

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Военный факультет

Кафедра радиоэлектронной техники
ВВС и войск ПВО

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Допущено Министерством обороны Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для курсантов и студентов,
обучающихся в интересах радиотехнических войск*

Минск БГУИР 2017

УДК 621.396.6:355(076)
ББК 32.844+68.4я7
О-75

Авторы:

А. Н. Соколов, С. Н. Ермак, А. Г. Романович,
В. П. Вайдо, А. В. Денисевич

Рецензенты:

кафедра разведки и иностранных армий (слушателей)
учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»
(протокол №9 от 18.04.2016);

главный научный сотрудник государственного учреждения
«Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь»,
доктор технических наук, профессор С. Р. Гейстер

Основы построения радиоэлектронных средств : учеб. пособие /
О-75 А. Н. Соколов [и др.]. – Минск : БГУИР, 2017. – 100 с. : ил.
ISBN 978-985-543-293-8.

Издание разработано в соответствии с программой учебной дисциплины «Основы построения радиоэлектронных станций обнаружения воздушных целей» и является систематизированным учебным пособием по данной тематике. Рассматриваются вопросы основ построения современных средств радиолокации радиотехнических войск. Материал изложен в определенной последовательности и отражает методологические аспекты рассматриваемых вопросов. В отдельных случаях вопросы рассматриваются применительно к конкретным классам и образцам радиолокационных станций радиотехнических войск.

УДК 621.396.6:355(076)
ББК 32.844+68.4я7

ISBN 978-985-543-293-8

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2017

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АПЧ	– автоподстройка частоты
АР	– антенная решетка
АСУ	– автоматизированные системы управления
АФС	– антенно-фидерная система
АШП	– активная шумовая помеха
БАРУ	– быстродействующая автоматическая регулировка усиления
ВВС	– военно-воздушные силы
ДН	– диаграмма направленности
ДНА	– диаграмма направленности антенны
ИКО	– индикатор кругового обзора
ЛАХ	– логарифмическая амплитудно-частотная характеристика
НИП	– несинхронно-импульсная помеха
ОИП	– ответно-импульсная помеха
ПАП	– постановщик активных помех
ПБО	– подавление бокового ответа
ПВО	– противовоздушная оборона
ПП	– пассивные помехи
РЛИ	– радиолокационная информация
РЛП	– радиолокационное поле
РЛС	– радиолокационная станция
РЛС БР	– радиолокационная станция в боевом режиме
РЛС ДР	– радиолокационная станция в дежурном режиме
РЛС ОНЦУ	– радиолокационная станция обнаружения, наведения и целеуказания
РСА	– радиолокационные станции с синтезированной аппаратурой
РТВ	– радиотехнические войска
САЗО	– система с активным запросом-ответом
СДЦ	– селекция движущихся целей
УВИ	– устройство выдачи информации
УВЧ	– усилитель высокой частоты
УПИ	– устройство приема информации
УПЧ	– усилитель промежуточной частоты
ФАР	– фазированная антенная решетка
ЦВМ	– цифровая вычислительная машина
ШАРУ	– шумовая автоматическая регулировка усиления
ШОУ	– широкополосный ограничитель-усилитель
ШУПЧ	– широкополосный усилитель промежуточной частоты
ЭТ	– экстраполяционная точка

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Основы построения радиоэлектронной техники радиотехнических войск» предназначено для изучения дисциплин специализации кафедры радиоэлектронной техники ВВС и войск ПВО учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», а также других вузов Республики Беларусь, где проходят обучение студенты и курсанты родственных специальностей.

Наиболее актуально данное пособие при изучении следующих дисциплин специализации:

- «Техническая подготовка» для студентов, обучающихся по программам младших командиров;
- «Устройство и эксплуатация средств радиолокации» для студентов, обучающихся по программам офицеров запаса;
- «Основы построения наземных радиолокационных станций обнаружения воздушных целей», «Основы построения комплексов средств автоматизации» и «Радиоэлектронные системы локации военного назначения» для курсантов специальности «Радиоэлектронные системы».

Основные цели изучения данных дисциплин:

- обучить основам построения средств радиолокации РТВ в объеме, необходимом для выполнения функциональных обязанностей в составе боевого расчета радиотехнического подразделения в соответствии с первичным назначением и специализацией выпускников;
- развить у обучаемых логическое и алгоритмическое мышление, необходимое для ремонта и эксплуатации средств радиолокации РТВ в условиях лимита времени;
- изучить пути и методы применения общеинженерных, военнотехнических и специальных знаний для решения задач, характерных для радиотехнических войск, в том числе с помощью ЭВМ;
- подготовить обучаемых к самостоятельному освоению новых перспективных средств радиолокации РТВ.

1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РЛС

1.1. Радиотехнические войска как род войск ВВС и ПВО

Радиотехнические войска выполняют ответственные задачи по ведению радиолокационной разведки средств воздушного нападения противника и выдаче разведывательной и боевой информации, необходимой для управления войсками и радиолокационного обеспечения боевых действий зенитных ракетных войск и истребительной авиации. Для выполнения этих важных задач РТВ оснащаются новейшими средствами радиолокации, позволяющими в любое время года и суток, независимо от метеорологических условий и помех, успешно осуществлять радиолокационное наблюдение за средствами воздушного нападения противника на предельных дальностях и во всем диапазоне высот полета воздушных объектов.

1.1.1. Краткая справка из истории создания ВВС и войск ПВО Республики Беларусь

Военно-воздушные силы Республики Беларусь были образованы в 1992 г. на базе 26-й Воздушной армии. История и боевой путь армии неразрывно связаны с историей ВВС Западного фронта, на базе которых в мае 1942 г. и была сформирована 1-я Воздушная армия (в 1949 г. переименована в 26-ю Воздушную армию). Соединения и воинские части воздушной армии участвовали в Орловской и Смоленской операциях, освобождении Беларуси, Прибалтики, Польши, принимали участие в Берлинской операции. Более 160 воспитанников ВВС Западного фронта, 1-й Воздушной армии были удостоены звания Героя Советского Союза, 18 тысяч авиаторов награждены орденами и медалями. За образцовое выполнение боевых заданий, проявленную воинскую доблесть при освобождении Белоруссии подразделениям ПВО присвоены гвардейские звания и почетные наименования городов.

В послевоенный период личный состав объединения, умножая славу старших поколений авиаторов, с достоинством продолжал службу. Военные авиаторы с честью исполнили свой интернациональный долг в Афганистане, Корее, Вьетнаме, Египте, Анголе, Сирии, Йемене, Эфиопии, Кубе, Лаосе и Камбодже. Более 400 представителей ВВС принимали участие в ликвидации последствий на Чернобыльской АЭС.

Войска противовоздушной обороны Вооруженных Сил Республики Беларусь свою историю начинают с 1941 г., когда в г. Куйбышеве была сформирована 5-я дивизия ПВО на базе частей Московского корпуса ПВО. После нескольких реорганизаций 30 июня 1960 г. согласно Директиве Главнокомандующего войсками ПВО от 24 марта 1960 г. была создана 2-я Отдельная армия ПВО, в состав которой вошли 27-й Рижский и 11-й Барановичский корпуса ПВО. Личному составу одним из первых было доверено новейшее оружие: ЗРК С-300 и С-200, самолеты Су-15 и МиГ-25 П. В 1974 г. Указом Президиума Верховного Совета СССР 2-я Отдельная армия ПВО была награждена орденом

Красного Знамени. В 2000 г. Войска ПВО Вооруженных Сил Республики Беларусь были награждены Почетной грамотой Совета Министров Республики Беларусь.

В 2001 г. образован новый вид Вооруженных Сил Республики Беларусь, преемник истории и славных традиций – Военно-воздушные силы и войска противовоздушной обороны Республики Беларусь.

История радиотехнических войск как рода войск противовоздушной обороны, входивших в состав Вооруженных Сил СССР, берет свое начало 15 декабря 1951 г. В этот день соответствующим распоряжением Совета Министров СССР Министерству обороны была поставлена задача создания надежной службы обнаружения, оповещения и наведения, для чего предписывалось организовать единую радиолокационную систему страны. В период становления РТВ с конца 1950-х до середины 1960-х гг. осуществлялись массовые поставки радиолокационной техники, развертывались мощные группировки войск, началось производство комплексов средств автоматизации процессов сбора, обработки и выдачи радиолокационной информации.

С середины 1960-х до конца 1970-х гг. продолжилось освоение радиотехническими подразделениями господствующих высот, внедрение в войска новой радиолокационной техники, включая радиолокационные комплексы дальнего обнаружения, наведения и целеуказания П-80, 5Н87, а также автоматизированных систем управления войсками (АСУ). Во вьетнамской и ближневосточных войнах, где, по различным оценкам специалистов, американские ВВС потеряли от 2,5 до 4 тысяч самолетов и вертолетов, осуществлялась практическая проверка принципов строительства РТВ, тактики боевого применения войск, совершенствовались методы помехозащиты и принципы построения радиолокационного вооружения.

Период 1980-х гг. характеризовался качественными изменениями в вооружении и способах ведения боевых действий, поступлением в части новых образцов техники. Радиолокационное поле, созданное РТВ над территорией СССР, характеризовалось многократным перекрытием, что позволяло практически в любой точке осуществлять безостановочное сопровождение всевозможных летательных аппаратов. Это было необходимо для организации непрерывного огневого воздействия по воздушному противнику в случае развязывания крупномасштабной войны.

За последние годы решены многие вопросы по созданию единой автоматизированной системы управления разнородными силами и средствами. Сегодня на вооружении радиотехнических войск ВВС и войск ПВО находятся комплексы средств автоматизированного управления белорусского производства «Бор», «Поляна-РБ», «Неман», «Спрут», «Риф-Р». На боевое дежурство по противовоздушной обороне Республики Беларусь ежедневно заступают радиолокационные станции «Восток-Д», 19Ж6, 22Ж6, 44Ж6, 55Ж6, 5Н84А, «Противник-Г», «Восток-Д», подвижные радиовысотомеры ПРВ13, ПРВ16БМ.

1.1.2. Состав ВВС и войск ПВО

ВВС и войска ПВО предназначены для прикрытия административных, военных, экономических центров Республики Беларусь, группировок войск от ударов противника с воздуха, а также для поражения объектов и войск противника и обеспечения боевых действий сухопутных войск. ВВС и войска ПВО имеют в своем составе следующие рода войск:

- авиация;
- зенитные ракетные войска;
- радиотехнические войска.

ВВС и войска ПВО состоят из:

- Западного оперативно-тактического командования;
- Северо-Западного оперативно-тактического командования;
- воинских частей непосредственного подчинения;
- воинских частей оперативного, технического и тылового обеспечения.

В состав оперативно-тактического командования ВВС и войск ПВО входят воинские части истребительной авиации, соединений и воинских частей зенитных ракетных войск, радиотехнических войск, воинских частей тылового и технического обеспечения.

Воинские части *авиации* предназначены для прикрытия важных государственных, административных и промышленных объектов, нанесения ответных ударов по объектам государственного и военного назначения страны-агрессора, ведения боевых действий в интересах сухопутных войск и включает в себя:

- бомбардировочную авиацию;
- штурмовую авиацию;
- истребительную авиацию;
- транспортную авиацию;
- разведывательную авиацию;
- специальную авиацию.

