этом же или другом специальном индикаторе вычисленных параметров движения целей и элементов сближения с ними;

- сигнализацию об опасных событиях (появление или потеря опасной цели, сближение на близкое расстояние и т. д.);

- экстраполяцию ситуации (проигрывание) маневра для безопасного расхождения с опасными судами, выбранного либо автоматически, либо по решению штурмана.

Такой объем автоматизации предусматривает активное участие штурмана в решении этой задачи только на начальном и конечном этапах при принятии самых ответственных решений — захват целей, необходимых для непрерывного автосопровождения, и выбор маневра на безопасное расхождение.

В принципе можно автоматизировать и эти процессы. Однако для начального этапа сложность заключается в необходимости обеспечения высокой вероятности уверенного обнаружения целей

(особенно малых целей на больших дистанциях и вблизи судна при наличии сильных помех от поверхности моря). Кроме того, при большом количестве целей может не хватить памяти ЭВМ и задача не будет решаться полностью. Поэтому наилучшим решением является совмещение обеих возможностей — как автоматического захвата целей при автоматическом обнаружении, так и ручного захвата при визуальном обнаружении на экране.

10.2. Обобщенная функциональная схема САРП

Несмотря на большое разнообразие технической реализации САРП, многие устройства выполняют общие функции. На основании этого можно с помощью упрощенной обобщенной функциональной схемы (рис.10-1) рассмотреть устройство и принцип работы САРП.

Большинство САРП состоит из следующих приборов и устройств: датчиков информации, сопрягающих устройств и непосредственно индикатора ситуаций. Если САРП может работать как в режиме кругового обзора, так и в режиме автоматической радиолокационной прокладки (например, САРП “Океан-С”, “Radar ATLAS 8600 ARPA”[16,17]), то приведенные каналы условного индикатора ситуаций во многом идентичны каналам САРП в этом режиме.

В качестве *датчиков информации* в САРП применяются одно- или двух - диапазонные судовые РЛС, лаг и гирокомпас.

Двухдиапазонная РЛС состоит (см. рис.10-1) из

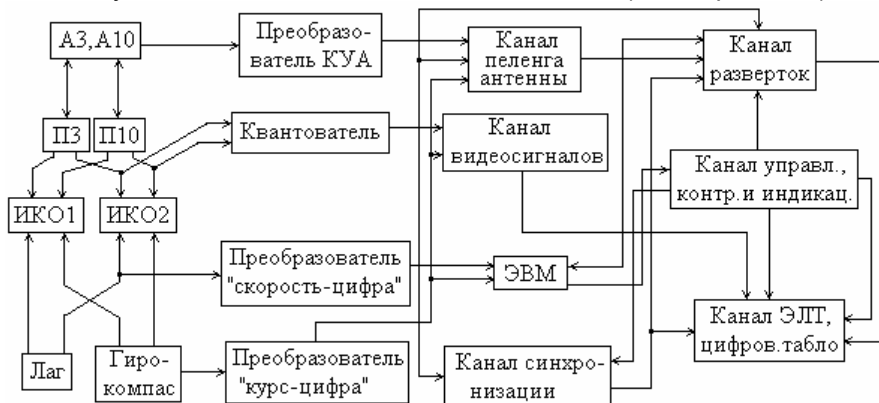


Рис.10-1. Упрощенная обобщенная функциональная схема САРП

антенн 3-х и 10-ти сантиметрового диапазонов (АЗ, А10); приемопередатчиков 3-х и 10-ти сантиметрового диапазонов (ПЗ, П10) и

двух индикаторов *ИКО1* и *ИКО2*. Информация от лага и гирокомпаса подается на ИКО для получения режима истинного движения (ИД).

От РЛС поступают следующие данные: текущее значение углового положения антенны в пространстве *КУА*, видеосигналы об окружающей обстановке *ВС* и импульсы синхронизации *ИС*. От лага *ЛГ* и гирокомпаса *ГК* поступает соответственно информация о скорости *Vs*, и курсе *Kс* собственного судна.

Одно- или двухдиапазонная РЛС может использоваться в обычном режиме, и тогда на *ИКО1* и/или *ИКО2* имеется возможность наблюдать окружающую радиолокационную обстановку и решать типичные радиолокационные задачи.

В режиме автоматической радиолокационной прокладки (АРП) РЛС, выполняя обычные функции, является одновременно основным датчиком информации о наблюдаемой обстановке.

Импульсы синхронизации в дальнейшем используются для синхронизации канала синхронизатора. Информация об угловом положении антенны после преобразования и кодирования используется в ряде трактов САРП.

Данные лага *ЛГ* о скорости и гирокомпаса *ГК* о курсе судна после преобразований используются для формирования вектора скорости собственного судна, для вычисления параметров наблюдаемых целей, для создания режима ИД в режиме АРП и др. В некоторых типах САРП, кроме АРП, предусмотрена возможность ручного ввода данных о скорости судна (в случае отсутствия лага или выхода его из строя).

Информация от датчиков поступает в аналоговой форме, а кодирование и вывод ее в цифровой процессор или вычислительную машину требуют дискретной формы ее представления. Основное назначение сопрягающих устройств — преобразование данных в аналоговой форме от датчиков информации в дискретную для ее дальнейшего кодирования, преобразования и ввода в цифровой процессор и другие тракты САРП.

Рассмотрим кратко назначение отдельных *сопрягающих устройств*. Преобразователь курсового угла антенны (*КУА*) предназначен для преобразования углового положения антенны в пропорциональную последовательность импульсов или в кодовую последовательность. Территориально он может располагаться как в районе антенны (например, фотодисковый датчик углового положения антенны САРП «Океан-С»), так и в канале пеленга антенны. Квантующее устройство предназначено для квантования видеосигналов *ВС* по амплитуде и по времени (по дальности). Квантование по амплитуде может быть двухуровневое (бинарное) или многоуровневое.

Время квантования по дальности выбирают таким образом, чтобы не загружать разрешающую способность РЛС по дальности и в то же время обеспечивать надежное автосопровождение при различных метеоусловиях и заданную точность измерения параметров надводных объектов.

Преобразователи скорость — цифра *ПСС* и курс — цифра *ПКЦ* служат для преобразования аналоговых значений скорости и курса собственного судна в цифровую форму. В некоторых типах САПП здесь же кодируется информация для ее дальнейшего использования.

Если на данном конкретном судне применяются цифровые датчики курса и скорости судна, то предусмотрена возможность ввода информации от них непосредственно в канал цифрового процессора и в другие тракты.

Назначение отдельных трактов и каналов *индикатора ситуаций*.

Информационно-вычислительный канал *ИБК* предназначен для приема, переработки, вычисления и хранения информации и выдачи ее на устройства отображения и сигнализации. Канал включает в себя специализированную ЭВМ или цифровой процессор, устройства связи с другими каналами и трактами, устройство кодирования и имитации и др.

Цифровой процессор в свою очередь состоит из блока арифметического устройства, блоков постоянной, оперативной и буферной памяти, блока преобразования сигналов и др. Он выполняет следующие функции:

- арифметическую и логическую обработку информации в соответствии с управляющими сигналами;

- через устройства связи осуществляет обмен информацией с абонентами системы во время выполнения команд ввода и вывода;

- обеспечивает прерывание вычисления текущей программы для выполнения команды прерывания и др.

Канал синхронизации *КСх* предназначен для синхронизации работы всех каналов системы. В некоторых типах САПП синхронизатор также синхронизирует работу блоков РЛС. Сигналы синхронизатора обеспечивают согласование во времени процессов излучения и приема сигналов, обработки и отображения информации. Вырабатываемые синхронизатором импульсы с периодом следования импульсов T разделяют на время t_1 , необходимое для представления первичной радиолокационной информации; время t_2 для представления вторичной информации в устройствах отображения; время t_3 , необходимое для завершения переходных процессов к моменту излучения последующего зондирующего импульса. Тактирующие и управляющие импульсы синхронизатора управляют работой информационно-вычислительного и других каналов.

В канале видеосигналов нормируется видеосигнал, который смешивается с дополнительными импульсами и служебными

метками; усиливается результирующий сигнал и подается для отображения на ЭЛТ. В канале видеотракта или в отдельных блоках обнаруживаются и классифицируются объекты, кодируются сигналы для ввода в ЦП.

Канал разверток *КР* (см. рис.10-1) создает напряжение радиально-круговой развертки для отображения первичной информации и напряжение координатной развертки для отображения вторичной графической и цифровой информации.

В канале пеленга антенны *КПА* формируется последовательность импульсов или кодовая последовательность, соответствующая текущему значению пеленга антенны.

