

Конспект лекций
по дисциплине „Радионавигационные приборы и системы”
для курсантов факультета судовождения

Подготовил доцент кафедры ”Электронные комплексы судовождения”, к.т.н. **Демиденко П.П.**

Одесса, 2010

Лекция №1

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, вежа 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 радиосекстаны).

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.

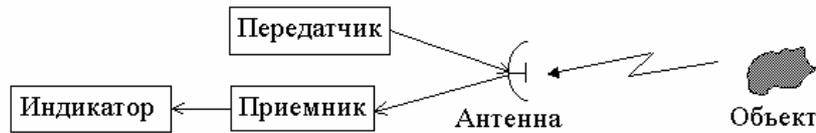


Рис.1.2. Упрощенная схема РЛС активного действия с пассивным ответом

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 (см. рис.1.3) 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.

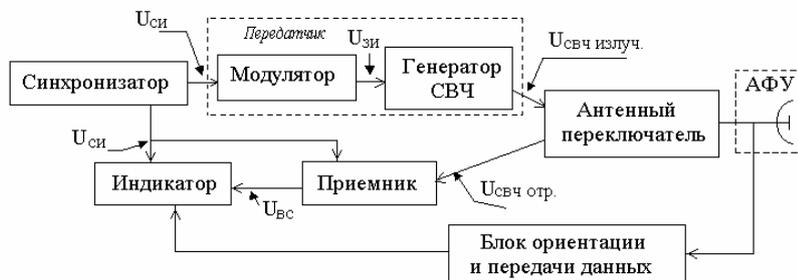


Рис.1.3. Упрощенная структурная схема импульсной НРЛС

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

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

$$D = \frac{c \cdot t_D}{2}, \quad (1)$$

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

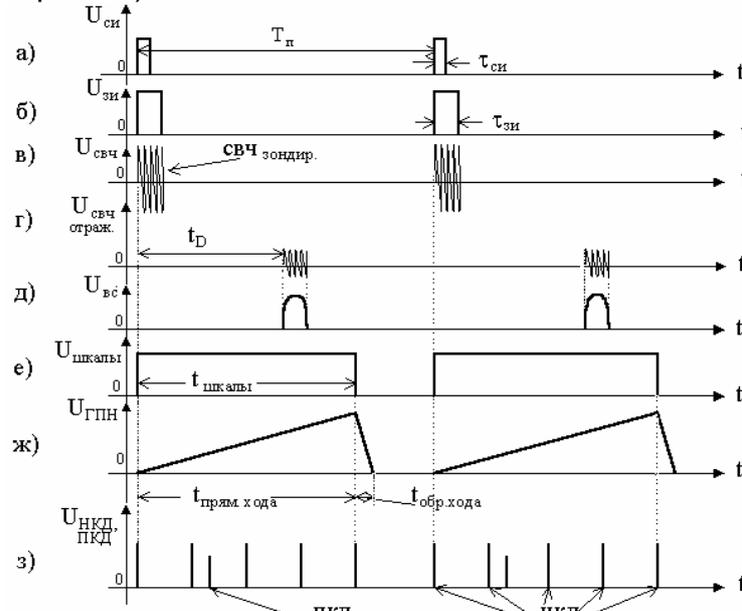


Рис.1.4. Основные временные соотношения работы импульсной НРЛС

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, (эюра «г»), преобразует их в видеосигналы (эюра «д») и затем подает их в индикаторное устройство.

В **индикаторе** с помощью воспроизводящего устройства (электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) или жидкокристаллического монитора) 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.

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

Лекция №2

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.1.7). Пеленг отсчитывается по часовой стрелке от направления на Север (в пределах 360°), которое выводится на индикатор НРЛС от гирокомпаса.

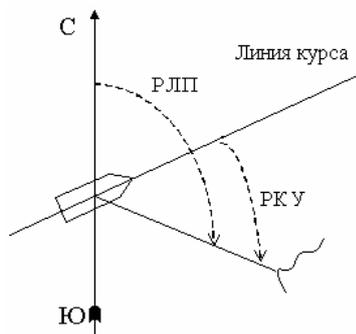


Рис.1.7. Определение РКУ и РЛП

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 (РКУ), а угол между

направлениями на Север и на объект – пеленгом (радиолокационным пеленгом- РЛП).

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.

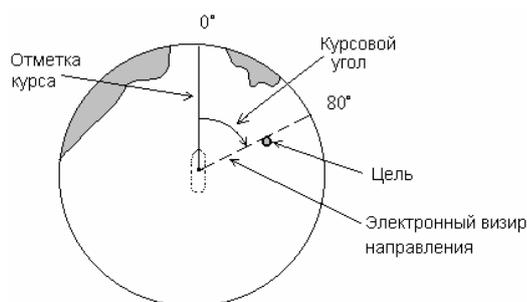


Рис.1.8.Пример радиолокационного изображения при ориентации по «Курсу»

При ориентации по «КУРСУ» (см. рис.1.8) отсчет углового положения антенны осуществляется относительно диаметра судна и азимутальное направление на цель определяется *курс*овым углом.

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

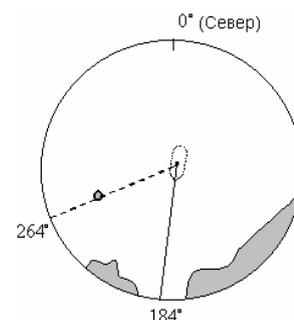
Визир направлен на цель, находящуюся на курсовом угле, например, 80° правого борта. При изменении курса судна происходит *смещение* всего изображения. Отметка курса при этом

остаётся 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 остаётся неподвижной. (Разновидностью ориентации по «КУРСУ» является ориентация «КУРС СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ»).

С введением в индикатор данных от гирокомпыаса 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.1.9) 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 относительно Севера. По неподвижной шкале отметка курса показывает курс судна, например, 184°.

Рис.1.9. Пример радиолокационного

Визир направлен на ту же цель. Тогда по неподвижной шкале отсчитывается радиолокационный пеленг 264°.

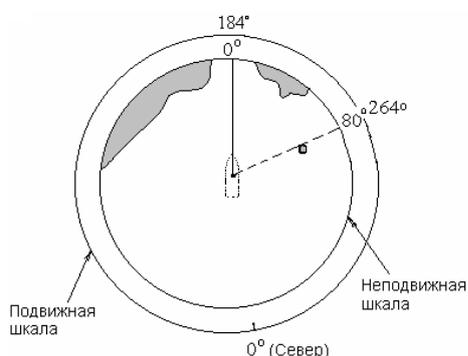
Рис.1.9. Пример радиолокационного изображения при ориентации по «Северу»

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

Третий вид ориентации изображения - «КУРС СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ» даёт возможность стабилизации его относительно Севера и одновременной ориентации относительно курса.

При этом линия отметки курса будет вновь направлена только вверх (см. рис.1.10), 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.1.10. 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 судно считается неподвижным.

При движении судна все отметки целей на экране будут совершать движение со скоростями, величина и направление которых будут определяться суммой скоростей движения судна и самих целей. Иначе говоря, это будут относительные движения отметок в судовой системе координат. 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.

Такой режим называется режимом индикации *относительного 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, соответствующему истинному курсу и скорости своего судна в масштабе изображения, стабилизированного относительно Севера.*

Все неподвижные объекты на экране должны быть неподвижными, а движущиеся цели – перемещаться своими истинными курсами и скоростями.

Для осуществления режима «Истинное движение» из относительного движения отметок целей вычитается собственное движение судна-носителя НРЛС [7].

В НРЛС операция вычитания выполняется смещением центра изображения, который является отметкой своего судна, в направлении и со скоростью, которые вводятся в систему от лага и гирокомпаса.

Пределы перемещения изображения своего судна на экране ограничиваются необходимостью - иметь *возможность обнаруживать цели по корме и по носу* при приближении своей отметки к краю экрана.

В НРЛС, при первоначальном включении режима ИД и при последующих переориентациях, отметка своего судна смещается в сторону, противоположную последнему курсу, на расстояние, соответствующее $\frac{2}{3}$ радиуса экрана. Переориентация изображения на ИКО (режим «Возврат» - то есть отметка своего судна смещается по контркурсу на расстояние, соответствующее $\frac{2}{3}$ радиуса экрана) производится автоматически, если отметка своего судна приблизилась к краю экрана на $\frac{1}{3}$ его радиуса (. Кроме того, возврат может быть выполнен оператором в любой момент вручную, нажатием соответствующей кнопки.

Основным достоинством данного режима является то, что все неподвижные объекты, окружающие судно, воспроизводятся 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.

(Если в режиме ИД происходит *смещение неподвижных* объектов, то это указывает на то, что гирокомпас и/или лаг выдают неточные данные. Введя в блок ИД корректирующие данные на указанные приборы и добившись *неподвижности неподвижных* объектов, можно определить погрешность этих приборов).

Недостатки относительного радиолокационного изображения при плавании вдоль побережий и в узкостях, а именно размазывание изображений неподвижных объектов и трудность их выделения среди подвижных, начинают ощущаться только после работы в режиме ИД.

Лекция №3

1.3. Эксплуатационные и технические характеристики НРЛС

1.3.1. Эксплуатационные характеристики

Эксплуатационные характеристики определяют возможности морских НРЛС 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».

Согласно уравнения радиолокации (1) $D = \frac{ct_D}{2}$ следует,

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

Отсюда следует, что длительность зондирующего импульса $\tau_{зи}$, согласно уравнению (2) определяет дистанцию

$$D(\tau_{зи}) = \frac{c\tau_{зи}}{2} = 150 \tau_{зи} , \quad (3)$$

где $\tau_{зи}$ [мкс].

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

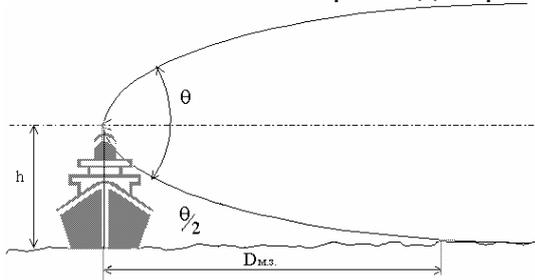
В этом случае минимальная дальность действия определяется уравнением

$$D_{min} = 150(t_B + \tau_{зи}) \approx 300\tau_{зи} . \quad (4)$$

Уменьшаться минимальное расстояние будет и при укорочении волноводного тракта, так как при прохождении импульсов от приемопередатчика 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.1.13 видно, что мертвая зона – $D_{м.з.}$ зависит от высоты установки антенны НРЛС и ее ширины диаграммы направленности в вертикальной плоскости θ .



На рис.1.13 обозначены: h – высота установки антенны судовой НРЛС, θ – ширина диаграммы направленности ее антенны в вертикальной плоскости.

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

Сравнивая уравнения (4) и (5) видно, что даже при очень малой длительности зондирующего импульса $\tau_{зи}$, реальная минимальная дальность действия может существенно увеличиться из-за мертвой зоны РЛС.

Разрешающая способность по дальности – это *минимальное расстояние ΔD между двумя, отдельно наблюдаемыми целями, расположенными в одном направлении относительно НРЛС.*

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

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

где
$$D_{пот.} = \frac{c \cdot \tau_{зи}}{2}, \quad (7)$$

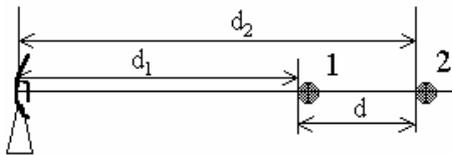


Рис.1.15.

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

$d > \Delta D$. Из рис.1.15 следует, что
$$d = d_2 - d_1 = \frac{c \cdot t_2}{2} - \frac{c \cdot t_1}{2} = \frac{c}{2} (t_2 - t_1) = \frac{\Delta t \cdot c}{2}$$

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

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

того, что в реальных условиях зондирующий импульс носит форму гауссовой кривой,

$$\tau_{зи} = \frac{1,2}{\Delta f}. \quad \text{Отсюда –} \quad \Delta D = \frac{c \cdot \tau_{зи}}{2} = \frac{c \cdot 0,6}{\Delta f}. \quad (8)$$

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

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

где; $d_{п}$ – 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

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

Разрешающая способность по углу (по направлению) в горизонтальной плоскости – это минимальный угол α между направлениями на два равноудаленных точечных объекта 1 и 2 (см. рис.1.16), при котором отраженные сигналы от этих целей принимаются и отображаются на ЭЛТ индикатора НРЛС раздельно.

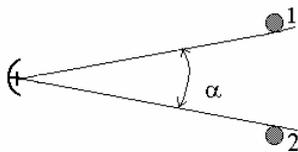


Рис.1.16.

Существует понятие *реальной* разрешающей способности α_p . Обычно она хуже потенциальной разрешающей способности α_o , которая приблизительно равна ширине диаграммы направленности антенны НРЛС в горизонтальной плоскости, т.е. $\alpha_o \approx \alpha_{гор}$, 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 $\alpha_{инд} = 57,3 (d_{п}/r)$,

где; $d_{п}$ – диаметр яркостного пятна на экране ЭЛТ, образованного сфокусированным лучем ЭЛТ;

r – расстояние от центра развертки до цели.

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

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 $d_{п}$ – диаметр яркостного пятна экрана ЭЛТ и увеличивать диаметр ЭЛТ.

Разрешающая площадка НРЛС - S_p .

Зная реальные разрешающие способности НРЛС по дальности и по углу, значение разрешающей площадки определяется как (см. рис.1.17):

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

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

ΔD_p – длина разрешающей площадки.

Аналогично разрешающей площадке НРЛС определяется **разрешающий объем НРЛС - V_p**

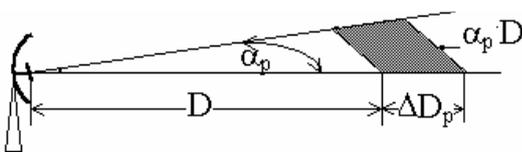


Рис.1.17.

(см. рис.1.18).

В этом случае учитывается «высота» объема h , определяемая дистанцией D и шириной диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости θ .

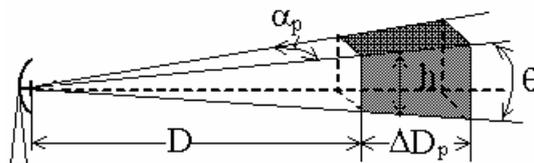


Рис.1.18.

Из рис.1.18 следует, что $h=2D \cdot \operatorname{tg}(\theta/2)$, тогда $V_p = S_p \cdot h$.
Отсюда находим:

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

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, от длительности зондирующего импульса и уровня 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;

$\delta_{\text{п}}$ - потенциальная СКП измерения дальности, определяемая уравнением $\delta_{\text{п}}$

$$= \frac{\Delta D}{\sqrt{\pi q}} = \frac{c \tau_{\text{зи}}}{2\sqrt{\pi q}}. \quad (\text{В этом уравнении } q - \text{ отношение энергии отраженного сигнала от}$$

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

К *внешним* факторам, определяющим СКП, относятся:

$\delta_{\text{р}}$ - СКП распространения радиоволн, связанная с условиями их распространения;

δ_0 - СКП, обусловленная флюктуацией кажущегося центра отражения.

Таким образом, суммарная СКП измерения расстояния будет определяться уравнением:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 + \delta_{\text{п}}^2 + \delta_{\text{р}}^2 + \delta_0^2}. \quad (14)$$

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 $\varphi_{\text{п}}$ зависит от ширины диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости и от соотношения сигнал/шум на выходе приемника, то есть

$$\varphi_{\text{п}} = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi q}}. \quad (15)$$

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 (см.рис.1.19), следующих с интервалом, равным периоду повторения зондирующих импульсов - $T_{\text{п}}$.

Отраженный импульс, который должен появиться в момент t_0 (см. рис.1.19), может появиться не только в момент t_0 , но и момент, сдвинутым относительно t_0 на время $\pm T_{\text{п}}/2$. В результате появляется угловая погрешность, СКП которой равна

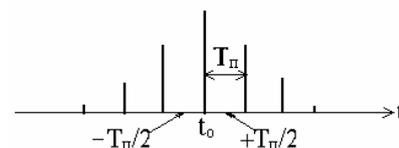


Рис.1.19.

$$\varphi_0 = \frac{\Omega T_{\Pi}}{2\sqrt{3}}, \quad (16)$$

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

Практически точность измерения направления равна

$$\varphi = \varphi_{\Pi} + \varphi_0 = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi q}} + \frac{\Omega T_{\Pi}}{3,42} \quad (17)$$

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

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.

Лекция №4

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_{Π} – частота следования зондирующих импульсов;

T_{Π} – период повторения (следования) зондирующих импульсов;

$P_{и}$ – импульсная мощность передатчика;

$P_{пр.мин}$ – 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 λ 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 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).

Т.обр. следует, что $\tau_{и} = nT_{п}$. Отсюда, $f=1/T_{п} = n/\tau_{и}$, так как $T_{п} = \tau_{и}/n$.

Тогда длина волны СВЧ радиоимпульса определится формулой $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c\tau_{и}}{n}$.

(18)

Например, при $n = 300$, $\tau_{и} = 0,1 \text{ мкс}$ $\lambda = 10 \text{ см}$, 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 приближенной зависимостью

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

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 в морских НРЛС применяются **две длины волны**: $\lambda_1 = 3,2 \text{ см}$ (**X** – диапазон) и $\lambda_2 = 9,8 \text{ см}$ (**S** – диапазон).

Частота следования импульсов $F_{п}$ 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 $T_{п}$ должен быть больше суммы $t_{пр.хода} + t_{обр.хода}$ пилообразного напряжения развертки, вырабатываемого генератором пилообразного напряжения, то есть:

$$T_{п} > (t_{пр.хода} + t_{обр.хода}). \quad (20)$$

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

$$F_{п} = 1/T_{п} \leq c/2,5D_{max}. \quad (21)$$

Уравнение (21) связывает D_{max} и минимальную частоту повторения $F_{п}$. Реально, в НРЛС $F_{п}$ 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 зондирующих импульсов, облучающих цель за один оборот антенны, будет равно:

$$N_{min} = t_{обл.}/T_{п} = \alpha/(\Omega \cdot T_{п}) = (\alpha \cdot F)/\Omega.$$

Из полученного выражения получаем:

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

В современных НРЛС $F_{п}$ на малых шкалах порядка 3000 *имп/с*, а на больших – 500 *имп/с*.

Мощность передатчика P оказывает влияние на дальность действия НРЛС. Различают импульсную $P_{и}$ и среднюю $P_{ср}$ 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:

$$P_{и}\tau_{и} = P_{ср} T_{п}. \quad (23)$$

Из этого уравнения следует, что $P_{ср} = P_{и} \cdot (\tau_{и}/T_{п})$, где $\tau_{и}/T_{п}$ – коэффициент заполнения k .

В НРЛС средняя мощность $P_{ср}$ измеряется единицами ватт, а импульсная мощность $P_{и}$ – 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:

$$P_{ш} = kT_0\Delta f N_{ш} m, \quad (24)$$

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 $\tau_{зн}$. Определяется уравнением $\Delta f = 1/\tau_{зн}$.

$N_{ш}$ – 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 $P_{п}$ на выходе приемника. m может достигать единицы, то есть $m = (P_c / P_{п}) = 1$.

В этом случае $P_c = P_{п} = P_{ш}$ или

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

Чувствительность () оценивается в *ваттах* или *децибелах*. Например, $= 10^{-12}$ Вт или

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

(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, угловой скоростью вращения Ω .

Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости α (рис.1.22,а) для НРЛС 3,2см 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.1.22,б) для обоих диапазонов – около $20^\circ \dots 22^\circ$.

Степень подавления боковых лепестков:

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

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

P - мощность основного лепестка.

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

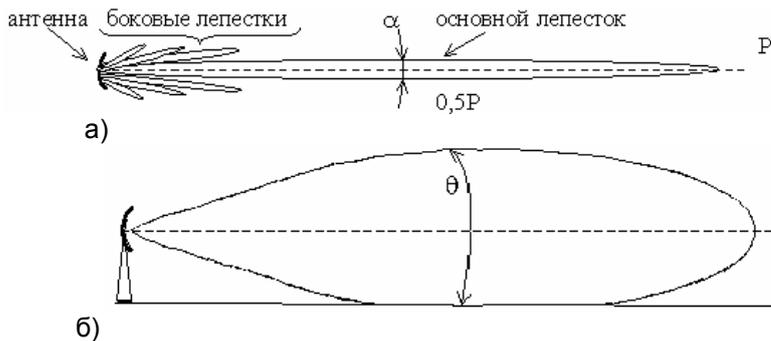


Рис.1.22. Диаграмма направленности антенны НРЛС:
а) – в горизонтальной плоскости; б) – в вертикальной плоскости

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

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.

Угловая скорость вращения антенны Ω обычно составляет (16...24) об/мин, а для быстроходных судов – (30...48) об/мин.

Лекция №5

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_3 , которая, будучи помещенной, на **облучаемый** объект перпендикулярно направлению распространения падающей СВЧ радиоволны, создает на входе приемника НРЛС плотность потока мощности отраженного сигнала **равной** плотности отраженной мощности от **реального** объекта.

Количественно ЭПО определяется таким образом.

Допустим, на объект площадью S падает мощность плотностью Π_1 . (Падающая плотность мощности определяется выражением $\Pi_1 = P_{\text{п}}/S_a$, где $P_{\text{п}}$ - мощность передатчика, а S_a - площадь раскрытия антенны). Под ее воздействием объект переизлучает мощность P , равную

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

Только часть этой энергии попадает обратно в антенну НРЛС плотность мощности, которой определяется уравнением

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

где: G - коэффициент направленного действия антенны,

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

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

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

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:

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

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, уголкового 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:

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

где a - сторона облучаемой плоскости, α - угол облучения.

3. Угловой отражатель со стороной a (см. рис.2.1).

Для увеличения интенсивности отражения малоразмерных объектов (например - бугров, вех и др.) в достаточно большом секторе облучения применяются искусственные угловые отражатели.

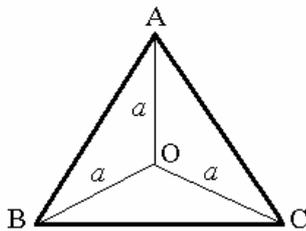


Рис.2.1.

ЭПО углового отражателя, у которого $\triangle AOB \perp \triangle BOC \perp \triangle AOC$, приблизительно равна площади мнимого шестиугольника, вписанного во внешний контур отражателя, определяется 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 $a=0,4 \text{ м}$ и $\lambda=3,2 \text{ см}$ $S_3=104,7 \text{ м}^2$. Если необходимо усилить интенсивность отражения во всех направлениях, то угловые отражатели устанавливают группами (по окружности).

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 .

а) При $R \gg \lambda$ $S_3 = \pi R^2$.

б) При $R \ll \lambda$, что характерно для капель дождя, тумана и других целей, ЭПО определяется уравнением $S_3 = 4 \left(\frac{2\pi R}{\lambda} \right)^4 \cdot \pi R^2$.

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. Например, при облучении двух целей, изображенных на рис.2.2, ЭПО

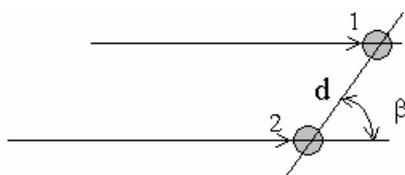


Рис.2.2.

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

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.

Для наглядности ЭПО представляют в виде ее зависимости от углов облучения объекта в полярной системе координат.

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.2.3) является выполнение соотношения

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

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).

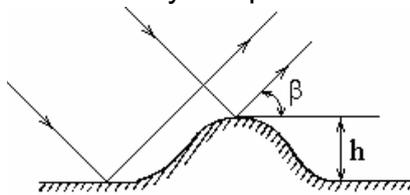


Рис.2.3.

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 ÷ 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

$$S_3 = S_p \cdot G = G \cdot \alpha D \frac{c \tau_{зи}}{2}, \quad (33)$$

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, гроззовые 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 равняется:

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

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_r). 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.

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. Такая решетка размещается обычно в раскрыве рупорной антенны [12].

Лекция №6

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).

Максимальную дальность НРЛС D_{max} определяется таким образом:

Если бы антенна была ненаправленной, то есть представляла собой изотропный излучатель, то она создавала бы при импульсном излучении мощностью P_n плотность потока мощности на поверхности сферы у объекта $\Pi = \frac{P_n}{4\pi D^2}$,

где: P_n - импульсная мощность передатчика;

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

Но, так как реальная антенна характеризуется коэффициентом направленного действия $G = \frac{S_a \cdot 4\pi}{\lambda^2}$, где S_a - площадь раскрытия антенны то, благодаря коэффициенту направленности, на объект воздействует плотность потока мощности (см. рис.2.1.) $\Pi_1 = \frac{P_n G}{4\pi D^2}$.

Под воздействием этого (падающего) потока мощности объект переизлучает (так как на его поверхности возникают СВЧ токи) в пространство мощность, определяемая уравнением $P = \Pi_1 \cdot S_3 = \frac{P_n G}{4\pi D^2} \cdot S_3$, где S_3 - эффективная поверхность отражения цели.

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

$$\Pi_2 = \frac{P}{4\pi D^2} = \frac{P_n G}{(4\pi)^2 D^4} \cdot S_3.$$

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

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

то на вход приемника (под воздействием плотности потока мощности Π_2) воздействует мощность $P_{пр} = \Pi_2 \cdot S_a = \frac{P_n G S_a}{(4\pi)^2 D^4} \cdot S_3$.

Подставив в полученное уравнение уравнение (36), получим $P_{пр} = \frac{P_n G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 D^4} \cdot S_3$.

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:

$$P_{пр} = \frac{P_n G^2 \lambda^2 \eta_1 \eta_2}{(4\pi)^3 D^4} \cdot S_3. \quad (37)$$

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

$$D_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_n G^2 S_3 \lambda^2 \eta_1 \eta_2}{(4\pi)^3 P_{пр.min}}}. \quad (38)$$

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.

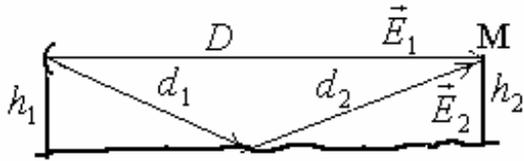


Рис.3.1.

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 $\phi = \phi + \beta$.

Обычно, при отражении от водной поверхности радиоволны с горизонтальной поляризацией \vec{E}_0 , приобретают фазовые сдвиги $\phi = \pi = 180^\circ$, 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 $\Delta d \approx \frac{2h_1 h_2}{D}$.

$$\text{Тогда} \quad \beta = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda D} \quad (40)$$

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

$$E_0 = 2E_1 \cos \frac{\phi}{2} = 2E_1 \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\beta}{2} \right) = 2E_1 \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D} \right) = 2E_1 \sin \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D}. \quad (41)$$

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 $E_0 = 0$.

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.3.2.

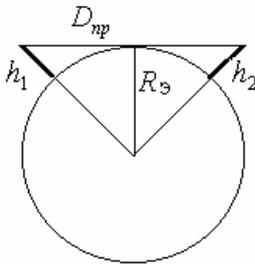


Рис.3.2

Из него следует, что

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

где $R_э$ - эффективный радиус Земли.

Уравнение (46), вследствие того, что $D_{нр} \gg h_1$ и $D_{нр} \gg h_2$, можно записать: $D_{нр} = \sqrt{2R_э} \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ или, с учетом коэффициента рефракции k_p , равным для стандартной атмосферы $k_p = 1,33$ и радиуса Земли ≈ 6370 км,

$$R_э = 1,33 \cdot 6370 = 8472,1 \text{ км.}$$

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.

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

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 [2,15].

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: $n = \sqrt{\epsilon_0}$ - изменение коэффициента преломления (ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость);

h - высота.

Субрефракция - (см. рис.3.3) 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.

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).

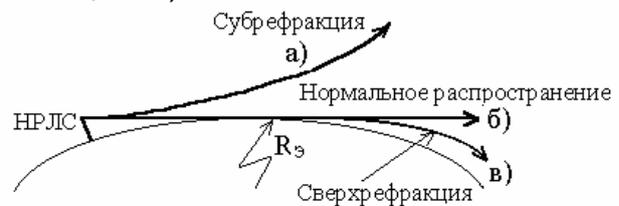


Рис.3.4

Сверхрефракция - (см. рис.3.3, 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.3.3).

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.

Поверхностный волноводный радиоканал.

Иногда оператор НРЛС может обнаружить цели на чрезвычайно больших дальностях, и в то же время он не может обнаружить цели в пределах выбранной шкалы дальности (в том числе и максимальной) при условии, что НРЛС технически исправна.

Эти явления происходят во время *крайних случаев* сверхрефракции. Из-за некоторого состояния атмосферы, СВЧ импульсы НРЛС распространяются под

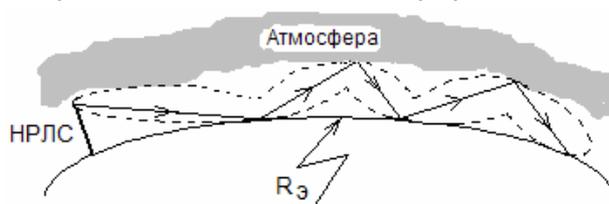


Рис.3.4

углами 1° или меньше к поверхности моря и могут отражаться слоями атмосферы. Таким образом возникает *поверхностный радиоканал*.

В поверхностном радиоканале, показанном на рисунке 3.4, СВЧ импульсы НРЛС (радарные лучи)

преломляются вниз к поверхности моря, затем отражаются вверх, снова преломляются вниз в пределах канала, и так далее непрерывно.

Простирается радиоканал на достаточно большие расстояния, достигая иногда сотни морских миль.

Поверхностный волноводный радиоканал 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, импульсы НРЛС и их эхо (отражения) могут 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.

Лекция №7

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 модуляторным устройством, которое состоит из импульсного модулятора и подмодулятора.