Зенитные ракетные войска предназначены для защиты от ударов с воздуха административных и экономических районов и центров, важных государственных и военных объектов, группировок вооруженных сил.

Радиотехнические войска предназначены для ведения разведки в воздушном пространстве, оповещения органов военного управления о воздушном нападении и обеспечения разведывательной информацией пунктов управления, боевой информацией соединений и воинских частей зенитных ракетных войск и авиации, обеспечения управления полетами авиации.

В мирное время ВВС и войска ПВО частью сил и средств несут боевое дежурство с целью охраны Государственной границы и воздушного пространства Республики Беларусь и контроля за соблюдением порядка их использования.

1.2 Понятие о радиолокации

В 50-е гг. XX века в СССР впервые прозвучало слово «радиолокация». Его связывали с причастностью к высшим военным либо научным секретам. Массовые популярные публикации того времени, детективные повести и фильмы убеждали читателей и зрителей в существовании очень сложного, способного «сотворить чудо» средства, которое позволит защитить небо от вражеских атак, видеть все, что происходит в небе, на земле и на море, даст возможность самолетам летать в любую погоду и при любой видимости. Со временем массовый интерес к радиолокации угас, его вытеснили новые научные и технические успехи, а сама радиолокация стала оформляться в научную дисциплину с четко очерченными границами возможностей и приложений.

Сегодня **радиолокация** представляет собой, с одной стороны, классическую учебно-научную дисциплину, вошедшую в обязательную программу подготовки специалистов в области радиотехники, с другой стороны, множество различных радиолокационных станций и устройств, действительно способных совершить невозможное и «увидеть» то, что в быту увидеть невозможно.

1.2.1. Какие задачи решает радиолокация?

Пусть наблюдатель находится в точке 0 . Он хочет узнать, что находится в некоторой другой точке 1 и какими физическими и геометрическими характеристиками этот предмет обладает. Наблюдатель имеет возможность излучать радиоволны и концентрировать при помощи антенны основную долю излучаемой энергии в заданном направлении. При этом, несмотря на то, что основной поток энергии сконцентрирован в пространстве, энергия излучается по всем направлениям без исключения. Наблюдатель имеет возможность принимать отраженные радиоволны с требуемого направления в условиях приема отраженных радиоволн со всех направлений без исключения. Также он может обладать определенными сведениями об объекте наблюдения (радиолокационной цели) и об окружающей среде. Таким образом, к основным задачам радиолокации можно отнести **дистанционное зондирование**.

Теперь рассмотрим, какие физические процессы происходят при осуществлении радиолокационного зондирования.

Наблюдатель излучает радиоволну, которая спустя некоторое время достигает точки 1 , где наводит на исследуемом объекте электрические и магнитные токи, которые в свою очередь порождают радиоволны, распространяющиеся по всем направлениям, в том числе и в направлении к точке 0 . Отраженная радиоволна достигает точки 0 , где в приемнике радиолокационной станции вызывает появление соответствующего сигнала (тока, напряжения). Вся информация о наблюдаемой цели может быть получена только из сравнения излученного и принятого сигналов. Будучи извлеченной, эта информация будет выражаться на языке электрических сигналов, а не на языке каких-либо физических или геометрических характеристик цели. **Перевод** с одного языка на другой – это следующая важная задача радиолокации.

1.2.2. Какие сигналы используются в радиолокации?

В радиолокации используются радиоволны с длиной, соответствующей сантиметровому (реже дециметровому) и миллиметровому диапазонам. Сам же вид излучаемого сигнала достаточно прост: как правило, это последовательность коротких по времени импульсов, следующих один за другим через промежутки времени, превосходящий длительность этих импульсов. Ширина спектра таких сигналов D_f в подавляющем большинстве случаев оказывается во много раз меньше несущей частоты излучаемого сигнала f_0 , т. е. у радиолокационных сигналов (за исключением особых случаев) отношение $D_f/f_0 \ll 1$. Для функций $U(t)$, обладающих таким свойством (узкополосные сигналы), как это впервые показал Гильберт, допустимо представление

$$U(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + j(t)), \quad (1.1)$$

где $A(t)$ и $j(t)$ – функции, медленно меняющиеся во времени за период высокой частоты $T = 2\pi/f_0$.

Такое простое на вид представление, каковым является выражение (1.1), несет в себе серьезную проблему, превращая радиолокацию с точки зрения решения стоящих перед ней задач в класс особых наук.

1.2.3. Что происходит при отражении радиоволн?

Отраженная радиоволна будет также иметь вид, определяемый равенством (1.1). Если цель неподвижна, то частота отраженного сигнала не изменится, а изменения претерпят лишь его амплитуда и фаза.

Облучению подвергнутся также все остальные цели и, в частности, те из них, которые расположены на том же расстоянии от радиолокационной станции (назовем эти цели, например, 2 и 3), что и исследуемая цель 1.

Естественно, что радиоволны, отраженные от целей 1, 2 и 3, одновременно достигнут точки 0, где расположена радиолокационная станция. В этом случае сигнал в точке 0 найдется простым сложением трех сигналов аналогично с равенством (1.1): суммарный сигнал будет иметь тот же вид, что и равенство, независимо от того, присутствует или отсутствует обнаруживаемая цель.

Это значит, что независимо от наличия или отсутствия цели в общем случае на входе радиолокационного приемника всегда присутствует сигнал одного и того же вида – квазигармоническое колебание.

1.2.4. Что такое элемент разрешения?

На первый взгляд есть определенное преимущество по сравнению с наблюдением в оптическом диапазоне, где объект характеризуется двумя числами: яркостью (коэффициентом отражения) и цветом (какая-либо количественная характеристика цвета). Однако в подавляющем большинстве используемых на практике радиолокационных станций (РЛС) измеряемым параметром

является лишь одно число – коэффициент отражения. Главное же отличие при сравнении с оптическими устройствами состоит в следующем.

В любой рассматриваемый момент времени на входе приемного устройства формируются сигналы, порожденные отраженными от различных целей радиоволнами, которые находятся на одинаковом расстоянии R от точки приема. Прием отраженных радиоволн антенной в основном осуществляется в пределах некоторого телесного угла D_w , для количественной оценки которого можно использовать два плоских угла D_a и D_b в двух взаимно перпендикулярных сечениях этого телесного угла (величина каждого из углов D_a и D_b определяется отношением L/d длины волны L к линейному размеру антенны d в соответствующих сечениях).

Таким образом, на выходе приемной антенны возникают токи, обязанные своим происхождением электрическим и магнитным токам, возбужденным падающей волной на прямоугольной площадке с линейными размерами $RD_a \times RD_b$ на расстоянии R от антенны. Принципиальное отличие оптики от радиолокации заключается в размерах этой площадки. Для больших наземных радиолокационных станций углы D_a и D_b составляют десятки угловых минут, что соответствует отношению L/d порядка $(3-5) \cdot 10^{-3}$. На расстоянии 50 км от антенны для этого случая линейный размер площадки составит величину порядка 400–600 м. В примере речь идет об очень больших и редких антеннах. Для большинства же антенн сантиметрового диапазона отношение L/d примерно равно 0,03–0,05, что на порядок хуже приведенного примера. Для оптики при диаметре антенны всего лишь в 1 см искомое отношение составляет величины порядка 10^{-5} , поэтому размеры рассматриваемой площадки для оптики оказываются иными.

В соответствии с критерием Рэлея все объекты, расположенные вдоль одного направления в пределах дальности, равной $c \times t/2$, будут восприниматься наблюдателем как один объект (здесь c – скорость света, t – длительность зондирующего импульса). Для ориентировки проведем оценочный расчет этой величины. Если использовать «обычный» радиолокатор, то длительность импульса следует принять равной на уровне 1 мкс. Для искомого размера это даст величину порядка 150 м, что весьма существенно.

Таким образом, все объекты, находящиеся в пределах параллелепипеда с размерами $RD_a \times RD_b \times ct/2$ (параллелепипед носит название разрешаемого объема, или элемента разрешения), будут восприниматься как одна цель. Из проблемы уменьшения этого объема вытекают почти все проблемы радиолокации.

1.2.5. Как улучшить обнаружение радиолокационных целей?

Даже в рамках неизменного элемента разрешения имеются дополнительные возможности для улучшения обнаружения находящихся там радиолокационных целей. К эффективным следует отнести *поляризационные* методы, суть которых сводится к следующему. При изменении вида поляризации излучаемой радиоволны происходит изменение мощности отраженной радиоволны. Очевидно, что всегда найдется такой вид поляризации зондирующей радиоволны, при которой отношение мощностей радиоволн, отраженных от исследуемой

цели и фоновых объектов, находящихся в элементе разрешения, будет максимальным. Теоретические расчеты и экспериментальные результаты показывают, что увеличение радиолокационного контраста для многих типичных ситуаций в среднем составляет 5–8 дБ, достигая в отдельных случаях 20 дБ и более. Существенный рост контраста дает возможность соотносить измеренные элементы матрицы рассеяния с исследуемой радиолокационной целью.

До сих пор речь шла о неподвижных по отношению к радиолокационной станции целях. В случае их движения отраженный сигнал (эффект Доплера) имеет другую по отношению к исходному сигналу частоту, которая отличается от основной частоты на величину, пропорциональную отношению радиальной составляющей скорости цели к длине волны. Если в элементе разрешения движущейся является только исследуемая цель, то при приеме отраженных радиоволн на частотах, не совпадающих с частотой зондирующего сигнала, можно разделить сигналы, идущие от исследуемой цели и от окружающего его фона. Это направление получило в радиолокации название *селекции движущихся целей* (СДЦ). Системами СДЦ снабжены очень многие современные РЛС.

Метод *повышения радиолокационного контраста* применяется в отношении радиолокационных целей, отраженный сигнал от которых содержит частоты, кратные по отношению к частоте зондирующего сигнала ($2f_0$, $3f_0$ и т. д.). Таким свойством, как правило, обладают объекты, имеющие ржавчину, трущиеся элементы, контакты и т. п. Если другие объекты подобными свойствами не обладают, то соответствующий радиолокационный контраст может быть увеличен на десятки децибел.

Для уменьшения размеров элемента разрешения по дальности необходимо уменьшить длительность зондирующего сигнала. Современные РЛС специального назначения могут формировать импульсы наносекундной длительности, что обеспечивает разрешение по дальности до десятков сантиметров. Если уменьшение длительности импульсов связано с техническими и конструктивными ограничениями, то проблема уменьшения горизонтального и вертикального размеров элементов разрешения, т. е. углов D_a и D_b , наталкивается на физическое ограничение, связанное с тем, что углы D_a и D_b пропорциональны отношению L/d . Переход от сантиметрового к миллиметровому диапазону волн дал возможность сократить линейные размеры элемента разрешения в 3–5 раз при соответствующем сравнении с сантиметровым диапазоном. Дальнейшее уменьшение длины волны наталкивается на проблему резкого увеличения энергетических потерь радиоволны на трассе распространения вследствие роста поглощения и рассеяния в атмосферных метеообразованиях. Кроме того, возникающие при этом технические проблемы препятствуют волнам короче 1 мм.