Устройство отображения первичной и вторичной информации состоит из канала *ЭЛТ* и *КЭЛТ* и цифровых табло *ЦТ*. В большинстве САРП на ЭЛТ совмещается отображение первичной информации об окружающей обстановке и вторичной графической и цифровой. На *ЦТ*, как правило, отображается цифровая информация.

Канал управления, контроля и индикации *КУКИ* предназначен для формирования сигналов управления работой системы и индикации положения органов управления, сигналов контроля, формирования команд управления и др. *КУКИ* позволяет вести обмен информацией между оператором и системой. Судоводитель с помощью органов управления задает и запрашивает, что ему необходимо, а цифровой процессор выдает запрашиваемую информацию на экран ЭЛТ и цифровые табло.

Функциональные схемы конкретных САРП могут отличаться от приведенной упрощенной обобщенной схемы, так как они значительно отличаются по способу построения различных трактов и по их технической реализации.

10.3. Методы представления информации в САРП

Первичную и вторичную информацию в САРП необходимо представлять судоводителю в ясной и легкодоступной форме, которая позволяет быстро и однозначно определять качественные и количественные характеристики сопровождаемых объектов. Для существующих в настоящее время САРП характерны два метода представления информации.

Первый метод основан на совмещенном отображении первичной и вторичной информации на одном экране, второй — на использовании двух отдельных индикаторов для отображения первичного радиолокационного изображения и вырабатываемых системой данных.

Опыт эксплуатации САРП с отображением информации вторым методом показал, что наличие двух экранов приводит к рассеянию

внимания судоводителей, требуются дополнительные усилия на сопоставление и идентификацию наблюдаемых объектов и их вторичной информации. Поэтому первый метод отображения информации считается более удобным для судоводителя, так как совмещение информации позволяет лучше оценивать текущую ситуацию, контролировать работу автоматических устройств, сравнительно легко опознавать их вторичную информацию.

Первичная информация на экране ИКО отображается в виде обычного радиолокационного изображения: отметки эхо-сигналов от наблюдаемых объектов, метки НКД, ПКД, метка курса.

Вторичная (вычисленная) информация отображается на экране ИКО в графической и буквенно-цифровой форме. Для отображения первичной информации в большинстве САРП применяется радиально-круговая развертка, основной недостаток которой — малая яркость свечения изображения. В свою очередь это требует затемнения помещения или применения тубуса.

Телевизионная развертка позволяет наблюдать радиолокационный сигнал при дневном освещении, что является важным ее преимуществом. Этот тип развертки применяют в САРП «Океан - СР», устройстве МХ-1200 фирмы «Magnavox»; устройстве 1Р570Т14N фирмы «Thomson — CSF» (Франция) и др.

Для отображения вторичной информации в большинстве систем используется координатная развертка. При координатной развертке луч ЭЛТ перемещается с помощью команд от процессора в заданную точку экрана и вычерчивает требуемый символ или цифру. Эта развертка осуществляется в период после создания основной развертки.

К графической форме вторичной информации относятся символы, линии, штриховые линии, маркеры.

Подвижный маркер служит для ручного захвата цели на автосопровождение, а также для стробирования цели, цифровой формуляр которой необходимо вывести на экран ЭЛТ или табло. Подвижный маркер выполнен в виде кольца (САРП «Бриз-Е») или перекрестия (САРП «Океан-С») и имеет возможность с переменной скоростью оперативно перемещаться при помощи специального устройства в любую точку экрана. При совмещении отметки от цели и подвижного маркера и нажатии кнопки «Ввод» процессор данную цель берет на автосопровождение. Вокруг цели появляется знак сопровождения, а подвижной маркер можно перемещать в новую точку экрана.

Признаком сопровождения цели и обработки ее параметров является кольцо (САРП «Бриз-Е»), кораблик (САРП «Океан-С»), две дуги (САРП фирмы «Sperry»), или другие графические элементы. Знак сопровождения свидетельствует о том, что данная цель процессором

обрабатывается. Через 1 мин после захвата цели, вырабатываются ее параметры движения, и на экране индицируется вектор перемещения: ЛИД — линия истинного движения или ЛОД — линия относительного движения в зависимости от режима ориентации.

Длина вектора соответствует перемещению объекта за время прогноза T_n . Время прогноза дискретно может устанавливаться штурманом в пределах от 1 до 30 мин.

Прогнозирование дает возможность судоводителю наблюдать развитие ситуации сближения своего судна с объектом или объектов между собой в ускоренном масштабе времени (например, в САРП «Бриз-Е» время ускорения соответствует 1:60). Прогнозирование можно осуществлять в режиме ЛИД и ЛОД. При этом длина линий движений увеличивается пропорционально времени прогноза.

Результаты прогнозирования должны учитываться штурманом при принятии решения о выполнении маневра.

Если цель опасна, то знак сопровождения и вектор перемещения данной цели мигают, что позволяет легко выделить ее среди других целей на экране. Одновременно включается звуковая и световая сигнализация для привлечения внимания штурмана, если он в это время не вел наблюдения по экрану индикатора.

При срыве автосопровождения цели из-за помех знак сопровождения и вектор перемещения становятся штриховыми. Это показывает штурману, что данная цель не обрабатывается цифровым процессором, и он должен принять соответствующие меры предосторожности. В некоторых типах САРП может представляться и другая графическая информация. Например, в САРП фирмы «Sperry» вектор перемещения заканчивается эллипсом зоны опасности. Размеры эллипса формируются с учетом допустимого кратчайшего расстояния сближения и погрешностей определения местоположения цели.

В САРП «Океан-С» предусмотрена возможность установки линий, ограждающих (запрещающих) автозахват на автосопровождение определенных областей (например, отметок от береговой черты) и др.

Цифровая информация, отображающаяся на экране ИКО или табло, включает, прежде всего, цифровой формуляр цели. Он представляет собой вычисленные цифровые данные о параметрах сопровождаемого объекта:

P — пеленг на объект;

D — дальность до объекта;

параметры движения цели: K_c — курс цели;

V_c — скорость цели;

параметры опасности цели: $D_{кр}$ — дистанция кратчайшего сближения;

$T_{кр}$ — время до точки кратчайшего сближения.

На индикаторе также в виде цифр указываются время прогнозирования T_n , курс и скорость собственного судна.

10.4. Достоинства и недостатки САРП

Основными достоинствами средств автоматической радиолокационной прокладки является возможность облегчения с их помощью труда судоводителей и повышения надежности и точности их работы. Это достигается, прежде всего, благодаря заблаговременному предупреждению судоводителей с помощью САРП о появлении цели на заданной дистанции или в заданном секторе, быстрой оценке степени опасности сближения с ней, возможности одновременного решения задачи безопасного расхождения с несколькими судами и наглядности выдаваемой на экране индикатора информации о движении судов-целей, позволяющей легко судить о степени опасности столкновения с каждой целью.

Важным достоинством САРП является также возможность с их помощью быстрой проверки эффективности выбираемого судоводителем маневра путем проигрывания для расхождения сразу по отношению ко всем автоматически сопровождаемым целям.

Следует подчеркнуть, что наряду с достоинствами САРП имеется целый ряд объективных ограничений и недостатков, о которых необходимо помнить при применении этой аппаратуры.

Сейчас исходной информацией, имеющейся в ЭВМ, для решения этой задачи являются данные, получаемые от РЛС. Однако при выборе маневра существенными являются ограничения, накладываемые наличием подводных опасностей в зоне маневрирования, гидрометеорологическими условиями плавания, регламентирующими правила судоходства, и другими причинами. Информации об этих ограничениях в ЭВМ нет. Поэтому маневр, рассчитанный ЭВМ и основанный на неполной информации, может служить только рекомендацией, принимаемой штурманом к исполнению в том случае, если ему известно об отсутствии ограничений.

Кроме этого, так как САРП использует данные от радиолокатора, то все ограничения, свойственные РЛС, остаются действующими и в САРП. Например, если РЛС не обнаруживает цель, то и САРП не будет решать задачу расхождения с ней. Если радиолокационная информация подвержена влиянию помех, то и

САРП будет испытывать вредное воздействие помех, которые могут вызвать появление ложных целей, ложного срабатывания предупредительной сигнализации, появление ошибок в расчетах, выполненных САРП.

Кроме того, САРП имеет свои собственные ограничения:

- не все наблюдаемые на экране индикатора цели автоматически сопровождаются (из-за необходимости их предварительного захвата или ограниченного числа сопровождаемых и индицируемых целей);
- неустойчиво сопровождаются цели со слабыми эхо-сигналами;
- не исключена возможность вычисления ошибочных параметров движения целей при их нахождении в зоне помех или при маневрировании целей или собственного судна;
- возможны сбои в сопровождении при близком прохождении наблюдаемых целей относительно друг друга;
- данные, вычисляемые САРП, выдаются с запаздыванием, связанным с необходимостью набора первичной информации в течение некоторого времени, так же как это происходит и при ручной радиолокационной прокладке.