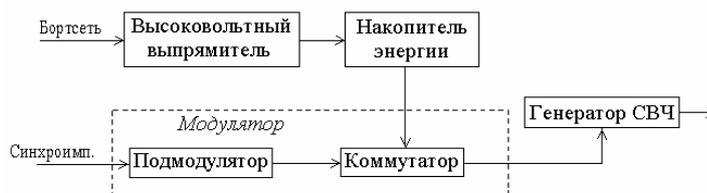


Рис.4.1. Упрощенная функциональная схема радиолокационного передатчика

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.

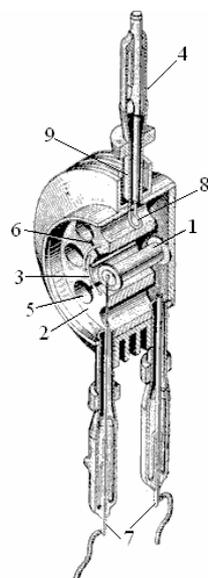


Рис. 4.2. Устройство магнетрона

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

На практике широко применяются пакетированные магнетроны (см. рис.4.3), у которых магнитная система 4 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.

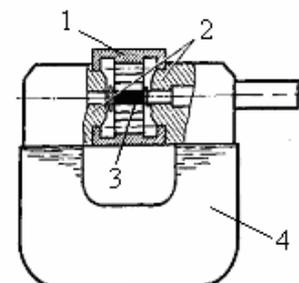


Рис. 4.3. Пакетированный магнетрон:
1 — медный анодный блок; 2 — ферромагнитные полюсные наконечники;
3 — катод; 4 — магнит

Обычно напряжение накала магнетрона равно 6,3 В, но ввиду того, что катод работает в режиме усиленной электронной бомбардировки, такое значение напряжения питания 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.

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.

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.4.4. Такого типа модулятор использовался в НРЛС «Дон» [9].

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 $+E_a \rightarrow C_n \rightarrow L \rightarrow R1 \rightarrow R2$ до напряжения $+(14+16) kB$. (Этому значению соответствует $+E_a$).

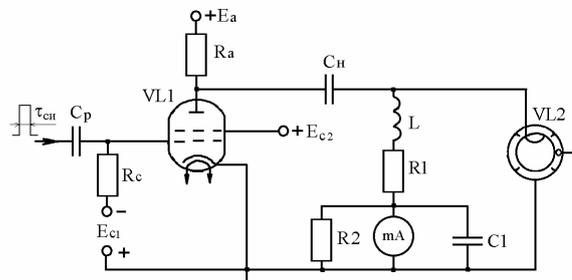


Рис.4.4. Упрощенная схема импульсного модулятора с накопительным конденсатором

Одновременно подмодулятор формирует импульсы положительной полярности, близкие к прямоугольной форме, длительностью $\tau_{зи}$.

При их поступлении на управляющую сетку $VL1$ (при этом положительная амплитуда $\tau_{зи}$ должна быть больше отрицательного напряжения на управляющей сетке), радиолампа открывается, и накопительный конденсатор C_n разряжается на магнетрон по цепи: $VL1 \rightarrow C_n \rightarrow VL2 \rightarrow$ 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 $C2$.

Лекция №8

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).

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 ($F_{зи}$) 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.4.5. Модулятор содержит коммутационную лампу – водородный тиратрон VL1, накопительную линию НЛ (разомкнутую на конце), импульсный трансформатор ИТ, магнетрон VL2, зарядное сопротивление $R_{зар}$ [7].

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

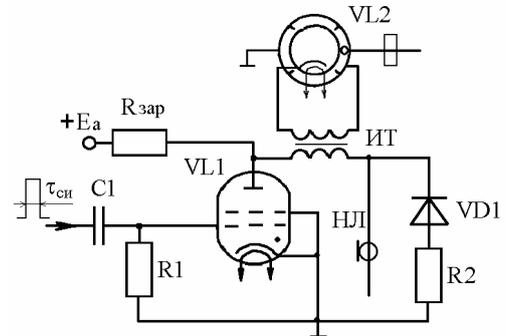


Рис.4.5. Упрощенная схема модулятора с накопительной линией

Условно схему, приведенной на рис.4.5 можно представить рисунком 4.6.

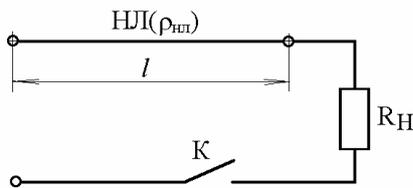


Рис.4.6

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,

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

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.4.7,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.4.7,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 $U_H = i_p \cdot R_H = \frac{R_H \cdot E}{2R_H} = \frac{E}{2}$ (см. рис.4.7,б). По мере разряда последующих распределенных емкостей длинной линии НЛ, разрядная волна будет перемещаться вдоль НЛ от ее начала к разомкнутому концу.

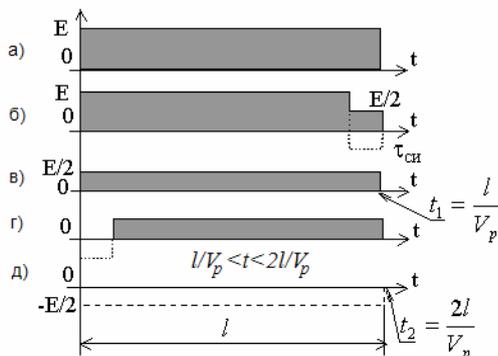


Рис.4.7.

В момент времени $t_1 = \frac{l}{V_p}$ (где V_p - скорость распространения радиоволны вдоль НЛ),

волна достигает разомкнутого конца НЛ (см.рис.4.7,в), отражается без изменения величины и знака и начинает распространяться к нагрузке (рис.4.7,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.4.7,д). В этом случае на зажимах первичной обмотки ИТ формируется прямоугольный импульс напряжения амплитудой $-\frac{E}{2}$ длительностью

$t_{и} = \frac{2l}{V_p}$. Этот импульс передается вторичной обмоткой ИТ на магнетрон.

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

Для получения импульсов большей длительности, в качестве НЛ используют искусственные длинные линии, состоящие из сосредоточенных элементов L и C .

Длительность импульсов, формируемая такой линией равна

$\tau_{зи} = 2n\sqrt{LC}$, где n - количество звеньев (обычно $n = 5 \dots 6$), а L и C – соответственно индуктивность и емкость звена.

Для защиты модулятора от перенапряжений, к НЛ подключен защитный диод VD1 с нагрузочным сопротивлением R_2 , которое снимает возможное остаточное отрицательное напряжение с НЛ.

4.4. Импульсный линейный модулятор

Упрощенная схема импульсного линейного модулятора приведена на рис.4.8.

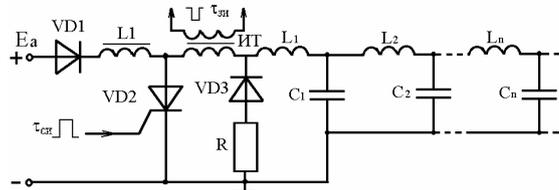


Рис.4.8. Упрощенная схема импульсного линейного модулятора

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 $\tau_{сн}$ отпирается тиристор VD2. Протекающий через него ток разряда уменьшает сопротивление тиристора VD2 и происходит разряд накопительной линии $L_n C_n$ через первичную обмотку импульсного трансформатора ИТ.

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

4.5. Импульсный магнитный модулятор

В этом модуляторе (схема на рис.4.9) в качестве коммутирующего элемента используется катушка нелинейной индуктивности.

Такие модуляторы называются импульсными магнитными модуляторами.

Импульсный магнитный модулятор состоит из катушки нелинейной индуктивности (дроссель) $L1$, накопительной емкости $C1$, нелинейного трансформатора $T1$, накопительного конденсатора $C2$ и импульсного трансформатора $T2$.

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.

(Если сердечник индуктивности $L1$ 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 $VD2$ заперт. В этом случае накопительный конденсатор $C1$ через нелинейный дроссель $L1$ заряжается до напряжения $+E_a$. Если открыть $VD2$, емкость $C1$ 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 $\tau_{зи}$, воздействующий на катод магнетрона.

Длительность $\tau_{зи}$ определяется временем разряда $C2$ через первичную обмотку $T2$ или $\tau_{зи} \approx 0,7C2 \cdot R_{(первич.обмотки\ T2)}$.

$C2$ включают в схему, если необходимо сформировать $\tau_{зи} \leq 0,1\text{ мкс}$. Если же $\tau_{зи} > 0,1\text{ мкс}$, тогда вместо $C2$ в схеме используют длинную линию.

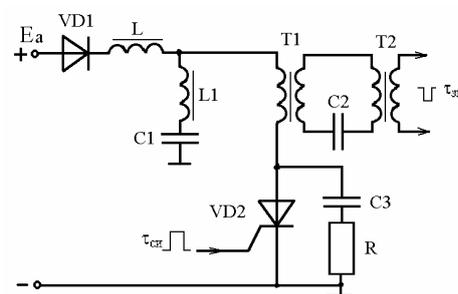


Рис.4.9. Схема импульсного магнитного модулятора

Лекция №9

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.

Одним из важных параметров антенны, влияющий на эксплуатационные параметры НРЛС, является *диаграмма направленности* антенны.

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:

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

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

где E_{max} и Π_{max} - максимальные значения соответствующих величин.

Наряду с формульной зависимостью ДН существует и более наглядный способ ее изображения – графический метод. Часто, в главных плоскостях (вертикальной и горизонтальной), нормированные ДН изображают в полярной (рис.5.1,а) или прямоугольной системе координат (рис.5.1,б).

Угол $\theta_{0,5}$, (а также угол $\alpha_{0,5}$ - в горизонтальной плоскости) на уровне половинной мощности характеризует соответственно ширину диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскости.

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

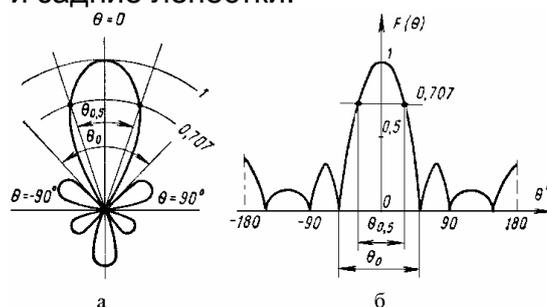


Рис.5.1. а) ДН в полярной и - б) в прямоугольной системе координат

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

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”).

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

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.5.2), то она может излучать (принимать) СВЧ колебания.

По своим свойствам она аналогична полуволновому симметричному вибратору [1,9]. Только в щелевом излучателе вектор магнитного поля \vec{H} ориентирован вдоль щели, а вектор электрического

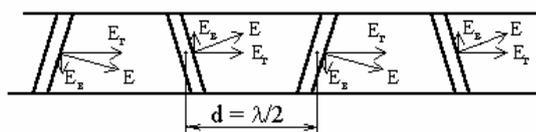


Рис.5.2.

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 $10^\circ \dots 15^\circ$).

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}_T . Сложив вектора электрического поля \vec{E} , возникающих в щелях, получим $\sum \vec{E}_T \approx \max$, 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 $d = \lambda_{\text{крит}}/2$ размещаются фильтры (перегородки), сквозь которые \vec{E}_T проходит без существенных 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]. На рис. 5.3 показан практический чертеж антенного блока НРЛС «Наяда-5» [29].

Антенный блок осуществляет формирование СВЧ-энергии в виде радиолуча (диаграммы направленности) требуемой формы, направленное *излучение* энергии в пространство и ее направленный *прием* после отражения от облучаемых объектов.

Несущей частью конструкции блока является литой кронштейн, к которому крепится щелевая антенна. Щелевая антенна (рис.5.3) представляет собой

секториальный рупор 2, в вершине которого помещен волноводный излучатель бегущей волны 4 с решеткой фильтров 3.

Излучатель формирует диаграмму направленности антенны в горизонтальной плоскости. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости формируется рупором 2.

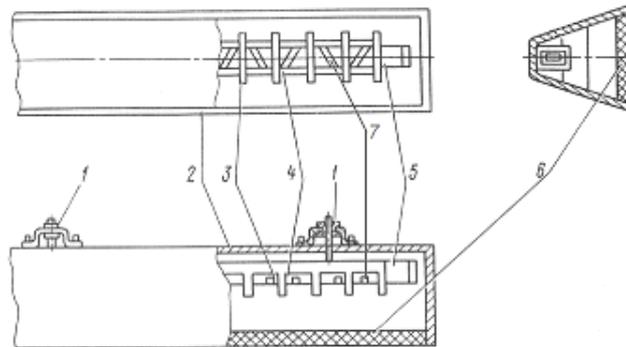


Рис.5.3. Чертеж антенного блока НРЛС «Наяда-5»

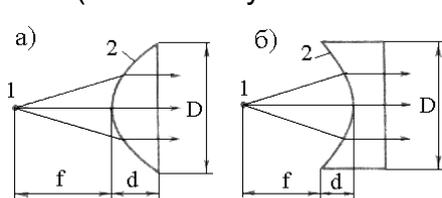
В качестве излучателя использован латунный волновод сечением 28,5x12,6 мм с прорезанными на узкой стенке наклонными щелями 7. В конце излучателя установлен поглощающий клин 5 из ферроэпоксида. В раскрыве щелевого излучателя расположен фильтр паразитной поляризации 3. Пластины фильтра, установленные между щелями, образуют предельные волноводы для подавления вертикальной составляющей поля, излучаемого наклонными щелями.

Рупор антенны герметизируется радиопрозрачным диэлектриком 6, изготовленным из стеклопластика с проволоочной сеткой для компенсации отраженной от диэлектрика СВЧ-энергии.

Максимум диаграммы направленности в горизонтальной плоскости отклоняется от нормали к раскрыву антенны приблизительно на 6° в сторону поглощающего клина.

Для регулировки в заводских условиях диаграммы направленности в горизонтальной плоскости имеются регулировочные винты 1, которые фиксируются гайками после регулировки. Во время эксплуатации НРЛС регулировка диаграммы направленности антенны не производится.

В моделях НРЛС (например, НРЛС «Печора-2» [12]) используется *линзово-щелевая* антенна. Она состоит из слабо направленного облучателя 1 (см. рис.5.4) и линзы 2 (плосковыпуклой «а» или плосковогнутой «б»).



Линза изготавливается из диэлектрического радиопрозрачного материала (полистирол, фторопласт). С помощью линзы электромагнитная волна облучателя преобразуется в плоскую волну, формирующую заданную диаграмму направленности.

Рис.5.4.

Размер D определяет угол раскрыва 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.

Угловая скорость вращения антенн Ω обычно составляет 16...24 об/мин, а на быстроходных судах от 30 до 48 об/мин.

Например, в НРЛС серий FAR21x7, FAR 28x7 ($x=1,2,3$) фирмы Furuno имеется два стандарта угловой скорости: для X – диапазона -24 об/мин и 42 об/мин, а для S-диапазона - 24 об/мин и 45 об/мин; Simrad RA 41,42 - 24 об/мин и 42 об/мин; «Bridge Master» серии E фирмы Деcca - 28 об/мин и 45 об/мин.

Лекция №10

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 ферритовые (ФАП) и коммутационные или ответвительные (ОАП) [1,9,28].

Схема антенного переключателя типа ФАП показана на рис. 5.5.

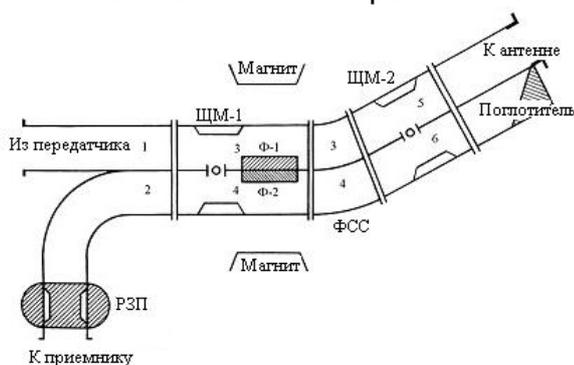


Рис.5.5. Ферритовый антенный переключатель

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.

Ферритовый антенный переключатель (рис.5.5) состоит из двух симметричных щелевых мостов ЩМ-1 и ЩМ-2 и двухканальной волноводной секции с помещенными внутри каждого канала ферритами Φ -1, Φ -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 Φ -2 создает отставание фазы электромагнитного поля на 90° по отношению к фазе поля, проходящего через феррит Φ -1. При распространении же энергии со стороны антенны и поглощающей нагрузки феррит Φ -1 создает отставание поля по фазе на 90° по отношению к фазе поля, проходящего через феррит Φ -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 Φ -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 Φ -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.

В некоторых НРЛС, например НРЛС серии „Наяда”, в качестве антенного переключателя применяется фазовый ферритовый циркулятор [27].

Циркулятором называется устройство, имеющее несколько плеч и переключающее мощность электромагнитных колебаний с одного плеча на другое [23].

В нем используются ферриты, представляющие собой магнитокерамические материалы, состоящие в основном из окислов металлов. Они отличаются от обычных металлических магнитных материалов отсутствием электрической проводимости и незначительными потерями энергии в СВЧ диапазоне.

Взаимодействие электромагнитного поля сигнала с электронами феррита управляется с помощью внешнего магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Это взаимодействие вызывает изменение магнитной проницаемости феррита и проявляется, например, в таких невзаимных свойствах, как вращение плоскости поляризации электромагнитного поля, сдвига фазы, изменение характеристики электромагнитного поля в зависимости от направления распространения энергии через феррит и т. п.

Фазовый ферритовый циркулятор представляет собой симметричное под углом 120° разветвление волноводной линии, в центре которого находится ферритовый цилиндр, размещенный в диэлектрической втулке (рис.5.6) [28]. При работе под действием поля постоянного магнита электроны феррита закручиваются, как показано окружностью со стрелками.



Рис.5.6. Фазовый ферритовый циркулятор

Электромагнитная энергия СВЧ, сформированная магнетроном, из передатчика, поступающая в плечо 1 разветвления, будет распространяться в направлении плеча 2 (к антенне) и не будет попадать в плечо 3. Объясняется это тем, что в направлении плеча 2 вектор поля вращается навстречу электронам, и колебания здесь проходят без ослабления. В направлении же плеча 3 электроны и магнитное поле вращаются в одном направлении, и энергия поглощается.

Если сигнал из антенны (отраженный сигнал от цели) в разветвление поступает через плечо 2, то по этой же причине он будет распространяться в направлении плеча 3 (к входу приемника) и не попадает в плечо 1, которое оказывается изолированным (развязанным) от плеча 2.

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.5.7.

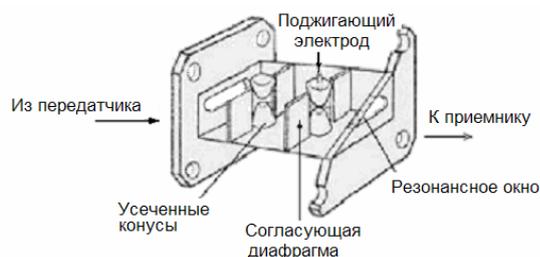


Рис.5.7. Типичная конструкция РЗП

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]. 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.

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 конструктивно 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 (см. рис.5.8).

Основой его являются два элемента: волноводно-коаксиальный переход 1 и бесконтактное дроссельное соединение коаксиальной части



(вращающееся сочленение) 2. Коаксиальная часть перехода 3 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* 4. Размеры, конфигурация и место установки зонда в волноводе выбраны так, чтобы обеспечивалось наилучшее согласование структуры электромагнитных полей обеих частей перехода, что сопровождается минимальными потерями,

Рис.5.8. Вращающийся переход отражениями и быстрым затуханием возбуждающихся на переходе волн высших порядков. (Согласование достигается с помощью плунжера 5).

В конструкции бесконтактного соединения внешних проводников коаксиальной части используется 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.

Электромагнитные колебания от генератора СВЧ-энергии, распространяющиеся в прямоугольном волноводе, возбуждают симметричный тип колебаний в отрезке коаксиального волновода 2. Центральный проводник коаксиального отрезка является возбуждающим штырем (зондом) 3 в волноводе, питающем щелевую антенну. Так как ось штыря совпадает с осью вращения, то условия возбуждения при вращении антенны не изменяются. Шарообразный конец

зонда 3 обеспечивает нормальную работу вращающегося перехода в рабочем диапазоне частот.

Для настройки вращающегося перехода служит плунжер 1, с помощью которого добиваются наилучшего согласования между неподвижной и вращающейся частями перехода, что соответствует максимальному коэффициенту передачи мощности.

Лекция №11

6. Приемник НРЛС и принцип его работы

Радиоприемные устройства НРЛС супергетеродинного типа предназначены для выделения, усиления и преобразования энергии радиоволн, необходимых для нормальной работы индикаторного устройства.

Особенностями приемников радиолокационных станций являются усиление в широкой полосе частот, обусловленной приемом коротких импульсов, большими уходами частоты гетеродина, неточностями настройки элементов схемы и влиянием различных дестабилизирующих факторов. Общее усиление приемника складывается из усиления его отдельных каскадов, причем основное усиление в приемниках супергетеродинного типа получается в каскадах усилителя промежуточной частоты и видеоусилителя.

Динамический диапазон приемника должен быть таким, чтобы можно было обнаруживать наиболее слабые сигналы и не перегружаться при приеме самых сильных отраженных сигналов.

Таким образом, основными характеристиками радиоприемников РЛС являются: чувствительность, коэффициент шума, избирательность, полоса пропускания, коэффициент усиления, динамический диапазон, выходная мощность и качество воспроизведения сигналов.

Основные конструктивные характеристики: механическая прочность, влагостойкость, устойчивость к колебаниям температуры, габаритные размеры.

Упрощенная функциональная схема приемника НРЛС с блоком автоматической подстройки частоты (АПЧ) приведена на рис.6.1.

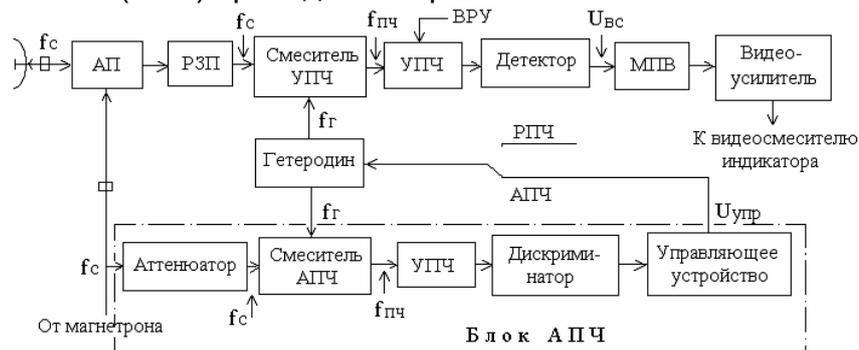


Рис.6.1. Упрощенная функциональная схема приемника НРЛС

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 к входу приемника.

РЗП 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 сигналов, принимаемых от объектов.

Детекторный каскад преобразует импульсы, заполненные промежуточной частотой, в видеоимпульсы, которые усиливаются видеоусилителем и затем 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_r) 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 полупроводниковые генераторы СВЧ, например - генератор с применением диода 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.

Полупроводниковые генераторы СВЧ.

Полупроводниковый генератор СВЧ состоит из колебательного контура — объемного резонатора того или иного типа и активного элемента. В диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн в качестве активных элементов применяют лавинно-пролетные диоды (ЛПД) и диоды с объемным эффектом (ДОЭ).

Полупроводниковые генераторы СВЧ отличаются экономичностью питания, большим сроком службы, малыми габаритами и массой [23,28].

Достаточно широкое распространение в судовых навигационных РЛС получили генераторы с использованием диодов Ганна (ГДГ). Диод Ганна содержит тонкую пластинку из арсенида галлия размером 0,1X0.15 мм, на обе поверхности, которой нанесены невыпрямляющие металлические (омические) контакты. Электрод, на который подается положительное напряжение — анод, а отрицательное — катод [23].

В отличие от диодов с *p-n* - переходом в ГДГ энергия постоянного тока преобразуется в энергию колебаний СВЧ во всем объеме полупроводника. Когда приложенное напряжение к полупроводнику оказывается больше определенного критического значения, 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, т. е. имеет импульсный характер. Первая гармоника импульсного тока возбуждает колебания в объемном резонаторе. Конструктивно ГДГ во многом сходны с генераторами на ЛПД.

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 путем изменения напряжения смещения дополнительного варикапа (диода специального типа), при котором изменяется его емкость. Диапазон электрической перестройки частоты генератора равен примерно 15%, а механической — значительно выше. Напряжение питания 6...12 В.

Существуют генераторы на диодах Ганна в диапазоне частот от 1 до 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 [23].

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 $f_{пч} = f_c - f_r$, 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 волноводе 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.

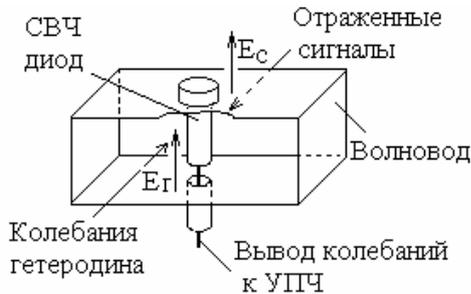


Рис.6.2. Смеситель с использованием одного диода

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. 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 ($VD1, VD2$).

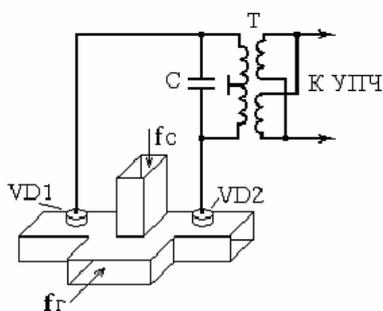


Рис.6.3. Балансная схема преобразователя

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 $\varphi_{пч1} = \varphi_c - \varphi_r$,

а ток через диод $VD2$ — фазу $\varphi_{пч2} = \varphi_c + 180^\circ - \varphi_r = \varphi_{пч1} + 180^\circ$.

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.

В настоящее время в судовых РЛС широко применяется балансная схема преобразования.

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

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

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. На малых шкалах, при малой длительности излучаемых СВЧ импульсов, полоса пропускания каскадов УПЧ должна расширяться. Достигается это путем подключения параллельно контурам сопротивлений. Этим самым уменьшается добротность колебательных контуров, а значит – расширяется полоса пропускания.

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

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

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

$$\Delta f_{\text{пч}} = (3 \div 5) / \tau_{\text{и}} .$$

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.

Лекция №12

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 $U_{\text{упр.}}$, 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,

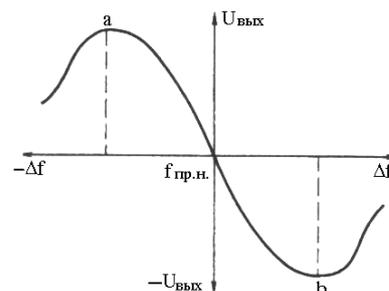
$$\Delta f = f_{\text{пр}} - f_{\text{пр.н.}},$$

где $f_{\text{пр.н.}}$ — номинальное значение промежуточной частоты приемника.

В качестве дискриминаторов или частотных различителей применяют частотные детекторы.

Зависимость выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ 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.



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

Рис.6.4. Статическая характеристика дискриминатора

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 $U_{\text{упр.}}$ 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 должны быть больше периода $T_{\text{и}}$ следования импульсов.

6.4. Временная автоматическая регулировка усиления

Эффективным средством борьбы с помехами, возникающие от морского волнения, а также от близкорасположенных объектов, является временная автоматическая регулировка усиления (ВАРУ). (Уровень „автоматической” регулировки определяется вручную самим оператором).

ВАРУ необходима для выравнивания интенсивности сигналов от объектов, расположенных на разных расстояниях от антенны НРЛС, тем самым, обеспечивая 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 объектов. 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.

ВАРУ формирует управляющее напряжение (напряжение смещения в каскадах

УПЧ) так, чтобы усиление приемника возрастало с увеличением дистанции до объекта. Практически управляющее напряжение ВАРУ имеет экспоненциальную характеристику.

Принцип формирования напряжения ВАРУ заключается в том, что одновременно с излучением зондирующего СВЧ импульса (рис.6.5), автоматически включается схема ВАРУ приемника, которая формирует импульс, состоящий из прямоугольного импульса (длительность которого равна длительности зондирующего импульса $\tau_{зи}$) и экспоненциальной составляющей. Прямоугольная составляющая сигнала ВАРУ 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).

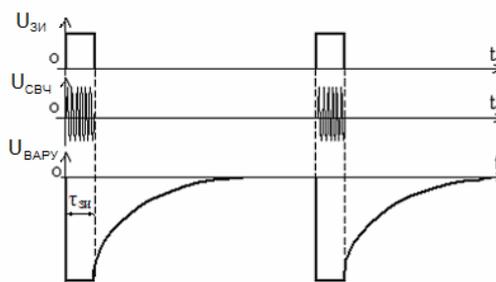


Рис.6.5.

Оператор с помощью схемы ВАРУ, изменяя величину потенциометра, 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 ВАРУ является возможность устранения помех, вызываемых отражением от взволнованной поверхности моря, которые постепенно убывают с расстоянием и являются однородными для различных направлений.

6.5. Малая постоянная времени

На работу НРЛС вредное влияние оказывают сигналы, отраженные от дождя либо мокрого снега, которые создают достаточно мощное отражение и поэтому создают интенсивную засветку на экране индикатора. Эхо-сигналы от осадков создают на индикаторе засветку в виде вуалеобразной, мягко окаймленной области, чем-то напоминающей вату, интенсивность которой зависит от интенсивности осадков (см. ниже рис.6.7,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 и для увеличения разрешающей способности по дальности, а также для того, чтобы получить более

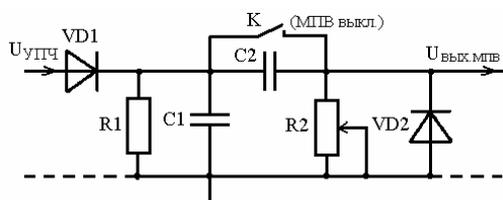


Рис.6.6.Схема дифференцирующей цепочки

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.6.6).