Уменьшить отношение L/d можно также путем увеличения линейных размеров антенны. «Лобовая атака» на эти размеры приводит к появлению очень больших антенных систем и конструкций. Однако, поскольку вся «игра» идет на соотношениях между фазами тока в различных точках антенны, а в сантиметровом и миллиметровом диапазонах фаза в 90 % соответствуют расстояния, измеряемые миллиметрами и их долями, проблема юстировки таких си-

стем, их защита от температурного расширения, ветрового и дождевого воздействия, колебаний почвы представляет собой самостоятельную проблему исключительной сложности. Это обусловило уникальность таких антенн и их сверхдорогую стоимость при разработке и эксплуатации, поэтому их количество в мире исчисляется единицами. Антенны более скромных размеров размещаются на земле или на передвижных средствах. Однако очевидно, что получить у таких антенн наибольшее значение отношения L/d (свыше 150–200) не представляется возможным.

Для антенн, устанавливаемых на борту летательных аппаратов, эти размеры ограничиваются линейными размерами носителей. Попытка уменьшить угол D_a привела к созданию вдольфюзеляжных антенн. Длительное время считалось, что этим исчерпываются все возможности для бортовых радиолокационных станций.

Прорыв произошел в начале 60-х гг., когда впервые обратили внимание на то, что обработка сигнала в антенне сводится к сложению сигналов от различных ее участков с учетом соответствующего набега фазы, вызванного особенностями геометрии антенной конструкции. Это привело к мысли, что такую обработку можно сделать искусственно. С этой целью необходимо последовательно в разных точках пространства произвести измерение амплитуды и фазы напряженности электрического поля, запомнить эти значения, а затем специальным образом их сложить. Особенность этой идеи состоит в том, что упомянутые выше измерения производятся в процессе полета, что дает возможность искусственно создать антенну, размеры которой определяются расстоянием между первым и последним замерами, т. е. в принципе такая антенна может быть практически безграничной.

Реализация этой идеи привела к созданию принципиально нового класса антенн – антенн с синтезированной апертурой. Радиолокационные станции, работающие с такими антеннами, получили название РЛС с синтезированной апертурой (РСА). В современных РСА удается получить отношение L/d , исчисляемое несколькими сотнями, а в отдельных случаях даже тысячами. Использование РСА привело к такому сокращению элемента разрешения, что радиолокационное изображение стало приближаться к фотографическому (в фотографии «точка переводится в точку», в радиолокации «элемент разрешения переводится в точку»). Сегодняшний уровень разработки РСА – это многочастотная РЛС с управляемой поляризацией излучаемой волны, работающая в реальном масштабе времени.

1.2.6. От чего зависит точность измерения и как ее улучшить?

Одной из основных задач, стоящих перед радиолокацией, является обеспечение точности измерения основных параметров и характеристик отраженных радиосигналов, позволяющих определять пространственные координаты и скорость радиолокационной цели, а также расстояние до этой цели.

Обнаружение радиолокационных целей, как уже говорилось, зависит исключительно от энергии отраженного сигнала и не зависит от его вида и фор-

мы. Точность же измерения параметров и характеристик принимаемых сигналов зависит не только от их энергии, но и от формы зондирующего сигнала. Из общей теории следует, что, для того чтобы обеспечить высокоточное определение дальности и скорости радиолокационной цели, излучаемый сигнал должен иметь как можно большую длительность во времени и иметь как можно более широкий спектр. Последнее условие требует сложной формы сигнала, его наибольшего отличия от самого простого радиолокационного сигнала, каковым является обычная синусоида. Таким требованиям удовлетворяют так называемые сложные сигналы, к которым относятся линейно-частотно-модулированные сигналы, сигналы с фазовой манипуляцией, шумоподобные сигналы и ряд других. Формированию и применению таких сигналов посвящены специальные разделы радиолокации. Следует обратить внимание на парадоксальный вывод, что наилучшим по критерию точности одновременного измерения дальности до цели и ее скорости является идеальный шумовой сигнал.

1.2.7. Какие неклассические виды радиолокации существуют?

Несмотря на весьма слабые отраженные сигналы, которые имеют место в *нелинейной радиолокации*, их накопление в радиоприемном устройстве за приемлемое время делает это направление радиолокации достаточно эффективным, а зачастую единственно возможным средством обнаружения малоподвижных, слабоконтрастных целей, обладающих соответствующим эффектом, на фоне мощного отражения от подстилающих покровов.

В последние годы заметное применение находит *двухпозиционная радиолокация*, при которой облучение цели осуществляется из одного пункта, а прием отраженных радиоволн проводится в других пунктах. Такой способ решения радиолокационных задач позволяет обеспечивать более точную навигационную привязку к исследуемому объекту. Иллюстрацией двухпозиционной радиолокации может служить наша повседневная жизнь, когда источником освещения служит солнце, мы же воспринимаем рассеянный окружающими предметами солнечный свет.

В некоторой степени к двухпозиционной радиолокации можно отнести так называемую *вторичную радиолокацию*, нашедшую широкое применение в гражданской и военной авиации. Ее суть сводится к тому, что наземный радиолокатор, облучая летательный аппарат, включает бортовую РЛС, которая передает специальную информацию о полете летательного аппарата и о состоянии некоторых его систем.

Как известно, всякое нагретое тело излучает электромагнитные волны различных частот. Максимум интенсивности этого излучения при температурах порядка 300–350 К приходится на инфракрасный диапазон волн. Существуют и довольно успешно функционируют РЛС, осуществляющие прием этого излучения. Направление, связанное с использованием этого диапазона, носит название *ИК-радиолокации*. Достоинство ИК-радиолокации состоит в скрытности функционирования РЛС, трудностях постановки помех ее действию, неэффективности маскировки наблюдаемых объектов. Недостатки связаны с невозможностью

осуществления селекции по дальности, а также с сильным влиянием состояния атмосферы. Свободными от последнего недостатка оказались РЛС, работающие по тому же принципу, но в сантиметровом и частично в миллиметровом диапазонах волн. Сам сигнал здесь существенно меньше, чем в инфракрасном диапазоне, однако это не является принципиальным препятствием на пути использования таких РЛС. Это направление носит название *пассивной тепловой радиолокации*, или *микроволновой радиометрии*.

Развитие лазерной техники привело к созданию нового направления — *оптической радиолокации*. Оптический локатор облучает объект с помощью передатчика и принимает отраженное от него излучение при помощи приемника. Электрический сигнал на выходе приемника содержит информацию о параметрах лоцируемого объекта, а характеристики этого сигнала в среднем пропорциональны координатам объекта.

1.2.8. Сферы применения радиолокации

Некоторое представление об областях применения РЛС может дать приводимый ниже перечень.

1. *Сельское и лесное хозяйство*. Исследование плотности растительного покрова, распределения лесных массивов, лугов и полей, определение вида почв, их температуры и влажности, контроль за состоянием ирригационных систем, обнаружение пожаров.

2. *Геофизика и география*. Определение структуры землепользования, распределение и состояние транспорта и систем связи, развитие систем переработки природных ресурсов, топография и геоморфология, определение состава пород и их структуры, стратиграфия осадочных пород, поиск минеральных месторождений, отработка техники разведки полезных ископаемых.

3. *Гидрология*. Исследование процессов испарения влаги, распределение и инфильтрация осадков, изучение стока грунтовых вод и загрязнения водных поверхностей, определение характера снегового и ледового покрова, наблюдение за водным режимом главных рек.

4. *Океанография*. Определение рельефа волнующейся поверхности морей и океанов, картографирование береговой линии, наблюдение за биологическими явлениями, проведение ледовой разведки.

5. *Военное дело, гражданская авиация и космические исследования*. Метеорологическое обеспечение полетов, управление воздушным движением, обеспечение ближней и дальней радионавигации, радиолокационное обеспечение посадки воздушных судов и космических аппаратов, обеспечение дальнего и ближнего обнаружения воздушных целей и наведения на них перехватчиков, обеспечение перехвата воздушных целей и прицеливания, панорамный обзор поверхности, распознавание государственной принадлежности летательных аппаратов, обеспечение радиолокационного сопровождения воздушных и наземных объектов и т. д.

1.3. Основные принципы и виды радиолокации

Радиолокация (от лат. *radio* – ‘излучаю’, *locus* – ‘размещение’, ‘расположение’) – это область радиотехники, решающая задачи радиолокационного наблюдения различных объектов, т. е. их обнаружения, измерения координат и параметров движения путем использования отраженных или переизлученных объектами радиоволн либо их собственного радиоизлучения. В процессе радиолокационного наблюдения получают *радиолокационную информацию*. Устройства радиолокационного наблюдения называются *радиолокационными станциями*, или *радиолокаторами*. Сами же объекты радиолокационного наблюдения называются *радиолокационными целями (целями)*, к ним относятся летательные аппараты (самолеты, вертолеты, ракеты, метеозонды), гидрометеобразования (дождь, снег, град, облака), речные и морские суда, наземные объекты (строения, автомобили, самолеты в аэропортах), военные объекты и т. п.

Источником радиолокационной информации является *радиолокационный сигнал*. В зависимости от способов его получения различают следующие виды радиолокации: активную (с активным и пассивным ответом), полуактивную, пассивную.

Активная радиолокация с активным ответом характеризуется тем, что ответный сигнал является не отраженным, а переизлученным с помощью специального ответчика-ретранслятора (рис. 1.1, б). Такими ответчиками могут быть оборудованы только «свои» цели. Использование активного ответа позволяет увеличить дальность действия РЛС и надежность получения информации о цели.

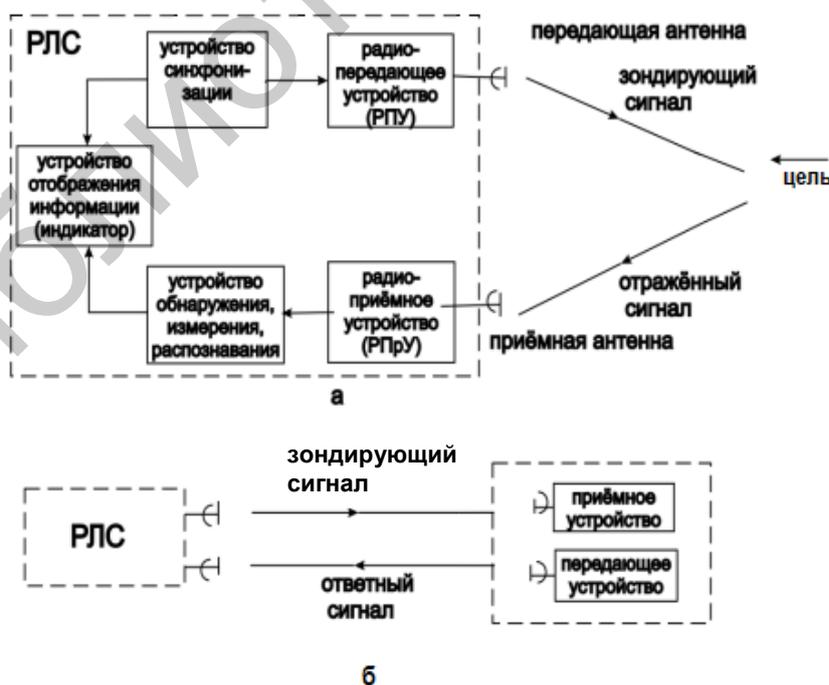


Рис. 1.1. Активная радиолокация:
а – с пассивным ответом; б – с активным ответом

Данный вид радиолокации широко используется для наблюдения радиолокационных целей на больших расстояниях, космических аппаратов, а также малоразмерных аэродинамических «своих» целей. Он также широко применяется для определения государственной принадлежности самолетов (с помощью специальных кодов).