Однако, если при ручной прокладке рекомендуется первоначальную оценку делать через *3 мин*, а окончательный результат через *6 мин* (если имеется время для этого), то при применении САРП оценка может быть получена через *1 мин*, а надежные результаты через *3 мин*. Отмечая это преимущество автоматической прокладки, следует иметь в виду неспособность САРП мгновенно рассчитывать параметры движения цели и учитывать это, особенно в условиях маневрирования.

Несмотря на отмеченные ограничения и недостатки САРП, которые необходимо знать и принимать во внимание судоводителям, оснащение судов этой аппаратурой, безусловно, положительно сказывается на безопасности их плавания и способствует снижению навигационной аварийности и предотвращению загрязнения окружающей среды.

Эксплуатационная и экономическая эффективность применения автоматизированных радиолокационных систем обусловлена их преимуществами по сравнению с традиционными РЛС. Следует отметить достигаемые с их помощью более высокую точность и надежность решения задач путем исключения субъективных ошибок штурмана при измерении и расчетах и более полного использования информации.

11. Влияние электромагнитных излучений и их биологические последствия

Наибольшее влияние электромагнитное излучение оказывает на тех, кто с ним работает, то есть на операторов различных радиосредств, работающих на передачу. Сила такого излучения может быть очень большой. Так, например, напряженность электрического поля (амплитуда) от радиопередатчика КВ-диапазона средней мощности составляет величину порядка 1000 В/м в непосредственной близости от него и порядка 100 В/м на расстоянии нескольких метров [20]. Причем при некоторых конструктивных вариантах исполнения (например — на речных судах) наибольшая мощность приходится именно на уровень головы оператора.

Опасный источник электромагнитных облучений — передающие антенны. Исходящее от них излучение может поражать вообще ничего не подозревающих людей. Антенны наводят ток в окружающих металлических предметах, которые создают вторичное излучение, проникающее практически во все щели и в помещения. Напряженность таких полей вблизи антенны может достигать 10 тыс. В/м .

Существуют две зоны излучения от любой антенны — зона индукции и зона излучения. Зона индукции ограничена расстоянием порядка четверти длины волны. Напряженность в ней быстро падает (обратно пропорционально второй степени расстояния). В зоне излучения напряжённость падает медленно — обратно пропорционально первой степени расстояния. Так, например, при работе мощных средневолновых передатчиков на судне все оно оказывается в зоне индукции.

Влияние электромагнитного облучения на организм зависит от длины волны, напряженности, продолжительности и характера излучения (импульсное или непрерывное). При наиболее часто встречающемся постоянном облучении небольшим по уровню полем средневолнового диапазона у человека наблюдаются повышенная утомляемость, раздражительность, учащение ритма сердца, понижение, а затем повышение давления.

СВЧ излучения

СВЧ излучения вредны для любой части тела, особенно для глаз [15]. Это может происходить, если человек находится в диаграмме направленности включенной НРЛС с невращающейся антенной на расстоянии 1-2 метра или меньше. Средняя мощность на этом расстоянии - приблизительно 10 мВт/см^2 . СВЧ излучения чрезвычайно сконцентрированы в волноводе. Стоять перед открытым

волноводом, когда излучаются СВЧ импульсы, очень опасно. Это может случаться при отсоединении волновода от антенны или передатчика при его техническом обслуживании.

Для СВЧ-излучения характерным является способность накапливать вредное действие в организме.

При действии больших доз СВЧ-облучения в организме могут наблюдаться: повреждение тканей, общие судорожные явления, тахикардия, дрожь, потливость, повышение артериального давления и температуры тела. При поражении глаз может развиваться катаракта (особенно это относится к лазерным источникам) [20].

Биологическое действие полей зависит от степени их поглощения организмом. В СВЧ-диапазоне поглощается до 50% падающей на человека энергии поля, а в средневолновом диапазоне — не более 20%. При этом важна также и глубина проникновения. Так, волны сантиметрового диапазона проникают не более чем на 1—2 см (при облучении длиной волны 3 см, возникает нагрев поверхности тела. 10 см длина волны проникает вглубь ткани тела и вызывает повышение температуры приблизительно 2 см глубже поверхности кожи), а волны КВ-диапазона могут пронизывать все тело. Главная опасность состоит в том, что электромагнитная энергия переходит в тепловую, вызывая разогрев тела, интенсивность которого зависит в первую очередь от скорости кровотока, то есть от теплоотвода.

Существуют так называемые пороговые эффекты, то есть напряжения, превышение которых может привести к тепловому поражению организма. Для средневолнового диапазона их величина достигает 1000 В/м, для коротковолнового — 2000 В/м, для СВЧ-излучения — 100 В/м.

Особенно подвергаются тепловому воздействию органы, богатые водой (печень, поджелудочная железа, мочевой пузырь, желудок и т. д.). При этом обостряются ранее хронически протекавшие в них процессы (гастрит, холецистит и др.), могут наблюдаться кровотечения, образование язв и перфораций (прободений). Длительное облучение небольшими дозами может привести к сердечной недостаточности, к нарушению обмена веществ.

Крайне опасным является излучение сверхнизкочастотных электромагнитных колебаний (от долей герц до нескольких десятков килогерц). Верхняя часть этого диапазона используется для связи и навигации подводных лодок, нижняя — для проведения различных геофизических измерений, в том числе подводных. Степень влияния этого диапазона на организм изучена пока слабо [20].

Методы защиты от излучений электромагнитных волн сводятся в основном к экранированию, разнесу в пространстве и во времени источников излучения.

Разнос во времени сводится к тому, что во время работы мощных радиосредств запрещается пребывание людей в зоне излучения, запрещается также подходить к волноводным трактам, переключателям и другим элементам антенн или передатчиков.

Разнос в пространстве сводится к удалению излучателей от жилых и производственных помещений. Особое внимание при этом уделяется размещению генераторов СВЧ-диапазона. Сами радиопередатчики должны иметь минимум фидерного тракта, то есть должны быть максимально приближены к антеннам.

Рентгеновские излучения

Рентгеновское излучение возникает при интенсивной «бомбардировке» сконцентрированного потока электронов в ЭЛТ. Однако интенсивность этого излучения очень ограничена благодаря применению специальной защиты ЭЛТ и оно не представляет особой угрозы для здоровью.

Некоторые типы модулей (блоков) (тиристор и модулятор) имеют керамические изоляторы из оксида бериллия. Вдыхаемая невидимая пыль этих изоляторов является опасной для здоровья, и этот эффект накопительный. Некоторые компоненты (например, магнетрон, антенный переключатель) обладают небольшим радиоактивным излучением. На расстоянии более 30 см эта радиация незначительна, но эти компоненты носить вблизи тела нельзя.

Высокое напряжение

Необходимо строго следить за тем, чтобы не были открыты устройства и блоки НРЛС при ее работе. Следует помнить, что даже при выключенной НРЛС в некоторых источниках питания длительное время может сохраняться накопленная энергия (напряжение). Особенно это касается высоковольтных выпрямителей, питающих электронно-лучевую трубку и модулятор передатчика.

При ремонте или профилактике НРЛС следует в видном месте повесить табличку с надписью, предупреждающей, что выполняются необходимые работы с НРЛС. В некоторых случаях следует удалить плавкие предохранители для того, чтобы предотвратить случайное включение НРЛС [26].