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 (укороченными) положительной и отрицательной полярности. Длительность этих импульсов тем меньше, чем меньше установлена величина сопротивления резистора $R2$ (предусмотрена ее регулировка с панели управления).

Диод $VD2$, подключенный параллельно резистору $R2$, срезает импульсы отрицательной полярности, а положительные видеоимпульсы создают на экране индикатора изображение.

На рис. 6.7 показаны временные диаграммы напряжений на входе 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).

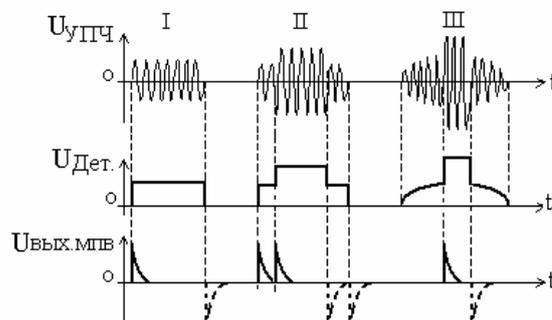


Рис.6.7.

Ситуация II на рис.6.7 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 на промежуточной частоте, то, подвергая дифференцированию суммарный видеоимпульс, на выходе цепочки МПВ получают два остrokонечных 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.6.7 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 оператор НРЛС включают по мере надобности.

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 усиления, 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 $U_{Вых}$ 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, флуктуации 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 $U_{\text{ВЫХ}}$ в зависимости от входного $U_{\text{ВХ}}$ должен иметь следующий вид:

$$\frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dU_{\text{ВХ}}} = \frac{a}{U_{\text{ВХ}}},$$

где: a — коэффициент пропорциональности.

После интегрирования этого выражения получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = a \int \frac{dU_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = a \ln U_{\text{ВХ}} + C_0.$$

Если обозначить через $U_{\text{Н}}$ и $k_{\text{Н}}$ соответственно входное напряжение и коэффициент усиления каскада, соответствующие началу логарифмического участка амплитудной характеристики, как показано на рис. 6.8, то

$$U_{\text{ВЫХ.Н}} = U_{\text{Н}} \cdot k_{\text{Н}} = a \ln U_{\text{Н}} + C_0. \text{ Отсюда } - C_0 = U_{\text{Н}} \cdot k_{\text{Н}} - a \ln U_{\text{Н}}.$$

Полагая коэффициент $a = U_{\text{Н}} \cdot k_{\text{Н}} = \text{const}$, имеем

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{Н}} \cdot k_{\text{Н}} \left(\ln \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{Н}}} + 1 \right).$$

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

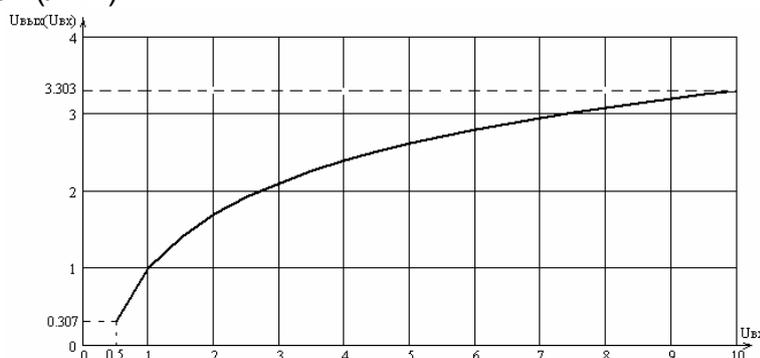


Рис.6.8. Пример ЛАХ

Принцип получения ЛАХ (см. рис. 6.9) заключается в следующем:

- все каскады должны быть одинаковы;
- амплитудные характеристики каскадов до насыщения линейны;
- при насыщении $U_{\text{ВЫХ}}$ не зависит от $U_{\text{ВХ}}$ каскада;
- суммирование осуществляется линейно.

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

Возможны различные схемы, обеспечивающие получение логарифмической характеристики в УПЧ. Наибольшее распространение получила схема логарифмического УПЧ с последовательным детектированием сигналов отдельных каскадов усиления и их суммированием (рис.6.9) [24,28].

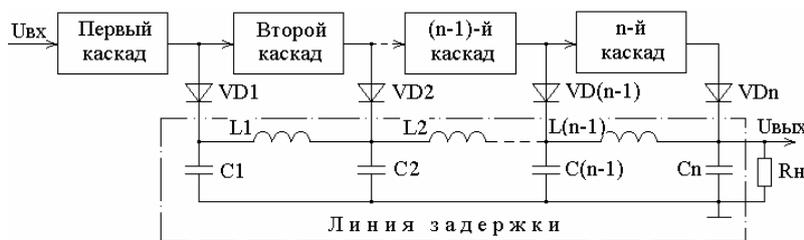


Рис. 6.9. Упрощенная схема логарифмического УПЧ

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

Линия задержки позволяет всем импульсам с выхода диодов $VD_1—VD_n$ приходиться 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. 6.8), 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 собственным шумом приемника.

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

Для более эффективного подавления помех от моря также применяется ВАРУ, которая действует 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.

Лекция №13

7. Индикаторы кругового обзора НРЛС

Индикатор кругового обзора (ИКО) предназначен для:

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

ИКО является окончательным звеном НРЛС. Информацию с ИКО «снимает» визуально оператор – штурман. 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 ИКО можно судить о навигационной обстановке.

ИКО классифицируется по следующим признакам:

- по типу используемых воспроизводящих информацию устройств;
- по назначению НРЛС;
- по методу получения отметки цели;
- по типу применяемой развертки.

По типу используемых воспроизводящих устройств – электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с магнитным управлением электронного луча (CRT - **C**athode **R**ay **T**ube), а в новых разработках НРЛС – жидкокристаллические (ЖК) дисплеи (LCD-мониторы - **L**iquid **C**rystal **D**isplay)

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.

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.

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

По методу получения отметки цели – индикаторы с амплитудной или яркостной отметкой.

В индикаторах судовых РЛС применяют ЭЛТ с длительным послесвечением экрана, электромагнитным управлением и фокусировкой электронного потока (луча), радиально-круговой разверткой. Модуляция луча яркостная, то есть яркость пятна на экране ЭЛТ изменяется в соответствии с амплитудой поступающих сигналов [1,4,9,10].

Работа ЭЛТ требует определенных питающих 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 сфокусированного 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 $0^\circ - 180^\circ$ и $90^\circ - 270^\circ$ 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 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 ультрафиолетового излучения ЭЛТ. 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 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.

Упрощенная функциональная схема ИКО приведена на рис.7.1.

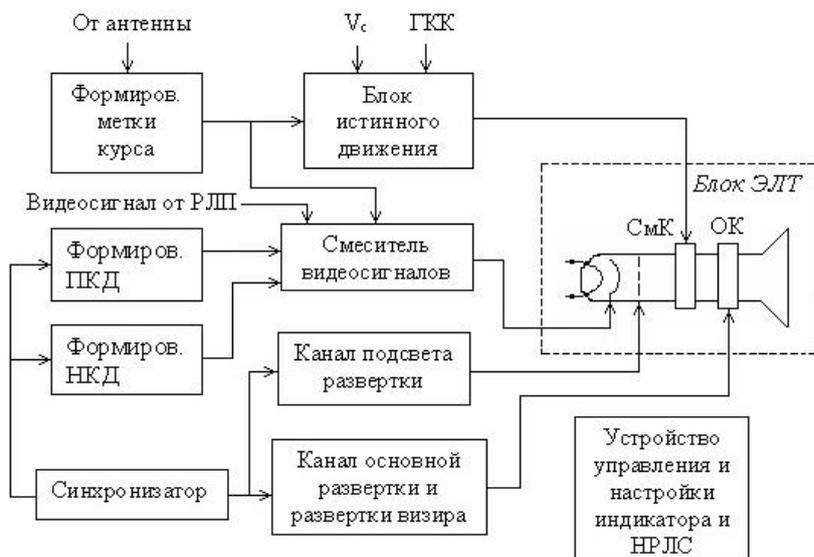


Рис. 7.1. Функциональная схема индикатора кругового обзора

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”).

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 отклоняющейся 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. Формирование 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 амплитуда импульса развертки должна также изменяться (нарастать) с *постоянной* скоростью. Время нарастания до определенной, конечной амплитуды (это время определяет время прямого хода развертки) 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 (см. рис.7.2).

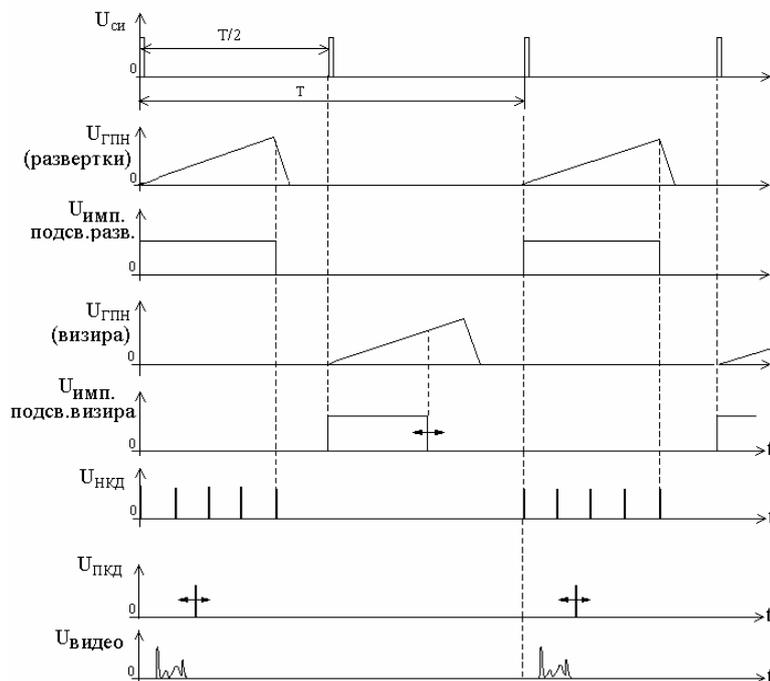


Рис.7.2. Основные временные соотношения электрических процессов в индикаторе

Отклонение луча развертки на воспроизводящем устройстве должно происходить *синхронно и синфазно* с вращением антенны, обеспечивая тем самым 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 же по «Северу» необходима связь, как с антенной, так и с гирокомпасом, причем данные гирокомпаса должны вызвать 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.7.1.

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

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.

Лекция №14

7.1.1. Формирование развертки с помощью двух неподвижных отклоняющих катушки

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.7.3).

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 $-W$. Поэтому токи в катушках соответственно равны:

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

При пропускании через ортогональные катушки пилообразных токов, промодулированных вращением антенны по синусоидальному и косинусоидальному законам, вектор результирующего магнитного поля $\vec{\Phi}_p$, являющийся суммой

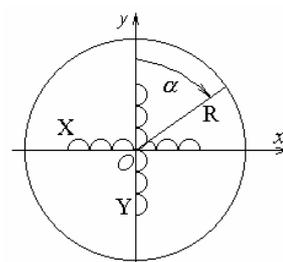


Рис.7.3.

магнитных потоков в катушках X и Y ($\vec{\Phi}_p = \vec{\Phi}_X + \vec{\Phi}_Y$), будет вращаться с постоянной частотой, равной частоте вращения антенны.

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-01”) [7].

Упрощенная схема реализации расщепления фазы огибающей вращения антенны после генератора развертки приведена на рис.7.4.

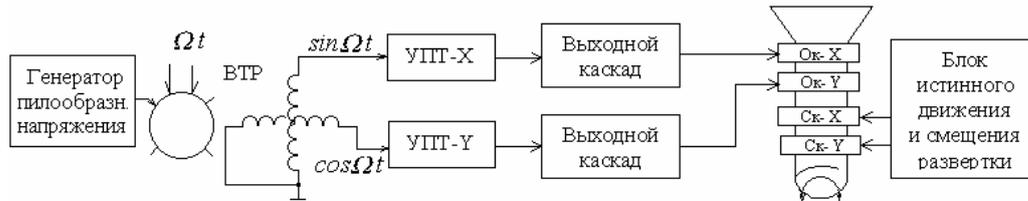


Рис.7.4.

На рисунке соответственно обозначено: ВТР – вращающийся трансформатор, ротор которого непосредственно связан с осью антенны; УПТ-Х, УПТ-У – усилители постоянного тока по осям X и Y ; 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-01”) показан на рис.7.5.

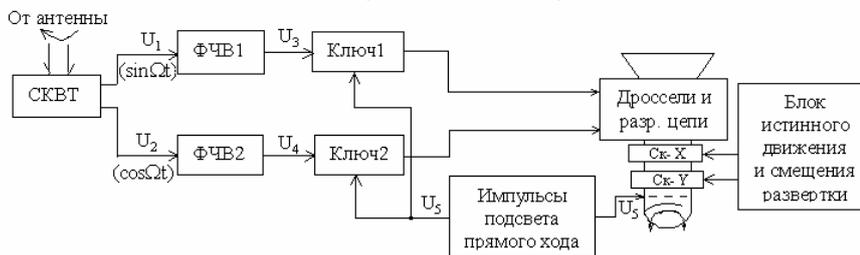


Рис.7.5.

Лекция №15

7.1.2. Цифровая развертка НРЛС

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.7.6) [1,12].

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.

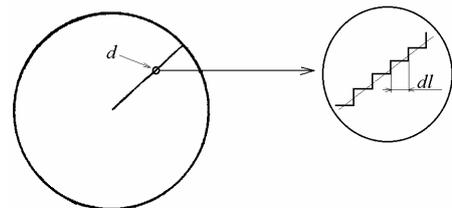


Рис.7.6

Упрощенная функциональная схема генератора цифровой развертки приведена на рис.7.7.

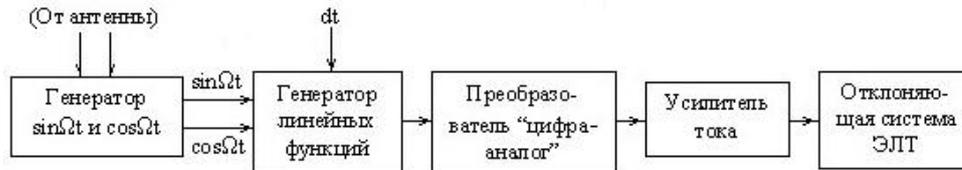


Рис.7.7.

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 масштаб 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.

Они 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.7.8.



Рис.7.8.

На рис.7.9 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 $+E_k \rightarrow R3 \rightarrow L1 \rightarrow$ корпус.

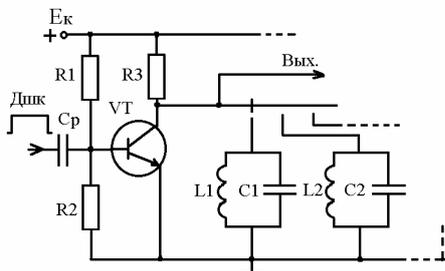


Рис.7.9.

Одновременно 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.7.10).

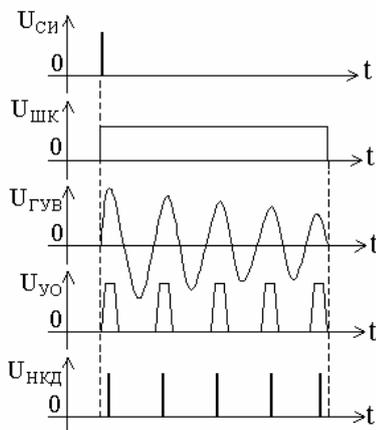


Рис.7.10.

Далее полученные импульсы поступают в выходной каскад, в котором происходит формирование кратковременных импульсов длительностью 0,05...0,07мкс, 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: $T = \frac{1}{323230} = 3,09 \mu\text{с}$, 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.7.11.

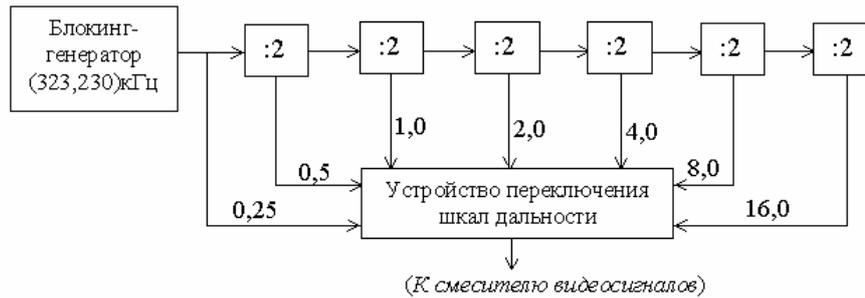


Рис.7.11.

(В качестве делителей выходной частоты блокинг-генератора используются триггеры. Значение цифр 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 $\Delta D=0,25$ мили 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.7.12.

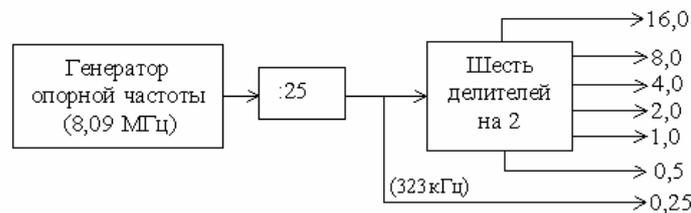


Рис.7.12.

Лекция №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, тем самым создается на экране индикатора светящаяся яркостная отметка, 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.

Принцип формирования ПКД *компараторный* способом (методом сравнения напряжений) приведен на схеме рис.7.13 и объясняется временными диаграммами (рис.7.14).

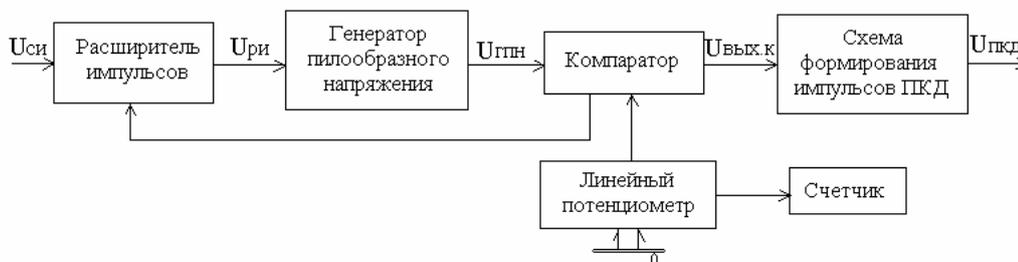


Рис.7.13. Функциональная схема формирования ПКД компараторным способом

Импульс синхронизации запускает расширитель импульсов, собранный по схеме триггера. Триггер управляет работой генератора пилообразного напряжения (ГПН), выполненного по схеме с зарядной емкостью.

Длительность импульсов $U_{ри}$ определяет предел изменения задержки в данном устройстве (см. рис. 7.14).

С выхода ГПН линейно изменяющееся напряжение поступает на сравнивающее устройство — компаратор. На другой вход компаратора подается постоянное опорное напряжение $U_о$, снимаемое с линейного потенциометра дальности. Величина этого напряжения устанавливается органом управления, определяющим положение отметки ПКД на экране индикатора (в разных моделях НРЛС он имеет свое название).

Компаратор сравнивает величины пилообразного и опорного напряжений и в момент равенства $U_{гпн} = U_о$ выдает на своем выходе импульс, который запускает

выходной блокинг-генератор, формирующий импульс ПКД. Кроме того, импульс компаратора подается на триггер, возвращая его в исходное состояние, этим самым подготавливая схему для приема следующего импульса запуска.

Время задержки визира дальности относительно начала развертки (например, $t_{1\text{зад}}$, $t_{2\text{зад}}$) 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 дальномера и выбранного неподвижного кольца дальности совпадать не будут. Если отметку подвижного дальномера с помощью специальных регулировочных устройств совместить с отметкой выбранного неподвижного кольца дальности, то показания дальномера 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.7.15 и состоит из таких основных блоков:

- а) блок формирования опорных тактовых импульсов;

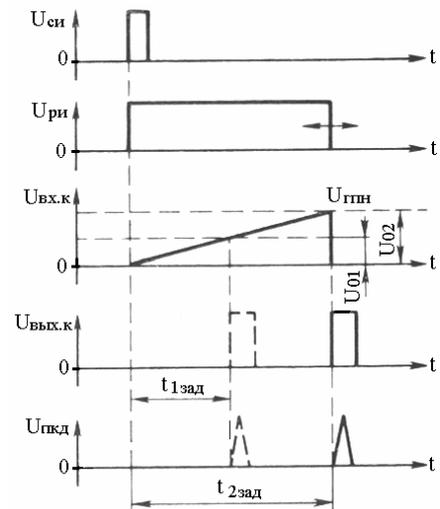


Рис.7.14.

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

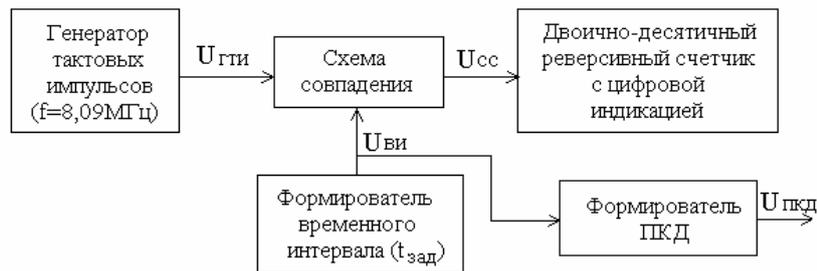


Рис.7.15. Функциональная схема формирования ПКД цифровым способом

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

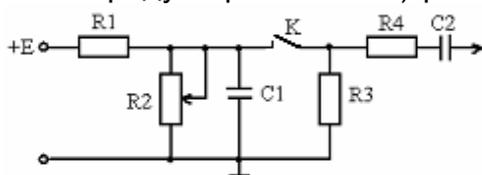
С выхода схемы совпадения последовательность импульсов ($U_{сс}$) подается в блок счетчика дистанции с цифровым отсчетом, на индикаторе которого отображается дистанция до цели с точностью отсчета, определяемой частотой тактовых импульсов (в данном примере - 0,01 мили). Одновременно фронтом импульса временного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

7.3. Формирование отметки курса

Практически все современные НРЛС обладают двумя видами ориентации – относительно 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.7.16 в качестве примера приведена одна из схем, с помощью которой формируется отметка курса.

Принцип работы схемы заключается в следующем. Пока контакт “К” (он расположен в районе редуктора антенны) разомкнут, от источника питания +Е через резистор



R1 происходит заряд емкости C1. В момент, когда ось диаграммы направленности вращающейся антенны совпадает с диаметральной плоскостью судна, контакт “К” замыкается и конденсатор C1 разряжается на резистор R3.

Отрицательный скачок этого напряжения через резистор R4 и разделительный конденсатор

Рис.7.22. Схема формирования отметки курса

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.

Лекция №17

8. 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 *per. t* 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

$$\Delta f = (9500 - 9320) \text{ МГц} = 180 \text{ МГц}.$$

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 (качение) 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—120с). 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.

Принцип работы РМО с качанием частоты поясняется схемой, приведенной на рис. 8.1.

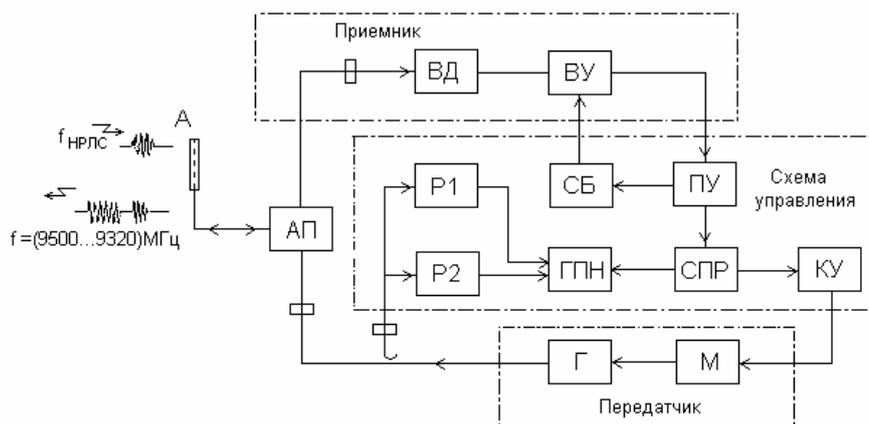


Рис. 8.1. Структурная схема РМО с качающейся частотой ответа

Зондирующие импульсы судовой РЛС через всенаправленную антенну *A*, 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 *M* и СВЧ-генератора перестраиваемой частоты *G*. Далее ответные СВЧ-сигналы через всенаправленную антенну *A* 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

$p-n$ - 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 *P1* и *P2*, 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.

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:

- А — ближнего действия (до 10 миль);
- В — 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. 8.1).

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” эхосигналы;

- 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 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.

8.1. 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 мкс, а при получении сигнала от НРЛС время сканирования по диапазону увеличивается до $t_c = 7,5$ мкс. Этот процесс повторяется двенадцать законченных циклов, что в целом составляет $t_{общ} = 95$ мкс (см. рис.8.2).

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.

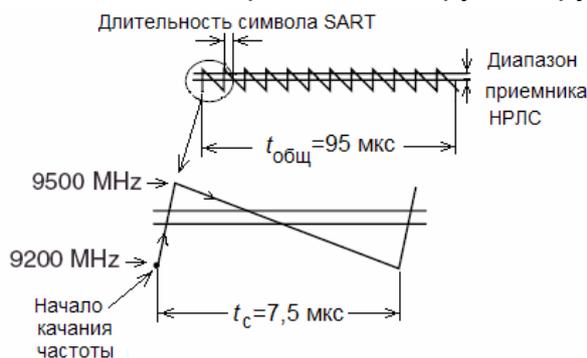


Рис.8.2. Временной режим работы SART

При этом отметка, ближайшая к центру развертки, будет указывать на расстояние до объекта, а остальные метки будут направлены от объекта к периметру ЭЛТ.

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.

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.

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 кВт, 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 кГц. (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°C до $+55^{\circ}\text{C}$;

- 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.

8.1.1. 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.

Рис.8.5. РЛО фирмы
McMurdo (Великобритания)

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 упростить обнаружение в условиях отражений, и подтвердят, что РЛО находится около судна.

4. Настройка НРЛС.

Чтобы увеличивать видимость РЛО в условиях отражений, ручная подстройка частоты НРЛС может быть загрублена для уменьшения отражений. НРЛС с автоматической подстройкой частоты не позволяют выполнить загрузление.

5. Усиление.

Для максимальной дальности обнаружения РЛО должна использоваться нормальная установка усиления для большой дальности, с видимой зернистостью фонового шума.

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 НРЛС.

Лекция №18

9. 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 40 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 **Automatic Radar Plotting Aid**). 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.

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 в СССР была разработана 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» [12,16]. 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»).

В настоящее время на многих судах морского флота установлены средства автоматической радиолокационной прокладки, разработанные и изготавливаемые различными фирмами: «Bridge Master» (английской фирмы «Decca»), «Digiplot» (фирмы «Iotron», США), «CAS» (фирмы «Sperry», США), фирмы Krupp - Atlas Elektronik (Германия) [17], Furuno, JRC (Япония) [31,34], «Ряд», «Лиман», «Горизонт» (Россия) и ряд других средств [32].

9.1. 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.

9.2. 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.9.1) рассмотреть устройство и принцип работы САРП.

Большинство САРП состоит из следующих приборов и устройств: датчиков информации, сопрягающих устройств и непосредственно индикатора ситуаций.

В качестве *датчиков информации* в САРП применяются одно- или двух - диапазонные судовые РЛС, лаг и гирокомпас.

Двухдиапазонная РЛС состоит (см. рис.9.1) из антенн 3-х и 10-ти

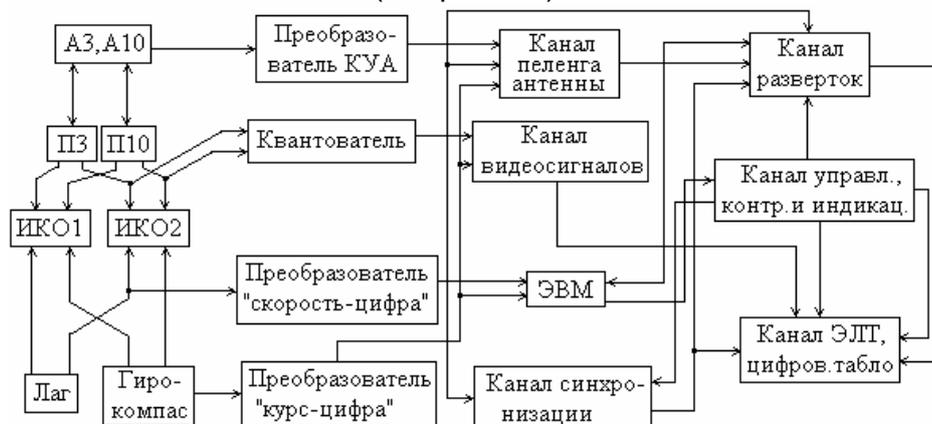


Рис.9.1. Упрощенная обобщенная функциональная схема САРП

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 создания необходимых режимов ориентации изображения и режимов движения.

От РЛС поступают следующие данные: текущее значение углового положения антенны в пространстве (КУА), видеосигналы об окружающей обстановке (ВС) и импульсы синхронизации (ИС). От лага и гирокомпаса поступает соответственно информация о скорости V_c , и курсе K_c 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 о скорости и гирокомпаса 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 САРП, кроме АРП, предусмотрена возможность ручного ввода данных о скорости и курсе судна.

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, получаемых от датчиков информации, в дискретную для ее дальнейшего кодирования, преобразования и ввода в цифровой процессор и другие тракты САРП.