При активном ответе по линиям связи «РЛС – ответчик» и «ответчик – РЛС» может передаваться дополнительная полезная информация, в том числе и нерадаролокационная: высота полета, определяемая бортовым высотомером более точно, чем наземными РЛС; сведения о количестве горючего; номер самолета и т. д.

Радаролокационные системы могут быть *совмещенными однопозиционными* и *разнесенными многопозиционными*. В совмещенном радиолокаторе передающее и приемное устройства располагаются совместно, возможно поочередное использование одной и той же антенны для передачи и приема. В разнесенной системе передающее и приемное устройства располагают на удалении d друг от друга (рис. 1.2). Для наземной разнесенной системы (см. рис. 1.2, а) характерно постоянство расстояния d между приемным и передающим пунктами. При расположении передающего пункта на земле, а приемного на самонаводящей ракете (см. рис. 1.2, б) расстояние d является переменным.

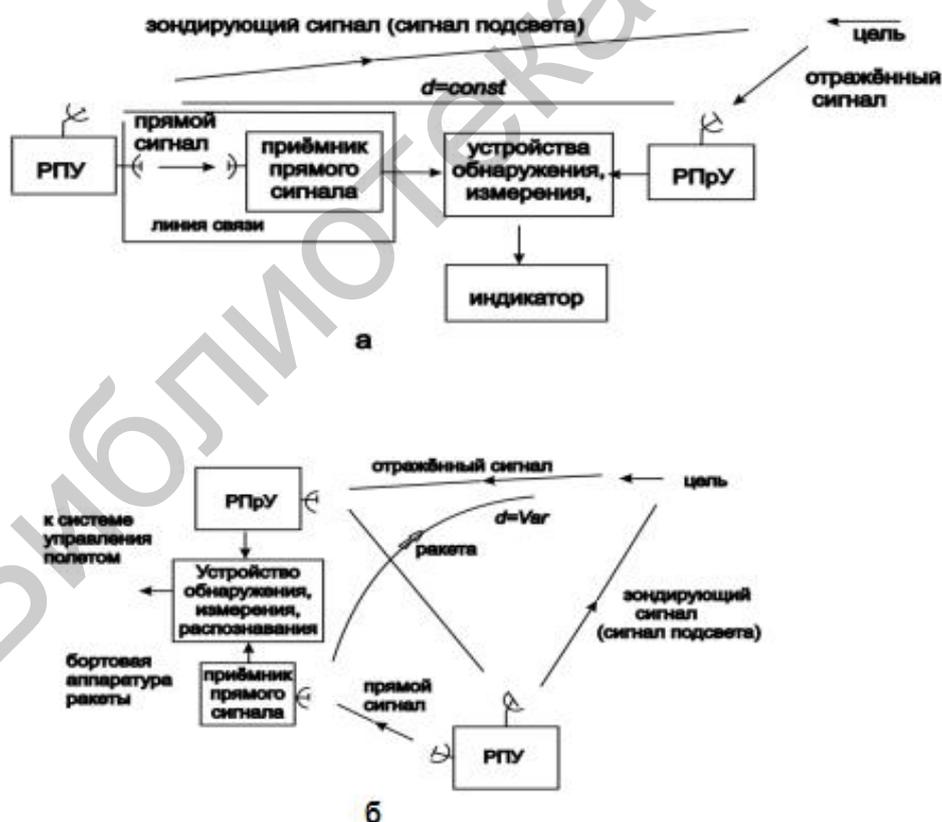


Рис. 1.2. Разнесенная система полуактивной радиолокации:
 а – с постоянной базой; б – с переменной базой

Разнесенные радиолокационные системы, в которых передача зондирующего сигнала (иногда его называют сигналом «подсвета») и прием отраженного производится в разных пунктах, называют также системами *полуактивной радиолокации*.

Пассивная радиолокация основана на приеме собственного радиоизлучения целей. Электромагнитные колебания создаются элементами цели: ее нагретыми частями (тепловое излучение в диапазоне инфракрасных или миллиметровых волн), радиотехническими устройствами связи, навигации, локации, радиопротиводействия (обычное радиоизлучение), а также ионизированными частицами участков атмосферы в окрестности цели (радиоизлучение при работе двигателя баллистической ракеты или при ядерном взрыве).

В системах пассивной радиолокации прием может осуществляться одним или несколькими разнесенными приемными устройствами (рис. 1.3).

Пассивные РЛС являются неизлучающими системами и, следовательно, обладают высокой скрытностью, что является их важнейшим достоинством.

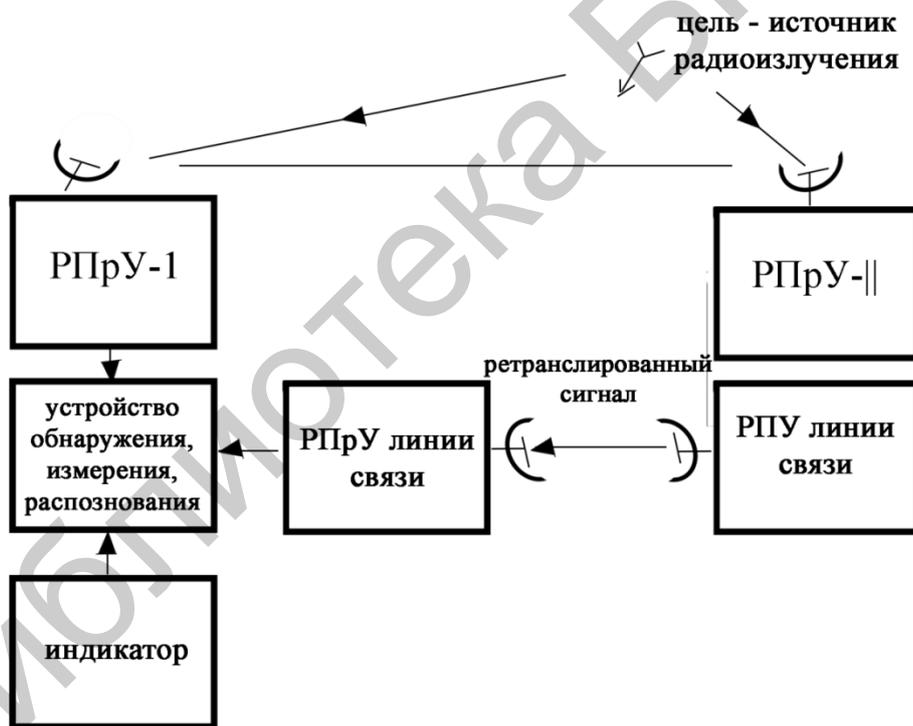


Рис. 1.3. Система пассивной локации

1.4. Принцип работы и общее устройство РЛС

1.4.1. Принцип работы РЛС

Основными составными частями РЛС являются передатчик, приемник, антенное и оконечное устройство.

Передатчик вырабатывает высокочастотные колебания, которые модулируются по амплитуде, частоте или фазе иногда весьма сложным образом. Эти колебания подаются в антенное устройство и образуют зондирующий сигнал в виде *радиоимпульса*. Радиоимпульсы могут быть простыми и сложными. В последних применяется внутриимпульсная частотная и фазовая манипуляция. Другим видом зондирующего сигнала является *непрерывный сигнал*, в нем наряду с гармоническими колебаниями могут использоваться частотно-модулированные и др.

После того как первичная электромагнитная волна, падающая на цель, вызывает в ее теле вынужденные колебания электрических зарядов, цель подобно обычной антенне создает свое электромагнитное поле. Это поле представляет собой вторичную, т. е. отраженную, электромагнитную волну, создающую в РЛС радиолокационный сигнал, который является носителем информации о цели. Так, амплитуда сигнала в определенной степени характеризует размеры и отражающие свойства цели, время запаздывания относительно начала излучения зондирующего сигнала используется для измерения дальности, а частота колебаний благодаря эффекту Доплера несет информацию о радиальной скорости цели. Поляризационные параметры отраженной волны могут быть использованы для оценки свойств цели (ее формы, соотношения между размерами). Наконец, направление прихода отраженной волны содержит информацию об угловых координатах цели.

Приемник РЛС необходим для выделения полезного сигнала из помех (так называемая первичная обработка сигнала).

Оконечное (выходное) устройство служит для представления радиолокационной информации в нужной потребителю форме. Если потребителем является человек-оператор, то используется визуальная индикация. Для потребителя в виде АСУ информация кодируется. При этом в ЭВМ происходит вторичная обработка информации (подобная действиям человека-оператора).

Главные этапы радиолокационного наблюдения:

- 1) *обнаружение* – процесс принятия решения о наличии целей с допустимой вероятностью ошибочного решения;
- 2) *измерение* – определение координат целей и параметров их движения с допустимыми погрешностями;
- 3) *разрешение* – выполнение задач обнаружения и измерения координат одной цели при наличии других, близко расположенных по дальности, скорости и т. д.;

4) *распознавание* – установление некоторые характерных признаков цели: государственные принадлежности, разновидности цели (точечная или групповая, движущаяся или неподвижная) и т. д.

1.4.2. Диапазоны длин волн, используемые в радиолокации

Важным фактором при выборе диапазона длины волн является характер отражения радиоволн от цели. Если размеры цели меньше длины волны, то интенсивность отражения мала. При этом цель можно уподобить антенне с очень малой действующей высотой или малой эффективной площадью. Другой крайний случай, когда размеры цели намного больше длины волны, близок к оптическому. Интенсивность отражения достигает заметной величины, мало зависит от длины волны и определяется в основном отражающими свойствами и размерами цели. В промежуточном случае, когда размеры цели соизмеримы с длиной волны, возможно резонансное возбуждение участков поверхности цели, при котором заметно возрастает интенсивность отражения в некоторых направлениях.

Учитывая размеры реальных целей, можно сделать вывод: для того чтобы длина волны была значительно меньше этих размеров или соизмерима с ними, в радиолокации необходимо использовать ультракороткие волны. При выборе диапазона волн важное значение имеют особенности распространения радиоволн в атмосфере, в частности резонансное поглощение (например, для кислорода на частоте 60 ГГц поглощение составляет около 14 дБ/км), что вынуждает избегать применения соответствующих частот.

В современных РЛС используются метровые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые радиоволны, а в лазерных локаторах – волны оптического диапазона. Согласно рекомендациям Международной организации гражданской авиации, радиолокации отводится почти 30 % диапазона частот 1–10 ГГц. Широко используются полосы частот, где средняя длина волны $\lambda_{cp} = (20, 10, 5, 3)$ см. Следует отметить, что за рубежом метровый диапазон в настоящее время сравнительно редко используется для целей радиолокации. Вместе с тем, поскольку ультракороткие волны, как правило, распространяются лишь в пределах прямой видимости, то для обеспечения загоризонтного радиолокационного наблюдения могут найти применение декаметровые волны.

1.4.3. Общее устройство РЛС

В радиотехнических войсках ВВС и войсках ПВО радиолокационные станции предназначены для обнаружения воздушных целей, определения их текущих координат (азимут, дальность, угол места), принадлежности к своим воздушным судам, а также для засечки ядерных взрывов.

В состав РЛС (рис. 1.4) входят следующие основные системы: антенно-фидерная, передающая, приемная, синхронизации, индикации, помехозащиты, электропитания, защиты и контроля, автоматического съема данных, автоматизированного управления с цифровой вычислительной машиной (АСУ с ЦВМ), наземный радиолокационный запросчик.