Некоторые термины, их сокращения и обозначения

АП- антенный переключатель
 АФУ- антенно-фидерное устройство
 ЭЛТ- электронно-лучевая трубка
 НРЛС – навигационная радиолокационная станция
 СВЧ – сверхвысокочастотные колебания
 D_y - дистанция до цели
 t_D - время распространения кратковременных радиоимпульсов до цели от антенны и обратно к антенне
 $c=3 \cdot 10^8$ м/с – значение скорости света, принимаемое при практических расчетах
 $U_{си}$ – напряжение синхронизирующих импульсов
 $\tau_{зи}$ – длительность зондирующего импульса
 $U_{вс}$ – напряжение видеосигналов
 $U_{зи}$ - напряжение зондирующего импульса
 $U_{свч}$ – напряжение сверхвысокочастотного сигнала
 НКД - неподвижные кольца (круги) дальности
 ПКД - подвижный круг дальности
 ОК - отметка курса
 ЭВН - электронный визир направления
 ΔD_p – реальная разрешающая способность НРЛС по дальности
 α_p - реальная разрешающая способность НРЛС по углу (направлению)
 S_p - реальная разрешающая площадка НРЛС
 V_p – реальный разрешающий объем НРЛС
 δ - точность измерения дистанции (СКП)
 φ - точность измерения направления
 ИКО – индикатор кругового обзора
 $T_{п}$ – период повторения (следования) зондирующих импульсов
 СВЧ – сверх высокочастотные колебания
 P_u – импульсная мощность передатчика
 P_{np} – чувствительность приемника
 ЭПО – эффективная поверхность отражения
 ЭПР – эффективная поверхность рассеяния
 ОД- относительное движение
 ИД – истинное движение
 ЛОД – линия относительного движения
 ЛИД – линия истинного движения
 F_D – доплеровская частота
 v_p - радиальная скорость объекта

ЛГ- лаг

ГК – гирокомпас

АРИ - автоматизированный радиолокационный индикатор

АРЛС - автоматизированная радиолокационная станция

САРП – средство автоматической радиолокационной прокладки

D — дальность до объекта

L — пеленг на объект

K_c — курс цели

V_c — скорость цели

$D_{кр}$ — дистанция кратчайшего сближения

$T_{кр}$ — время до точки кратчайшего сближения

T_p - время прогнозирования

СВРЛ – система вторичной радиолокации

РМО – радиолокационный маяк-ответчик

РЛО – радиолокационный ответчик

ДРЛС – доплеровская радиолокационная станция

КВ – короткие волны

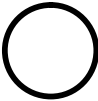
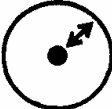
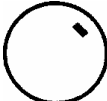
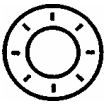
СЭК - система электронной навигационной карты

ЭЛН - электронная линия направления

ЭСРП - электронные средства радиолокационной прокладки

Приложение 1.

Символы, рекомендуемые ИМО для использования в морских РЛС

	Выключено (Off)		Включено (Radar on)		Подготовка (Radar stand – by)
	Вращение антенны (Aerial rotating)		Ориентация по северу (North-up presentation)		Ориентация по курсу (Ship's head up presen- tation)
	Регулировка отметки курса (Heading marker alignment)		Выбор шкалы дальности (Range selector)		Короткий импульс (Short pulse)
	Длинный импульс (Long pulse)		Настройка (Tuning)		Усиление (Gain)
	МПВ выключено (Anti-clutter rain minim.)		МПВ включено (Anti-clutter rain maxim.)		ВРУ выключено (Anti-clutter sea minim.)
	Максимальное значение ВРУ (Anti-clutter sea maxim.)		Подсвет шкалы (Scale illumination)		Яркость дисплея (Display brilliance)
	Яркость НКД (Range rings brilliance)		Изменение положения ПКД (Variable range marker)		Визир направления (Bearing marker)
	Контроль излучения (Transmitted power monitor)		Контроль излучения и приема (Transmit receive monitor)		

Приложение 2

1. Требования к судовым радиолокационным системам

Согласно протокола, принятого ИМО в 1978 г. в виде поправки к СОЛАС-74 все морские суда валовой вместимостью 500 *рег. т* и более должны быть снабжены радиолокатором, а суда валовой вместимостью 10000 *рег. т* и выше должны иметь две РЛС. В 1979 г. ИМО были приняты технико-эксплуатационные требования к САРП Резолюцией А.422(XI), в которой предписано всем судам валовой вместимостью 10000 *рег. т* и более иметь средства автоматической радиолокационной прокладки, удовлетворяющие этим требованиям [19].

За время, прошедшее после принятия этих документов, возросли как требования к обеспечению безопасности судоходства, так и произошел значительный прогресс в развитии радиолокационной и особенно информационной техники. Поэтому на современном этапе ИМО проводит работу по совершенствованию требований к радиолокационному (РЛ) оборудованию судов. Ниже приводятся новые предварительные, рассмотренные 41-ой сессией ИМО (20.09.95 г.) стандартные требования к техническим характеристикам РЛ-оборудования судов.

1.1. Назначение РЛ-оборудования

РЛ-оборудование должно обеспечивать индикацию относительно своего судна положения надводных судов, препятствий, буев, берега и навигационных знаков в виде, который оказывает помощь при навигации и предупреждении столкновений.

1.2. Стандартные расстояния

При нормальных условиях распространения радиоволн, когда высота антенны над уровнем моря равна 15 м и нет помех, РЛС должна давать четкое изображение:

- берега — на расстоянии 20 М, когда он возвышается над уровнем моря до 60 м; и на расстоянии 7 М, когда он поднимается до 6 м;
- надводных объектов: судов вместимостью 5000 *брт* независимо от ракурса — на расстоянии не менее 7 М; малых судов длиной порядка 10 м — на расстоянии не менее 3 М; объектов, таких как навигационные буи, имеющих эффективную отражающую поверхность порядка 10 кв.м — на расстоянии не менее 2 М.

Надводные объекты должны быть четко отображены, начиная с минимальной горизонтальной дистанции 50 м. от позиции антенны.

1.3. Индикация

Радиолокатор должен иметь дисплей для пользования при дневном свете без внешнего увеличения с минимальным эффективным диаметром в пределах шкалы пеленгов не меньшим, чем:

- 180 мм для судов вместимостью 150-1000 *брт*;
- 250 мм для судов вместимостью 1000-10000 *брт*;
- 340 мм для судов вместимостью 10000 *брт*. и выше.

Разрешается применение многоцветных дисплеев.

Предписывается иметь шкалы дальности: 0,25; 0,5; 0,75; 1,5; 3; 6; 12 и 24 М. Шкалы с большими и меньшими значениями дальности допускаются. В пределах эффективной площади экрана должна содержаться только информация, которая используется для навигации или предупреждения столкновений; и информация, которая имеет определенное отношение к цели (например, символ цели, ее вектор) или другое прямое отношение к изображению. Требуется, чтобы начало шкалы дальности было в месте своего судна, и шкала была линейной.

Изображаемая на экране РЛ-системы информация должна быть легкочитаемой при всех условиях освещенности.

Выбранная информация системной электронной навигационной карты (СЭК) может быть представлена на дисплее РЛС, но таким образом, чтобы информация РЛС не маскировалась, не затемнялась и

1.4. Измерение расстояний и пеленгов

Предписывается иметь на экране дисплея электронные НКД для оценки расстояний, причем на шкалах 0,25, 0,5, 0,75 М должно быть, по крайней мере, два, но не больше шести НКД, на других предписываемых требованиями шкалах должно быть шесть НКД. При смещении центра развертки должны отображаться дополнительные кольца дальности с интервалом, равным интервалу между основными НКД. РЛ-изображение должно снабжаться подвижным маркером дальности в виде кольца (ПКД) с индивидуальным цифровым индикатором. Допускаются добавочные ПКД. Требуется, чтобы точность измерения дистанций с помощью НКД и ПКД как при несмещенном, так и смещенном центре развертки была не хуже 1 % от значения используемой шкалы, или 30 метров, если 1% от дистанции шкалы меньше этой цифры. Предписывается иметь толщину НКД не больше максимальной разрешенной толщины курсовой линии. На всех шкалах дальности наведение ПКД на объект должно производиться с требуемой точностью в течение 5 с. Установленное судоводителем значение расстояния ПКД не должно изменяться при переключении шкал дальности. Курсовая линия на экране дисплея должна отображаться сплошной линией от начала развертки до края дисплея

с ошибкой, не более 1° . Требуется, чтобы ее толщина не превышала $0,5^\circ$ на максимальном расстоянии шкалы. На шкале пеленгов дисплея РЛС предписывается иметь указатель курса.

В РЛ-системе должна быть электронная линия для снятия направлений — ЭЛН (Electronic bearing line — EBL): пеленгов и курсовых углов, с индивидуальным цифровым индикатором, чтобы получать в течение 5 с направление на любой объект, где бы он не находился на экране. Направление на цель на границе экрана должно измеряться с погрешностью, не большей 1° . ЭЛН должна быть не толще курсовой линии и отличаться от нее. Предписывается иметь возможность изменения яркости ЭЛН и выключения ее изображения. Требуется, чтобы ЭЛН поворачивалась в обоих направлениях непрерывно или с шагом, не более $0,2^\circ$. Направление ЭЛН должно индицироваться в градусах, а отсчет состоять, по крайней мере, из четырех знаков, один из которых после десятичной точки. Предписывается иметь возможность измерения, как пеленгов, так и курсовых углов, отсчеты которых должны отличаться. Требуется, чтобы шкала направлений была на краю экрана и разделена через 5° , с 5 и 10-градусными отличными друг от друга делениями, причем числа у делений должны быть, по крайней мере, через 30° . Начало ЭЛН должно перемещаться с места судна в любую точку экрана и обеспечиваться возможность измерять относительно ее направления. Рекомендуется на ЭЛН иметь ПКД.