9.2.1. Назначение сопрягающих устройств

Преобразователь курсового угла антенны (КУА) предназначен для преобразования углового положения антенны в пропорциональную последовательность импульсов или в кодовую последовательность. Конструктивно 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 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 скорости — цифра (ПСЦ) и курс — цифра (ПКЦ) служат для преобразования аналоговых значений скорости и курса собственного судна в цифровую форму. В некоторых типах САРП здесь же кодируется информация для ее дальнейшего использования.

Если на 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 (ИВК) 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, 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 САРП 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.9.1) 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 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 значительно отличаться от приведенной выше упрощенной обобщенной схемы как по схемному так и конструктивному решению построения различных трактов.

Для превращения НРЛС в САРП применяются радарпроцессоры (РП).

Радарпроцессоры (РП) предназначены для приема аналогового видеосигнала от радиолокационной станции (РЛС) и его дальнейшей цифровой обработки, обеспечивающей автоматическое обнаружение, автозахват и автосопровождение целей, вычисление и передачу в ЭВМ в реальном времени информации о координатах и параметрах движения целей, а также формирование

радиолокационного изображения для отображения совместно с электронной картой [40].

Конструктивно РП представляет собой одноплатный модуль, в котором, в зависимости от варианта исполнения, загрузка программного обеспечения и взаимодействие с управляющей ЭВМ может осуществляться с помощью различных интерфейсов. РП функционирует независимо от вычислительных ресурсов и памяти ЭВМ.

Синхронизируется РП от синхроимпульса НРЛС. Видеосигнал с выхода приемника РП воспринимает любой полярности в диапазоне от 0 до 3.0 В с шириной спектра 15...20 МГц. Максимальная скорость вращения антенны, с которой работает РП – до 60 об/мин.

С помощью программного обеспечения радарпроцессор обеспечивает решения задач аналого-цифрового преобразования, подавления асинхронных помех, компенсации помех от моря, обнаружения целей, определения координат целей и параметров их движения, автоматического сопровождения целей, автоматической нумерации целей, ведение электронного журнала, решения задач расхождения, преобразования координат, стабилизации и компенсации искажений, индикаторного процесса и т.п.

Например, плата радарпроцессора, разработанная компанией «Транзас» устанавливается в стандартный компьютер (с минимальными требованиями Pentium 200 MMX, RAM 64Mb), стыкуется с любыми типами радаров, в том числе и аналоговыми [41]. Плата обрабатывает радарный видеосигнал в цифровой, что позволяет наложить радарную картинку на электронную карту (см. рис.10.2), выделяет и сопровождает до 500 целей и записывает на жесткий диск всю информацию, включая сырую радарную картинку с каждого оборота антенны в течение месяца непрерывной работы.

Наложение радарной картинки позволяет одним взглядом сравнить радарное отражение от берегов, буев, маяков и других объектов с электронной картой. Если радарное изображение совпадает, то можно быть уверенным в том, что GPS и гирокомпас работают без ошибок и электронная карта привязана к координатам правильно. Сравнивая визуально разницу между радарными и картографическими объектами с шириной зоны безопасного плавания, можно оценить степень опасности.

Уникальной функцией радарпроцессора «Транзас» является возможность записи и последующего воспроизведения радарной картинки в течение месяца непрерывного использования. Такая функция особенно важна для судов или береговых контрольных радарных станций, выполняющих патрульные функции, в качестве доказательства при столкновениях или других аварийных ситуациях.

Лекция №19

9.3. 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 (см. рис.9.2) [34].

(На рис.9.2 приведен пример отображения *графической* вторичной информации в САРП фирмы Furuno серии FAR 25x5 [34]).

Для отображения первичной информации в большинстве САРП применяется радиально-круговая развертка, основным недостатком которой — малая яркость свечения изображения.

В свою очередь это требует затемнения помещения или применения тубуса.



Рис.9.2. Пример отображения графической вторичной информации в САРП серии FAR 25x5

Телевизионная развертка позволяет наблюдать радиолокационный сигнал при дневном освещении, что является важным ее преимуществом. Этот тип развертки применяют во многих САРП, например - в САРП «Океан - СП», устройстве MX-1200 фирмы «Magnavox», «Krupp-Atlas 8600, 9600» фирмы «Krupp-Atlas Elektronik», фирмы Furuno, модели серий FAR 21x7, FAR 28x5, JRC – САРП JMA 5300, САРП «Bridge Master» серии E, фирмы «Decca».

На рис.9.3 приведен пример *совместного* отображения первичной и вторичной информации в САРП фирмы Furuno, модель FAR 2827 [34].

На нем, в информационных зонах отображается такая информация:

зона 1 – данные собственного судна;

зона 2 – информационные данные – температура воды, глубина, ветер и др.;

зона 3 – расширенная информация;

зона 4 – информационные данные AIS (**A**utomatic **I**dentification **S**ystem)–

цели.

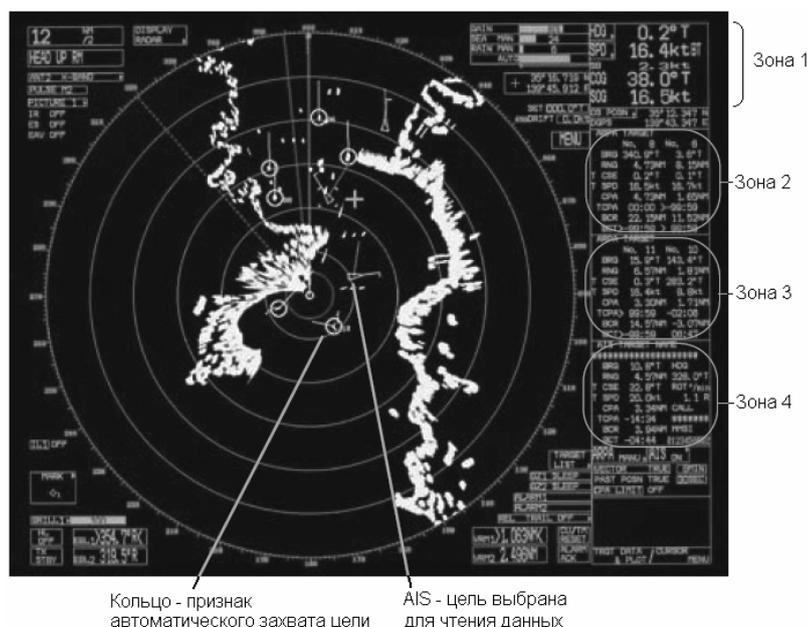


Рис.9.3. Пример отображения первичной и вторичной информации на индикаторе САРП фирмы Furuno, модель FAR 2827

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 для дальнейшего ее автосопровождения, а также для стробирования цели, цифровой формуляр которой выведен на экран ЭЛТ или табло. Подвижный маркер выполнен в виде кольца или перекрестия 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.

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_p . 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.

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 (вспыхивают), 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 «Speggy» вектор перемещения заканчивается эллипсом зоны опасности. Размеры эллипса формируются с учетом допустимого кратчайшего расстояния сближения и погрешностей определения местоположения цели.

Цифровая информация, отображающаяся на экране ИКО или табло, включает, прежде всего, цифровой формуляр цели .

Формуляр представляет собой вычисленные цифровые данные о параметрах сопровождаемого объекта :

P — пеленг на объект;

D — дальность до объекта;

параметры движения цели: $K_{ц}$ — курс цели;

$V_{ц}$ — 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 $T_{п}$, курс и скорость собственного судна.

Кроме этого, на индикаторе может отображаться различная навигационная информация: элементы движения собственного судна, радиолокационная прокладка, данные о погоде, о температуре воды и информация от других судовых навигационных датчиков указывается в определенных зонах экрана. Выбранные цели отмечаются квадратными символами на экране радара.

В некоторых радарх имеются свои, некоторые особенности в представлении информации, например - в радарх FURUNO серии FAR-21x7 имеется функция – «увеличение» [34]. Это замедленное изображение развертки в увеличенном масштабе, что запрещено требованиями IMO, но Администрация согласилась с этой особенностью, так как это увеличение производится в отдельной части экрана радара для решения некоторых специфических задач судовождения.

Суда, оборудованные AIS, отображаются на экране радара двумя символами (как цель AIS и как цель ARPA). Это возможно потому, что координаты цели AIS определяются по спутниковой системе GPS, в то же время координаты цели ARPA определяются по расстоянию и направлению на нее относительно антенны радара собственного судна. Когда оба символа находятся в пределах критерия операционного поля, символ ARPA объединяется с символом AIS. Критерии определяются различиями в дистанции, направлении, курсе, скорости и т.д.

В зоне 4 (см. рис.9.3), например, отображаются такие данные:

Статистические данные: номер MMSI, по регистрации IMO, позывные и название судна, длина, ширина и тип судна. Координаты судна, относительно места установки антенны.

Рейс судна: осадка судна, наличие опасного груза (тип груза), пункт назначения, время прибытия по указанию судовладельца.

Текущие данные: координаты судна с показателем точности обсервации, время в формате UTC, COG (курс относительно грунта), SOG (скорость относительно грунта), назначенный путевой угол, скорость поворота (по возможности), коэффициент поправок на переменные значения курса и скорости (от 2 сек. до 3мин.).

Короткие сообщения по безопасности мореплавания: в произвольной форме.

9.4. 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 целей на заданной дистанции или в заданном секторе;
- быстрой оценке степени опасности сближения с целью;
- 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.

При сопряжении САРП с АИС имеются следующие дополнительные преимущества:

- получение и отображение данных о других АИС-целях;
- отображение данных о собственном судне, передаваемых транспондером АИС;
- выключение отображения на экране данных о целях АИС и полное выключение интерфейса АИС;
- счисление местоположения целей АИС;
- отображение контура цели АИС в масштабе, сопоставимом с размерами судна.

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 задачи на расхождение 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 высокой точности и надежности решения задач путем исключения субъективных ошибок штурмана при измерении и расчетах и более полного использования информации.

Список использованной литературы к НРЛС и САРП

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. Волюнец 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.И. 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, Волынец В.Ф., О.В.Кононов и др.- 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1986.- 144 с.
13. Москвин Г.И., Суровец 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 “Мортехинформреклама”, 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.
27. Прибор ПЗ «Наяда-5». Техническое описание ЛА2.000.012 ТО. М.: 1985.- 46 с.
28. Судовая радиоэлектроника и радионавигационные приборы: Учебник для ВИМУ/ А.М.Байрашевский, А.В.Жерлаков, А.А. Ильин, Н.Т.Ничипоренко, В.Б.Сапегин. – М.: Транспорт, 1988.- 271 с.
29. Прибор А «Наяда-5». Техническое описание ЛА2.092.032 ТО. М.: 1985.- 9 с.
30. Демиденко П.П. Судовые навигационные радиолокационные станции.- Учебн. пособие. Одесса, 2004.- 163 с.
31. www.jrc.co.jp/eng
32. Использование НРЛС и САРП на морских судах. П.П. Демиденко. Мортехинформреклама. Морской транспорт. Серия «Судовождение, связь и безопасность мореплавания». Экспресс-информация, вып.8(363), 1999, с.14-24.
33. <http://itc.ua/monitors.phtml>
34. www.furuno.co.jp/en
35. С.Чандрасекар. Жидкие кристаллы: Пер. с англ. Л.Г.Шалтыко. Под. ред. И.Г.Чистякова. М.: Мир, 1980.-341 с.

36. В.Э.Фигурнов. IBM PC для пользователя: 6-е изд. перераб. и доп.- М.:ИНФРА, 1995.- 432 с.
37. А.В.Петроченков. Hardware - компьютер и периферия. М.: ОАзт «Манускрипт», 1995.-112 с.
38. Д. Чеканов. LCD мониторы по версии 2002 года./www.3dnews.ru, 2002.
39. К.Богачев. Внутрь матрицы – обзор жидкокристаллических мониторов.«Hard &Soft». №9,2007.
40. www.nprame.ru.
- 41.www.zora.ru

Лекция №20

Радионавигационные системы (РНС) предназначены для определения навигационных параметров (координатно-временных составляющих вектора состояния) судна, необходимых для обеспечения судовождения по выбранному (заданному) пути.

Для определения навигационных параметров судна, прежде всего, важно знать координаты центра массы судна, которые обычно обозначаются в трехмерной координатной системе как X, Y, Z . В большинстве случаев ограничиваются двумя координатами X и Y на поверхности Земли; частными видами этих координат являются географические, прямоугольные, ортодромические (маршрутные), дальномерные, разностно-дальномерные (гиперболические), угломерно-дальномерные и др.

Навигационным параметром судна является и текущее время. С 1900 г. радио используется для определения и контроля времени относительно согласованного международными организациями начального момента.

В состав РНС входит три функционально взаимосвязанных комплекса аппаратуры.

Первый комплекс - радиопередающие устройства с передающими антеннами, установленными в точках с известными координатами x_i, y_i, z_i или на поверхности Земли, или на искусственных спутниках Земли (ИСЗ). Излучатели одной системы могут находиться на различных удалениях друг от друга: например, в фазовых РНС станции устанавливаются на расстояниях друг от друга от 100 до 180 км, в импульсно-фазовых РНС – порядка 1-2 тыс. км, а в РНС с ИСЗ на орбитах высотой 20 тыс. км от поверхности Земли - расстояния между излучателями еще более значительны.

Второй комплекс - бортовая аппаратура, установленная на потребителях (судах и других навигационных объектах). Бортовая аппаратура (приемоиндикаторы) измеряет параметры принимаемых сигналов (первичная обработка сигналов) и с помощью специальных карт или вычислителей определяет навигационные параметры судна (на базе вторичной обработки сигналов РНС).

Третий комплекс — аппаратура управления и синхронизации передающих станций; этот комплекс может включать и контрольно-измерительные пункты.

Радиоканал между точкой формирования излучаемого сигнала и точкой его приема и обработки содержит три последовательно соединенных звена - тракта.

Передающий тракт включает опорный генератор, хранитель времени, модулятор, радиопередатчик с передающей антенной, размещаемой в точке с известными координатами x_i, y_i, z_i .

Тракт распространения радиоволн - среда между передающей и приемной антеннами.

Приемоизмерительный тракт включает приемную антенну в точке с координатами X, Y, Z , радиоприемник, демодулятор, бортовой хранитель времени, устройство первичной и вторичной обработки сигналов.

Следует иметь в виду, что как бы ни были совершенны схмотехнические и технологические решения, используемые в радиоаппаратуре, предельные возможности улучшения характеристик радиотехнических систем определяются влиянием условий распространения радиоволн.

В настоящем конспекте лекций рассматриваются вопросы назначения, особенности построения и классификация радионавигационных систем.

Рассматриваются принципы построения фазовых, импульсно-фазовых РНС, а также РНС с использованием искусственных спутников Земли.

Рассматриваются их точностные характеристики и факторы, влияющие на них.

Судовые радионавигационные системы

1. Назначение и особенности радионавигационных систем

Радионавигация – это вождение движущихся объектов (судов, летательных аппаратов) с использованием радиотехнических систем.

В судовождении много столетий основное применение имели астрономические и другие навигационные приборы, а также визуальная ориентировка наблюдения. Однако низкие точности вождения и зависимость определения места судна от погодных и других факторов ограничивали возможность флота и, особенно, авиации. Поэтому, уже на ранних этапах развития радиотехники возникли предложения по ее использованию для целей навигации. Начали создаваться так называемые радионавигационные системы (РНС), которые явились вторыми после радиосвязи системами, определившими дальнейшее развитие радиотехники.

Необходимая навигационная информация (*широта* - φ , *долгота* - λ , *скорость* и *курс* судна, *высота* приемной антенны, при работе со спутниковой навигационной системой, относительно выбранного геоида) обеспечивается различными техническими средствами судовождения, основными из которых являются РНС.

Под радионавигационной системой (РНС) подразумевается *радиотехнический комплекс*, состоящий из *синхронизированных* между собой наземных или космических излучателей (передатчиков) и бортовых приемников, размещенных как на борту подвижного объекта, так и вне него.

Радионавигационная система имеет определенную зону действия — область пространства, в пределах которой она может обеспечивать подвижный объект навигационной информацией с допустимой погрешностью.

Взаимосвязь этих устройств осуществляется с помощью электромагнитных колебаний – радиоволн, которые связывают в единую систему всю радиоаппаратуру, часть из которой обычно располагается на борту судна, а часть – в нескольких опорных наземных радионавигационных точках – навигационных ориентирах (НО) с известными с высокой точностью координатах или же на космических аппаратах.

В основе построения всех современных РНС лежит свойство радиоволны распространяться в свободном пространстве по кратчайшему пути с конечной скоростью ($V_p \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$) значение которой предполагается известным применительно к данным условиям. Поэтому, используя излучатели как навигационные ориентиры с известными координатами, можно решить задачу местоопределения объекта посредством измерения в его бортовом приемоиндикаторе (ПИ) той или иной совокупности параметров (параметра) специальным образом сформированного излучателями высокостабильного электромагнитного поля.

Тот параметр радионавигационного поля, в результате измерения которого в ПИ выделяется необходимая навигационная информация, носит название радионавигационного параметра (РНП).

Радионавигационным параметром может быть любой из параметров радионавигационного (электромагнитного) поля. Радионавигационное поле, как и всякое электромагнитное, характеризуется амплитудой, частотой, фазой, а также временем прихода сигнала в ПИ. Соответственно возможно создание *амплитудных, фазовых, частотных и временных* радионавигационных систем, если значения соответствующих параметров поля являются функцией навигационного параметра.

В свою очередь геометрическая величина, определяющая местоположение объекта в пространстве и связанная с радионавигационным параметром известной аналитической зависимостью, называется навигационным параметром (НП).

Геометрическое место точек, соответствующее конкретному значению НП, образует некоторую изоповерхность.

Очевидно, что вид изоповерхности определяется используемым в данной РНС навигационным параметром. Пересечение двух изоповерхностей, определяемых двумя полученными значениями НП, образует изолинию. Отсюда следует, что для обеспечения трехмерной навигации с координатами, например широта, долгота, высота над некоторой уровенной поверхностью, минимальное количество образуемых в пространстве изоповерхностей должно быть равно трем. Наличие избыточных изоповерхностей позволяет существенно повысить точность определения места объекта при надлежащей обработке измерений в бортовых ПИ.

При обеспечении навигационной информацией морских объектов в качестве одной из изоповерхностей в большинстве случаев используют уровенную поверхность океана, что сокращает количество необходимых НО при одновременных измерениях, а также сводит задачу местоопределения судна к получению двух изолиний на поверхности Земли.

Имеются два основных режима работы РНС: активный и пассивный.

Активный режим – судовая аппаратура содержит устройства, излучающие радиоволны. Примером такой РНС является радиолокационная станция.

Пассивный режим – на борту подвижного объекта не требуется устанавливать излучающую аппаратуру.

1.1. Классификация РНС

В основу классификации РНС, работающих в пассивном режиме, положены различные признаки, основными из которых можно выделить следующие:

вариант размещения аппаратуры РНС;

вид используемого навигационного параметра или, что эквивалентно, вид создаваемых изолиний в зоне действия системы;

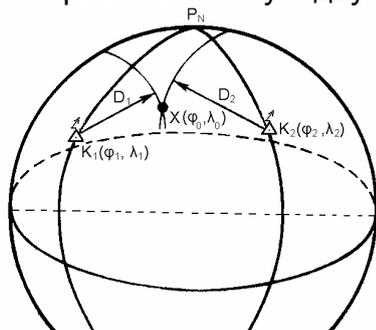
вид измеряемого в ПИ радионавигационного параметра; рабочий диапазон радиоволн;

дальность действия системы.

В соответствии с первым из приведенных признаков все РНС можно подразделить на РНС наземного базирования излучателей (передатчиков) и излучателей, размещенных на космических аппаратах, которые образуют так называемые спутниковые радионавигационные системы (СРНС).

В соответствии со вторым признаком классификации РНС делят на дальномерные, псевдодальномерные, разностно-дальномерные, радиально-скоростные системы. Возможно использование комбинаций этих методов [1,2].

Дальномерный способ местоопределения в морской радионавигации основан на измерении минимум двух дальностей D_i ($i=1,2$) до двух навигационных ориентиров K_1 и K_2 , (рис.1.1) имеющих географические координаты соответственно φ_1, λ_1 и φ_2, λ_2 .



Изолинии в этом случае являются окружностями (если поверхность Земли считать сферической), и задача местоопределения судна сводится к решению двух нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} \cos D_1 &= \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_o + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_o \cdot \cos(\lambda_1 - \lambda_o); \\ \cos D_2 &= \sin \varphi_2 \cdot \sin \varphi_o + \cos \varphi_2 \cdot \cos \varphi_o \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_o) \end{aligned} \quad (1)$$

Рис.1.1. Пример дальномерного способа определения места

относительно неизвестных координат φ_0 и λ_0 точки X расположения бортового ПИ.

Этот метод ранее использовался в радиопеленгаторных системах и некоторых спутниковых навигационных системах, например, в американской СНС «Транзит» (искусственный спутник Земли представлял собой подвижный НО и от него определялись дистанции D_i ($i=1,2$) в два последовательные моменты времени).

Техническая реализация получения НП в дальномерной системе при беззапросном варианте ее построения, не предусматривающем излучения сигналов запроса потребителями навигационной информации основана на том, что необходимо с высокой точностью определять время прохождения импульсного сигнала от НО до ПИ, т. е. – необходимо знать момент излучения сигнала t_0 навигационным ориентиром и момент приема сигнала t_1 бортовым приемоиндикатором. Отсюда, время прохождения сигнала от НО к ПИ будет равно $\tau = t_1 - t_0$ и расстояние тогда определится уравнением $D = \tau \cdot V_p$, где V_p – скорость распространения радиоволны. Таким образом, через последовательные интервалы времени t_1, t_2 можно определить D_1 и D_2 . Однако, чтобы определить НП — дальность D_i в рассматриваемом случае, необходимо не только зафиксировать момент t_1 прихода сигнала в точку расположения бортового ПИ, но и знать момент t_0 излучения сигнала НО, что предполагает, в частности, хранение в бортовом ПИ шкалы времени НО. Реализация такого технического способа сложная, так как нужна высочайшая синхронизация (привязка) шкалы времени бортового ПИ со шкалой времени НО.

Практически в бортовых ПИ шкала времени НО восстанавливается за счет использования высокостабильных опорных генераторов — стандартов частоты колебаний. Так, например, для обеспечения точности измерения дальности не хуже 10 метров допустимое относительное расхождение частот опорных генераторов ПИ и НО должно лежать в пределах 10^{-14} — 10^{-15} , что представляет достаточно сложную техническую задачу с точки зрения ее реализации.

В настоящее время специальные импульсные дальномерные системы в морской навигации не применяются, а принцип дальномерной импульсной системы реализован в навигационной радиолокации, где в качестве береговых ретранслирующих станций используются радиолокационные маяки-ответчики.

Сейчас широко используется модификация дальномерного способа - *псевдодальномерный метод* [3,4].

При реализации псевдодальномерного метода допускается, что шкала бортового времени ПИ может быть сдвинута относительно шкалы единого времени используемых НО на неизвестную, но достаточно малую и постоянную за время определения НП величину Δt .

Псевдодальномерный способ не накладывает жестких ограничений на долговременную стабильность бортового опорного генератора ПИ, но в то же время предполагает существование *единой шкалы времени всех НО*, образующих единую систему. В этом случае значение НП — псевдодальность \bar{D} связана, при отсутствии прочих погрешностей в измерениях, с истинной дальностью к НО соотношением:

$$\bar{D} = D + V_p \cdot \Delta t .$$

В связи с тем, что при этом способе появилась еще одна неизвестная величина (кроме φ_0 и λ_0) - Δt , требуется прием сигнала еще от одного, дополнительного, НО или же последовательно во времени принимать сигналы от одного и того же НО [1]. На рис.1.2 показан пример приема сигналов от трех навигационных ориентиров.

В современных ПИ задача определения места судна, в данном случае, сводится к автоматическому решению в вычислительном устройстве приёмника

системы из трех уравнений вида (1), где в левой части приняты значения $\cos \bar{D}_i$, ($i=1,2,3$).

В результате ее решения при использовании трех НО получают не только координаты φ_0 и λ_0 местоположения судна, но и оценивают систематическую погрешность определения дальности $V_p \Delta t$, вызванную погрешностью Δt эталона времени бортового ПИ. Псевдодальномерный способ реализован

в разработанных СНС с использованием искусственных спутников Земли (ИСЗ) на средневысотных орбитах «Навстар» (США), «Глонавс» (Россия) и разворачиваемой европейским космическим агентством СНС «Галилео» [9,10,11,14].

Разностно-дальномерный способ. В этом способе в качестве НП используется не временное определение, а используется разность расстояния ΔD образующаяся между двумя НО.

(ΔD – это *равная разность расстояний* между парой излучателей – передающих станций, так называемых ведущей и ведомой станциями).

В разностно-дальномерном способе, для определения места судна необходимо иметь две разности расстояния, т. е. достаточно измерить разности расстояний ΔD_i ($i=1,2$) до двух пар излучателей сигналов РНС. В этом случае возможное минимальное количество НО в такой РНС – три (одна из станций будет общей – ведущей для двух ведомых станций).

Известно, что геометрическое место точек на земной поверхности, удовлетворяющее условию $\Delta D = \text{const}$, образует сферическая гипербола, в фокусе которой находится излучатель сигналов РНС. При пресечении сферической гиперболы с земной поверхностью образуется изолиния, представляющая собой гиперболу. Поэтому разностно-дальномерные системы по виду создаваемых изолиний часто называют *гиперболическими*.

К разностно-дальномерным системам в настоящее время относятся РНС «Лоран-С» (США), «Чайка» (Россия), однако используемых в судовождении относительно редко.

Радиально-скоростной способ базируется на измерении скорости сближения (удаления) НО по отношению к потребителю навигационной информации, что позволяет находить в ПИ изменение частоты принятого сигнала от НО. Этим изменением является *доплеровский сдвиг частоты*. Этот способ применялся в низкоорбитальных СНС доплеровского типа «Транзит» (США) и «Цикада» (Россия) [1,2].

Третий признак классификации - по виду используемого РНП: системы радионавигации делятся на четыре основных класса - угломерные, временные (импульсные), фазовые и частотные [1].

В *угломерных* РНС используются *амплитудные* методы измерения.

Временные РНС используют для выделения необходимой навигационной информации в бортовых ПИ измерения запаздывания принимаемого импульсного сигнала относительно моментов времени, определяемых в конечном итоге единой шкалой времени НО. Представитель данного класса РНС – ранее используемая в морской навигации система «Лоран-А» (США) [5,6,8].

В *фазовых* РНС осуществляют измерения в бортовом ПИ *запаздывания фаз* принятых сигналов от береговых станций. Фазовые РНС благодаря высокой точности фазовых измерений получили большое распространение на судах с

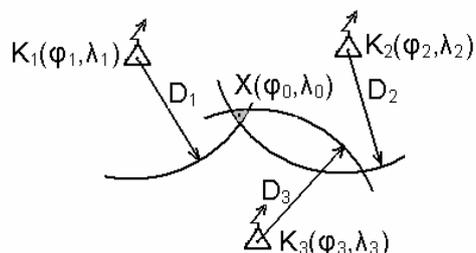


Рис.1.2. Пример приема сигналов от трех навигационных ориентиров

высокоточным позиционированием, в гидрографии, геодезии. К данному типу относятся РНС «Декка» (Великобритания), «РСВТ-1», «Брас», «Марс-75», «РСДН-20» (Россия). (РСВТ – радионавигационная система высокой точности; РСДН – радионавигационная система дальней навигации).

Для обеспечения навигации морских и воздушных транспортных судов используются также комбинированные — *импульсно-фазовые* РНС «Лоран-С» (США) и «РСДН-3» («Чайка») (Россия).

К *частотным* РНС относились доплеровские СНС «Транзит» (США) и «Цикада» (Россия).

По частотному диапазону радиоволн РНС классифицируются следующим образом:

- сверхдлинноволновые - («РСДН-20», «Омега»);
- длинноволновые - («РСВТ-1», «Марс-75», «РСДН-3», «Декка», «Лоран-С»);
- средневолновые («Брас», «Лоран-А»),
- ультракоротковолновые («Цикада», «Глонасс», «Транзит», «Навстар»).

По дальности действия РНС принято классифицировать в соответствии со следующей системой:

- глобальные - спутниковые навигационные системы;
- системы дальней навигации, имеющие максимальную дальность около 1500 миль («Лоран-С», «РСДН-3», «РСДН-20»);
- системы средней дальности действия - до 500 миль («РСВТ-1», «Марс-75», «Декка»);
- прибрежного плавания с дальностью действия до 100 миль («Брас», специальные высокоточные гидрографические системы типа «Хайфикс»).

Лекция №21

1.2. Импульсные РНС. Принцип работы

Импульсными РНС называются разностно-дальномерные радионавигационные системы, у которых навигационный параметр (линия положения) определяется путем измерения *разности времени* Δt между моментами приема импульсных сигналов, синхронно излучаемых двумя береговыми радиостанциями А и В (рис.1.3).

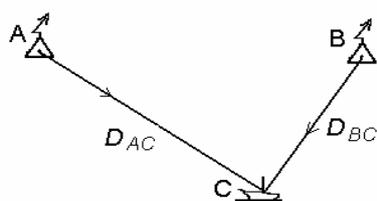


Рис.1.3. К определению разности расстояния

Одна из них, например А, является ведущей (Master), а вторая — В — ведомой (Slave). Если расстояние между судном С и ведущей станцией А равно D_{AC} , а между судном и ведомой станцией — D_{BC} , то разность времени приема импульсных сигналов оказывается равной:

$$\Delta t = \frac{D_{AC}}{v_p} - \frac{D_{BC}}{v_p} = \frac{(D_{AC} - D_{BC})}{v_p} = \frac{\Delta D}{v_p},$$

или $\Delta D = v_p \cdot \Delta t,$

где: ΔD — разность расстояний;

v_p — скорость распространения радиоволн.

Следовательно, измеряемая разность времени Δt представляет собой разность расстояний ΔD до береговых станций. Поскольку линией положения рассматриваемой РНС является гипербола, то данную систему называют также импульсной гиперболической РНС.