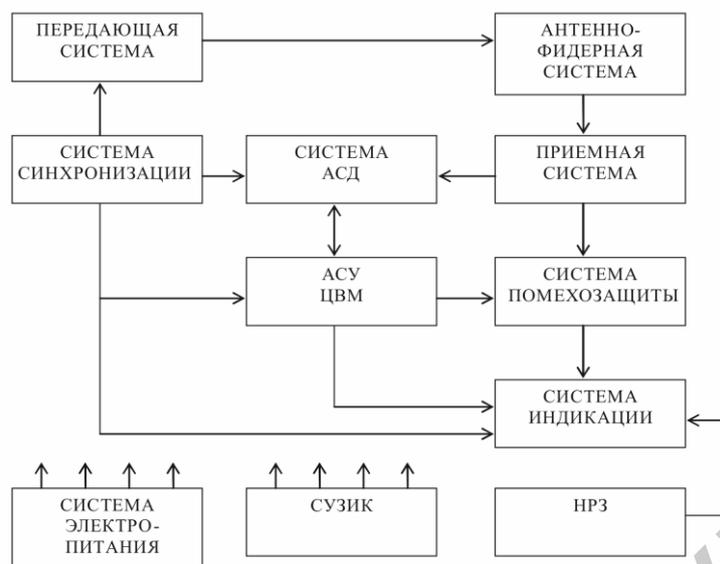


Рис. 1.4. Структурная схема РЛС

Антенно-фидерная система (АФС) предназначена для излучения зондирующих импульсов в пространство, приема отраженных сигналов и подачи их на вход приемной системы.

Передающая система предназначена для формирования мощных высокочастотных зондирующих импульсов и подачи их на АФС.

Приемная система служит для усиления принятых отраженных сигналов и преобразования их в видеоимпульсы.

Система индикации предназначена для визуального наблюдения за целями, измерения их дальности, азимута, высоты, а также определения различных характеристик (скорости полета, принадлежности, характера маневра, количества и типа летательных аппаратов).

Система синхронизации обеспечивает синхронную работу всех систем и блоков станции.

Система помехозащиты предназначена для устранения мешающего воздействия на оконечное устройство активных, пассивных и несинхронных импульсных помех.

Наземный радиолокационный запросчик обеспечивает определение государственной принадлежности самолетов к своим ВС.

Система управления, защиты и контроля предназначена для последовательного включения/выключения РЛС, управления приводами вращения/качания/складывания антенны, контроля работы блоков и систем, определения параметров и защиты РЛС от аварийных режимов работы.

Система электропитания служит для питания всех систем и блоков РЛС первичными и вторичными напряжениями.

Система автоматического съема данных предназначена для выделения из действующей на выходе приемника смеси «сигнал + шум» полезных сигналов, а также определения координат обнаруженных целей. Кроме того, на этапе первичной обработки производится кодирование измеренных координат, которые поступают на АСУ и ЦВМ с целью последующей обработки.

АСУ с ЦВМ проводит анализ информации, полученной с аппаратуры съема данных в нескольких периодах обзора пространства, устраняет ошибки, оставшиеся после первичной обработки, выбирает оптимальный режим работы станции на основе полного анализа полученной информации.

Возможности РЛС по выполнению поставленных задач характеризуются тактическими и техническими характеристиками. Подробно боевые возможности РЛС рассмотрены в источнике [11].

1.4.4. Координаты целей, определяемые РЛС

Радиолокация используется для определения местоположения воздушных целей и других движущихся объектов.

На рис. 1.5 показано местоположение цели в пространстве, которое может быть отражено либо в сферической (D, β, ϵ), либо в цилиндрической (D_r, β, H) системе координат.

Эти поверхности являются геометрическим местом точек пространства, в которых данный измеряемый параметр постоянен, и называются поверхностями положения. На плоскости достаточно знать линии положения. В данном случае это окружность радиусом D и прямая под углом β (рис. 1.5, б). Рассмотренный метод определения положения цели можно называть дальномерно-угломерным, он является основным в РЛС РТВ.

Могут использоваться и другие методы определения положения цели: дальномерный, угломерный (пеленгационный), разностно-дальномерный и др.

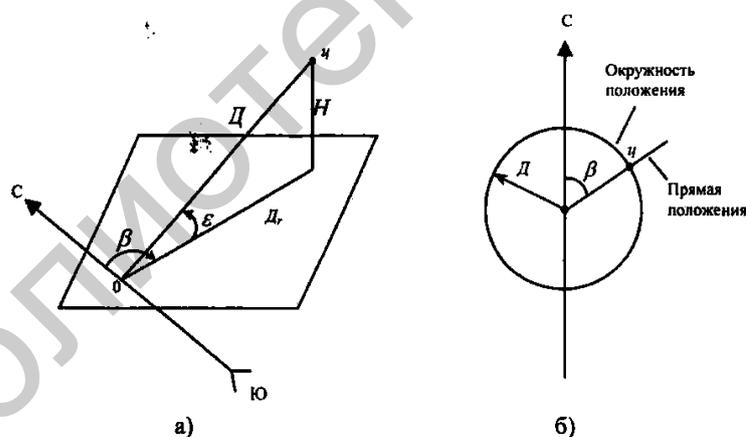


Рис. 1.5. Положение цели в пространстве:

a – системы отсчета координат; *б* – линии положения при дальномерно-угломерной точке U и наклонной, расположенной под углом β к горизонту: D – наклонная дальность (или просто дальность); D_r – горизонтальная дальность; β – азимут (угол между северным направлением и проекцией направления на цель в горизонтальной плоскости, отсчитываемой по часовой стрелке); ϵ – угол места (угол между проекцией направления на цель в горизонтальной плоскости и направлением на цель); H – высота цели

Любая РЛС независимо от ее боевого применения решает три основные задачи:

- 1) обнаружение объекта;
- 2) определение направления на обнаруженный объект;
- 3) определение расстояния до него.

Объектом радиолокационного наблюдения (целью) может быть любое тело или группа тел с электромагнитными или магнитными свойствами, отличными от свойств среды, в которой распространяются радиоволны. Целью может быть и тело, характеризующееся собственным излучением радиоволн.

Положение объекта в пространстве или на местности в наиболее общем случае определяется следующими его координатами:

1) *наклонной дальностью* (D) – дальностью от РЛС до объекта по соединяющей их прямой;

2) *углом места цели* (ε) – углом в вертикальной плоскости между направлением на объект и проекцией линии наклонной дальности на горизонтальную плоскость;

3) *азимутом цели* (β) – углом в горизонтальной плоскости между начальной линией отсчета и направлением объекта.

Для воздушных целей, кроме величин D , ε , β , важно знать высоту полета H , которая равна длине перпендикуляра, опущенного из точки наблюдения цели на горизонтальную плоскость, следовательно, координаты целей РЛС определяются следующими выражениями:

$$D_r = D \cos(\varepsilon); \quad (1.2)$$

$$H = D \sin(\varepsilon);$$

$$H = D \sin(\varepsilon) + \frac{D^2}{2R_3};$$

$$D = \frac{Ct_3}{2},$$

где H – высота цели;

D – наклонная дальность;

R_3 – эквивалентный радиус земли;

C – скорость света;

t_3 – время запаздывания отраженного сигнала.

1.4.5. Антенно-фидерные системы

Излучение и прием электромагнитных волн являются неизменным условием функционирования любого локатора. В связи с этим антенна является одним из наиболее важных устройств, в значительной степени определяющих тактико-технические характеристики РЛС.

Выполнение основных тактико-технических характеристик РЛС по дальности действия, точности определения координат, разрешающей способности, помехозащищенности, электромагнитной совместимости, скрытности, скорости обзора пространства и т. д. во многом обеспечивается надлежащим выбором и техническим состоянием антенны.

Антенно-фидерные системы предназначены для передачи электромагнитной энергии зондирующих сигналов от передатчика к антенне, излучения ее в пространство, приема отраженных эхосигналов и передачи их энергии на вход приемника.

В состав АФС входят (рис. 1.6) антенная система, токосъемник, ферритовый циркулятор (антенный коммутатор), защитное устройство. Функции излучения и приема электромагнитной энергии выполняет *антенная система*, функции передачи энергии от передатчика к антенне и от антенны к приемнику выполняет *волноводный тракт*.

Токосъемник предназначен для передачи энергии от неподвижного фидера (волновода) к облучателю, вращающемуся вместе с антенной.

Ферритовый циркулятор (антенный коммутатор) обеспечивает работу передающей и приемной систем на одну антенну, а также защиту передающей системы от сигналов, отраженных от неоднородностей волноводного тракта.

Защитное устройство обеспечивает на время передачи зондирующих сигналов защиту приемного устройства от мощных импульсов передатчика, просачивающихся через ферритовый циркулятор (антенный коммутатор). В качестве защитных устройств, как правило, используются разрядники, представляющие собой стеклянную колбу, наполненную газом.

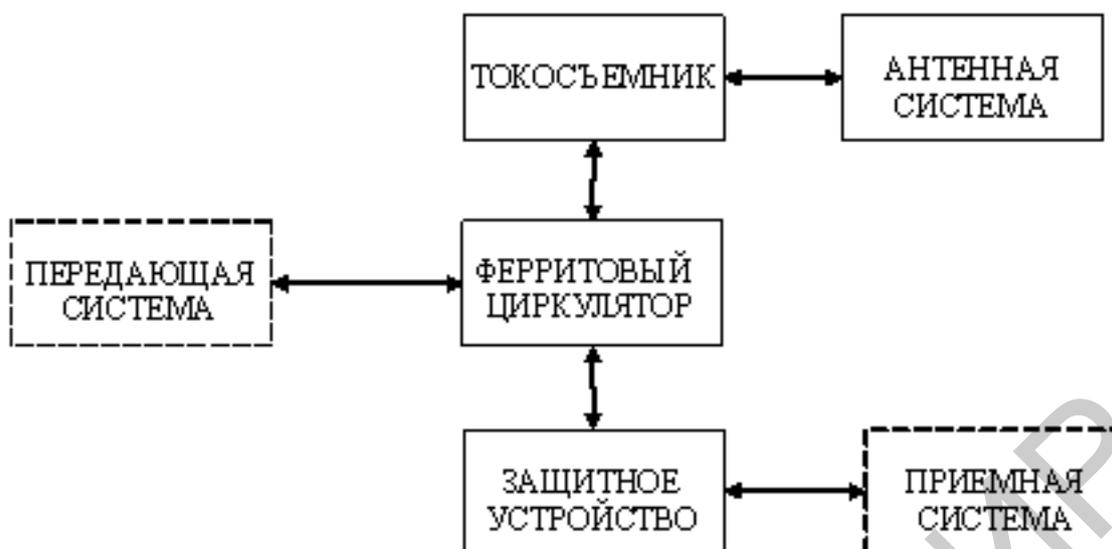


Рис. 1.6. Общая функциональная схема РЛС

Фидеры (волноводы) предназначены для физического соединения элементов АФС между собой и элементов АФС с передающей и приемной системами. Различают односвязные и многосвязные фидеры (волноводы). На практике широко применяются следующие *односвязные* фидеры (волноводы):

- волновод с прямоугольным поперечным сечением – прямоугольный волновод;
- волновод с круглым поперечным сечением – круглый волновод (рис. 1.7, *а* и *б*).