1.5. Разное

Разрешающая способность по дистанции РЛ-системы должна быть такой, чтобы обеспечивать отдельную индикацию на шкале

1,5 М двух точечных целей, расположенных на одном пеленге в пределах пространства 50-100 % от значения шкалы, и на расстоянии не более 40 м друг от друга. Соответственно разрешение по пеленгу на этой шкале для двух точечных целей, расположенных на одном расстоянии от центра в пределах 50-100 % значения шкалы, должно быть не более $2,5^\circ$.

РЛ-оборудование должно нормально работать при килевой и бортовой качке до 10° .

Предписано, чтобы антенна вращалась по часовой стрелке, равномерно, автоматически, со скоростью не меньшей 20 об/мин при относительной скорости ветра до 100 узлов. Допускается к такой работе антенны использовать дополнительные режимы сканирования ее по азимуту.

Следует иметь возможность ориентации РЛ-изображения по Северу и по курсу. Курс должен вводиться от ГК либо другого эквивалентного ГК курсоуказателя. Погрешность согласования с

компасом должна быть не больше $0,5^\circ$ даже при вращении компасной картушки со скоростью порядка до 2 об/мин. Требуется, чтобы переключение с одного режима ориентации на другой с установкой заданного направления с требуемой точностью выполнялось в пределах 5 с.

Предписано иметь в РЛС соответствующие средства для подавления нежелательных эхо-сигналов от волнения моря, дождя и других форм осадков, облаков, грозы и РЛС других судов. Эти средства должны подстраиваться вручную. Допускается иметь и автоматическое подавление помех, которое должно иметь возможность отключения.

Когда антенна расположена на высоте 15 м над уровнем моря, то даже в условиях помех от моря РЛ-система должна давать четкую отметку стандартного радиолокационного отражателя на расстоянии до 3,5 М.

РЛС должна быть полностью в рабочем состоянии в пределах 4 мин после ее включения. Переход из режима "Подготовка" в режим "Работа" должен осуществляться в пределах 15 с.

Предписано иметь возможность независимого изменения яркости НКД, ПКД, ЭЛН и полного их выключения. Для РЛС, отображающих на экране вторичную информацию (символы целей, вектора, и др.), должна быть возможность отключения ее показа на экране.

Требуется в РЛ-системе иметь режимы относительного и истинного движения и допускать смещение начала развертки не менее чем на 50 % и не более чем на 75 % значения шкалы дальности. В режиме истинного движения должна быть возможность стабилизации изображения относительно воды (моря) и грунта. Используемые в РЛ-системе относительные лаги должны иметь возможность измерения скорости на переднем и заднем ходу. При стабилизации относительно грунта вход данных скорости и проходимого расстояния должен быть двухкоординатным. Это могут быть данные от доплерлага, электронной позиционной системы, либо от самой РЛС при сопровождении неподвижных объектов. Следует иметь возможность ручного ввода скорости своего судна от 0 до 30 узлов с шагом, не большим 0,2 узла, и ручного ввода данных течения и дрейфа.

РЛ-система должна иметь возможность получения информации от средств счисления, электронных позиционных систем в виде, соответствующем международным стандартам. Название источника получения информации должно отображаться. Дополнительно к РЛ-изображению требуется иметь возможность представления на экране в графической форме точек, навигационных линий и карт.

1.6. Средства прокладки

В РЛ-системе должны быть следующие средства радиолокационной прокладки:

- суда от 300 до 500 *брт* должны быть снабжены электронным средством радиолокационной прокладки (ЭСРП) с ручным вводом засечек целей (EPA -Electronic plotting aid);
- суда от 500 до 1600 *брт* должны иметь автоматический радиолокационный прокладчик — АРП (АТА - Auto tracking aid);
- суда от 1600 до 10000 *брт* должны быть снабжены САРП (ARPA - Automatic radar plotting aid) с минимальным эффективным диаметром дисплея 250 мм;
- суда от 10000 *брт* и больше должны быть снабжены САРП с минимальным эффективным диаметром дисплея 340 мм.

Эксплуатационные требования к средствам автоматической радиолокационной прокладки

1.1 В целях снижения опасности столкновений судов в море, средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП) должны:

.1 уменьшить рабочую нагрузку наблюдателей, предоставив им возможность автоматизированного получения информации для того, чтобы навигационная задача со многими целями могла решаться так же просто, как она решается прокладкой вручную в отношении одной цели;

.2 обеспечивать непрерывную, точную и быструю оценку ситуации.

1.2 Радарное оборудование, сопрягаемое с дисплеем САРП, должно соответствовать эксплуатационным требованиям к судовым РЛС [резолюция А.477 (XII)] в части используемых режимов.

1.3 В дополнение к общим требованиям, содержащимся в резолюции А.694(17), САРП должны соответствовать следующим минимальным эксплуатационным требованиям.

2. Определения

2.1 Определения терминов, используемых в настоящих эксплуатационных требованиях, приводятся в Дополнении 1.

3. Эксплуатационные требования

3.1 Обнаружение

3.1.1 Если обнаружение целей помимо судоводителя, работающего с РЛС, производится отдельным устройством, то оно должно иметь эксплуатационные характеристики не хуже тех, которые могут быть получены при использовании экрана РЛС.

3.2. Захват

3.2.1 Захват целей может быть ручным или автоматическим при относительной скорости до 100 узлов. Однако в любом случае должно быть предусмотрено устройство для ручного захвата и сброса целей: в САРП с автоматическим захватом должна быть предусмотрена возможность запрета захвата в определенных зонах обзора. На любой шкале дальности, на которой захват в определенных зонах запрещен, зона захвата должна быть указана на экране индикатора.

3.2.2 Автоматический или ручной захват должны иметь характеристики не хуже тех, которые могут быть получены пользователем на экране радара.

3.3. Сопровождение

3.3.1 САРП должно обеспечивать автоматическое сопровождение, обработку, одновременное отображение и непрерывное обновление данных не менее чем по 20 целям, независимо от того, производится захват автоматически или вручную.

3.3.2 Если предусматривается автоматический захват, то критерий выбора целей для сопровождения должен указываться в технической документации. Если сопровождают не все цели, наблюдаемые на экране индикатора, то сопровождаемые цели должны быть четко обозначены на экране соответствующим символом*. Надежность сопровождения не должна быть хуже, чем при использовании ручного сопровождения с записью последовательных положений целей на экране.

3.3.3 САРП должно обеспечивать непрерывное сопровождение захваченной цели, отчетливо различимой на экране в пяти из десяти последовательных оборотов антенны, не допуская при этом перебросов сопровождения целей.

3.3.4 При проектировании САРП должны быть приняты меры по уменьшению вероятности ошибок сопровождения, включая перебросы сопровождения. Качественное описание влияния источников ошибок на автоматическое сопровождение и соответствующие ошибки, включая влияние малых отношений «сигнал/шум» и «сигнал/помеха», вызванных отражениями от моря, дождя, снега, низких облаков и несинхронными излучениями, должно быть представлено в эксплуатационной документации.

3.3.5 САРП, по требованию, должно отображать на экране в виде соответствующих символов*, по крайней мере, четыре равноразнесенных по времени предыдущих местоположения любой сопровождаемой цели за период, соответствующий используемой шкале дальности. Должна быть указана временная шкала прокладки предыдущих положений. Наставление по эксплуатации должно содержать объяснение того, что представляют собой предыдущие местоположения цели.

*МЭК 872: Морские средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП).

3.4. Отображение

3.4.1 Устройство отображения может быть либо автономным, либо входить в состав РЛС. Однако оно должно включать все данные, которые обеспечиваются индикатором РЛС в соответствии с эксплуатационными требованиями к навигационному радиолокационному оборудованию.

3.4.2 Конструкция должна быть такой, чтобы любая неисправность в компонентах САРП, представляющих данные в дополнение к информации, обеспечиваемой радаром в соответствии с эксплуатационными требованиями к навигационному оборудованию, не влияла на основное радиолокационное изображение.

3.4.3 В САРП должны предусматриваться, по крайней мере, шкалы дальности 3, 6 и 12 миль, а также обеспечиваться четкая индикация используемой шкалы.

3.4.4 Оборудование САРП может также иметь другие шкалы дальности, использование которых допускается положениями резолюции А.477(XII), и в таком случае они должны соответствовать этим требованиям.

3.4.5 САРП должно допускать работу в режиме относительного движения при ориентации изображения «Север» и «Курс» со стабилизацией от гирокомпаса. Кроме того, в САРП может быть предусмотрен режим истинного движения. В этом случае судоводитель должен иметь возможность выбора режимов истинного или относительного движения. При этом должна быть четкая индикация об используемом режиме движения и ориентации.