1.3. Фазовые РНС

1.3.1. Принцип работы ФРНС

В основе построения ФРНС лежит понятие «фазовый зонд». Наименование «фазовый зонд» указывает, что приемоизмеритель разностно-дальномерной (гиперболической) системы подобен некоторому зонду в электромагнитном поле береговых станций. Этот зонд не искажает поля.

Фазовый зонд изобретен Мандельштамом Л. И., Папалески Н. Д., Щеголевым Е. Я. в 1934 г. Аппаратура выпущенных радиологов (в том числе ФРНС «Координатор») позволяла реализовать режим фазового зонда. Во время Второй мировой войны в Великобритании (со ссылкой на существенное значение советских разработок) был создан вариант фазового зонда — система «Декка» [5,6].

В послевоенные десятилетия проведено несколько модернизаций ФРНС «Декка» для обеспечения надежного устранения многозначности фазовых измерений.

Береговые станции фазовой гиперболической РНС, входящие в одну цепочку, должны излучать колебания, у которых фазы согласовываются друг с другом либо с помощью ведущей станции А (см. рис.1.4), либо с помощью точного высокостабильного эталона частоты [6].

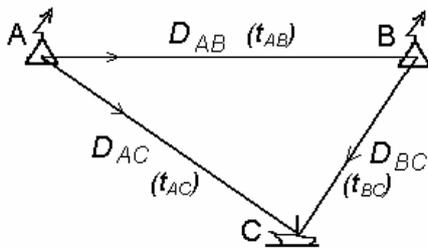


Рис.1.4. К принципу работы ФРНС

Для понимания принципа работы ФРНС рассмотрим пример: излучение станциями **одинаковых частот** (рис.1.4). Пусть станции А и В излучают радиоволны на одной частоте:

$$\omega_A = \omega_B = \omega = 2\pi f, \quad \text{где } f \text{ — частота колебаний.}$$

Тогда напряженность поля у антенны ведущей станции А может быть выражена следующим образом [2,3]: $E_A = E_{mA} \sin \omega t$. К ведомой станции В радиоволны, распространяющиеся со скоростью $v_p \approx c \approx 300\,000 \text{ км/с}$, придут через некоторое время $t_{AB} = \frac{D_{AB}}{c}$.

(Кратчайшее расстояние между станциями А и В — D_{AB} , называется *базой*)

Предполагая переизлучение станцией В принятых колебаний без задержки во времени, можно записать напряженность поля у ее антенны $E_B = E_{mB} \sin \omega (t - t_{AB})$.

На судно (в точку С) колебания от обеих станций придут через время после их излучения соответственно $t_{AC} = \frac{D_{AC}}{c}$ и $t_{BC} = \frac{D_{BC}}{c}$. Следовательно, э.д.с.,

индуктирующиеся в антенне судового приемоиндикатора при приеме сигналов каждой из станций можно выразить следующим соотношением:

$$e_{AC} = E_{mA} \sin \omega (t - t_{AC});$$

$$e_{BC} = E_{mB} \sin \omega (t - t_{BC} - t_{AB}).$$

Фаза этих колебаний определяется выражениями, находящимися под знаком синуса. Поэтому разность фаз принятых колебаний приемником на судне от станций А и В будет равна

$$\varphi_{AB} = \omega(t - t_{AC}) - \omega(t - t_{BC} - t_{AB}) = \omega(t_{BC} - t_{AC}) + \omega t_{AB}.$$

Учитывая, что $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$; $t_{BC} - t_{AC} = (D_{BC} - D_{AC})/c$; $T \cdot c = \lambda$; (T — период колебаний; λ — длина волны), получим

$$\varphi_{AB} = \frac{\omega}{c} (D_{BC} - D_{AC}) + \frac{\omega}{c} \cdot D_{AB}, \quad (2)$$

$$\text{или} \quad \varphi_{AB} = \frac{2\pi}{\lambda}(D_{BC} - D_{AC}) + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot D_{AB}. \quad (3)$$

Таким образом, при постоянной частоте (длине волны) и неизменном базовом расстоянии между станциями разность фаз колебаний в точке приема определяется только разностью расстояний от нее до станций. Следовательно, постоянная разность фаз будет на всей линии, проходящей через данную точку. Эта линия представляет собой **гиперболу**.

Действительно, если $\varphi_{AB} = const$, то при $\omega/c = const$ ($2\pi/\lambda = const$) и разность расстояний от судна С до станций А и В $D_{BC} - D_{AC} = \Delta D = const$, то это является свойством *гиперболы*.

Так как при использовании ФРНС интересуют *изменяющийся* фазовый сдвиг, то его постоянную величину $\frac{2\pi}{\lambda} D_{AB}$, получаемую при постоянном базовом расстоянии, в выражениях (2) и (3) можно исключить и получить более простое соотношение:

$$\varphi_{AB} = \frac{2\pi}{\lambda}(D_{BC} - D_{AC}). \quad (4)$$

Формула (4) является *навигационной функцией фазовых РНС*.

Участок рабочей зоны ФРНС, заключенный между двумя гиперболами, при плавании судна, в пределах которого разница фаз между ведущей и ведомой станцией изменяется на 2π , называется *фазовой дорожкой*. На базе ширина фазовой дорожки $d = \lambda/2$.

Для согласованной работы станций в фазовых РНС применяются высокостабильные генераторы излучаемых частот (атомные стандарты частот).

В любом случае колебания, принятые приемоиндикатором от пары станций, дадут возможность измерения разности фаз между ними только при условии, что колебания от этих станций в месте их приема можно отделить друг от друга. Выполнить это можно, разделив сигналы во времени — так называемая *временная селекция* или по частоте — *частотная селекция*.

В связи с этим принципиально возможны два основных способа излучения береговых станций: в разные промежутки времени колебания *одной и той же* частоты или же одновременные колебания *различных* частот.

В простейшем случае предполагается одновременное излучение каждой береговой станцией ФРНС сигнала только одной частоты. Однако, в связи с тем, что одновременный прием двух колебаний одинаковой частоты не позволяет в приемнике отличить их друг от друга, станции должны излучать колебания так, чтобы они приходили к приемоиндикатору в *разное время*. Для этого станции излучают их попеременно через определенный промежуток. Получающийся при этом дополнительный сдвиг фаз между колебаниями, будучи постоянным, на работу всей системы не влияет. Приемоиндикатор имеет специальное фазозапоминающее устройство, которое запоминает фазу первоначально принятых колебаний от станции А и подает их на фазоизмерительное устройство во время прихода колебаний от второй станции - станции В.

Излучение одинаковых частот (режим *временной селекции*) использовался в фазовых системах дальней навигации «Омега» (США), РСДН-20 (СССР).

Однако, помимо такого режима работы, береговые станции могут излучать последовательно или одновременно несколько сигналов различных частот (от двух до четырех).

Станции, работающие на одной, общей частоте, образуют цепочку, состоящую из 3-х или 4-х станций.

До конца 90-х годов прошлого столетия широко использовались ФРНС средней дальности действия (250-300 миль при расстояниях между береговыми станциями цепочек порядка 60-120 миль). Представителями таких ФРНС были «Декка»

(Великобритания) и РСВТ (СССР), отличающиеся высокой точностью определения места судна. (Например, при работе в дневное время на удалениях до 100 миль от береговых станций точность определения места обеспечивалась в пределах 0,01-0,03 мили, однако в ночное время на дальностях порядка 250 миль она ухудшалась до 1,0 -1,5 мили) [1,2,6].

В этих системах для различия приемником сигналов цепочки, ведущая и ведомые станции излучали *одновременно* сигналы на *различных* частотах, являющимися когерентными гармониками общей для них, так называемой базисной частоты.

В приемниках таких систем применялась *частотная селекция* сигналов, а измерение разности фаз между ведущей и ведомыми станциями осуществлялась на так называемой частоте сравнения.

Одним из существенных недостатков ФРНС является повторяющийся фазовый отсчет (многозначность фазовых отсчетов) через 2π (см. уравнение 4), что приводит к неоднозначности определения места суда.

Для разрешения этой проблемы использовались различные способы [1,2,3]:

- непрерывное наблюдение при перемещении судна за изменением текущей разности фаз сравниваемых колебаний с фиксацией количества фазовых циклов (способ привязки);
- периодический перевод ФРНС в режим формирования радионавигационного поля грубой фазовой структуры со значительно более широкими дорожками d .

1.4. Разностно-дальномерные РНС

Разностно-дальномерной называется радионавигационная система, навигационным параметром которой является *разность расстояний* от подвижного объекта до двух разнесенных в пространстве радионавигационных точек. Если в качестве радионавигационных точек используются расположенные на земной поверхности передающие станции, то такая система называется разностно-дальномерной с опорными наземными передающими станциями.

Парой станций называются две опорные наземные станции разностно-дальномерной РНС, создающие семейство линий положения системы. Минимальная совокупность опорных наземных передающих станций, создающая сетку линий положения радионавигационной системы, образуют цепь опорных станций.

Береговые опорные станции разделяются на *ведущую* и *ведомые*. *Ведущей* называется станция, по сигналам которой осуществляется синхронизация излучения в системе; станция, сигналы которой синхронизируются сигналами ведущей станции, называется *ведомой*.

Необходимо отметить, что линия положения — множество точек в зоне действия радионавигационной системы, характеризующееся одним и тем же значением навигационного или радионавигационного параметра. В морской навигации этому определению соответствует термин «навигационная изолиния», а под линией положения понимается отрезок прямой линии, заменяющей навигационную изолинию вблизи счислимого места судна.

Множество точек, для которых абсолютная величина разности расстояний до двух фиксированных точек (фокусов) является величиной постоянной, называется гиперболой. Значит, каждой величине разности расстояний до ведомой и ведущей станций соответствует определенная гипербола с фокусами в точках размещения станций.

Поэтому, в этой связи разностно-дальномерные системы называют *гиперболическими*.

Принцип работы разностно - дальномерных РНС (гиперболических) заключается в следующем.

Допустим, что береговые станции РНС, установленные в точках А и В с известными координатами, одновременно излучают импульсные сигналы с одинаковым периодом T повторения (рис.1.5).

Определение разности расстояний импульсным методом сводится к измерению в точке расположения ПИ (точка X) временного

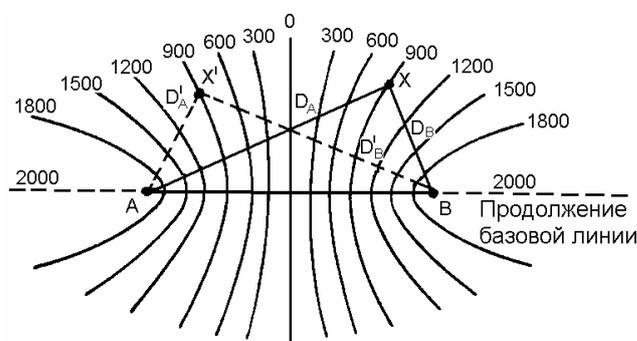


Рис.1.5. К принципу построения гиперболической импульсной РНС

интервала между приходами импульсов, излученными береговыми станциями. Измерив этот временной интервал Δt (РНП), можно далее найти искомое значение разности расстояний $D_A - D_B = \Delta D$ (НП). Для преобразования измеренного значения РНП в искомое значение НП используют навигационную функцию, которая для импульсной системы имеет вид

$$\Delta D = v_p \cdot \Delta t. \quad (5)$$

Однако при одновременном излучении береговыми станциями импульсов возникает неоднозначность в измеренных значениях РНП. Действительно, при такой организации излучения НО в силу того, что ПИ нечувствительны к знаку величины Δt , используя лишь одни радиотехнические измерения, не представляется возможным определить, на какой из двух изолиний, симметрично расположенных относительно перпендикуляра к середине базы, находится бортовой ПИ. Более того, на нормали к середине базовой линии импульсы береговых станций будут накладываться во времени друг на друга, что приводит к тому, что на участках зоны действия системы, близких к этой нормали, радиотехнические методы измерения РНП не могут быть реализованы [1,3,6].

В этом нетрудно убедиться, если задаться конкретным значением длины базовой линии D_{AB} , которое удобно взять равным, например, 324 милям. Время распространения сигнала по базе будет равно 2000 мкс, и оцифровка изолиний (гипербол) конкретными значениями РНП в микросекундах будет иметь вид, представленный на рис.1.5.

Из этого рисунка видно, что ПИ покажет разницу времени $\Delta t = 900$ мкс как в реальной точке X так и в мнимой X', т.е. реальная точка X на семействе гиперболических линий определится неоднозначно.

Поэтому для обеспечения нормального функционирования импульсной РНС (однозначного определения) предусмотрен ряд дополнительных технических решений, а именно: для устранения неоднозначности РНП, а также обеспечения отсутствия наложения сигналов НО в зоне действия системы, станция В (в дальнейшем называемая *ведомой*), излучает свой сигнал спустя через некоторый интервал времени t_k после момента прихода сигнала от станции А (*ведущей*) в точку ее расположения.

Величина t_k называется кодовой задержкой и позволяет при необходимости владельцам РНС изменять оцифровку изолиний по любой ранее заданной во

времени программе, предохраняя тем самым от несанкционированного разработчиками использование ее сторонними потребителями навигационной информации.

Кроме кодовой задержки, в импульсных РНС, ведомая станция В запускается с задержкой времени, равной времени распространения радиоимпульса от ведущей станции А, запускающей станцию В, т.е. общее время задержки равно:

$$t_3 = \frac{D_{AB}}{v_p} + t_k. \quad (6)$$

В этом случае (например, при длине базы 324 мили и $t_k=1000$ мкс) время задержки запуска ведомой станции будет равно $t_3 = 3000$ мкс. Тогда оцифровка изолиний (при смещении по базе на 150 мкс) имеет вид, представленный на рис.1.6.

В любой гиперболической системе пара станций позволяет определить *только одну* изолинию.

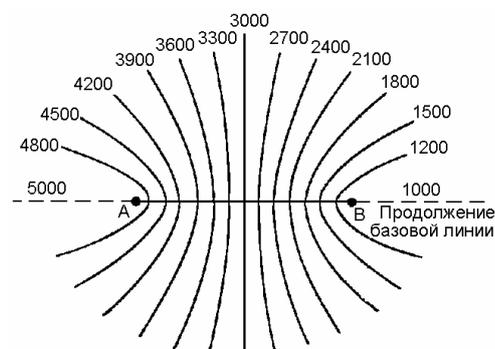


Рис1.6. Семейство изолиний разностно-дальномерной РНС

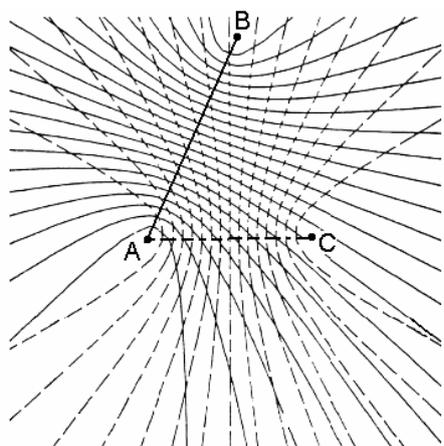


Рис1.7. Пример отображения изолиний варианта – с ведущей станцией А и двумя ведомыми – В и С.

А для определения места подвижного объекта (см. рис.1.1) необходимо определить минимум еще одну изолинию. Поэтому, для получения второй изолинии необходимо использовать сигналы еще одной пары станций. В этом случае РНС должна состоять минимум из трех станций – одна из которых будет ведущей, а две остальные – ведомыми. На рис.1.7 показан пример отображения изолиний двух пар цепочек РНС разностно-дальномерной РНС

Лекция №22

1.6. Импульсно-фазовые радионавигационные системы

К реально действующим разностно-дальномерным системам в настоящее время относятся импульсно-фазовые РНС «Лоран-С» (США) и «Чайка» (Россия).

1.6.1. Радионавигационные системы «Лоран»

LORAN (англ. **L**ong **R**ange **N**avigation) радионавигационная система наземного базирования. Система LORAN («Лоран») была разработана в США под руководством Альфреда Лумиса и широко использовалась кораблями ВМФ США и Великобритании в годы Второй мировой войны [1,5,6,7,8,15].

Первым поколением РНС «Лоран» была импульсная система «Лоран-А» (была введена в действие в 1943 г.), которая использовалась для обеспечения навигации на удаленностях порядка 600 — 700 миль от береговых станций (при использовании поверхностных радиоволн) обеспечивая при этом точность определения места (0,5

...1,5) мили. РНС «Лоран-А» работала в средневолновом диапазоне на частотах излучения около 2МГц ($\lambda=150$ м). 70 ее передающих станций охватывали около 30% территории земного шара [8,15]. Идеология построения и принцип измерения радионавигационного параметра (РНП) в импульсной РНС в общих чертах рассмотрены в подразделе 1.6.2.

Большое достоинство импульсной РНС — отсутствие при надлежащей организации излучения многозначности измерений, а также возможность селекции (разделения) поверхностных и пространственных сигналов в точке приема. Вместе с тем относительно низкая точность импульсного метода измерения РНП $\delta(\Delta t) = 1 \div 2$ мкс не позволяла эффективно использовать систему для обеспечения прибрежной навигации.

Стремление улучшить точность импульсной РНС за счет применения фазовых методов измерения РНП с одновременным увеличением дальности действия системы при переходе в диапазон длинных волн привело к созданию в середине 50-х годов импульсно-фазовой РНС (ИФРНС) «Лоран-С». (Под импульсно-фазовой РНС понимается система, в которой для грубых измерений радионавигационного параметра используют огибающие радиосигналов (имеющих форму импульсов), а для точного определения — используют фазовые измерения несущей частоты этих импульсов) [1,2,8].

В 1974 г. решением правительства США ИФРНС «Лоран-С» до появления спутниковой РНС была признана основной гражданской навигационной системой в прибрежной зоне США.

Ожидается, что «Лоран-С» будет находиться в эксплуатации, пока что как минимум до 2015 года [15].

В России эксплуатируется система аналогичного назначения, что и «Лоран-С», получившая название «Чайка».

1.6.2. Импульсно - фазовая РНС «Лоран-С». Принцип действия импульсно - фазовой РНС

Импульсно - фазовые радионавигационные системы (ИФРНС) объединяют преимущества импульсных и фазовых систем, а именно — однозначность первых и высокую точность вторых. В этих системах многозначность разрешается применением импульсных измерений, а точные измерения выполняются фазовым методом. Измерения при этом ведутся как бы на трех шкалах, как, например, в часах: часовая, минутная и секундная стрелки, с последовательным увеличением точности и сужением области однозначности. Импульсная форма огибающей сигнала позволяет кроме разрешения многозначности решить такие важные задачи, как временную селекцию и выделение сигналов поверхностной волны. Для выделения сигналов поверхностной волны используется то свойство, что в длинноволновом диапазоне (в котором реализуются современные морские импульсно-фазовые РНС) задержка пространственной волны относительно поверхностной превышает 30мкс в пределах всей рабочей зоны (см.рис.1.9). Это позволяет сформировать строб, выделяющий начальную часть принятого сигнала, не подвергающуюся воздействию пространственной волны [1,3,4].

Дальность действия станций системы при использовании поверхностной радиоволны достигает 1200 — 1400 миль, при этом точность определения места составляет 0,05 — 1,5 мили. При использовании пространственных волн точность резко снижается.

Передающие радиостанции ИФРНС устанавливаются для обслуживания некоторой площади земной поверхности в точках с известными координатами [1,3,4,6,7].

Станции системы сводятся в цепи, состоящие из ведущей станции (Master - обозначается *M*) и четырех или трех ведомых станций (Slave- обозначаются *W*, *X*, *Y* и *Z*), излучение которых жестко синхронизировано между собой. Кратчайшее расстояние между ведущей и ведомой станциями цепочки называется **базой**.

Все станции **всех цепей** излучают радиоимпульсы специальной формы на *одной несущей частоте* 100 кГц в последовательности, приведенной на рис.1.8,а.

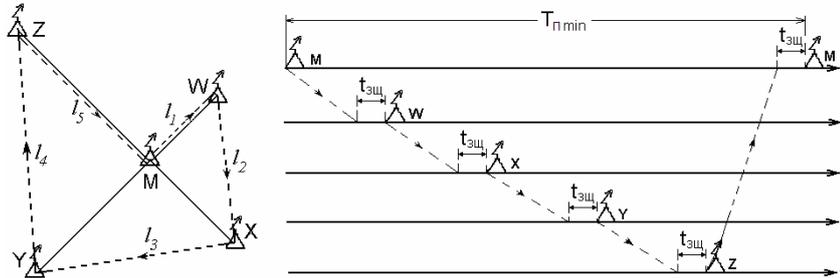


Рис.1.8. Порядок излучения станций цепи ИФРНС:

- пример расположения станций цепи;
- временные диаграммы последовательности приема и излучения

Ведущая и ведомая станции цепочки РНС образуют пару, которая обеспечивает создание одной изолинии положения судна.

Станции одной цепочки используют один и тот же период повторения сигналов. (Соответственно - станции другой цепочки используют уже другой период повторения сигналов).

Численное значение периодов повторения сигналов выбирается с дискретом 10 мкс в интервалах от 40 000 до 100 000 мкс и обозначаются числом, равным уменьшенному в 10 раз периоду. Например, обозначение 9900 соответствует периоду 99 000 мкс.

Для обеспечения распознавания цепей каждой из них присваивается определенная частота повторения импульсов T_n , которая выбирается из следующих условий.

Периоды T_n повторения радиоимпульсов выбираются возможно меньшими, для того чтобы в единицу времени передавалось больше полезных сигналов. Однако уменьшение периода T_n повторения радиоимпульсов допустимо до определенного значения T_{nmin} , ограничиваемого условием, необходимым для нормальной работы ИФРНС: (поверхностные) земные и ионосферные радиоимпульсы от всех станций, входящих в цепочку, не должны совпадать во времени между собой в любой точке рабочей зоны системы.

Это условие выполняется, если каждая из N_c станций цепочки (количество станций N_c может составлять минимум две, максимум – четыре) излучает свои сигналы спустя некоторый защитный промежуток времени $t_{зщ}$ после момента приема сигналов от той станции, которая в заданной очередности передачи сигналов является предшествующей (рис.1.8,а). Время $t_{зщ}$ определяется задержкой многократно отраженных радиоимпульсов по отношению к поверхностным и обычно составляет 1000—2000 мкс. Из рассмотрения временной диаграммы (рис.1.8,б) можно заключить, что при излучении одиночных радиоимпульсов период их повторения не может быть меньше, чем

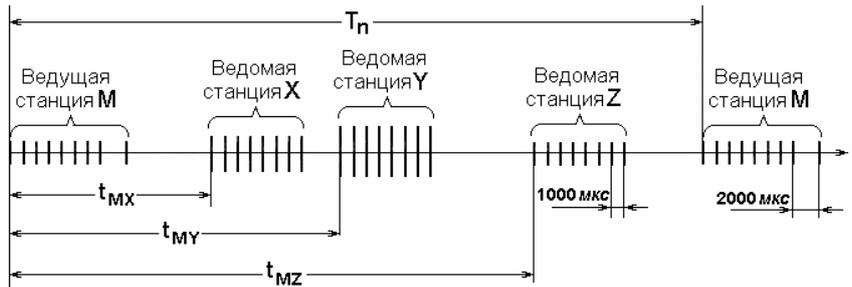
$$T_{nmin} = \frac{MW}{v_p} + t_{зщ} + \frac{WX}{v_p} + t_{зщ} + \frac{XY}{v_p} + t_{зщ} + \frac{YZ}{v_p} + t_{зщ} + \frac{ZM}{v_p} + t_{зщ} = \frac{l}{v_p} + N_c t_{зщ},$$

где $l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5$ – длина замкнутой линии, соединяющей по кратчайшим расстояниям станции в порядке очередности излучения сигналов (см. рис.1.8,а).

Дальность действия ДВ РНС существенно зависит от средней мощности (энергии) на начальных (свободных от влияния ионосферных волн) участках поверхностных радиоимпульсов. Увеличение излучаемой импульсной мощности ограничивается пределами эффективности передающих антенн и их электрической прочностью.

Увеличение длительности импульса *не приводит* к желаемому результату, так как используется только начальная часть фронта нарастания импульса. Увеличение полезной средней мощности за счет уменьшения периодов следования ограничивается, как указывалось, необходимостью обеспечения приема сигналов станций цепочки без перекрытия их радиоимпульсов между собой по всей рабочей зоне системы.

Поэтому в ИФРНС для увеличения полезной средней мощности сигналов каждая



станция излучает не один импульс за период повторения, а целую серию, состоящую из восьми кодированных импульсов (см. рис.1.9. На этом рисунке не приведены импульсы ведомой станции W).

Рис.1.9. Общий вид пакетов радиоимпульсов ведущей и ведомых станций и их период следования

Длительность каждого радиоимпульса 100—120 мкс на уровне 6 дБ, а период повторения

в серии $T = 1000 \text{ мкс}$, т. е. длительность всей серии («пакета») из восьми импульсов составляет $(8 - 1) T = 7000 \text{ мкс}$.

Ведущие станции цепочек излучают также *девятый* импульс, который служит в основном для ПИ с визуальным опознаванием сигналов, телеуправления и специальных передач.

Девятый, маркерный импульс ведущих станций отстоит от последнего, восьмого, импульса на 2000 мкс.

Одиночный радиоимпульс в пакете любой станции имеет вид, представленный на рис.1.10.

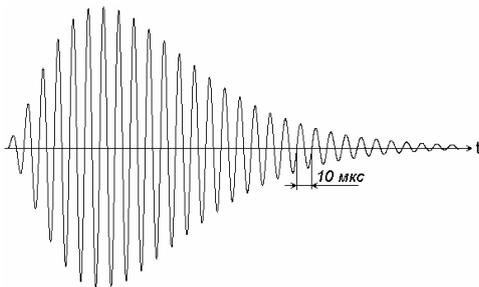


Рис.1.10. Общий вид одиночного радиоимпульса

Максимальная его амплитуда достигается на 65 мкс, а затем по экспоненциальному закону уменьшается до 200...300 мкс.

Амплитуда радиоимпульса, т.е. его

огнивающая, формируется таким образом, чтобы обнаружение сигнала и его дальнейшая обработка в приемнике осуществлялась в момент перехода через ось времени в положительном направлении высокочастотного заполнения импульсов в конце их третьего периода, т.е. при пересечении несущей частоты на временной оси,

равной 30 мкс. Эта точка пересечения, так называемая особая точка – **OT (SSP – Standard Sampling Point)**, выбирается компромиссно по двум причинам (см.рис.1.11).

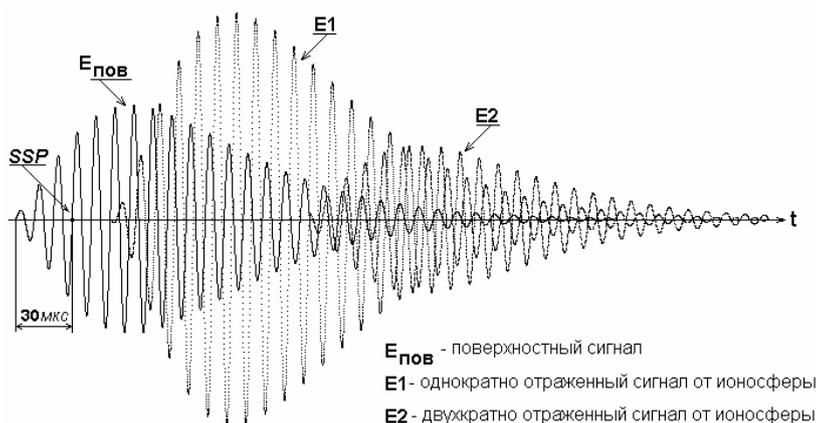


Рис.1.11. Общий вид принимаемого сигнала при наличии поверхностного и пространственных сигналов

Во-первых, колебания в импульсе должны обладать достаточной мощностью, чтобы приемник смог его обнаружить, а во-вторых, необходимо обрабатывать радиоимпульс в первых периодах колебания его несущей частоты, чтобы гарантировать, что приемоиндикатор обнаружит и будет обрабатывать поверхностный импульс передающей станции, а не импульс, отраженный от верхних слоев атмосферы.

Радиоимпульсы, отраженные от верхних слоев атмосферы создают большие ошибки в определении положения. Поэтому форма радиоимпульса разработана таким образом, чтобы исключить этот главный источник ошибки.

Еще одной особенностью сигналов ИФРНС «Лоран С» является то, что в некоторых импульсах пакета используется бинарное фазовое кодирование, т. е. фаза ВЧ заполнения меняется на 180° по сложному закону, обеспечивающему идеальные авто- и взаимокорреляционные функции сигналов ведущей и ведомых станций. Период T_k фазового кода составляют два пакета импульсов — нечетный и четный, т. е. $T_k = 2T_p$.

С фазовым кодированием, фаза излучаемых сигналов (100 кГц сигналов) изменяется систематически от импульса к импульсу. Принятые приемником сигналы, отраженные от верхних слоев атмосферы, будут вне фазы с одновременно принятыми поверхностными сигналами и, поэтому, они не будут обработаны приемником.

Кроме своего основного назначения фазовое кодирование облегчает автоматическое опознавание сигналов и слежение за ними, позволяя выполнять эти операции даже в тех случаях, когда уровень сигнала ниже уровня помех.

Ведомые станции, входящие в одну цепочку, различаются между собой временем задержки излучений пакетов радиоимпульсов относительно момента излучения ведущей станцией. Поэтому пакеты радиоимпульсов каждой ведомой станции появляются после приема пакетов ведущей станции только в определенное время и отсчеты РНП (в микросекундах) для каждой пары станций одной цепочки ИФРНС будут лежать в своих пределах от минимального (на продолжении линии базы со стороны ведомых станций) до максимального (на продолжении линии базы со стороны ведущей станции).

Излучение сигналов пакетами из m радиоимпульсов увеличивает минимальный период повторения излучения T_{min} системы.