Из *многосвязных* волноводов чаще всего применяются: коаксиальный кабель; полосковые, щелевые и компланарные линии (рис. 1.7, *в–е*).

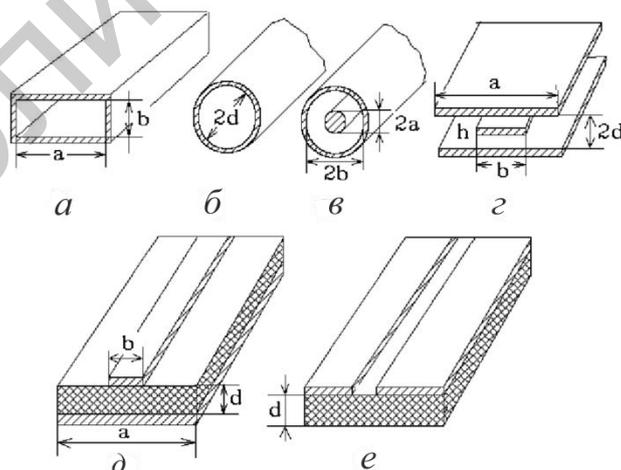


Рис. 1.7. Односвязные и многосвязные фидеры:

- а* – прямоугольный; *б* – круглый; *в* – коаксиальный кабель; *д* – щелевые линии;
- е* – компланарные линии

В состав *антенной системы* РЛС в общем случае входят следующие устройства: передающие и приемные антенны основных радиолокационных каналов; передающие и приемные антенны наземного радиолокационного запросчика; вспомогательные антенны подавления помех в основных каналах; компенсационные антенны для подавления помех и боковых ответов наземного радиолокационного запросчика; антенны контрольной аппаратуры.

Основными параметрами антенных устройств являются: коэффициент усиления антенны; форма диаграммы направленности антенны (ДНА); уровень боковых лепестков; диапазонность; поляризация.

Коэффициент усиления антенны характеризует степень выигрыша по мощности с учетом направленных свойств антенны и наличия в ней потерь. Антенны современных РЛС имеют коэффициент усиления от нескольких сотен до десятков тысяч.

Форма ДНА существенно влияет на точность и разрешающую способность по угловым координатам, а также на помехозащищенность. В вертикальной плоскости она определяет степень рациональности распределения излучаемой энергии по углу места. Правильно выбранная форма ДНА в этой плоскости позволяет сократить энергетические затраты при обеспечении заданной дальности обнаружения. В частности, для достижения требуемой разрешающей способности по азимуту ширина диаграммы направленности в азимутальной плоскости должна быть узкой ($0,5-8^\circ$). Для увеличения помехозащищенности уровень боковых лепестков диаграммы направленности должен быть наименьшим. Для того чтобы время обзора также было минимальным, ДНА в вертикальной плоскости выбирается широкой.

Для РЛС обнаружения, осуществляющих круговой обзор, наиболее рациональной является диаграмма направленности, широкая в вертикальной и узкая в горизонтальной плоскости; для высотометров – наоборот, узкая в вертикальной и более широкая в горизонтальной плоскости.

Антенная система в составе РЛС выполняет следующие основные функции:

- преобразование электромагнитных колебаний, генерируемых передающим устройством и распространяющихся в линии передачи, в электромагнитные колебания, распространяющиеся в свободном пространстве (излучение);

- улавливание (прием) энергии электромагнитных волн (эхосигналов) с определенного телесного угла пространства и концентрация ее на входе линии передачи;

- преобразование электромагнитных колебаний, распространяющихся в свободном пространстве, в электромагнитные колебания, распространяющиеся в линии передачи для их передачи на вход приемного устройства (прием);

- обеспечение направленности излучения и приема электромагнитных волн заданной поляризации.

Требования к параметрам антенных систем должны формулироваться исходя из целевого назначения локатора. Основными требованиями являются следующие:

- обеспечение заданных энергетических характеристик излучения (приема);
- обеспечение требуемой направленности излучения (приема) при уровне боковых лепестков ДНА не выше заданного в определенном секторе углов;
- обеспечение управления угловым положением ДНА в соответствии с программой обзора в заданной зоне обзора;
- устойчивость к ветровым нагрузкам, обледенению, воздействию ударной волны;
- возможность быстрой разборки и сборки, удобство транспортировки.

1.4.6. Классификация и краткая характеристика локационных антенн

В качестве основных признаков классификации антенн обычно используют диапазон длин волн, ширину полосы пропускания антенны, вид поляризации, направленные свойства антенн и др.

По диапазону длин волн различают антенны сверхдлинных, длинных, средних, коротких и ультракоротких (метровых, дециметровых, сантиметровых и миллиметровых) волн, антенны оптического диапазона.

По ширине полосы пропускания антенны делят на узкополосные ($P_A/f_0 \leq 0,1$), широкополосные ($0,1 \leq P_A/f_0 \leq 0,4$), диапазонные ($0,4 \leq P_A/f_0 \leq 1,3$) и частотно-независимые ($P_A/f_0 > 1,3$), где P_A – ширина полосы пропускания антенны, f_0 – рабочая частота.

По виду поляризации антенны делят на антенны линейной поляризации (вертикальной и горизонтальной), эллиптической и круговой поляризации.

По направленным свойствам антенны делят на остронаправленные (с игольчатой диаграммой направленности), слабонаправленные и антенны с веерной диаграммой направленности (с различной направленностью в ортогональных плоскостях).

Антенны с игольчатой диаграммой направленности применяют в локаторах сопровождения и наведения или в соответствующих режимах работы многофункциональных локаторов.

Антенны с веерной диаграммой направленности применяют в обзорных двухкоординатных РЛС или в режимах обзора многофункциональных (трехкоординатных) РЛС.

Слабонаправленные антенны могут являться элементами сложных антенных систем, например, фазированных антенных решеток, или являться вспомогательными в локаторах различного целевого назначения.

По пространственному расположению элементов антенны делят на:

- одномерные (элементы расположены вдоль отрезка прямой, дуги окружности и т. п.);

- двумерные (элементы расположены на плоскости, цилиндрической, параболической или сферической поверхности);
- трехмерные, или объемные.

1.4.7. Зеркальные антенны

Зеркальные антенны являются наиболее распространенным типом направленных антенн в сантиметровом, дециметровом и отчасти в метровом диапазонах длин волн. Объясняется это тем, что зеркальные антенны обладают большой направленностью, высоким КПД, хорошими диапазонными свойствами. С помощью зеркальных антенн можно получить почти любую ДНА. Немаловажным их достоинством является простота конструкции.

Антенны такого типа состоят из облучателя и отражателя – зеркала. Облучатель – слабонаправленная антенна, излучающая сигналы в сторону зеркала. Диаграмма направленности антенны формируется путем переотражения от отражателя (рис. 1.8).

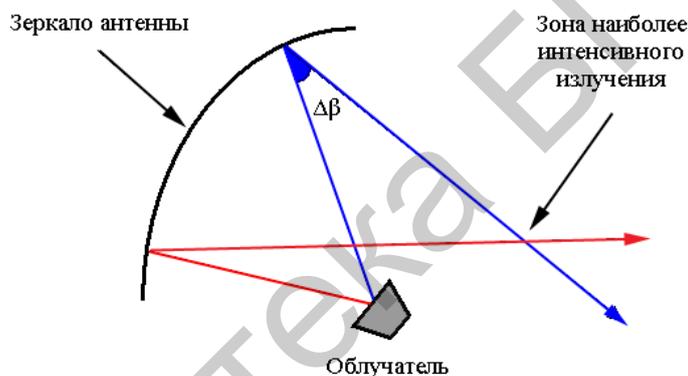


Рис. 1.8. Зеркальная антенна

Конструктивно зеркала могут выполняться из сплошных или перфорированных металлических листов, металлизированных пластиков, нанесенных на диэлектрик, и т. д. Для уменьшения «парусности» антенн зеркала обычно выполняют на основе проводов или металлических сеток, параллельных вектору напряженности электрического поля.

Зеркальные антенны обычно классифицируют по форме и числу применяемых зеркал.

По форме поверхности отражателей зеркальные антенны подразделяются на:

- параболические (в форме параболоида вращения, усеченного параболоида вращения и параболического цилиндра);
- сферические;
- плоские;
- специального профиля.

По числу используемых зеркал различают однозеркальные и многозеркальные антенны.

По форме раскрыва зеркальные антенны могут быть круговыми, эллиптическими, прямоугольными и т. п.

Наибольшее распространение получили однозеркальные антенны с параболической и специальной формой зеркала, а также двухзеркальные антенны.

1.4.8. Антенные решетки с частотным и фазовым управлением

Антенны первых локаторов, работающих в диапазоне метровых волн, выполнены в виде решеток синфазных вибраторов (рис. 1.9). Сканирование осуществляется механическим вращением антенны. Такие антенны применяются в некоторых РЛС и в настоящее время, например, в модели П-18. Но по мере внедрения в радиолокацию дециметровых, а затем сантиметровых и миллиметровых волн антенные решетки (АР) все более вытеснялись зеркальными и линзовыми антеннами.

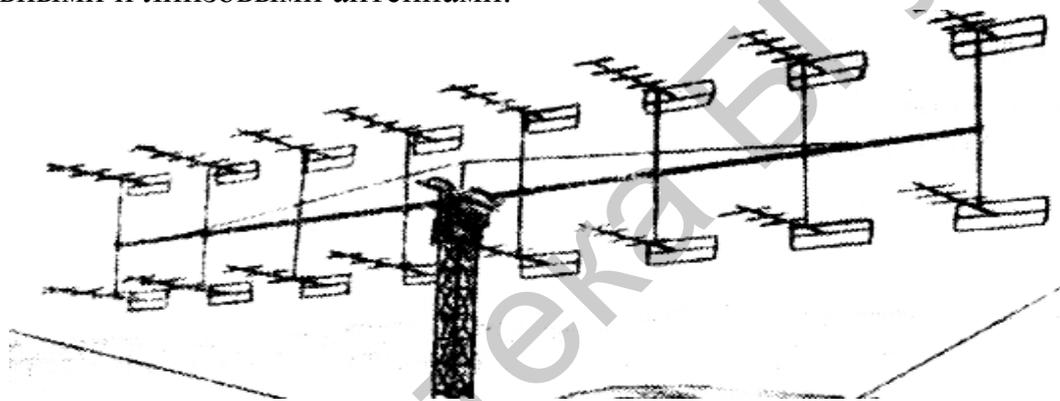


Рис. 1.9. Антенная решетка синфазных вибраторов

В последние годы интерес к многоэлементным антенным решеткам значительно возрос, т.к. они позволяют решить ряд серьезных проблем современной радиолокации.

Для получения узкого луча требуются антенны больших размеров, но это исключает возможность механического сканирования с малым периодом обзора. Если же применить АР, то ее можно составить из тысяч – десятков тысяч однородных элементов (вибраторных, рупорных и др.), достигнув этим очень высокой направленности. Вместе с тем механическое сканирование заменяется электронным. Суть электронного сканирования заключается в том, что положение и форма луча в пространстве зависит от амплитудного и фазового распределения полей (токов) в элементах решетки.

Для сканирования в одной плоскости достаточно линейной решетки, а для сканирования по двум угловым координатам требуются решетки из элементов, распределенных на плоскости или поверхности шара, цилиндра и т. д.