3.4.6 Информация о курсе и скорости, вырабатываемая САРП по захваченным целям, должна выдаваться в векторной или графической форме, четко указывающей предвычисленное перемещение цели с помощью соответствующего символа*. В этом отношении:

- .1 САРП с отображением предвычисленной информации только в векторной форме должен предусматриваться выбор как истинного, так и относительного векторов. Должна быть индикация о выбранном режиме векторов и, если выбран режим истинных векторов, на экране также должна быть указана стабилизация: относительно грунта или воды;
- .2 САРП с изображением данных о курсе и скорости в графической форме должна также, по запросу, обеспечивать индикация истинного и/или относительного векторов цели;

- .3 длина отображаемых векторов должна регулироваться путем выбора времени предвычисления;
- .4 должна быть предусмотрена четкая индикация времени предвычисления вектора;
- .5 если для стабилизации изображения относительно грунта используется сопровождение неподвижных целей, то они должны быть обозначены соответствующим символом*. В этом режиме относительные векторы, включая векторы целей, используемых для стабилизации, должны отображаться на экране по запросу.

*МЭК872: *Морские средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП).*

3.4.7 Информация САРП не должна маскировать радиолокационное изображение целей. Отображение данных САРП должно находиться под контролем судоводителя, работающего с РЛС. Должна предусматриваться возможность сброса в течение 3 секунд ненужной информации САРП.

3.4.8 Должны быть предусмотрены средства, обеспечивающие независимую регулировку яркости радиолокационного изображения и САРП, вплоть до полного погасания данных САРП.

3.4.9. Метод представления информации должен учитывать необходимость наблюдения данных САРП более чем одним наблюдателем при условии нормальной освещенности мостика как в дневное, так и в ночное время. Может быть предусмотрена защита экрана от попадания солнечных лучей, высота которой не мешает судоводителю выполнять свои обязанности по осуществлению наблюдения с мостика. Должна быть предусмотрена регулировка яркости.

3.4.10 Должна быть предусмотрена возможность быстрого определения пеленга и расстояния до любого объекта, появляющегося на экране САРП.

3.4.11 В случае автоматического захвата цели при входе в зону захвата, выбранную судоводителем, или в случае ее ручного захвата, на экране САРП через одну минуту должна отображаться тенденция ее движения, и в течение трех минут — предвычисленный вектор перемещения в соответствии с пунктами 3.4.6, 3.6, 3.8.2 и 3.8.3.

3.4.12 После переключения шкал дальности, на которых работает САРП, или после изменения режима индикации, вся информация по прокладке должна быть отображена на экране в течение периода времени, не превышающего один оборот антенны.

3.5. Предупредительная сигнализация

3.5.1 САРП должно обеспечивать визуальную и звуковую сигнализацию о сближении любой различаемой цели на заданное расстояние или о пересечении ею зоны, выбранной оператором. Цель, вызвавшая предупредительный сигнал, должна быть отчетливо обозначена на экране соответствующими символами*.

3.5.2 САРП должно обеспечивать визуальную и звуковую сигнализацию о любой сопровождаемой цели, по вычисленным данным имеющей расстояние и время кратчайшего сближения меньше значений, установленных оператором. Цель, вызвавшая предупредительный сигнал, должна отчетливо обозначаться на экране индикатора соответствующими символами*.

3.5.3 САРП должно обеспечивать четкую сигнализацию о сбросе цели с автосопровождения, вызванном любыми причинами, кроме выхода цели за шкалу дальности. Положение цели на момент сброса (потери) должно отчетливо обозначаться на экране.

3.5.4 Должна быть предусмотрена возможность включения и выключения оператором звуковой сигнализации.

**МЭК872: Морские средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП).*

3.6. Требования к информации

3.6.1 Наблюдатель должен иметь возможность выбрать любую сопровождаемую цель для получения информации. Выбранные цели должны быть обозначены соответствующим символом* на экране радара. Если требуется информация более чем по одной цели в одно и то же время, каждый символ должен быть отдельно идентифицирован, например, номером к каждому символу*.

**МЭК872: Морские средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП).*

3.6.2 Для каждой выбранной цели следующая информация должна быть четко и недвусмысленно идентифицирована, а также немедленно и одновременно отображена на экране в буквенно—цифровой форме за пределами рабочего диаметра экрана:

- .1 текущее расстояние до цели;
- .2 текущий пеленг на цель;
- .3 предвычисленная дистанция кратчайшего сближения;
- .4 предвычисленное время кратчайшего сближения;
- .5 вычисленный истинный курс цели;
- .6 вычисленная истинная скорость цели.

3.6.3 Представление данных, упомянутых в подпунктах 3.6.2.5 и 3.6.2.6, должно включать идентификацию представляемой информации относительно воды или грунта.

3.6.4 При представлении на экран информации о нескольких целях одновременно, для каждой выбранной цели на экран должна быть выведена информация не менее чем по двум подпунктам, приведенным в пункте 3.6.2. Если информация выводится на экран парами для каждой цели, то группироваться она должна следующим образом: данные пункта 3.6.2.1 с данными пункта 3.6.2.2; 3.6.2.3 с 3.6.2.4 и 3.6.2.5 с 3.6.2.6.

3.7. Имитация маневра

3.7.1 В САРП должна быть предусмотрена возможность имитации маневра своего судна на расхождение со всеми сопровождаемыми целями с упреждением по времени или без него относительно момента имитации. При этом обработка и отображение буквенно—цифровой информации по сопровождаемым целям не должны прерываться. Имитация должна обозначаться на экране соответствующим символом*.

3.7.2 В Наставлении по эксплуатации должно быть объяснение основополагающих принципов выбранного алгоритма имитации маневрирования, включая, если предусмотрено, имитацию маневренных характеристик своего судна.

3.7.3 Должна быть предусмотрена возможность в любой момент прервать имитацию маневра.

3.8. Точность

3.8.1 Погрешности САРП должны быть не более указанных в пунктах 3.8.2 и 3.8.3 для четырех ситуаций, приведенных в Дополнении 2. Данные значения погрешностей соответствуют лучшим результатам ручной прокладки в условиях бортовой качки $\pm 10^\circ$ с учетом погрешностей датчиков информации, приведенных в Дополнении 3.

3.8.2 Не более чем за 1 минуту устойчивого сопровождения САРП должно определить тенденцию относительного перемещения цели. При этом значения погрешностей (с вероятностью 95%) не должны превышать:

МЭК 872: Морские средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП).

Ситуация сближения	<u>Параметр</u>	<u>Параметр</u>	<u>Параметр</u>
	Относительный курс, градусы	Относительная скорость, узлы	Дистанция кратчайшего сближения, мили
1	11	2.8	1.6
2	7	0.6	-----
3	14	2.2	1.8
4	15	1.5	2.0

Примечание 1: В установившемся состоянии сопровождаемая цель и свое судно следуют прямым курсом и с постоянной скоростью.

Примечание 2: Вероятность значений такая же, как границы достоверности. Указанная вероятность является одновременно и доверительной вероятностью.

3.8.3 Не более чем через три минуты устойчивого сопровождения САРП должно определить движение цели с номинальной точностью. При этом значения погрешностей (с вероятностью 95%) не должны превышать:

Ситуация сближения	<u>Параметры</u>					
	Относ. курс, град.	Относ. скорость, узлы	Дкр, мили	Ткр, мин	Истин. курс, град.	Истин. скорость, узлы
1	3.0	0.8	0.5	1.0	7,4	1.2
2	2.3	0,3	-----	-----	2.8	0.8
3	4.4	0.9	0.7	1.0	3.3	1.0
4	4.6	0.8	0.7	1.0	2.6	1.2

3.8.4 В течение не более одной минуты после завершения маневра сопровождаемой цели или своего судна САРП должно определить тенденцию относительного движения цели, а в течение трех минут —

экстраполированное перемещение в соответствии с пунктами 3.4.6, 3.6, 3.8.2 и 3.8.3. В данном контексте «маневр своего судна» предполагает отклонение от курса $\pm 45^\circ$ в одну минуту.

3.8.5 САРП должно быть спроектировано таким образом, чтобы для ситуаций, предусмотренных в Дополнении 2, при самых благоприятных условиях движения своего судна погрешность, вносимая САРП, была незначительной в сравнении с погрешностями, вызываемыми датчиками входной информации.

3.9. Сопряжение с другим оборудованием

3.9.1 САРП не должно ухудшать параметры любых приборов - датчиков входной информации. Сопряжение САРП с другой аппаратурой не должно ухудшать параметров аппаратуры. Это требование должно выполняться независимо от того, находится САРП в рабочем состоянии или нет. Кроме того, САРП должно быть спроектировано таким образом, чтобы, насколько это практически возможно, соответствовать настоящим требованиям при возникновении в нем какой—либо неисправности.