Лекция №23

2. Спутниковые навигационные системы (СНС)

4-ого октября 1957 года в Советском Союзе впервые в мире был запущен первый искусственный спутник Земли (ИСЗ). Этот маленький спутник, по современным стандартам, весом приблизительно 84 килограмма, был выведен на околоземную орбиту с апогеем 942 км и перигеем 230 км. Период вращения вокруг Земли составлял 96 минут, (спутник находился на орбите до начала 1958 года). Так началась так называемая "Космическая эра" [13,15].

В 1957 г. группа советских ученых под руководством академика В. А. Котельникова экспериментально подтвердила возможность определения параметров движения искусственных спутников Земли по результатам измерений доплеровского сдвига частоты сигнала, излучаемого с ИСЗ, в точке приема с известными координатами. Была установлена также возможность решения и **обратной** задачи - нахождения координат точки приема по измеренному доплеровскому сдвигу частоты сигнала, излучаемого с ИСЗ, параметры движения которого известны [1,2,3].

Использование ИСЗ в качестве радионавигационной опорной станции, координаты которой хотя и изменяются, но заранее известны для любого момента времени, позволило создать ряд проектов спутниковых радионавигационных систем (СРНС).

В настоящее время ИСЗ широко используются в различных областях народного хозяйства, в том числе и на морском флоте, где наибольшее распространение спутники нашли для целей навигации, морской радиосвязи, спасения на море, гидрометеорологии и др.

Использование спутниковых систем для этих целей становится возможным, если установить на ИСЗ соответствующую радиотехническую аппаратуру, которая должна быть связана по радиоканалу с судовой аппаратурой.

Для управления работой ИСЗ на Земле должна быть размещена *сеть специальных станций*. Назначение спутниковой системы существенно влияет на вид орбиты ИСЗ, а это в свою очередь определяет характеристики его радиотехнической аппаратуры.

Наземные станции управления располагают таким образом, чтобы можно было осуществлять регулярный контроль (слежение) за траекторией спутников и передачу необходимой информации на них. Для этого требуется обычно несколько станций слежения, расположенных в различных районах земного шара, координационно-вычислительный центр и станции ввода данных на спутники об изменении их траектории. Обновление данных на ИСЗ должно выполняться с такой периодичностью, чтобы точность определения не выходила за гарантированные пределы.

Аппаратура на спутнике должна обеспечивать прием сигналов наземных станций (а в некоторых системах — и судового оборудования) и излучение собственных сигналов с мощностью, достаточной для работы во всей зоне радиовидимости ИСЗ. Излучаемые навигационными ИСЗ (НИСЗ) радиосигналы должны содержать информацию о его траекторных данных в течение всего времени работы системы. Для этого на НИСЗ имеется запоминающее устройство, способное хранить траекторные данные спутников, рассчитанные наземными станциями, до их следующего обновления. Антенное устройство ИСЗ обладает направленностью, позволяющей производить излучение сигналов со спутника к поверхности Земли.

Диапазон радиоволн, используемых в спутниковых РНС, выбирают исходя из условий наименьшего затухания в атмосфере и возможности применения антенн небольших размеров как на спутниках, так и на судах. Наилучшими в этом отношении оказываются метровые, дециметровые и сантиметровые волны, на которых можно передавать сигналы с широкой полосой частот, т. е. с большим содержанием информации.

Типы орбит ИСЗ

Высота орбиты ИСЗ определяется, прежде всего, площадью поверхности, на которой одновременно он должен быть виден, и связана с мощностью излучения передатчика спутника. При облучении большой поверхности необходима большая высота орбиты и, следовательно, большая мощность передатчика. При малой высоте мощность излучения может быть уменьшена, но в этом случае спутник быстро проходит над данным районом, что сокращает время определения по нему. Кроме того, при небольшой высоте из-за сильного торможения в атмосфере орбита спутника существенно изменяется и его срок службы сокращается. Поэтому, на высоту, меньшую 200 км, спутник запускать нецелесообразно.

Важная эксплуатационная характеристика РНС – размер зоны радиовидимости (величина обслуживаемой поверхности) ИСЗ. Под зоной радиовидимости понимается малый круг на поверхности Земли, в пределах которого могут приниматься сигналы данного ИСЗ (см. рис.2.1) [1,3].

Сферический диаметр Q зоны радиовидимости определяется уравнением

$$\sec Q/2 = 1 + H/R_3,$$

где: H – высота орбиты ИСЗ;

R_3 – радиус Земного шара.

При движении спутника по орбите зона радиовидимости будет также перемещаться, образуя на поверхности Земли полосу радиовидимости, которая в силу суточного вращения Земли будет постоянно смещаться к западу.

Это смещение d за время T_c , равное одному обороту спутника вокруг Земли, в функции широты φ и угла i наклона орбиты определяется выражением:

$$d = 15 T_c \sin i \cdot \cos \varphi.$$

Величина обслуживаемой поверхности зависит от периода обращения спутника вокруг Земли T_c и частоты его пролета в данном районе, поэтому характер орбиты (ее вид и наклон)

выбирается соответствующим образом. Чем выше орбита, тем больше период обращения ИСЗ. При орбите, близкой к круговой, высота изменяется незначительно, расчет траектории спутника и слежение за ним проще, но

вывод спутника на орбиту сложен. Эллиптическая орбита затрудняет слежение за спутником и учет всех сил, действующих на него, однако вывод на орбиту оказывается более простым.

В зависимости от угла наклона орбиты i относительно плоскости экватора все спутники разделяют на *экваториальные* ($i = 0$), *наклонные* ($0 < i < 90^\circ$) и *полярные* ($i = 90^\circ$).

Экваториальные спутники все время вращаются в плоскости экватора. Низкие спутники перемещаются над поверхностью Земли и видны всегда в одной и той же полосе наблюдения, ширина которой, например, при высоте спутника 1000 км равна

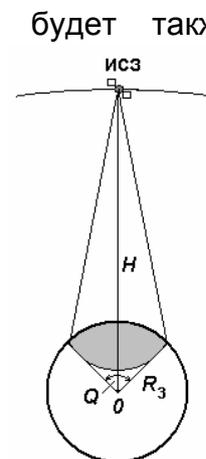


Рис.2.1. Зона радиовидимости РНС

3600 миль. Если ИСЗ выведен на круговую орбиту с высотой 35 870 км и вращается с запада на восток с периодом $T_c = 24$ ч, он находится все время над одной и той же точкой Земли и с этой точки кажется неподвижным (стационарный спутник). Такой спутник виден на поверхности земного шара, ограниченной центральным углом 162° , от широты 81° Южного полушария до широты 81° Северного полушария. Практически один стационарный спутник в состоянии обслужить акваторию всего Тихого океана.

Три экваториальных стационарных спутника, расположенных в пространстве через 120° относительно друг друга, могут обеспечить передачу сигналов на всю поверхность Земли (за исключением полярных областей). Из пяти спутников, равномерно расположенных на стационарной орбите, можно одновременно использовать два. При определении места по таким спутникам достаточно знать их долготу. Для обслуживания также и полярных районов могут применяться квазистационарные (синхронные) спутники с суточным периодом обращения, но с небольшим ($5^\circ \dots 7^\circ$) наклоном орбиты относительно плоскости экватора.

Наклонные спутники, с наклоном орбиты под углом $30^\circ \dots 60^\circ$ к экватору, могут иметь орбиту высотой от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч километров. При большой высоте они видны на большой поверхности Земного шара, поэтому даже при небольшом их количестве можно обслуживать весь Земной шар.

Полярные спутники вращаются в плоскости меридиана, но из-за вращения Земли они периодически проходят над всеми районами Земного шара.

Если полярная орбита имеет высоту около 1000 км, торможение от атмосферы незначительно и спутники при массе несколько десятков килограммов могут существовать в течение десятков лет. Диаметр зоны видимости ИСЗ при такой высоте равен 3600 миль, т. е. одновременно он виден на достаточно большой территории. Обращение вокруг Земли осуществляется за 105 мин. Полоса наблюдения за один оборот спутника смещается к западу на 1500...800 миль (в широте $0^\circ \dots 60^\circ$), т. е. на последующих витках спутника полосы частично перекрываются. Продолжительность наблюдения спутника равна 16 мин, если трасса спутника проходит через точку наблюдения. При смещении точки наблюдения относительно трассы на расстояние 1000 миль время наблюдения уменьшается приблизительно до 14 мин.

За одни сутки такой полярный спутник можно использовать для наблюдения два раза на экваторе и четыре раза на широте 60° . Для получения дискретности определения 0,5. . . 1,5 ч в любой точке земного шара необходимо иметь 5 ... 6 спутников на орбитах, равномерно смещенных вокруг Земли. Определение по спутнику невозможно, если он виден под углом менее 7° относительно горизонта, из-за больших помех и затухания радиоволн в атмосфере.

При определении места необходимо учитывать искривление пути радиоволн при их распространении через ионосферу, которое зависит от угла места спутника и частоты принимаемых колебаний.

Если используются метровые и дециметровые волны без учета ионосферной рефракции, ошибка в местоположении может достигать нескольких сотен метров. На сантиметровых волнах ошибка практически отсутствует и может быть полностью исключена при одновременном измерении навигационного параметра на двух различных частотах.

2.1. Типы спутниковых систем

2.1.1. Спутниковые радионавигационные системы (СРНС)

Использование навигационных искусственных спутников Земли для определения места судна в море возможно с помощью радиосигналов, "связывающих" судно со спутником, который в данном случае является навигационным ориентиром с известными координатами [1,13].

Место судна может быть определено принципиально одним из двух способов:

1. На судне - по радиосигналам спутника при известных его координатах в течение всего времени движения НИСЗ или на момент определения места.

Этот способ является основным и используется в различных действующих спутниковых РНС. Определение места осуществляется обычно в пассивном режиме, при котором на судне *ведется только прием сигналов*. (Возможен и активный режим, требующий установки на судне приемопередающей аппаратуры).

2. На наземной контрольной станции - по радиосигналам запроса со спутника и ответа с судна.

Ответ судна не содержит данных о его координатах, рассчитываются они на контрольной станции, где имеются траекторные данные спутника и данные о моменте получения ответа судна. Такой способ пригоден для оперативного определения местоположения судов всего флота.

При беззапросном варианте спутник не запрашивает судно, а лишь принимает от него радиосигналы. При этом контрольная станция получает данные для определения места судна. В настоящее время беззапросный способ используется в космической системе поиска аварийных судов и самолетов (КОСПАС — САРСАТ) [16,17].

Спутниковые РНС обеспечивают независимое от времени суток и года глобальное обслуживание и выдают однозначные координаты судна с точностью от нескольких кабельтовых до нескольких метров.

Обслуживание информацией судов, находящихся в различных районах Земного шара, может быть обеспечено при наличии определенного количества ИСЗ. Орбиты, по которым происходит полет спутников, выбраны таким образом, чтобы ИСЗ находились в зоне радиовидимости в течение необходимого времени или постоянно. Определение места в некоторых, ранее применявшихся СРНС, например, в СРНС «Транзит» (США) осуществлялось лишь периодически с интервалом от получаса до нескольких часов в зависимости от района плавания, а в ныне действующих СРНС, например, в СРНС «Навстар» (США); «ГЛОНАСС» (Россия) — в любой момент времени и может быть непрерывным.

Непрерывность определения или определение по нескольким параметрам, в том числе - и при использовании эффекта Доплера, обеспечивают получение не только места судна, но и вектора его скорости.

В СРНС «Транзит» скорость судна определялась с точностью 0,5 ... 1,5 уз, а в СРНС «Навстар» определяется с точностью 0,2 уз.

Функционирование НИСЗ предполагает наличие на Земле системы специальных наземных станций слежения за спутниками и управления всей системой. Как на наземных станциях, так и на спутниках устанавливаются различные радиотехнические устройства, обеспечивающие радиосвязь между ними и передачу сигналов со спутника на судно.

На судне применяется приемоиндикатор, осуществляющий прием радиосигналов, их обработку и выдачу необходимой информации. Все это может быть выполнено только при объединении приемоиндикатора с ЭВМ. Поэтому,

несмотря на то, что первые СРНС появились в середине 60-х годов, массовое применение приемоиндикаторов на судах торгового и рыбопромыслового флота стало возможным спустя не менее 10 лет, когда появились недорогие ЭВМ, выполненные на интегральных схемах.

Например, плата приемника современного приемоиндикатора СРНС «Навстар» содержит: высокочастотный приемный тракт, устройства сложной математической обработки принятых из космоса сигналов, компьютер с большим быстродействием и значительной памятью, микроэлектронные схемы его сопряжения с внешними устройствами и другие сложные элементы. Сама плата имеет несколько слоев печатного монтажа и обеспечивает одновременный прием и обработку сигналов до восьми спутников. Управляют этим «ансамблем» уникальные математические алгоритмы, реализованные в виде машинных программ [25].

2.2. Методы определения места судна

Определение места судна с помощью ИСЗ предполагает решение трех отдельных задач, а именно:

- определение координат спутника (его траекторных данных) в момент измерения навигационного параметра;
- относительную привязку, т. е. нахождение координат судна относительно спутника;
- вычисление географических координат судна.

Координаты спутника и географические координаты судна определяются в результате обработки в ЭВМ судового приемоиндикатора, по специальной программе, траекторных данных ИСЗ и относительных координат ИСЗ — судно.

Для нахождения координат судна применимы, в большинстве своем, методы, которые используют обычно в наземных радионавигационных системах. Однако техническое решение определения места судна в спутниковых РНС достигается применением специальных методов определения.

Возможны следующие методы определения места с использованием ИСЗ [1,2,3]:

- угломерный — определяется *угловая высота* спутника;
- доплеровский – использование эффекта Доплера – определение *сдвига частоты* излученного ИСЗ радиосигнала относительно опорной (эталонной) частоты приемоиндикатора;
- радиально-скоростной — определяется *скорость сближения* спутника с судном, что равносильно использованию гиперболической РНС с изменяющейся длиной базы;
- разностно-дальномерный — определяется *разность расстояний* до одного и того же спутника в различных точках его движения по орбите, что равносильно использованию гиперболической РНС с перемещающейся базой. (Этот метод применялся в СРНС «Транзит» и «Цикада»).
- дальномерный — определяется *наклонная дальность* до спутника. Разновидность дальномерного метода - *псевдодальномерный* метод.

В СРНС «Навстар» и «ГЛОНАСС» используют псевдодальномерный, а также доплеровский методы определения места судна.

2.2.1. Угломерный метод

Угломерный метод определения, являясь наиболее простым и близким к астрономическим методам, позволяет определить место по одному ИСЗ, так как за время полета спутника в зоне видимости происходит значительное изменение его

высоты и азимута. Следовательно, за короткий промежуток времени можно получить несколько линий положения, пересекающихся друг с другом.

Судовое устройство, представляющее собой радиосекстан, с помощью остронаправленной антенны должно следить за спутником с точностью, равной долям угловой минуты. Размеры такой антенны (даже на сантиметровых волнах) становятся неприемлемыми для судовых условий, тем более, что ее основание должно иметь хорошую стабилизацию в пространстве. Расчет линий положения и места судна из-за быстрого перемещения спутника возможен лишь на ЭВМ. Все это вместе взятое не позволяет использовать угломерный способ определения места по ИСЗ в судовождении.

2.2.2. Доплеровский метод определения

При наличии на ИСЗ радиоаппаратуры, излучающей непрерывные немодулированные колебания высокой частоты f_0 , в приемник судового приемоиндикатора поступят колебания с частотой f , в общем случае не равной излучаемой частоте.

Объясняется это эффектом Доплера, который возникает при взаимном перемещении источника и приемника колебаний. Если источник и приемник приближаются друг к другу, то $f > f_0$, если же расстояние между ними увеличивается, то $f < f_0$.

Чем больше скорость изменения расстояния, тем больше принимаемая частота f отличается от излучаемой f_0 .

Эталонный генератор с частотой f_0 , установленный в приемоиндикаторе, дает возможность получить разностную доплеровскую частоту

$$F_D = \pm (f - f_0).$$

Следовательно, прием колебаний от приближающегося спутника дает доплеровскую частоту положительного знака, а прием от удаляющегося спутника — доплеровскую частоту отрицательного знака.

В момент нахождения ИСЗ на кратчайшем расстоянии S от точки наблюдения (судно на «траверзе спутника») частота $F_D = 0$, но скорость ее изменения наибольшая.

Таким образом, зафиксировав момент времени, при котором доплеровская частота равна нулю (при нахождении ИСЗ на минимальном удалении от наблюдателя), можно найти одну линию положения, а зная скорость изменения частоты, — и другую линию.

Первая является линией направления, перпендикулярной к трассе ИСЗ в точке кратчайшего расстояния, вторая — окружностью с определенным значением удаления от трассы.

Рассмотренный метод определения, называемый «траверсным», не используется в СРНС, так как дает всего две взаимно пересекающиеся линии положения за один пролет ИСЗ.

Сетку из ряда линий положения за один пролет навигационного ИСЗ обеспечивают доплеровские *радиально-скоростной* и *разностно-дальномерный* методы.

2.2.3. Радиально-скоростной метод

В общем случае значение доплеровской частоты от частоты излучения сигнала навигационным спутником и скорости его движения определяется выражением

$$F_D = f - f_0 = f_0(V_r/c) = V_r/\lambda = V \cos \alpha / \lambda, \quad (7)$$

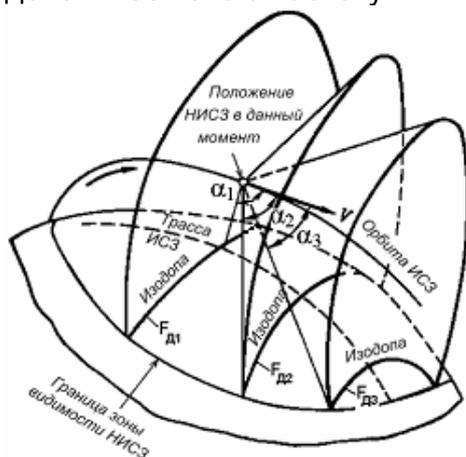
где: $V_r = V \cos \alpha$ — радиальная составляющая скорости спутника относительно судна ($V = 7,35$ км/с — скорость движения спутника на орбите при ее высоте 1000 км; α — угол между вектором скорости спутника и направлением на судно);

c — скорость распространения радиоволн;

λ — длина волны, соответствующая колебаниям с частотой f_0 .

В зоне видимости ИСЗ (см. рис. 2.2), излучающего колебания с частотой f_0 , образуются конические поверхности положения, которые, пересекаясь с поверхностью земного шара, создают линии положения.

Отличительной особенностью этих линий положения, называемых изодопами, является постоянное значение частоты Доплера. Поскольку, в соответствии с уравнением (7), величина частоты F_D для данного ИСЗ зависит от угла α , каждая изодопа имеет свою частоту.



Нулевое значение доплеровской частоты получается у изодопы, которая находится под спутником ($\alpha = 90^\circ$). По мере удаления от спутника в пределах зоны видимости на поверхности Земли угол α уменьшается, поэтому изодопы имеют все большее значение частоты Доплера.

В первом приближении изодопы являются гиперболами, поэтому при уменьшении угла α они имеют все более выпуклую форму. Изодопа с $F_D = 0$ (при $\alpha = 90^\circ$) является дугой большого круга на Земле.

Рис.2.2. Образование изодоп в спутниковых РНС происходит перемещение изодоп по поверхности Земли, что приводит к взаимному пересечению линий положения, соответствующих различным местонахождениям ИСЗ на орбите.

На более выпуклые гиперболы от первоначального положения ИСЗ накладываются менее выпуклые гиперболы, соответствующие текущему положению спутника. Место судна находится в одной из двух точек пересечения, расположенных по разные стороны от трассы спутника. При угловой высоте спутника не более 70° двусмысленность местонахождения судна устраняется счислением (достаточно знать, где проходит орбита спутника, к востоку или западу от меридиана судна). Для определения с повышенной точностью за время пролета ИСЗ в зоне видимости производят ряд измерений и получают место судна в точках пересечения нескольких изодоп.

При радиально-скоростном доплеровском методе следует, что взятые друг за другом в течение непродолжительного отрезка времени линии положения представляют собой гиперболы РНС с переменной длиной базы [1,2,3].

Частным случаем радиально-скоростного метода является траверзный метод определения, рассмотренный ранее. Очевидно, что определение места по траверзному методу производится с меньшей точностью, чем определение по нескольким пересекающимся изодопам.

Абсолютная точность радиально-скоростного доплеровского метода определения места тем лучше, чем выше частота колебаний, излучаемых спутником, и чем больше его скорость. Поэтому применяют круговые орбиты высотой не более 1000 км и частотой излучения, равной нескольким сотням мегагерц.

Максимальное значение доплеровской частоты при этом достигает нескольких килогерц, что обеспечивает простоту измерений.

2.2.4. Разностно-дальномерный (интегральный) метод

При своем движении ИСЗ занимает на орбите последовательные точки $S_1, S_2, S_3...$ (рис. 2.3). Это приводит к образованию в пространстве гиперболической РНС, база которой перемещается по орбите ИСЗ. Измерение разности расстояний ΔD_1 от судна до двух последовательных точек нахождения спутника S_1, S_2 дает поверхность положения в виде первого гиперboloида вращения.

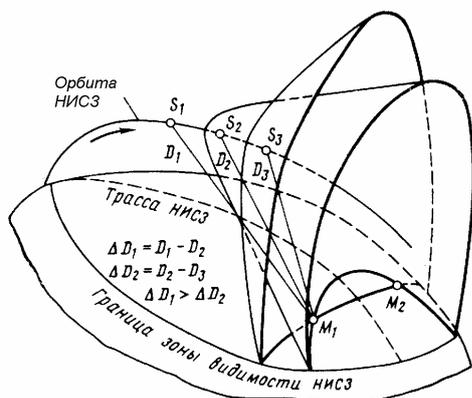


Рис.2.3. Интегральный доплеровский метод

Измерение ΔD_2 от точек S_2, S_3 дает второй гиперboloид вращения. Пересечение гиперboloидов вращения с поверхностью Земли создает на ней гиперболические линии положения, пересекающиеся друг с другом.

Определение разности расстояний осуществляется доплеровским методом путем интегрирования (подсчета суммарного количества периодов колебаний (импульсов биений)) частоты Доплера за время перемещения ИСЗ на длину базы [2].

Таким образом, каждому количеству импульсов биений доплеровской частоты соответствует свое значение разности расстояний от точек нахождения ИСЗ в моменты начала и конца подсчета импульсов биений. Технических трудностей такой метод измерений не представляет, так как отрезок времени (интервал интегрирования), в течение которого ведется подсчет, может быть достаточно большим. В СРНС «Транзит», где использовался этот метод, интервал интегрирования составлял от 120с до 24с. Двухминутный интервал подсчета суммарного количества периодов колебаний соответствует гиперболической РНС с базовым расстоянием 870 км. Точность определения места при подсчете импульсов биений с погрешностью до одного импульса может быть не хуже нескольких метров.

За время нахождения ИСЗ в зоне его видимости может быть получено достаточно большое количество пересекающихся линий положения. Обработка результатов измерения на ЭВМ, входящей в комплект судового приемоиндикатора, дает возможность получения места судна с высокой точностью. Вычисление производится по программе, в которой сравниваются измеренные значения со счислимыми путем последовательных приближений несколькими циклами (итерациями) до полной сходимости результатов. Координаты судна (долгота и широта) и время определения отображаются на дисплее приемоиндикатора.

2.2.5. Дальномерный метод

Определение дальности по ИСЗ возможно либо *активным* (запросным), либо *пассивным* (беззапросным) способом.

При *активном* способе судовой передатчик излучает запросный сигнал, который спутник принимает и переизлучает обратно на судно. С выхода судового приемника принятый сигнал поступает в индикаторное устройство, где *измеряется отрезок времени* от момента посылки сигнала судном до момента его возвращения.

При *пассивном* способе *излучение осуществляет только спутник*, сигналы которого согласованы с единым временем благодаря высокостабильному

собственному генератору, периодически синхронизируемому от наземной станции. Принятый на судне сигнал позволяет определить дальность до ИСЗ при наличии в судовом приемоиндикаторе своего стабильного эталонного генератора.

При любом из этих двух способов спутник должен передавать свои траекторные данные на момент установления связи между ним и судном.

Активный способ для определения места судна в настоящее время в спутниковых РНС не применяется, но не исключено его применение в некоторых других системах.

Пассивный способ до середины 70-х годов не мог обеспечить достаточной точности из-за отсутствия компактных и недорогих генераторов эталонной частоты (времени) с необходимой стабильностью. Появление эталонов частоты на атомной основе (рубидиевых, цезиевых и водородных) дало возможность использовать дальномерный пассивный (так называемый *псевдодальномерный*) метод в СРНС с круговыми орбитами высотой около 20 тыс. км («Навстар», «Глонасс»).

Нахождение в зоне видимости одновременно не менее трех-четырех ИСЗ создает условия для определения трех координат (*широты* - φ , *долготы* - λ , *высоты* - H) при наличии у пользователя обычного кварцевого эталонного генератора со значительно меньшей стабильностью по сравнению с установленными на ИСЗ.

Для использования этого метода на орбиты выводится достаточно большое количество спутников таким образом, чтобы четыре из наблюдаемых ИСЗ находились в положениях, которые обеспечивают наилучшую геометрию для определения.

2.2.6. Пассивный псевдодальномерный способ определения места

Измерение псевдодальности от космического аппарата (КА) до аппаратуры потребителя (АП) происходит в пассивном режиме, поскольку радиосигнал распространяется от спутника к приемоиндикатору (ПИ) в одном направлении [12].

Если бы был известен момент излучения сигнала со спутника, то расстояние от него к ПИ можно определить согласно формуле:

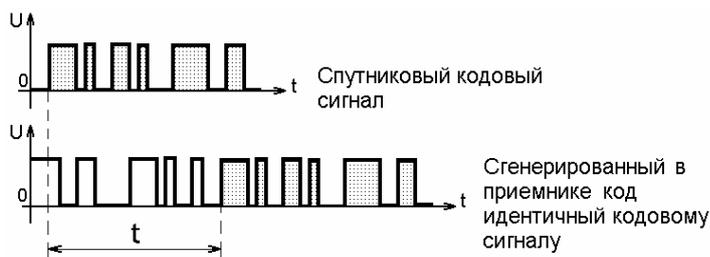
$$D = ct, \quad (8)$$

где t - время движения радиосигнала от КА к ПИ.

Радиоволна распространяется со скоростью приблизительно равной скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Если КА относительно ПИ будет в зените, например на высоте 20180 км, то радиосигналу потребуется время $t \approx 0,06$ с, чтобы пройти это расстояние. Поэтому необходимо определять время с высокой точностью, для чего устанавливаются "высокоточные часы" на КА и ПИ.

В современных СРНС «Навстар», «Глонасс» применен совершенный способ



измерения времени, основанный на атомном стандарте частоты, который обеспечивает ход бортовых часов КА с точностью 10^{-9} с. Главной трудностью при измерении времени прохождения радиосигнала явилось *точное выделение* в ПИ *момента*

времени, в который радиоимпульс излучен с КА.

Для этого разработчики СРНС обратились к разумной идее: синхронизировать часы КА и ПИ так, чтобы они генерировали абсолютно идентичные последовательности сигналов - коды (см. рис.2.4).

От КА приемоиндикатор принимает радиосигнал - код "излученный" и проверяется, как давно ПИ генерировал такой же код "опорный" – копию кода КА.

Выделенный таким образом *сдвиг одинакового вида кода* в сигнале КА и сгенерированного в ПИ будет соответствовать времени t прохождения радиосигналом расстояния от КА к приемоиндикатору.

Формирование таким образом "опорных" и "излучаемых" сигналов достигается наличием в ПИ и КА высокостабильных генераторов - "часов".

Время распространения сигнала от передатчика КА к ПИ представляет собой задержку Δt , на которую необходимо сдвинуть "опорный" сигнал, выработанный в ПИ, чтобы он с точностью до фазы совпал с принятым (излученным с КА), при этом время задержки будет точно соответствовать времени распространения сигнала от излучателя к приемнику (см. рис.2.4). Данный "код" выглядит как ряд случайных импульсов - «псевдослучайных последовательностей». (Этим импульсным кодом модулируют несущую частоту сигнала, излучаемого спутником). Таким образом, на КА и в ПИ вырабатываются две абсолютно идентичные последовательности сигналов - коды, которые поступают в ПИ на смеситель, где и определяется временной сдвиг - т.е. время движения сигнала t от КА к ПИ.

Математически эти коды формируются из двух функций полиномов типа [4,9]:

$$\delta_1(x) = 1 + x^3 + x^{10} + \dots (x = t),$$

$$\delta_2(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^{10} + \dots (x = t + \delta t).$$

Если их сложить в двоичном коде, сдвигая одну функцию относительно другой, получают 1025 различных вариантов. Из них выбирают 37, которые позволяют выделить совершенно некоррелированные сигналы. Полученная последовательность дает возможность распознавать номер КА и определить время прохождения радиосигнала от КА к приемоиндикатору, т.е. измерить навигационный параметр D .

$D_{\text{псд}}$ – псевдодальность (квазидальность - как бы дальность):

$$\begin{aligned} \text{или} \quad D_{\text{псд}} &= c(t + \delta t); \\ D_{\text{псд}} &= D + c \cdot \delta t, \end{aligned} \quad (9)$$

где D - истинное расстояние (см. уравнение 8); δt - погрешность в определении t .

Таким образом, ПИ измеряет время, за которое радиосигнал прошел от КА к приемоиндикатору. Если бы ПИ имел сверхточные часы (как на КА), то трех измерений $D_{\text{псд}}$ от трех КА было бы достаточно для определения места судна в трехмерной системе координат (x_c, y_c, z_c) . Но точность часов ПИ значительно ниже - они (ПИ) стоили бы очень дорого. Тогда для определения места судна и погрешности времени δt используют измерения до четырех КА.