Электрическое управление лучом АР осуществляется изменением частоты колебаний возбуждающего источника либо изменением фазы радиосигналов, подводимых к излучающим элементам. Соответственно, различают частотный и фазовый способы управления лучом.

1.4.9. Антенные решетки с частотным управлением лучом

Из теории антенн известно, что при изменении частоты радиосигнала (длины волны) происходит изменение направления главного максимума диаграммы направленности АР.

Эффективность частотного способа управления лучом характеризуется величиной углочастотной чувствительности АР, которая определяется отношением изменения направления максимума главного лепестка ДНА при сканировании луча с изменением частоты к относительному изменению частоты возбуждающих колебаний.

Антенны с частотным способом сканирования являются сравнительно простыми и имеют небольшую стоимость, они относятся к довольно распространенному типу антенн с электрическим сканированием.

Примером АР с частотным управлением лучом может служить облучатель основного канала РЛС 19Ж6 (рис. 1.10).

К основным недостаткам частотного способа относятся:

- ограниченные возможности по использованию широкополосных сигналов, поскольку в силу частотной зависимости ориентации луча ширина спектра радиосигнала, излучаемого в направлении на цель, уменьшается с увеличением углочастотной чувствительности АР. Другими словами, чем шире угол сканирования пространства, тем труднее использовать сложный сигнал с широким спектром, что, в свою очередь, влияет на дальность обнаружения, разрешающую способность и точность определения координат;

- ограниченные возможности частотной перестройки РЛС для защиты от помех, поскольку при изменении частоты отклоняется луч и теряется цель;

- наличие эффекта «нормали», проявляющегося в том, что при прохождении максимума главного лепестка через нормаль (перпендикуляр) к антенне отраженные от всех излучателей колебания складываются в фазе, т. к. в фидере между соседними излучателями укладывается целое число длин волн. Это приводит к резкому увеличению амплитуды отраженной волны, возникает опасность электрического пробоя. Поэтому обычно нормаль исключается из сектора сканирования.

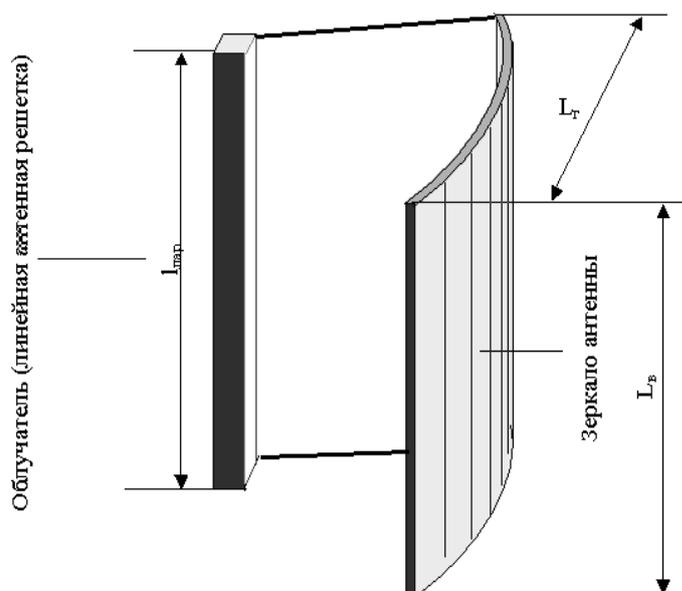


Рис. 1.10. Антенная система РЛС 19Ж6

1.4.10. Антенные решетки с фазовым управлением лучом

Фазированной антенной решеткой (ФАР) называется антенная решетка, направление максимального излучения (приема) и (или) форма соответствующей ей диаграммы направленности которой изменяется посредством изменения фазы радиосигналов в излучающих элементах.

В качестве излучателей в ФАР обычно используются слабонаправленные антенны: вибраторы, щели, рупоры, диэлектрические стержни, спирали и т. п.

Изменение фазового распределения (а иногда и амплитудного распределения) осуществляется электрическим способом с помощью ЭВМ, что обеспечивает высокую скорость сканирования и управления формой ДНА, быстрый обзор пространства и, соответственно, высокий темп выдачи информации о большом числе целей. Применение ЭВМ позволяет осуществить гибкое управление положением и формой ДНА в соответствии с алгоритмами, наиболее подходящими для складывающейся воздушной обстановки.

Возможность формирования с помощью одной антенны несколько независимых лучей совместно с высокой скоростью переборки из одного положения в другое позволяет конструировать многоцелевые и многофункциональные РЛС.

1.4.11. Влияние антенно-фидерного устройства на боевые возможности РЛС

Нарушение целостности отражателей в результате огневого или других видов воздействий, неисправность или смещение облучателей из фокусного центра отражателей приведет к нарушению условий оптимальности формирования диаграммы направленности антенны (увеличению ее ширины, уменьшению коэффициента направленного действия антенны, повышению

уровня боковых лепестков) и, следовательно, к снижению дальности обнаружения, помехозащищенности, ухудшению разрешающей способности и точностных характеристик РЛС.

Нарушение нормальной работы устройств дополнительной развязки, антенного переключателя, эквивалента антенны приведет к нарушению условий скрытной работы и радиотехнической маскировки РЛС, снижению защиты от противорадиолокационных ракет (снарядов).

Выход из строя антенных систем вспомогательных (пеленгационных) каналов исключит возможность определения РЛС пеленгов на ПАП.

Следует учитывать, что высокие точностные характеристики РЛС достигаются при ее тщательном ориентировании, горизонтировании и юстировке. Ошибки в ориентировании антенны складываются с другими ошибками измерения азимута воздушных объектов. В свою очередь ошибки в горизонтировании сказываются на точности измерения угловых координат, форме и размерах зоны обнаружения РЛС в различных азимутальных направлениях. Неточности юстировки приводят к дополнительным ошибкам в определении высоты целей. Ухудшение точностных характеристик РЛС снижает возможности по обеспечению наведения авиации и целеуказания зенитных ракетных войск.

Негерметичность и неисправность волноводных трактов РЛС, вращающихся сочленений вызывает ухудшение коэффициента бегущей волны и уменьшение дальности обнаружения, снижение эксплуатационной надежности.

1.4.12. Передающая система

Передающее устройство является важной составной частью РЛС и предназначено для формирования высокочастотных электромагнитных колебаний (локационных зондирующих сигналов) с заданными параметрами.

Из основного уравнения радиолокации следует, что при всех прочих одинаковых условиях максимальная дальность действия станции в свободном пространстве возрастает пропорционально корню четвертой степени от мощности излучения передатчика:

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{и}} \sigma \lambda^2 G^2}{(4\pi)^3 P_{\text{пр min}}}}, \quad (1.3)$$

где D_{max} – дальность максимальная, м;
 $P_{\text{и}}$ – мощность станции, Вт;
 σ – отражающая поверхность цели, м²;
 λ – длина волны, м;
 G – коэффициент усиления антенны;
 $P_{\text{пр min}}$ – чувствительность приемника, Вт.

Например, чтобы увеличить дальность действия в 2 раза, необходимо повысить мощность излучения передатчика в 16 раз. Такое увеличение дальности действия обходится слишком дорого, поэтому важное значение имеет выбор оптимального передатчика. Современное передающее устройство не только определяет большую часть первоначальной стоимости РЛС, но и требует непрерывных расходов при эксплуатации на первичное питание (электроэнергию).

Основными факторами, оказывающими решающее значение на выбор типа передающего устройства РЛС, являются:

- простота технической реализации устройств формирования зондирующих сигналов;
- обеспечение требуемой стабильности параметров сигналов в приемно-передающих каналах РЛС;
- выходная мощность и коэффициент полезного действия передающей системы;
- уровень нежелательных (внеполосных и побочных) излучений, надежность, долговечность и др.

Основными техническими характеристиками передающих устройств являются:

- мощность излучения (средняя либо импульсная);
- коэффициент полезного действия;
- длительность, ширина спектра, закон внутриимпульсной модуляции и частота повторения генерируемых импульсов;
- длина волны генерируемых колебаний, диапазон перестройки;
- надежность (среднее время наработки на отказ, время непрерывной работы);
- масса, габариты;
- стабильность несущей частоты, амплитуды и длительности, закона внутриимпульсной модуляции.

Основными функциями передающего устройства являются:

- генерирование колебаний;
- управление параметрами колебаний (модуляция);
- усиление по мощности.

Соответственно, функционально необходимыми узлами передающего устройства являются:

- генератор высокочастотных колебаний;
- модулятор;
- усилитель мощности.

Кроме этого, в состав передающего устройства входят источники питания, умножители (делители) частоты, системы автоподстройки частоты (АПЧ) и параметров модуляции сигналов.

В зависимости от целевого назначения РЛС, вида зондирующего сигнала передающие устройства строят по двум основным схемам:

- однокаскадные передающие устройства («мощный автогенератор»);
- многокаскадные передающие устройства («задающий генератор – усилитель мощности»).

1.4.13. Однокаскадные передающие устройства

В однокаскадных передающих устройствах функции обеспечения требуемой энергетики и стабильности частоты зондирующего сигнала реализуются одним устройством – автогенератором.

Передающие устройства с автогенератором СВЧ нашли широкое применение в основном в РЛС «старого парка» (П-37, 5Н84А, П-18, П-19, ПРВ-13, ПРВ-16, ПРВ-17). В таких устройствах вся генерируемая энергия СВЧ-сигнала вырабатывается мощным автогенератором при подаче на его анод питающего импульсного напряжения.

Типовая структурная схема однокаскадного передатчика представлена на рис. 1.11.

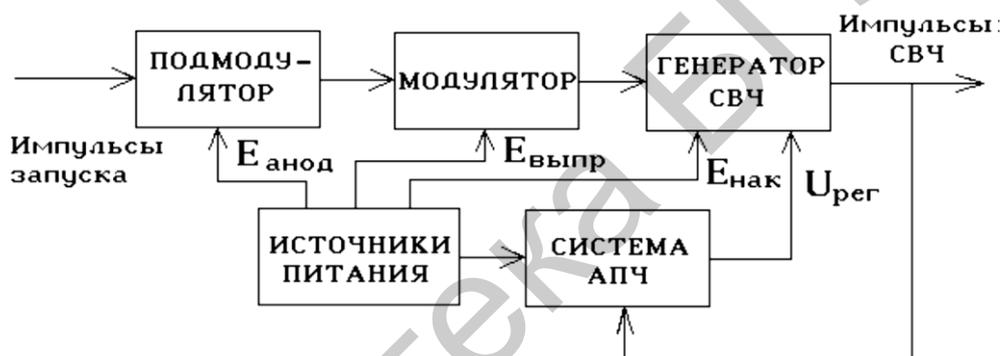


Рис. 1.11. Структурная схема однокаскадного передатчика

Цикл работы передающего устройства задается импульсами запуска передатчика (синхронизирующими импульсами), которые поступают от генератора импульсов запуска или синхронизатора РЛС. Период повторения $T_{\text{п}}$ этих импульсов определяет максимальную дальность действия РЛС при однозначном ее определении, т. е.

$$T_{\text{п}} > t_3 = 2 \cdot \frac{r_{\text{max}}}{c} \quad \text{или} \quad r_{\text{max}} = \frac{cT_{\text{п}}}{2}$$

В подмодуляторе из импульсов запуска формируются видеоимпульсы определенной длительности, амплитуды и подаются на модулятор для обеспечения его устойчивой работоспособности. В модуляторе передатчика формируются видеоимпульсы заданной формы и длительности. Эти импульсы поступают на генератор СВЧ, который формирует радиоимпульс большой мощности на несущей частоте РЛС f_0 .