3.9.2 САРП должно обеспечивать индикацию сообщения об отсутствии входных данных от любого внешнего датчика. САРП должно также возобновлять сигнализацию или индикацию сообщений, касающихся качества входных данных от любого внешнего датчика, которые могут повлиять на работу САРП.

3.10. Тестовые проверки и сигнализация об отказах

В САРП должна быть предусмотрена сигнализация о неисправностях, обеспечивающая судоводителю возможность производить контроль за надлежащей работой системы. Дополнительно должны быть предусмотрены тестовые программы для периодической полной проверки работы САРП путем сравнения с заданным решением. При введении какой—либо тестовой программы на экране радара должны появляться соответствующие символы* теста.

* МЭК 872: *Морские средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП)*.

3.11. Стабилизация относительно воды и грунта

3.11.1 САРП должны иметь возможность стабилизации относительно воды и грунта.

3.11.2 Датчики скорости и пройденного расстояния, обеспечивающие ввод информации в САРП, должны иметь возможность определять скорость судна относительно воды при движении передним и задним ходом.

3.11.3 Ввод информации, обеспечивающей стабилизацию относительно грунта, может осуществляться от лага, электронной системы определения местоположения, если точность измерения скорости соответствует требованиям резолюции**, или от сопровождаемых стационарных целей.

***См. резолюцию А.(19).*

3.11.4 Тип ввода и вид используемой стабилизации должны быть показаны на экране.

Дополнение 1

Определение терминов, используемых в эксплуатационных требованиях к САРП

- Цель* - неподвижный или перемещающийся объект, местоположение и перемещение которого определяется с помощью РЛС путем измерения дальности и пеленга.
- Относительный курс* - направление движения цели относительно местоположения своего судна, выраженное величиной угла, отсчитываемого от направления на север. Он определяется по экрану судовой РЛС путем нескольких измерений дальности и пеленга цели.
- Относительная скорость* - скорость цели относительно местоположения своего судна. Она определяется по экрану судовой РЛС путем нескольких измерений дальности и пеленга цели.
- Относительное движение* - комбинация относительного курса и относительной скорости.
- Истинное движение* - истинное направление движения цели, выраженное величиной угла, отсчитываемого от направления на Север. Он получается при сложении векторов относительного перемещения цели и перемещения своего судна*.
- Истинная скорость* - скорость цели, полученная путем сложения векторов относительной скорости цели и скорости своего судна.
- Истинное скорость движения* - сложение векторов истинного курса и истинной скорости.
- *Данные определения не учитывают относительно чего (воды или грунта) измеряется скорость своего судна.
- Истинный пеленг* - направление на цель от своего судна или от другой цели, выраженное величиной угла, отсчитываемого от направления на Север.

Относительный пеленг - направление на цель от своего судна, выраженное величиной угла отсчитываемого, от диаметральной плоскости своего судна.

Индикация истинного движения - режим работы, при котором отметки своего судна и каждой цели на экране индикатора перемещаются в соответствии с их собственным истинным перемещением.

Индикация относительного движения - режим работы, при котором положение отметки своего судна на экране индикатора остается неподвижным, а все цели передвигаются относительно своего судна.

Азимутальная стабилизация - режим индикации, при котором азимутальная ориентация изображения относительно назначенного истинного пеленга остается неизменной.

Ориентация изображения «Север» - азимутальная стабилизация, при которой линия, соединяющая центр развертки с нулем азимутальной шкалы является истинным направлением на Север.

Ориентация изображения «Курс» - азимутальная стабилизация, при которой линия, соединяющая центр развертки с нулем азимутальной шкалы совпадает с курсом судна, имевшим место в момент включения режима.

Курс - направление носа судна, выраженное углом, отсчитываемым между направлением на Север и диаметральной плоскостью судна.

Экстраполированное перемещение цели - предвычисление будущего перемещения цели, основанное на линейной экстраполяции существующего перемещения цели, полученного путем предыдущих измерений дальности и пеленга с помощью РЛС.

Относительный вектор - предвычисленное перемещение цели относительно своего судна;

- Истинный вектор* - предвычисленное истинное перемещение цели, полученное с учетом информации о направлении и скорости своего судна. Истинный вектор может быть представлен на экране как относительно воды, так и относительно грунта.
- Захват* - процесс выбора цели или целей и начало их сопровождения.
- Сопровождение* - компьютерный процесс учета последовательных изменений положения цели для определения параметров её движения.
- Переброс* - ситуация, при которой входящий радиолокационный сигнал от какой-то сопровождаемой цели неверно ассоциируется с другой сопровождаемой целью или с несопровожаемым радиолокационным сигналом.
- Зона захвата* - установленная судоводителем зона захвата, при входе в которую цель автоматически захватывается.
- История* - равноразнесенные по времени прошлые положения сопровождаемой цели. История (траектория прошлого движения) может быть относительной или истинной.
- Следы (треки)* - следы, оставляемые эхо-сигналами на экране РЛС, благодаря искусственному послесвечению экрана. Следы могут быть истинными или относительными. Истинные следы могут быть стабилизированы относительно воды или грунта.
- Опорный эхосигнал* - обозначенный специальным символом эхо-сигнал неподвижного навигационного знака, который сопровождается и используется для стабилизации движения своего судна относительно грунта.
- Имитация маневра* - режим, помогающий судоводителю в выполнении правильного маневра для безопасной навигации и избежания столкновения.

Зона подавления - зона, установленная судоводителем в пределах которой цели не захватываются.

ЭВДН - (электронный визир дальности и направления) — электронная линия, используемая для измерения пеленгов и/или расстояний.

Дкр/Ткр - предельные значения дистанции кратчайшего сближения и времени до кратчайшего сближения, устанавливаемые судоводителем с целью подачи сигнала тревоги, если для какой—либо сопровождаемой цели или целей указанные величины становятся меньше заданных.

Предвычисление пересечения - ситуация, при которой цель проходит впереди по курсу судна или предвычисление такого прохождения.

Плохое эхо - понятие, связанное с сопровождаемой целью, которая время от времени сбрасывается с сопровождения или имеет настолько плохой радиолокационный ракурс, что ее сопровождение не представляется возможным.

Потеря цели - понятие, связанное с целью, которая более не сопровождается из—за потери или затенения эхо-сигнала.

Стабилизация относительно воды - режим представления изображения, при котором свое судно и все цели перемещаются относительно воды, используя ввод в индикаторное устройство гирокомпасного курса и скорость относительно воды в продольном направлении.

Стабилизация относительно грунта - режим представления изображения, при котором свое судно и все цели перемещаются относительно грунта, используя ввод в индикаторное устройство информации о скорости относительно грунта или о суммарном сносе.

Предвычисленные точки столкновений - графическое представление предвычисленных точек столкновения,

лежащих на пересечении путей движения целей возможного пути движения своего судна.

Предвычисленные зоны опасности - зоны, окружающие предвычисленные точки столкновений. Размеры их определяются соотношением скоростей своего судна и цели, а также введенным предельным значением *Дкр*.

Картографические линии - устройство, посредством которого судоводитель может построить на экране электронные линии, указывающие фарватеры, или схемы разделения движения судов. Иногда их называют навигационными линиями. Эти линии должны быть стабилизированы относительно грунта, чтобы они не перемещались.

Примечание: Все измерения и вычисления расстояний, пеленгов, относительной скорости, дистанции или времени кратчайшего сближения производятся относительно антенны РЛС своего судна.

Дополнение 2

Ситуации сближения

Для каждой из следующих ситуаций предвычисления произведены для положения цели, которое определено после предварительного сопровождения в течение одной или трех минут.

Параметры	Ситуации сближения			
	1	2	3	4
Курс нашего судна, <i>град</i>	000	000	000	000
Скорость своего судна, <i>узлы</i>	10	10	5	25
Дальность до цели, <i>мили</i>	8	1	8	8
Пеленг цели, <i>град</i>	000	000	045	045
Относительный курс цели, <i>град</i>	180	090	225	225
Относительная скорость цели, <i>узлы</i>	20	10	20	20

Дополнение 3

Погрешности датчиков информации

Значения погрешностей, указанных в пункте 3.8, основываются на следующих значениях погрешностей датчиков информации, характеристики которых соответствуют эксплуатационным требованиям к судовому навигационному оборудованию.

Примечание: σ — среднее квадратичное отклонение.

Радиолокационная станция.

а) За счет флюктуации центра отражения цели (мерцания) для судна длиной 200 м:

вдоль длины цели $\sigma = 30$ м (нормальное распределение);

вдоль ширины цели $\sigma = 1$ м (нормальное распределение).

б) За счет бортовой и килевой качки.