Большую часть δt составляет погрешность из-за *рассогласование* шкалы времени ПИ относительно шкалы времени КА (за счет значительной неточности шкалы времени в ПИ).

При измерении $D_{\text{псд}}$ до трех КА на поверхности Земли место судна (широта - φ и долгота - λ) находится в пересечении трех

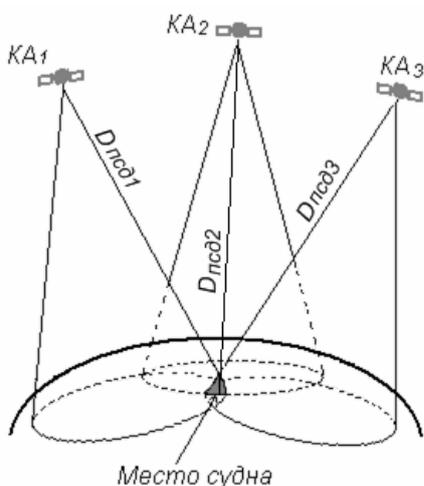


Рис.2.6 изолиний - окружностей, внутри треугольника погрешностей (см. рис.2.6).

Для определения же еще и высоты антенны ПИ относительно поверхности Земли – необходимы измерения $D_{\text{псд}}$ до четырех КА.

Вычислительное устройство ПИ будет "прибавлять" или "вычитать" $D_{\text{псд}}$ из измеренных при t_1 , t_2 , t_3 и t_4 до тех пор, пока рассчитанные псевдодальности $D_{\text{псд}}$ не образуют пересечение четырех сфер (изоповерхностей) в одной точке. В этом случае определяется место судна, погрешность шкалы времени ПИ относительно шкалы времени всей системы GPS и каждого КА. Для этого в ПИ имеется 4 канала приема и первичной обработки радиосигнала от КА (в некоторых ПИ 6-8 каналов).

Излучаемые КА кодированные радиосигналы модулированы по фазе. Принцип фазовой модуляции показан на рис.2.7.

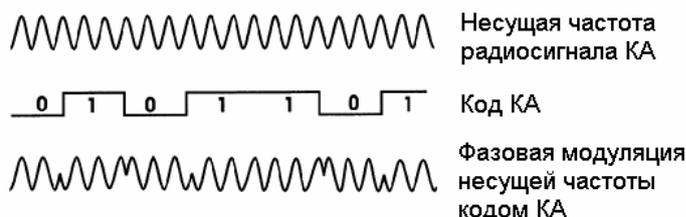


Рис.2.7. Принцип фазовой модуляции

Нахождение псевдорасстояний (или их разности) осуществляется при импульсном излучении сигналов спутниками. Однако, для повышения помехозащищенности системы, в действующих СРНС используют псевдошумовую модуляцию излучаемых сигналов.

Это дает возможность всем ИСЗ работать на *одной и той же*

несущей частоте (на волне около 19 см и/или 24.4 см), но со своим законом модуляции. Применение псевдошумовой модуляции с длительным периодом неповторяемости сигнала (до нескольких недель) создает условия для построения СРНС, определение места по которой невозможно, если пользователю не известен код модуляции [2].

Наряду с этим в системе может быть применен и более короткий по времени код модуляции, позволяющий определяться всем желающим пользователям, но с меньшей точностью.

Лекция №24

2.3. Структура навигационных радиосигналов НКА GPS

Передатчики НКА GPS излучают для определения места, два непрерывных модулированных радиосигнала на частотах L_1 - 1575,42 МГц ($\lambda=19$ см) и L_2 - 1227,6 МГц ($\lambda =24,4$ см). (С 2005 г. НКА излучают еще и третью частоту L_5 - 1176,45 МГц, предназначенную для специального применения) [9,15,18,19].

Все передаваемые НКА радиосигналы порождены одним стандартом частоты – 10,23 МГц и когерентно связаны между собой. (L_1 - 1575,42 МГц является 154 гармоникой частоты 10,23 МГц, а L_2 - 1227,6 МГц – соответственно 120 гармоникой).

(Применение двух несущих частот позволяет исправить погрешность GPS, известную как ионосферная задержка).

Все спутники GPS передают радиосигналы на этих же частотах - L_1 и L_2 , которые манипулированы по фазе (см. рис.2.7) по закону псевдослучайных двоичных цифровых последовательностей - **цифровыми кодами** – двумя **дальномерными кодами** и **информационным сообщением**.

Для того, чтобы приемники различали НКА – применяют **для каждого НКА свой** цифровой шифр – код, свойственный только данному номеру НКА. Это позволяет ПИ судна "узнать" номер НКА при измерении расстояния до него – то есть при измерении навигационного параметра.

Информационное сообщение (последовательность) содержит информацию об эфемеридах НКА, системном времени, поведении "часов" НКА, статусе сообщения и др.

Дальномерная последовательность предназначена для определения в приемоиндикаторе потребителя псевдодальности и других параметров, которые позволяют определить координаты объекта.

Существует два основных дальномерных кода:

- дальномерный псевдослучайный **C/A**-код – (Clear (Coarse)/Acquisition) - код свободного доступа;
- дальномерный псевдослучайный **P**-код (*P* – Precise(Protected)) – защищенный код.

Использование соответствующих кодов образует такие возможные режимы работы аппаратуры потребителей (АП) [9,13,19]:

SPS (Standart Positioning Service) для C/A-кода - обеспечивает гражданских потребителей.

PPS (Precise Positioning Service) для P-кода - обеспечивает доступ для санкционированных потребителей.

Как дальномерные, так и информационные коды формируются в НКА с помощью чередующихся прямоугольных импульсов (рис.2.9), так называемой M-последовательности, в которых число 0 и 1 (число символов) может отличаться *не более чем на один символ*, что придает

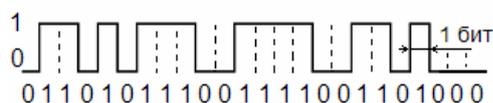


Рис.2.9.

сигналу, при кажущейся хаотичности чередования символов, свойства широкополосного шума.

Однако для различных кодов их длительность различная.

У информационного кода длительность импульса равна 20 мс, а их последовательность формируется с частотой 50 бит/с.

Импульсы C/A-кода формируются с частотой 1,023 МГц, а P-кода – с частотой 10,23 МГц. В этом случае длительность одного импульса (бита) C/A-кода будет равна: $\tau_{\text{бит}} = 1/f = 1/1,023 \text{ МГц} = 0,9775 \text{ мкс}$, а для P-кода - один бит равен 0,09775 мкс.

На рис.2.10 показан пример сложения C/A кода с информационными (навигационными данными) кодами и модуляция C/A кодом несущей частоты L1.

Из рисунка видно, что информационный код, формирующийся с частотой 50 бит/с, обладает длительностью одного бита 20 мс (рис.2.10,а). В 1 мс этого бита (см. рис.2.10,б) «вкладывается» дальномерный C/A код (см. рис.2.10, в), при этом количество двоичных псевдослучайных импульсов (бит) 0 или 1 составит: $1\text{ мс} : 0,9775 \text{ мкс} = 1023$. Отсюда также следует, что длительность C/A кода равна 1000 мкс.

Как было сказано выше, дальномерными кодами модулируются несущие частоты L1 и L2. В приведенном примере – в 1бите C/A кода, который модулирует частоту L1 1575,42 МГц, вкладывается *без изменения фазы*: $1575,42 \cdot 10^6 \text{ (Гц)} \times 0,9775 \cdot 10^{-6} \text{ (с)} = 1540$ колебаний (волн) (рис.2.10,г). А «длина» бита для L1 равна: $3 \cdot 10^8 \text{ (м/с)} \times 0,9775 \cdot 10^{-6} \text{ (с)} = 293,25$ метров.

Аналогично рассуждая - для дальномерного P-кода, у которого длительность бита псевдослучайной последовательности равна 0,09775 мкс, количество двоичных

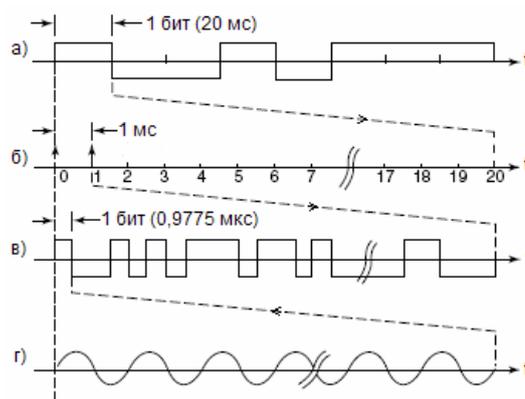


Рис.2.10.

псевдослучайных импульсов (бит) 0 или 1 составит: $1\text{мс}:0,09775\text{ мкс}=10230$, при этом «длина» бита P -кода для $L1$ равна: $3 \cdot 10^8 (\text{м/с}) \times 0,09775 \cdot 10^{-6} (\text{с}) = 29,325$ метров.

Также, как и для C/A кода, длительность P -кода равна 1000 мкс, а длительность 1 бита информационного (навигационного) кода равна 20 мс (см. рис.2.10,а).

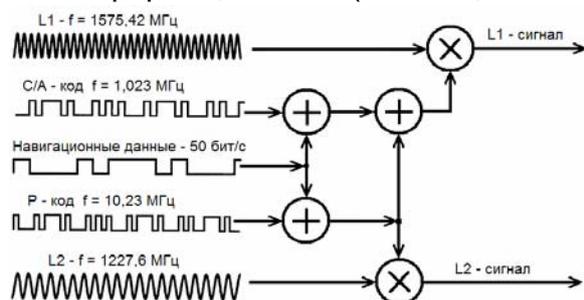


Рис.2.11. Модуляция несущих частот кодированными сигналами

Из приведенных выше расчетов видно, что потенциально точность определения места с P -кодом в десять раз выше, чем с C/A кодом.

На рис.2.11.показан процесс модуляции несущих частот $L1$ и $L2$ кодовыми сигналами.

Излучаемый сигнал $L1$ состоит из двух компонентов, которые находятся по фазе в квадратуре друг к другу

(сдвинуты на $\pi/2$) для удобства их разделения.

Первая компонента представляет собой радиосигнал, который модулирован двумя двоичными последовательностями (дальномерным псевдослучайным P -кодом) и информационной последовательностью передачи данных, складывающимися по модулю 2 (см. рис.2.11).

Вторая компонента – радиосигнал- также модулируется двумя двоичными последовательностями (дальномерный псевдослучайный C/A -код и информационная последовательность), складывающимися по модулю 2.

Сигнал $L2$ модулирован только P - кодом и обеспечивает доступ для санкционированных потребителей.

Это позволяет им исключить погрешности влияния ионосферы (т.к. используются сигналы на двух частотах). Соотношение погрешностей определения выходных параметров по C/A -коду и P -коду 10:1. Т.е., использование P -кода позволяет выполнить измерения с погрешностями, значительно меньшими, чем с C/A -кодом.

Основным навигационным дальномерным псевдослучайным кодом является *точный P-код* (P – Precise).

В распоряжении мирового сообщества находится *открытый* псевдослучайный C/A код, иногда переводимый как „легкий (грубый) захват”, который сначала использовался для первого вхождения в режим слежения с последующим переходом к использованию P -кода.

В целом этот шифр-код содержит 15345000 единичных элементов. Из них подобраны 1025, которые присваиваются в разном сочетании 24-м НКА на орбитах (то есть здесь используется кодовый принцип разделения сигналов). Через семь суток шифр-код заменяется (с субботы на воскресенье).

P -код представляет собой двоичную псевдослучайную последовательность длиной в 7 суток, с тактовой частотой 10,23 МГц. Длительность закрытого $P(Y)$ -код составляет 267 суток, формируется, в соответствии со специальными закрытыми документами (следует отметить, что, кроме вышеописанных, существует также Y -код, который образуется путем шифрования точного кода. Очевидно, что применение алгоритмов шифрования является прерогативой специальных ведомств).

2.3.1. Навигационное сообщение

В навигационном сообщении информационной последовательности GPS содержится информация об эфемеридах НКА, позволяющих рассчитать их координаты и составляющие скорости, альманах созвездия НКА, частотно-

временные поправки, метки времени, параметры ионосферной модели, сведения о работоспособности бортовой аппаратуры НКА и др.

Эта информация используется в аппаратуре потребителя при решении навигационно-временной задачи по определению координат, скорости и временной поправки к местной шкале времени.

3. Глобальная спутниковая система GPS

3.1. Назначение, общая характеристика и состав системы

Глобальная спутниковая система GPS (Global Position System) или «Navstar» (Navigational Satellite Providing Time and Range) предназначена для высокоточного определения в пространстве трех координат места, составляющих вектора скорости и времени различных подвижных объектов.

Система разработана по заказу и находится под управлением МО США.

Министерство Обороны США первоначально разрабатывало систему глобального позиционирования в 70-х годах только как спутниковую навигационную систему для решения военных задач. В начале 80-х федеральная комиссия по радио- и навигационному планированию провела объединение разработок Министерства Обороны и Министерства Транспорта в области дальнейшего преобразования системы в глобальный инструмент для местоопределения, навигации и синхронизации времени (PNT — positioning, navigation, and timing) [9]

Глобальная навигационная система состоит из трех главных сегментов: *космического сегмента, берегового сегмента контроля и управления, и сегмента потребителей*.

Космическим сегментом и сегментами контроля и управления управляют Вооруженные силы США, а также космическое командование Военно-Воздушных сил.

В основном, сегмент контроля и управления поддерживает целостность всех спутников и данные, которые они передают.

Космический сегмент состоит из созвездия спутников, которые находятся на орбите, включая эксплуатационные, резервные и неоперативные модули (спутники).

Потребительский сегмент - это все пользователи, которые приобрели любое из множества коммерчески доступных приемников.

3.1.1. Космический сегмент

Космический сегмент состоит из полного созвездия GPS спутников, находящихся на орбите вокруг земного шара.

Период вращения спутников (орбитальный период) составляет приблизительно 12 часов, благодаря чему каждые сутки через 23 ч 55 мин 56,6 с спутник оказывается дважды над одной и той же точкой земной поверхности (ежедневно на 4 мин 3,4 с раньше).

Космический сегмент образован орбитальной группировкой, номинально состоящей из 24 основных навигационных космических аппаратов (НКА) и от 3-х до 6-ти резервных НКА. НКА находятся на шести круговых орбитах высотой примерно 20200 км, с наклоном к экватору 55° и равномерно разнесенных по долготе через 60° .

В состав бортового оборудования НКА входят следующие подсистемы: синтезатор частот, блоки формирования и передатчики навигационных сигналов, средства синхронизации и временного обеспечения или бортовые "часы" (на НКА Блок-II используются два рубидиевых со стабильностью $5 \cdot 10^{-13}$ и два цезиевых стандарта частоты со стабильностью $2 \cdot 10^{-13}$), бортовое вычислительное устройство

в составе основной и двух резервных ЭВМ, подсистемы ориентации в процессе наведения на орбите, телеметрии, приема команд и ретрансляции сигналов наземного комплекса управления, терморегулирования и электропитания.

Антенная система в линии передачи данных использует конические и спирально-конические антенны. Для передачи навигационных сигналов используются фазированные антенные решетки из спиральных излучающих элементов.

На НКА имеются также двигатели для коррекции орбиты и двигатели системы ориентации. Ориентация в пространстве осуществляется с помощью системы специальных датчиков. Подсистема телеметрии включает радиопередачи данных о состоянии бортовой аппаратуры в сегмент управления. По этим же линиям с Земли поступают поправки к эфемеридам и показаниям бортовых "часов".

Для точного определения орбит НКА используется запросный метод. По соответствующим измерениям задержки этих сигналов осуществляется точное определение параметров орбит и параметров движения НКА.

Опытные НКА (Блок-I) обеспечивали нормальную работу по определению места в течение 3 - 4 дней без контакта с Землей.

Оперативные, усовершенствованные, НКА получили наименование Блок-II, Блок-IIA, Блок-IIR.

НКА Блок-II обеспечивал местоопределение без контакта с Землей в течение 14 дней, а НКА Блок-IIR - в течение 180 дней.

Повышение автономности работы достигается за счет прогнозирования и компенсации погрешностей координатно-временного обеспечения НКА на коротком и длительном интервалах работы, обеспечиваемых за счет записи большого количества данных в памяти бортового компьютера НКА.

На бортах НКА Блок-IIR размещаются средства межспутниковой связи, обмена данными и измерения взаимных дальностей, позволяющие проводить автономную синхронизацию "часов" НКА и автономное уточнение параметров орбит. Именно эти средства предназначены для обеспечения автономной работы СРНС в течение 180 дней без существенного ухудшения точности определения координат (сферическая вероятностная ошибка - 16 м), удовлетворяющие предъявляемым требованиям по устойчивости функционирования. Эта способность может быть реализована лишь после запуска необходимого числа НКА Блок-IIR.

НКА Блок-IIF предназначены для замены НКА Блок-IIR, предполагают увеличение срока службы до 14 и более лет, а также совершенствование структуры сигнала и координатно-временного обеспечения НКА.

Подсистемы терморегулирования включают теплоотводящие панели и электронагревательные элементы.

Энергопитание осуществляется от панелей солнечных батарей. В период прохождения через тень Земли применяются никель-кадмиевые аккумуляторы.

3.1.2. Сегмент управления

Сегмент управления состоит из сети наземных станций слежения, расположенных по всему миру. Сеть включает главную (ведущую) станцию (ГС), контрольные станции (КС) или станции слежения (СС) и три земные станции ввода данных на НКА. Главная станция контроля и управления находится на авиабазе Фалкон ВВС США в районе г. Колорадо-Спрингс, штат Колорадо.

КС расположены сравнительно равномерно по земному шару вблизи экватора, что создает благоприятные условия для наблюдений НКА. В случае некоторого критического сбоя в системе есть также два поста управления, дублирующих

центральный пост управления (один из них расположенный в Саннивейле, Калифорния, и другой в Роквилле, Мэриленд).

Стационарные контрольные посты – станции слежения - пассивно сопровождают все спутники GPS (видимые ими в любой момент времени), принимают от них сигналы и осуществляют глобальной навигационной системы GPS специальные прецизионные измерения дальности до НКА. Затем эта информация передается на центральный пост управления в Колорадо-Спрингс через безопасный канал связи DSCS (Defense Satellite Communication System - защищенный канал спутниковой связи) (см. рис.3.4). Главная станция осуществляет сбор измерений от всех КС. Там все измерения обрабатываются. По ним осуществляются точные расчеты параметров орбит, ионосферной модели и корректирующих поправок для бортовых часов, которые с главной станции через земные станции связи (атолл Диего-Гарсия, о. Вознесения, атолл Кваджелейн) совместно с данными обработки метеорологической информации, позволяющей уточнить параметры модели тропосферы, передаются на борт каждого НКА. Производится также мониторинг состояния НКА и управление их работой.

Основу ГС составляет центр управления с вычислительным комплексом (координационно-вычислительный центр) и средства передачи данных на земную станцию связи с НКА (станция закладки служебной информации [18,19]). Канал "Земля - НКА" использует частоту 2227,5 МГц; канал "НКА - Земля" использует частоту 1783,74 МГц [9].

Сегмент управления устанавливает шкалу времени GPS, которая привязана к шкале времени UTC (шкала Универсального координированного времени), поддерживаемой Военно-морской обсерваторией США. Начало отсчета времени установлено в полночь с 5.1. на 6.1.1980 г. Самой крупной единицей времени GPS является одна неделя, которая состоит из 604800 с. Время GPS может отличаться от времени UTC, поскольку первое является непрерывным, а второе может корректироваться на целое число секунд. Между ними имеется также некоторое постоянно растущее расхождение. Поэтому ГС контролирует шкалу времени GPS с тем, чтобы она не уходила от UTC больше, чем на одну 1 мкс.

Передаваемые с НКА навигационные данные содержат информацию о расхождениях шкал времени. Точность этих данных такова, чтобы точность алгоритмической привязки шкалы времени GPS к UTC находилась в пределах 90 нс.

3.1.3. Сегмент потребителей

Сегмент потребителей включает приемники (аппаратуру потребителей - АП) GPS и сообщество самих пользователей.

АП принимает сигналы GPS, обрабатывает их, измеряет радионавигационные параметры (псевдодальность и приращение псевдодальности), определяет на их основе координаты и составляющие скорости в геоцентрической системе координат, поправку к местной шкале времени T_{GPS} относительно системного времени GPS и ее уход, а затем геодезические координаты и высоту над опорным эллипсоидом в системе координат WGS-84 (φ, λ, H) и составляющие вектора скорости (V_N, V_E, V_H). Возможно также определение координат в какой-либо иной системе, например - Меркатора, Гаусса-Крюгера и т.д.

АП производится для навигации подвижных объектов (самолетов, вертолетов, морских и речных судов, автотранспорта), для определения координат при геодезических и землеустроительных работах, для синхронизации систем связи и т.д. Конструкция АП существенно зависит от назначения. Ее стоимость находится в диапазоне от ста до нескольких десятков тысяч долл. США [25].

3.1.3.1. Основные задачи, решаемые аппаратурой потребителя

К числу потребителей СРНС второго поколения относятся наземные и морские объекты (подвижные и неподвижные), летательные аппараты (высокодинамичные и низкодинамичные) и др.

В зависимости от потребителя, требования к точностным характеристикам, числу измеряемых координат и составляющих скорости, допустимому времени вхождения в синхронизм, массогабаритным показателям и стоимости, типы аппаратуры потребителя колеблются в широких пределах. Для наземных и морских объектов достаточно ограничиться измерением двух координат и двух составляющих скорости. Для летательных аппаратов число измеряемых координат и составляющих скорости возрастает до трех. Поэтому номенклатура модификаций бортовой аппаратуры весьма обширна [25].

Основными задачами, решаемыми аппаратурой потребителя, являются:

- выбор рабочего созвездия ИСЗ, поиск и опознавание навигационных сигналов ИСЗ,
- введение в синхронизм систем слежения по времени запаздывания и фазе несущей частоты дальномерных сигналов, измерение времени запаздывания и доплеровского сдвига частоты,
- выделение и расшифровка содержания навигационного (информационного) сообщения,
- расчет координат ИСЗ на момент навигационных измерений,
- решение навигационной задачи (определение координат и составляющих вектора скорости потребителя, поправок к сдвигу шкал времени и частот),
- отображение вычисленных данных на информационном табло.

3.2. Точностные характеристики системы GPS

Известно, что существующая система GPS постоянно совершенствуется, в частности – в отношении сервиса, предоставляемого системой GPS сообществу ее пользователей, как гражданских, так и военных.

До мая 2000 года точность определения координат гражданских пользователей с использованием С/А - кода была относительно низкой – 40-100 метров, так как этот код сознательно загроублялся так называемым режимом избирательного доступа SA (Selective Availability).

Это был специально созданный режим работы КА системы GPS только для режима SPS - С/А - кода для всех гражданских потребителей, когда значительно ухудшается точность измерения навигационного параметра псевдодальности в системе L1 на частоте $f_1 = 1575,42$ МГц. В этом режиме фактически смещалась шкала времени подачи сигнала с КА.

Это преднамеренное ухудшение точности работы было задумано с целью "не дать возможному противнику воспользоваться точностью GPS с тактическими целями" (инициатива руководства ВС США). Позже, в процессе модернизации системы произошли изменения, когда в полночь на 1 мая 2000 года согласно директиве Президента Клинтона этот режим был отключен [18,27].

С тех пор, как режим избирательного доступа был отключен, пользователи GPS постоянно получают горизонтальную точность в SPS лучше 10 метров.

Без всяких дополнительных пользовательских затрат на оборудование, отключение режима избирательного доступа дало пользователям GPS во всем мире значительные преимущества в реализации широкого круга их задач.

Точностные характеристики определения места, скорости движения и времени подвижного объекта с помощью

GPS (работающего не в дифференциальном режиме) определяются источниками погрешностей и соответствующими статистическими характеристиками.

Лекция №25

4. Спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС

4.1. Назначение, общая характеристика и состав системы

Основное назначение СРНС второго поколения ГЛОНАСС - глобальная оперативная навигация (сухопутных, морских, воздушных) подвижных объектов наземных и низкоорбитальных космических. Термин "глобальная оперативная навигация" означает, что подвижной объект, оснащенный навигационной аппаратурой потребителей (НАП), может в любом месте приземного пространства в любой момент времени определить (уточнить) параметры своего движения - три координаты и три составляющие вектора скорости [12].

Система разработана по заказу и находится под управлением Министерства обороны РФ. Распоряжением Президента РФ от 18 02 99 г. ГЛОНАСС был придан статус системы двойного (военного и гражданского) назначения [10,11]. Определено также, что федеральными органами исполнительной власти, ответственными за ее использование, поддержание и развитие, являются Министерство обороны и Российское авиационно-космическое агентство.

С марта 1995 г., Российская Федерация, являющаяся владельцем СРНС ГЛОНАСС, разрешает использовать систему ГЛОНАСС в стандартном режиме для гражданского, коммерческого и научного использования без взимания за это специальной платы.

В ГЛОНАСС применяются навигационные космические аппараты (НКА) на круговых геоцентрических орбитах с высотой около 20000 км над поверхностью Земли. Благодаря использованию бортовых эталонов времени и частоты, атомных стандартов частоты, в системе обеспечивается взаимная синхронизация навигационных радиосигналов, излучаемых орбитальной группировкой НКА.

В НАП на подвижном объекте в сеансе навигации принимаются радиосигналы не менее чем от четырех радиовидимых НКА и используются для измерения не менее чем четырех соответствующих псевдодальностей (ПД) и радиальных псевдоскоростей (ПС). Результаты измерений и эфемеридная информация (ЭИ), принятая от каждого НКА, позволяют определить три координаты и три составляющие вектора скорости подвижного объекта и определить смещение шкалы времени (ШВ) объекта относительно ШВ системы. В СРНС число потребителей не ограничивается, поскольку НАП не передает радиосигналы на НКА, а только принимает их от НКА (*пассивная навигация*).

Радионавигационное поле СРНС ГЛОНАСС наряду с основной функцией (глобальная оперативная навигация приземных подвижных объектов) позволяет проводить [9,11]:

1. локальную высокоточную навигацию наземных подвижных объектов (сухопутных, морских, воздушных) на основе дифференциальных методов навигации с применением стационарных наземных корректирующих станций и НКА;
2. высокоточную взаимную геодезическую "привязку" удаленных наземных объектов;
3. взаимную синхронизацию стандартов частоты и времени на удаленных наземных объектах;
4. неоперативную автономную навигацию низко – и среднеорбитальных космических объектов;

5. определение ориентации объекта на основе радиоинтерферометрических измерений на объекте с помощью навигационных радиосигналов, принимаемых разнесенными антеннами.

СРНС ГЛОНАСС включает в себя три сегмента: *космический сегмент* с орбитальной группировкой (ОГ) навигационных космических аппаратов; *сегмент управления* - наземный комплекс управления (НКУ) орбитальной группировкой НКА; *сегмент* аппаратуры потребителей (АП).

4.3. Космический сегмент

4.3.1. Орбитальная группировка

Полная орбитальная группировка СРНС ГЛОНАСС [15] должен содержать 24 штатных НКА на круговых орбитах с наклоном $i=64,8^\circ$ в трех орбитальных плоскостях по восемь НКА в каждой. Долготы восходящих узлов трех орбитальных плоскостей различаются номинально на 120° . Номинальный период обращения НКА равен $T=11$ ч 15 мин 44 с, и, соответственно, номинальная высота круговой орбиты составляет 19100 км над поверхностью Земли.

В каждой орбитальной плоскости восемь НКА разнесены по аргументу широты номинально через 45° , и аргументы широты восьми НКА в трех орбитальных плоскостях сдвинуты на $\pm 15^\circ$. За время эксплуатации НКА на орбите (до пяти лет) реальные НКА в ОГ группировка положения могут отличаться от номинальных не более чем на $\pm 5^\circ$.

4.3.2. Структура навигационных радиосигналов

В системе ГЛОНАСС каждый штатный НКА в орбитальной группировке постоянно излучает шумоподобные непрерывные навигационные радиосигналы в двух диапазонах частот: от 1602,56 МГц до 1615,5 МГц ($L1$) и от 1246,43 МГц до 1256,5 МГц ($L2$) (для простоты дальше будем обозначать как 1600 МГц и 1250 МГц).

В АП навигационные измерения в двух диапазонах частот позволяют исключить ионосферные погрешности измерений [15].

Каждый НКА имеет цезиевый АСЧ, используемый для формирования бортовой шкалы (БШВ) и навигационных радиосигналов 1600 МГц и 1250 МГц.

Шумоподобные навигационные радиосигналы в ОГ НКА различаются несущими частотами. Поскольку для взаимноантиподных НКА в орбитальных плоскостях можно применять одинаковые несущие частоты, то для 24 штатных НКА минимально необходимое число несущих частот в каждом диапазоне частот равно 12. Данное утверждение достаточно очевидно, если иметь в виду наземных потребителей (сухопутных, морских, воздушных), поскольку в зоне радиовидимости наземного потребителя не могут одновременно находиться взаимноантиподные НКА. (Космический потребитель может одновременно "видеть" взаимноантиподные НКА).

В АП в сеансе навигации осуществляется поиск несущей частоты каждого принимаемого навигационного радиосигнала в пределах узкой полосы (~ 1 кГц) около прогнозируемого значения с учетом доплеровского сдвига несущей частоты.

Доплеровский сдвиг может иметь максимальные значения ± 5 кГц в АП на наземных объектах и ± 40 кГц в АП на низкоорбитальных космических объектах.

Навигационный $L1$ радиосигнал 1600 МГц - двухкомпонентный. На заданной несущей частоте в радиопередатчике формируются два одинаковых по мощности шумоподобных фазоманипулированных навигационных радиосигнала "в квадратуре"

(взаимный сдвиг по фазе на $\pm 90^\circ$): узкополосный (стандартной точности, СТ) и широкополосный (высокой точности, ВТ).