Погрешность пеленга будет максимальной на каждом из четырех квадрантов вокруг своего судна для целей на курсовых углах 045° , 135° , 225° и 315° и будет равна нулю на курсовых углах 0° , 90° , 180° и 270° . Эта погрешность изменяется синусоидально с удвоенной частотой качки.

Для качки 10° среднее значение этой погрешности равно $0,22^\circ$ с наложением максимальной синусоидальной погрешности с амплитудой $0,22^\circ$.

в) За счет формы главного лепестка - среднеквадратическая погрешность в определении пеленга при нормальном распределении равна $0,05^\circ$.

г) За счет формы зондирующего импульса - среднеквадратическая погрешность в определении дальности при нормальном распределении равна 20 м.

д) За счет люфта антенны - максимальная погрешность в определении пеленга при равномерном распределении равна $\pm 0,05^\circ$.

е) За счет квантования максимальная погрешность в определении пеленга равна $\pm 0,1^\circ$ и в определении дальности равна $\pm 0,01$ мили (при равномерном распределении). Если устройство кодирования связано с сельсином, средняя квадратичная погрешность в определении пеленга при нормальном распределении равна $0,03^\circ$.

Гирокомпас

Погрешность калибровки $0,5^\circ$. Среднеквадратическая погрешность $\sigma = 0,12^\circ$ при нормальном распределении относительно погрешности калибровки.

Лаз

Погрешность калибровки 0,5 узла. Утроенная среднеквадратическая погрешность $3\sigma = 0,2$ узла при нормальном распределении относительно погрешности калибровки.

Список использованной литературы

1. Байрашевский А.М., Ничипоренко Н.Т. Судовые радиолокационные системы: Учебник для морских вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Транспорт, 1982.- 317 с.
2. Морская радиолокация/ Под ред. В.И. Винокурова. – Л.: Судостроение, 1986.- 256 с.
3. Радионавигационные приборы и системы/ В.А. Василенко, Б.С. Розен, В.В. Серегин. – М.: Агропромиздат, 1986.- 319 с.
4. Справочник по основам радиолокационной техники. Под ред. В.В. Дружинина.- М.: Военное изд., 1967.- 768 с.
5. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколника. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации. Под ред. Я.С. Ицхоки. М.: «Сов. радио», 1976.- 456 с.
6. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколника. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 2. Радиолокационные антенные устройства. Под ред. П.И. Дудника. М.: «Сов. радио», 1977.- 408 с.
7. Волинец В.Ф. РЛС «Океан». М.: Транспорт, 1974.- 200 с.
8. Радиотехнические системы: Учебник для вузов по спец. «Радиотехника»/ Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др.; Под ред. Ю.М. Казаринова.- М.: Высш. шк., 1990.- 496 с.
9. Радиотехника и радионавигационные приборы. Айзинов М.М., Байрашевский А.М. - Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1975. - 432 с.
10. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1983.- 536 с.
11. Справочник по судовому оборудованию радиосвязи и радионавигации. Т. II. Оборудование радионавигации/ А.М. Байрашевский, Ю.Е. Горностаев, А.В. Жерлаков и др. – Л.: Судостроение, 1979.- 232 с.
12. Судовые радиолокационные станции: Атлас / А.М. Байрашевский, Волинец В.Ф., О.В. Кононов и др.- 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1986.- 144 с.
13. Москвин Г.И., Суворец Л.А. Доплеровская радиолокационная станция «Истра». Экспресс-информация. Сер. Судовождение и связь, вып. 5 (90), М., ЦБНТИ ММФ, 1976.- 36 с.
14. Admiralty List of Radio Signals. Volume 5, 2000/2001.- 340 p.
15. Соненберг Г.Д. Радиолокационные и навигационные системы: Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1982.- 400 с.
16. Рекомендации для судоводителей по практическому использованию судовой автоматизированной РЛС «Океан-С»:

- Методические рекомендации.- М.:В/О "Мортехиформреклама", 1986. 56 с.
17. Radar ATLAS 8600 ARPA. Инструкция по обслуживанию. Krupp Atlas Elektronik GMBH, 1989.
18. Судовые средства автоматизации предупреждения столкновений судов / Ю.Г. Зурабов, Р.Н. Черняев, Е.В. Якшевич, В.Я. Яловенко. – М.: Транспорт, 1985.- 264 с.
19. Вагущенко Л.Л. Интегрированные системы ходового мостика: Учеб. пособ. / ОНМА. – Одесса. Латстар, 2003.- 170 с.
20. Каратаев О.Г. Проблемы электромагнитной совместимости. (сер. «Радиоэлектроника и связь»; №5) - М.: Знание, 1988.- 64 с.
21. Дьяконов В. Mathcad 8/2000: специальный справочник – СПб.: Издательство «Питер», 2000.- 592 с.
22. Материалы Интернет - Radio Officer © 2002 Edition.
23. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. посібник/ За ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І.Правди.- К.: вища шк., 1999.- 838с.:іл.
24. Судовые радионавигационные приборы: Учебник для мореходных училищ/ В.В.Коновалов, Л.И.Кузнецова, Н.П.Мельников, О.Б.Причкин.- 5-е изд., перераб. и доп.- М.: Транспорт, 1989.- 223 с.
25. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». – 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1988.- 448 с.
26. Широких И.П. Ремонт судовых навигационных приборов: Справочник.- М.: Транспорт, 1985.- 144 с.

Введение	3
1. Навигационные радиолокационные станции	4
1.1. Импульсная НРЛС. Принцип ее построения	5
1.2. Радиолокационное изображение на ЭЛТ индикатора	8
1.2.1. Виды ориентации	8
1.2.2. Индикация относительного и истинного движения	10
1.3. Эксплуатационные и технические характеристики НРЛС	12
1.3.1. Эксплуатационные характеристики	12
1.3.2. Основные технические параметры	18
2. Отражающие свойства объектов	24
2.1. ЭПО простейшей формы	25
2.2. ЭПО групповых объектов	26
2.3. ЭПО судов	27
2.4. ЭПО распределенных объектов	29
3. Дальность действия НРЛС в свободном пространстве	32
3.1. Влияние отражений от подстилающей поверхности (водной, земной) на дальность действия НРЛС	34
3.2. Влияние сферичности Земли на дальность действия НРЛС	37
3.3. Влияние атмосферы на дальность действия НРЛС	38
4. Радиолокационные импульсные передатчики	40
4.1. Особенности магнетронных генераторов	40
4.2. Импульсный модулятор с накопительным конденсатором	44
4.3. Импульсные модуляторы с накопительной линией	45
4.3.1. Упрощенная схема модулятора с накопительной линией	46
4.4. Импульсный линейный модулятор	48
4.5. Импульсный магнитный модулятор	49
5. Антенно-волноводные устройства судовых НРЛС	51
5.1. Щелевые и линзовые антенны	53
5.2. Антенные переключатели	56
5.3. Высокочастотные газовые разрядники	59
5.4. Вращающийся переход	61
6. Приемник НРЛС и принцип его работы	63
6.1. Преобразование частоты	64
6.1.1. Смесители на СВЧ диодах	66
6.2. Усилитель промежуточной частоты	68
6.2.1. Выбор полосы пропускания приемника	69
6.2.2. Детекторы и видеоусилители	70
6.3. Автоматическая подстройка частоты	70
6.4. Временная регулировка усиления	73

6.5. Малая постоянная времени.....	76
6.6. Логарифмический усилитель.....	78
7. Индикаторы кругового обзора НРЛС.....	82
7.1. Образование развертки в ИКО.....	87
7.1.1. Формирование развертки с помощью двух неподвижных отклоняющих катушки.....	88
7.1.2. Цифровая развертка НРЛС.....	91
7.2. Вспомогательные метки – НКД, ПКД.....	93
7.2.1. Способы формирования НКД.....	93
7.2.2. Способы формирования ПКД.....	96
7.3. Формирование отметки курса.....	101
8. Радиолокационные системы с активным ответом.....	102
8.1. Общая характеристика.....	102
8.2. Радиолокационные маяки-ответчики.....	106
8.3. Радиолокационный ответчик.....	111
8.3.1. Некоторые замечания при работе с РЛО.....	113
9. Навигационные РЛС с использованием эффекта Доплера.....	115
9.1. ДРЛС типа “Истра” для измерения скорости причаливания судов.....	119
10. Судовые средства автоматической радиолокационной прокладки	122
10.1. Требования к средствам автоматической радиолокационной прокладки.....	124
10.2. Обобщенная функциональная схема САРП.....	125
10.3. Методы представления информации в САРП.....	128
10.4. Достоинства и недостатки САРП.....	131
11. Влияние электромагнитных излучений и их биологические последствия.....	133
Некоторые термины, их сокращения и обозначения.....	136
Приложение 1.....	138
Приложение 2.....	139
Приложение 3.....	144
Список использованной литературы.....	160