Широкополосные навигационные радиосигналы в системе ГЛОНАСС предназначены для использования санкционированными потребителями и имеют защиту от несанкционированного использования.

Узкополосный навигационный радиосигнал в системе ГЛОНАСС является открытым и предназначен для гражданских потребителей.

4.3.3. Навигационное сообщение

Для навигационных радиосигналов цифровая информация (ЦИ) навигационного сообщения формируется на борту НКА на основе данных, передаваемых от НКУ системы на борт НКА с помощью радиотехнических средств. Передаваемая в навигационных радиосигналах ЦИ структурирована в виде строк, кадров и суперкадров. В узкополосном навигационном радиосигнале 1600 МГц строка ЦИ имеет длительность 2 с (вместе сметками времени) и содержит 85 двоичных символов длительностью по 20 мс, передаваемых в относительном коде. Первый символ каждой строки является начальным ("холостым") для относительного кода. Последние восемь символов в каждой строке являются проверочными символами, позволяющие исправлять одиночный ошибочный символ и обнаруживать два ошибочных символа в строке. Кадр содержит 15 строк (30 с), суперкадр 5 кадров (2,5 мин).

В составе каждого кадра передается полный объем оперативной ЦИ и часть альманаха системы. Полный альманах передается в пределах суперкадра.

Оперативная ЦИ в кадре относится к НКА, излучающему навигационный радиосигнал, и содержит:

- признаки достоверности ЦИ в кадре;
- время начала кадра t_k ;
- эфемеридную информацию (ЭИ) - координаты и производные координат НКА в прямоугольной геоцентрической системе координат на момент времени t_0 ;
- частотно-временные поправки (ЧВП) на момент времени t_0 в виде относительной поправки к несущей частоте навигационного радиосигнала и поправки к блоку шкалы времени (БШВ) НКА;
- время t_0 . Время t_0 , к которому "привязаны" ЭИ и ЧВП, кратно 30 мин от начала суток.

Оперативная ЦИ необходима в НАП в сеансе навигации, так как ЧВП вносятся в результаты измерений, а ЭИ используется при определении координат и вектора скорости потребителя.

Альманах системы содержит:

- время, к которому относится альманах;
- параметры орбиты, номер пары несущих частот и поправку к БШВ для каждого штатного НКА в ОГ (24 НКА);
- поправку к шкале времени (ШВ) системы относительно ШВ страны; погрешность поправки не более 1 мкс.

Альманах системы необходим в НАП для планирования сеанса навигации (выбор оптимального созвездия НКА) и для приема навигационных радиосигналов в системе (прогноз доплеровского сдвига несущей частоты).

Узкополосные навигационные радиосигналы в системе ГЛОНАСС обеспечивают более оперативный прием (обновление) альманаха за счет более короткой длительности суперкадров (2,5 мин) по сравнению с системой GPS (12,5 мин) [9,11].

Навигационные радиосигналы, излучаемые штатными НКА, образуют радионавигационное поле в околоземном пространстве.

В СРНС ГЛОНАСС каждый штатный НКА излучает навигационные радиосигналы 1600 МГц и 1250 МГц в сторону Земли с помощью передающих антенн, рабочая часть диаграммы направленности (ДН) которых имеет ширину $2\varphi_0=38^\circ$ [9] и "освещает" диск Земли с избытком до высоты h_0 над поверхностью.

Рабочую часть ДН можно представить в виде конусного радиолуча с углом $2\varphi_0$ при вершине. Очевидно, что

$$\sin\varphi_0=(h_0+r)/(H+r),$$

где: $r = 6400$ км - радиус Земли;

$H=19100$ км - высота орбиты НКА.

При $\varphi_0=19^\circ$, $h_0 = 2000$ км.

При полной ОГ (24 штатных НКА) радионавигационное поле на высотах $h \leq h_0 - 2000$ км непрерывно в пространстве, т.е. потребитель в любой точке этого пространства "освещается" радиолучами не менее чем от четырех НКА, образующих по отношению к нему удовлетворительное по геометрическому фактору созвездие для оперативного автономного определения координат и вектора скорости.

На высотах $h > h_0$ радионавигационное поле становится дискретным в пространстве. Космические объекты на высотах $h_0 < h < H$ "освещены" радиолучами от необходимого для оперативной навигации созвездия (не менее четырех НКА, включая НКА ниже местного горизонта) не везде, а только при нахождении в определенных областях пространства.

Космические объекты на высотах $h > H$ (например, на геостационарной орбите) будут "освещены" на некоторых участках своей орбиты радиолучом от одного или двух НКА (при полной ОГ), и АП может не оперативно определить орбиту космического объекта на основе обработки результатов приема навигационных радиосигналов на "освещенных" участках орбиты.

5.Спутниковая радионавигационная система «ГАЛИЛЕО»

В настоящее время широкое распространение для целей морской навигации получила глобальная спутниковая радионавигационная система США - «Навстар». В России заканчивается окончательное развертывание СРНС ГЛОНАСС. По данным информационно-аналитического центра системы ГЛОНАСС [28], 4 марта 2008 года количество одновременно работающих спутников в системе вернулось к значению 15. Всего в системе числятся 16 аппаратов, из них работают 15, на техобслуживании - 1. Точность местоопределения указанных систем в открытом режиме составляет $\pm (10...20)$ м при доверительном интервале 0,95, а в дифференциальном режиме до $\pm(2...5)$ м.

Обе эти СРНС разработаны и запущены в эксплуатацию соответственными ведомствами этих стран и, по-прежнему, управляются военными, так что никто не может быть гарантирован от неожиданного прекращения работы систем.

Использование данных СРНС третьими странами вызывает некоторые трудности, связанные с необходимостью контроля их работоспособности, особенно в местах военных и других конфликтов, к тому же доступ к ним может в любой момент прекращен или загрублена точность позиционирования, как это было до мая 2000 г. с СРНС «Навстар».

После того как в 2000 г. основной провайдер услуг GPS (Министерство обороны США) отказался от режима селективного доступа, точность определения координат возросла почти на порядок, а режим дифференциальных поправок увеличивает

точность еще в несколько десятков раз, что удовлетворяет все категории потребителей навигационной информации.

Однако активно продолжают работы по *европейскому* проекту глобальной навигационной спутниковой системы (**Global Navigation Satellite System - GNSS**), создаваемой по инициативе ЕС и Европейского космического агентства.

На первый взгляд новая система по своей структуре, типам используемых сигналов и характеристикам аналогична GPS/ГЛОНАСС.

И все же, несмотря на очевидное сходство, GNSS существенно отличается от систем GPS и ГЛОНАСС. Во-первых, GNSS создается гражданской организацией, а, следовательно, в *ней нет и не может быть режима селективного доступа* и в принципе исключена возможность введения каких-либо ограничений. Что же касается системы GPS, то никто не гарантирует, что в случае возникновения конфликта в одной из "горячих точек" планеты такой режим не будет введен вновь.

Другой, не менее важный фактор - низкая скорость передачи навигационных данных в существующих системах (она равна 50 бит/с). Как правило, передача их навигационного сообщения объемом 1500 бит занимает не менее 30 с, что неприемлемо для отдельных категорий пользователей.

И, наконец, как любая система, GPS не застрахована от случайных сбоев и выхода из строя навигационных НКА, т. е. от потери целостности системы. Чтобы избежать ошибок определения местоположения, каждый НКА передает сведения о работоспособности своей бортовой аппаратуры. Время обнаружения нештатной ситуации на борту GPS-спутника составляет 2-3 ч. Безусловно, для большей части пользователей "потеря из информационного поля" одного-двух НКА в течение такого относительно небольшого периода времени остается практически незамеченным, тем более что грубые ошибки в определении местоположения отбрасываются программно, а сравнительно небольшие задержки в определении координат не критичны. Однако существует категория потребителей (воздушный и морской флот и т. п.), для которых даже такие небольшие сбои в работе навигационной системы недопустимы. Они могут привести к непредсказуемым последствиям, например, при взлете или заходе на посадку самолетов, при прохождении судна через узкий пролив.

Европейский проект глобальной навигационной спутниковой системы GNSS должен быть реализован в два этапа: GNSS-1 и GNSS-2.

На первом этапе (2001-2003 гг.) была создана Европейская геостационарная система навигационного дополнения - European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS), которая должна обеспечивать те же услуги, что и GPS/ ГЛОНАСС в период с 2004г. до 2015-2018 г.г. [30].

Основная часть проекта, GNSS-2, базируется на новой спутниковой системе, получившей название **Galileo**. Ее орбитальная группировка должна быть развернута до 2013 г.

Поэтому, странами ЕС Европы ведутся интенсивные разработки новой СРНС Galileo («Галилео»).

Новая система создается для обеспечения наибольшей точности определения координат.

Среди первостепенных задач проектирования новой системы, группой разработки сигналов Galileo Европейской комиссии выделила совместимость и возможность взаимодействия системы Galileo с другими спутниковыми навигационными системами, особенно с NAVSTAR, а также возможность иного использования системы в той части радиочастотного спектра, в которой будет работать Galileo.

Европейское сообщество поставило задачу, чтобы система Galileo была открытой глобальной системой, полностью совместимой с NAVSTAR, но одновременно была полностью независимой от нее.

Текущий сигнал системы Galileo планируется создать с учетом максимального взаимодействия с системой NAVSTAR, что позволит уменьшить уязвимость систем позиционирования.

Под независимостью систем подразумевается их защита или уменьшение вероятности одновременного выхода из строя двух систем. Это может быть достигнуто отчасти путем отдельного обслуживания наземной и космической инфраструктуры и систем управления, отчасти – путем введения в действие специально разработанных типов сигналов и иного распределения частот [28].

Работы по практическому созданию Galileo (сокращенно GNSS-2) начались в 2005 году, а первый этап практической эксплуатации системы планируется начать в 2013 г.

Система Galileo будет иметь открытую архитектуру, что обеспечит взаимодействие с существующими системами GPS, ГЛОНАСС, разрабатываемой системой EGNOS и службами поиска и спасения. Запланированный перечень ее навигационных услуг гораздо шире, чем у GPS и ГЛОНАСС.

Архитектура Galileo включает три основных элемента: космический сегмент, наземную инфраструктуру (комплекс управления) и навигационную аппаратуру потребителей.[30,31,32]

Космический сегмент должен состоять из 30 средневысотных навигационных спутников Земли (НСЗ), расположенных на трех орбитах. Из них 27 НСЗ должны входить в состав орбитальной группировки под названием Walker 27/3, что означает количество симметрично расположенных в пространстве 27 НСЗ, по 9 аппаратов на каждой из трех орбит. Чтобы обеспечивать необходимую избыточность на орбите и позволить быстрое восстановление в случае отказа спутников, предполагаются 3 активных резервных спутника, расположенных в промежутках между орбитами. Такое их расположение обеспечивает глобальное покрытие территории Земного шара. Срок службы всех аппаратов рассчитан на 10 лет. Особенностью указанной группировки НСЗ, по сравнению с ныне существующими, является более лучшая их геометрия наблюдения. При высоте орбит относительно поверхности Земли около 23616 км и угла наклона к экватору 56° их процесс наблюдения повторяется каждые 24 часа, а траектория каждого в отдельности НСЗ относительно Земли - через трое суток [15].

Первый космический аппарат GIOVE-A (**Galileo In-Orbit Validation Element**) системы Galileo был выведен на расчетную орбиту высотой свыше 23000 км 28 декабря 2005 года с помощью ракеты-носителя «Союз». На спутнике установлено двое атомных часов с отклонением менее одной миллиардной секунды в час, антенны L-диапазона и генераторы сигналов для навигационной системы. Эти сигналы передаются одновременно по двум каналам. Второй тестовый аппарат GIOVE -B, который выведен на орбиту весной 2008 года, передает сигналы уже по трем каналам сразу. (Космический аппарат GIOVE-B разработан и построен консорциумом Galileo Industries, в который входит около сотни фирм).

С помощью GIOVE-B должны пройти проверку на орбите ключевые технологии, имеющих важнейшее значение для проекта европейской системы глобального позиционирования "Галилео". В частности, для максимально точного отслеживания текущего времени, на чем традиционно строится работа высокотехнологичных навигационных систем, на спутнике установлены атомные часы. С помощью водородного мазера (квантового генератора) удастся достичь высочайшей точности их хода с погрешностью в одну наносекунду в 24 часа.

Орбитальная группировка Galileo оптимизирована для обслуживания территорий, находящихся в высоких широтах. В состав бортовой аппаратуры НКА войдет также ретранслятор сигналов радиомаяков, которые используются для проведения поисково-спасательных работ.

Наземная инфраструктура Galileo включает станции телеметрического контроля и управления орбитальной группировкой, объединенные в единую сеть глобального мониторинга. Информация в такой сети будет обрабатываться со столь высоким быстродействием, что это позволит обнаруживать сбои в работе бортового оборудования НКА за время, не превышающее 6 с. Планируется также значительно уменьшить время оперативного оповещения пользователей о сбоях в работе навигационных спутников.

Проектирование системы ведется с учетом ее интеграции с другими системами связи и навигации, что особенно важно в тех случаях, когда прием сигналов неустойчив и требуется передача дополнительной информации. Так, планируется интеграция Galileo с наземными навигационными системами Logan-C и EUROFIX, системами космической связи, имеющими собственные подсистемы определения местоположения (Globalstar, Orbcomm), а также системами беспроводной связи (GSM, UMTS), в которых предусмотрено хранение информации о местоположении абонентов.

Работа системы Galileo будет базироваться на *четырёх ключевых службах*.

Базовая, общедоступная служба (Open Service - OS) обеспечит позиционирование подвижных объектов (в том числе определение их координат с помощью мобильных телефонов), самолетную и морскую навигацию, передачу сигналов точного времени (*UTC*). Эти услуги предоставляются бесплатно.

Обеспечение безопасности, связанное с угрозой жизни людей, входит в компетенцию *службы спасения (Safety-of-Life Service - SLS)*. Она призвана обеспечить требования ICAO и других международных организаций для систем навигации, например, таких, которые гарантируют безопасную постановку судов в док или предотвращение столкновения поездов. Расчетная вероятность определения координат в SLS с первой попытки - не менее 0,999.

В задачи *третьей службы - общественного регулирования (Public Regulated Service - PRS)* - входит предоставление навигационной информации государственным структурам, полиции, гражданской обороне, службам обеспечения правопорядка, экстренной помощи и т. д. Основные требования - защищенность от внешних воздействий и невозможность пиратского использования ее навигационных сигналов незарегистрированными пользователями.

Четвертая, *коммерческая служба, (Commercial Service - CS)* будет предоставлять платные услуги зарегистрированным пользователям. В перечень ее услуг, кроме бесплатных услуг OS, войдет передача дополнительных зашифрованных данных, например, используемых для управления движением.

Кроме того, в системе Galileo планируется реализовать услуги **службы поиска и спасения (Search and Rescue Service)**. Каждый спутник Galileo способен ретранслировать одновременно сигналы от 300 аварийных радиомаяков, находящихся в активном состоянии. Эта информация будет передаваться с борта НКА в наземные пункты службы S&R. Точность определения местоположения для существующих в системе COSPAS-SARSAT радиомаяков - около 5 км, а для радиомаяков, оборудованных приемниками Galileo, - не более 10 м.

Комплекс аппаратуры наземного управления сосредоточен в Центре управления СРНС, где осуществляются телеметрические измерения траекторий НСЗ, синхронизация и контроль целостности их работы с передачей необходимых сигналов и команд на НСЗ.

Навигационная аппаратура потребителей (приемоиндикаторы) представляют собой многоканальные корреляционные кодовые приемники супергетеродинного типа.

Расчетная точность определения места судна системы составляет ± 4 м при доверительном интервале 0,95, точность привязки к шкале времени системы UTS на уровне 50 нс.

Передача информации в системе Galileo базируется на иной, чем в GPS и ГЛОНАСС, структуре узкополосных и широкополосных сигналов. Главное отличие - более высокая тактовая частота, что позволяет повысить точность измерения псевдодалейностей и обеспечить передачу данных, необходимых для управления движением.

В настоящее время для системы Galileo Международный Союз Электросвязи (МСЭ) выделил шесть участков частот в *L* - диапазоне (для навигационных спутников) и один участок в *C* - диапазоне (для геостационарных НКА).

Каждый навигационный спутник Galileo будет излучать по два шумоподобных радиосигнала: в нижней и в верхней части *L*-диапазона. Для общедоступных услуг будут использоваться сигналы *E1* и *E2* со скоростью 2-4 Мбит/с. Эти сигналы по своим параметрам аналогичны *C/A* коду системы GPS. Два других сигнала, *E5* и *E6*, будут передаваться с более высокой скоростью и предназначены для обслуживания пользователей на коммерческой основе.

С новыми тридцатью спутниками создаваемой системы Galileo, учитывая уже существующие спутники систем GPS и ГЛОНАСС, пользователи получат около 70 спутников, покрывающих весь земной шар. Чем больше спутников, тем выше точность навигации. Полная совместимость означает возможность использовать существующую аппаратуру, включая картографы, навигационные GPS и эхолоты.

Некоторые частоты всех трех СРНС («Галилео», «Навстар», ГЛОНАСС) расположены во взаимно-перекрывающихся участках, что дает возможность принимать их одним приемным устройством. Такой приемник, способный принимать сигналы всех трех СРНС, может использовать для определения места судна более 30 НСЗ одновременно, что повысит точность определения места с одновременным повышением надежности навигации.

Подобное увеличение количества спутников принесет пользу не только при работе в автономном режиме, но и улучшит качество определения координат и способность GPS аппаратуры разрешать неоднозначность по фазе несущей для отслеживаемого спутникового сигнала.

При наличии двух независимых (и в то же время совместимых) систем глобального позиционирования, пользователи могут выбрать три метода работы:

- *Использование только одной системы.* Такая ситуация может быть вполне реальной, особенно для военных и правительственных структур. США, внесшие огромный вклад в создание GPS, могут потребовать от определенных организаций использовать для целей позиционирования только систему GPS Navstar. Аналогично может поступить и Европейский Союз по отношению к своим отдельным государственным пользователям (только система Galileo).

- *Использовать одну систему для проверки работоспособности другой.* Даже если подобная аппаратура используется для целей навигации, пользователь может установить у себя двухсистемный приемник или два отдельных приемника, работающих с системами Navstar и Galileo. В этом случае будут вычисляться два независимых друг от друга решения и вычисляться корреляция между ними.

- *Совместные наблюдения от двух систем.* Пользователи будут проводить совместные измерения и получать единое навигационное решение. В таком режиме достигается лучшая видимость спутникового созвездия (особенно в городских

условиях и территориях с очень неравномерным рельефом, т.е. там, где сигналы могут быть заблокированы препятствиями) и требуется большая точность.

Повышение точностных характеристик обычно связывается с более качественной спутниковой геометрией единого GNSS созвездия, которая уменьшает так называемый *DOP* фактор и снижает ошибки в измеряемые псевдодальности.

Гарантированная точность определения координат для потребителей Galileo должна составлять 4 м в горизонтальной плоскости и 8 м - в вертикальной при значении доступности 95%. Точность определения временного положения по шкале UTC - не более 50 нс. Следует отметить, что это предварительные данные, которые могут уточняться.

6. Дифференциальный режим GPS

Как следует из предыдущих разделов, на точность определения места судна влияет много факторов. Для их уменьшения, а в некоторых случаях – исключения, наиболее эффективным средством является *дифференциальный способ* наблюдений - DGPS (Differential GPS). Его суть состоит в выполнении измерений двумя приемниками: один приемник GPS (1) устанавливается на базовой (контрольной) станции - контрольном

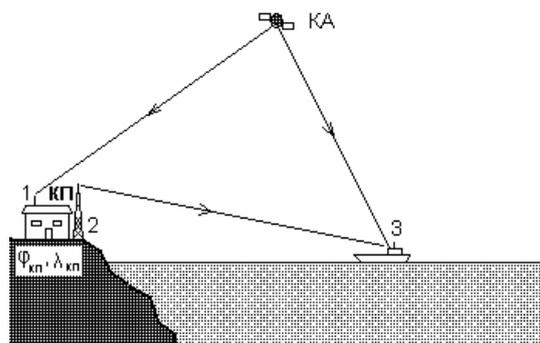


Рис.6.1. К сути дифференциального режима пункте (КП) с известными геодезическими координатами $\varphi_{кп}$, $\lambda_{кп}$ (см.рис.6.1), а другой – в определяемом месте, например на судне (3).

Поскольку расстояние от ИСЗ до приемников значительно больше расстояния между самими приемниками, то можно считать, что условия приема сигналов обоими приемниками практически одинаковы.

Следовательно, величины ошибок также будут близки.

Идея заключается в том, что на КП опорные приемники GPS, измеряющие псевдодальности до КА, рассчитывают точные дальности (по точным координатам пункта и КА). Рассчитываются и псевдокоординаты, поправки к координатам или к дальностям. Эти поправки передаются по радио на находящиеся поблизости потребители (морские суда - 3) (рис. 6.1). Используя поправки, ПИ определяют навигационные параметры с высокой точностью.

Сравнивая измеренные и рассчитанные дальности, исключают коррелированные погрешности: погрешности эфемерид (положения КА); погрешности рассогласования шкал времени КА и ПИ; погрешности за условия распространения радиоволн - ионосферная и тропосферная; геодезические погрешности. Все это вырабатывается в виде поправок. В случае использования DGPS точность места повышается более чем в 4 раза [12].

6.1. Способы дифференциальных определений

6.1.1. Способ разностей координат $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$

На контрольном пункте, где находится опорный приемник, рассчитываются по оптимальному (для него) созвездию координаты его места - $\varphi_{опр}$, $\lambda_{опр}$.

Зная $\varphi_{кп}$, $\lambda_{кп}$ рассчитывают поправки согласно уравнений:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{кп}} - \varphi_{\text{опр}},$$

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{кп}} - \lambda_{\text{опр}}.$$

Эти поправки передаются с помощью передатчиков (2) по радио на потребители (рис.6.1). Однако при этом необходимо выполнения одного существенного условия - использовать на судне необходимо те же КА, что и на КП, т.е. судовой ПИ лишается права выбора оптимального созвездия. По мере удаления судна от КП (более 100 морских миль) поправки менее соответствуют фактическим значениям поправок.

6.1.2. Способ разностей расстояний ΔD

Способ заключается в определении дифференциальных невязок псевдодальностей ΔD , а фактически - определение Δt (в наносекундах).

На контрольном пункте для каждого видимого КА рассчитывается $D_{\text{геодезич.}}$ по координатам КП и КА и определяется псевдодальность по сигналам КА.

Тогда

$$\Delta D_i = D_{\text{геодезич.}} - D_{\text{псевдодал.}}$$

Компьютер рассчитывает Δt , (в нс).

$$\Delta t_i = \Delta D_i / c$$

Для всех видимых КА в эфир передается, например: "КА1- задержка 5 нс, КА2 - опережение 15 нс" и так далее [12].

Потребитель выбирает для себя оптимальное созвездие КА и принимает для них поправки Δt_i . Точность определения места при удалении не ухудшается (как при способе 6.1.1.), но усложняется устройство ПИ - необходима приставка к ПИ для приема дифференциальных поправок (Δt_i) и дополнительное математическое обеспечение (компьютер). К тому же определенные поправки "устаревают", их необходимо заново определять. Обновление выполняется через 10 с (5 с идет расчет "новых" Δt_i). Скорость передачи поправок - 50 бод (50 бит/с).

Международная ассоциация маячных служб (International Association of Lighthouse Authorities (IALA)) установила свой протокол использования специального Международного стандарта выдачи поправок DGPS: RTCM - SC-104 (Radio Technical Commission for Maritime - Special Committee 104). Для их трансляции используются, как правило, морские радиомаяки, установленные по побережью в США, Швеции, Финляндии, Норвегии, Нидерландах и других странах.

По количеству КП и взаимодействию с потребителем дифференциальные определения делятся на два варианта:

1. *Общепринятый*. Он основан на работе АП с одним КП. При этом учитывается зависимость поправок от эфемеридной информации; от высоты КА над горизонтом; от условий распространения радиоволн (ионосферной и тропосферной); от удаления судна (ПИ) до КП (контрольного пункта).

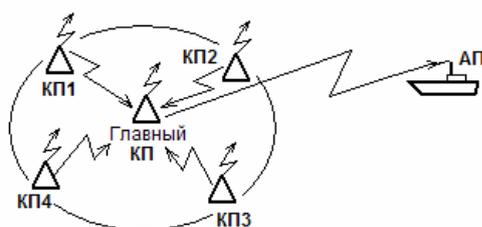


Рис.6.2. Схема построения развитого дифференциального варианта

Этот вариант прекращают использовать и переходят к развитому варианту.

2. *Развитой* дифференциальный вариант позволяет сохранить высокую точность определения места в радиусе $R \sim 1000$ миль от КП, практически не зависящую от удаления до КП (рис.6.2).

На данном участке побережья (или суши) подбираются и устанавливаются по окружности несколько КП-передатчиков. В центре - главный КП. Все они объединены в сеть. Все производят измерения и определяют поправки. Эти поправки передаются на главный КП, на котором происходит их совместная обработка по сложной математической модели, затем их объединяют в стандартный формат RTCM - SC-104 и передают в эфир $R \sim 1000$ миль.

В настоящее время развитой дифференциальный вариант имеет множество разновидностей, а именно - широкозонных, региональных и локальных дифференциальных систем.

Список использованной литературы ко второй части

1. Судовая радиоэлектроника и радионавигационные приборы: Учебник для ВИМУ/ А.М.Байрашевский, А.В.Жерлаков, А.А. Ильин, Н.Т.Ничипоренко, В.Б.Сапегин. – М.: Транспорт, 1988.- 271 с.
2. Судовые радионавигационные приборы/ В.В.Коновалов, Л.И.Кузнецова, Н.П.Мельников, О.Б.Причкин.- 5-е изд., перераб. и доп.- М.: Транспорт, 1989.-223 с.
3. Никитенко Ю.И., Быков В.И., Устинов Ю.М. Судовые радионавигационные системы: Учеб. для вузов. - М.: Транспорт, 1992.- 336с.
4. 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.
5. Радиотехника и радионавигационные приборы. Айзинов М.М., Байрашевский А.М. Изд.2-е, перераб. и доп. М.:Транспорт, 1975.-432 с.
6. Соненберг Г.Д. Радиолокационные и навигационные системы: Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1982.- 400 с.
7. Радионавигационные приборы и системы/ В.А.Василенко, Б.С.Розен, В.В.Серегин.- М.:Агропромиздат,1986.-319 с.: ил. (Учебн. для вузов).
8. <http://www.enci.ru/Loran>
- 9.Ю.А.Соловьев. Системы спутниковой навигации.- М.:Эко -Тренз, 2000.- 269 с.
10. Решетнев М.Ф. Развитие спутниковых радионавигационных систем. Информационный бюллетень НТЦ "Интернавигация", 1992, №1. стр 6-10.
11. Волков Н.М., Иванов Н.Е., Салищев В.А., Тюбалин В.В. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/Зарубежная радиоэлектроника, 1997, №1.
12. Навигационное использование средневысотных спутниковых РНС на судах морского флота. Д.Н. Рубинштейн, С.С.Спаский. Мортехинформреклама. Морской транспорт. Серия «Судовождение, связь и безопасность мореплавания». Экспресс-информация, вып.1(368)-2(369), 2000, 60 с.
13. Богданов В.А., Сорочинский В.А., Якшевич Е.В. Спутниковые системы морской навигации. – М.: Транспорт, 1987.- 200 с.
14. Демиденко П.П., Шевченко И.А.Спутниковая радионавигационная система «Галилео». Sea Review (морское обозрение). 4(20), 2005.- 24-26 с.
15. Admiralty List of Radio Signals. Vol.2, 2005/2006, p.266.
- 16.В.М.Кошевой, А.В.Шишкин, В.И.Купровский. Глобальная морская система связи для безопасности мореплавания. Одесса.:ОГМА,1997.- 224 с.
- 17.Глобальная морская система связи при бедствии и для обеспечения безопасности./ Липинский В.Н., под общ. ред. доц. Пономаренко В.В.-Одесса.: Морской тренажерный центр,1998.-402 с.
18. El-Rabbany, Ahmed. Introduction to GPS: the global positioning system. ARTECH HOUSE, INC. 2002.- 176 p.

19. Gregory T. French. Understanding the GPS. An introduction to the Global Positioning System. First Edition. 1996.- 255 p.
20. Интерфейсный контрольный документ GPS, ICD-200C-002, 25.9.97. www.navcen.uscg.mil/gps/geninfo/gpsdocuments/icd200/icd200.c.pdf.
21. Дьяконов В. Mathcad 8/2000: специальный справочник – СПб.: Издательство «Питер», 2000.- 592 с.
22. И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Изд.10-е стереотипное. М.: Гос. изд. физ.-матем. литер. 1962.- 608 с.
23. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. посібник / За ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І.Правди. – К.: Вища шк., 1999.- 838 с.: іл.
24. Н.И.Карякин, К.Н.Быстров, П.С.Киреев. Краткий справочник по физике. Изд.2-е. М.: Изд. «Высшая школа». 1964.- 574 с.
25. Б.К.Леонтьев. GPS:Все, что Вы хотели знать, но боялись спросить. М.: «Бук-Пресс», 2006.-352 с.
26. <http://www.rirt.ru/3dsat>
27. <http://www.dgps.com>
28. <http://www.gisa.ru>
29. <http://www.armstass.su>
30. Невдяев Л., Уткин Е.Навигационная система для Европы, <http://www.bytemag.ru>, 2006.
- 31.Скорик Е.Т. Новая спутниковая радионавигационная система «Галилео». РА , 2004, №10.
32. СНІР №2, 2003.
33. <http://ru.wikipedia.org/wiki>
- 34.Глобальные высокоэффективные широкозонные дифференциальные спутниковые системы радионавигации, управления и связи. Касымов Ш. И., Касымов А. Ш. Журнал «Радиотехника», №10, 2005.
35. www.cnews.ru/news.28.01.2005
36. www.networktech.ru