В станциях метрового и длинноволновой части дециметрового диапазонов автогенераторы обычно выполняются на мощных металlostеклянных или металлокерамических триодах (5Н84А, П-18). Колебательные системы таких генераторов образуются отрезками коаксиальных линий и междуэлектродными емкостями генераторной лампы. Перестройка частоты, обычно электромеханическая, производится с помощью плунжеров.

В станциях сантиметрового и коротковолновой части дециметрового диапазонов волн функцию автогенератора СВЧ выполняет магнетрон – двухэлектродный электровакуумный прибор с электромагнитным управлением. Генерирование колебаний в нем происходит при подаче отрицательных видеоимпульсов на катод.

Магнетронные генераторы обладают наибольшим коэффициентом полезного действия среди генераторных приборов.

В схемах передатчиков обычно предусмотрено применение систем автоматической подстройки частоты, обеспечивающих необходимую стабильность частоты зондирующих сигналов.

Рассмотренные передающие устройства используют для формирования простых зондирующих сигналов в РЛС средней дальности при умеренных требованиях к энергетике ($P_{и} < 10$ МВт) и относительной нестабильности частоты $\Delta f/f_0 = 10^{-4}$ – 10^{-5} . Следует учитывать, что в магнетроне генерация каждого зондирующего импульса начинается со случайной фазы, поэтому обеспечить когерентность излучаемой пачки радиоимпульсов в таком передатчике не представляется возможным.

1.4.14. Многокаскадные передающие устройства

Высокие требования к стабильности несущей частоты зондирующих сигналов, необходимость генерирования сложных и когерентных сигналов привели к появлению передающих устройств, выполненных по многокаскадной схеме. В качестве первого каскада используются маломощные возбудители, а в качестве последующих – многокаскадный усилитель мощности. В таком передатчике стабильность частоты зондирующего сигнала определяется в основном маломощными задающими генераторами, частота которых стабилизирована.

Возбудитель может быть построен по схеме, позволяющей быстрое (в течение нескольких микросекунд) переключение с одной рабочей частоты на другую. При формировании сигнала возбудителя можно предусмотреть его жесткую связь с частотой гетеродинного сигнала смесителя, что исключает необходимость применения АПЧ.

В общем случае структурная схема многокаскадного передающего устройства импульсной РЛС представлена на рис. 1.12.

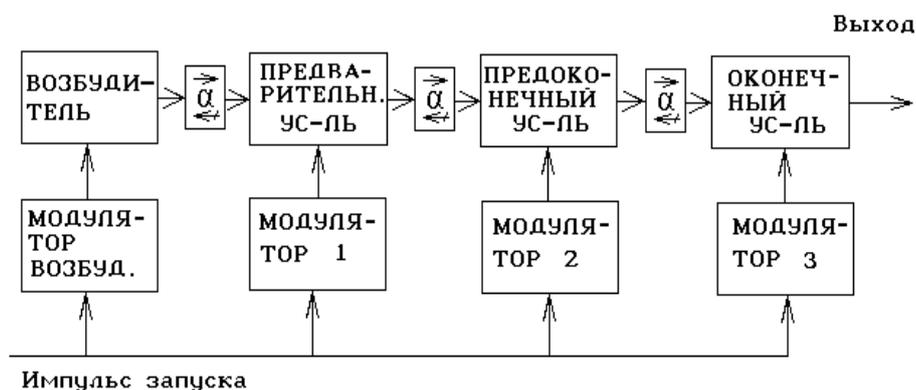


Рис. 1.12. Структурная схема многокаскадного передающего устройства импульсной РЛС

Мощность колебаний возбудителя должна быть достаточной для возбуждения следующего за ним каскада. Поскольку формирование сигнала осуществляется на пониженной мощности, необходимый выходной уровень мощности зондирующего сигнала достигается покаскадным усилением.

В импульсных РЛС импульсная модуляция осуществляется в зависимости от уровня выходной мощности либо в одном каскаде, либо в нескольких последних мощных каскадах усиления.

В ряде случаев формирование сигнала удобнее производить на пониженной частоте, при этом в состав предварительных каскадов включают либо умножители частоты, либо смесители (рис. 1.13).

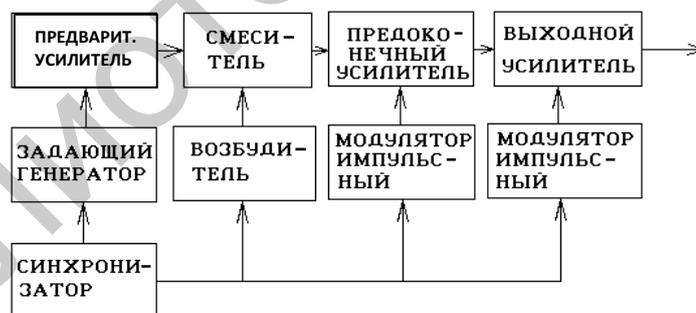


Рис. 1.13. Структурная схема многокаскадного передающего устройства при формировании сигнала на пониженной частоте

В качестве усилительных каскадов многокаскадного передатчика широко используются приборы с электродинамическим управлением электронным потоком: клистроны, лампы бегущей волны, лампы обратной волны и т. д.

Таким образом, многокаскадные передающие устройства применяются при высоких требованиях к стабильности частоты и строятся по схеме «задающий генератор – усилитель мощности». Примерами РЛС, в которых используются такие передающие устройства, являются РЛС 55Ж6, 22Ж6М, 19Ж6.

1.4.15. Импульсные модуляторы радиолокационных станций

Модуляторы РЛС вырабатывают мощные видеоимпульсы высокого напряжения заданной длительности и периода повторения для питания анодных цепей генераторных и усилительных приборов. Длительность модулирующих импульсов различных РЛС составляет единицы–десятки микросекунд, а период повторения – несколько миллисекунд. Это позволяет накапливать энергию во время паузы между посылками и отдавать ее в нагрузку в течение длительности импульса.

В передающих устройствах с усилителем мощности количество модуляторов и их характеристики зависят от схемы усилительной линейки и типа применяемых приборов. Взаимодействие модулятора с элементами передающего устройства (на примере передающего устройства с автогенератором в выходной ступени) показано на рис. 1.14.

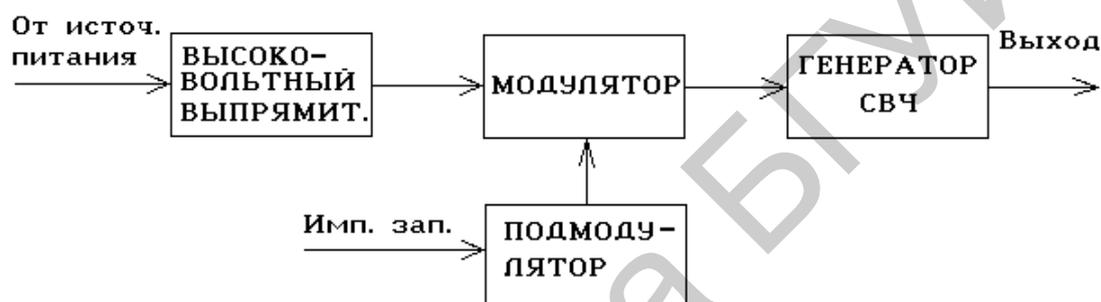


Рис. 1.14. Структурная схема передающего устройства с автогенератором в выходной ступени

Высоковольтный выпрямитель преобразует энергию переменного напряжения источника питания в энергию высокого постоянного напряжения, которое подается в модулятор. Вариант схемы построения высоковольтного выпрямителя представлен на рис. 1.15

Основной выпрямитель состоит из повышающего трансформатора $Tr1$ и типового трехфазного выпрямительного моста на диодах $D1-D48$. Фильтр ($Dr1, Dr2, C1-C48$) и обеспечивает фильтрацию выпрямленного мостом высокого напряжения. В цепи выпрямленного напряжения включен делитель $R49-R79$, с которого напряжение поступает на киловаттметр для контроля.

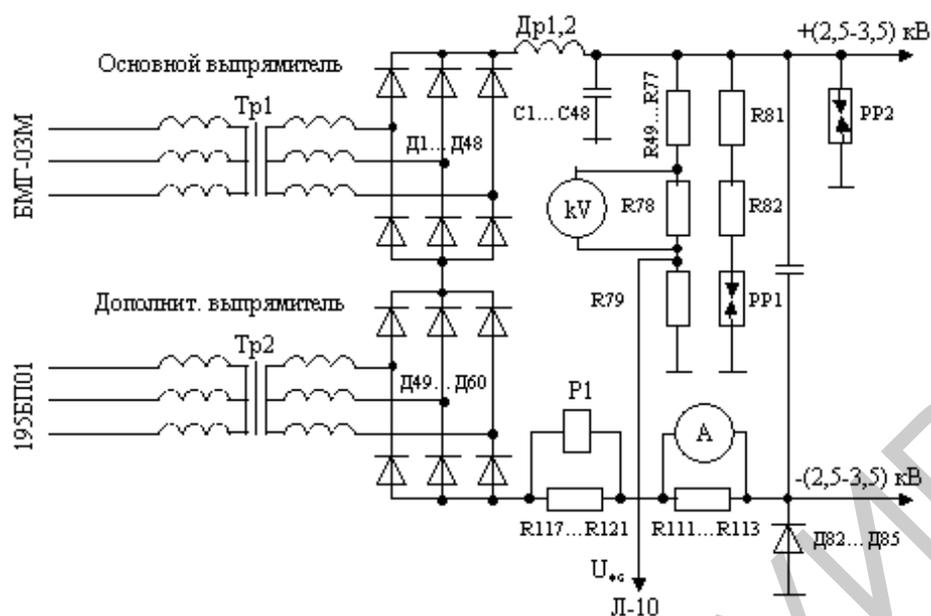


Рис. 1.15. Вариант схемы построения высоковольтного выпрямителя

Дополнительный выпрямитель состоит из трансформатора Tr2 и трехфазного выпрямительного моста на диодах Д49–Д60 и обеспечивает на выходе постоянное напряжение порядка 500 В.

Трехфазные диодные мосты основного и дополнительного выпрямителей включены последовательно. В режиме номинальной мощности передающего устройства на дополнительный выпрямитель подается трехфазное напряжение питания 220 В. Выходные напряжения основного и дополнительного выпрямителей суммируются, тем самым обеспечивается повышение выходного высоковольтного напряжения. В режиме пониженной мощности передающего устройства напряжение питания на дополнительный выпрямитель не подается, в этом случае выходное напряжение определяется напряжением основного выпрямителя. Другими вариантами изменения выходного напряжения высоковольтного выпрямителя являются переключение обмоток трансформатора из «звезды» в «треугольник» и изменение напряжения на первичной обмотке импульсного трансформатора.

В цепи выпрямленного напряжения включены датчик тока (R111–R113) и амперметр для измерения тока нагрузки высоковольтного выпрямителя, а также датчик короткого замыкания (реле P1 и резисторы R117–R121) для защиты выпрямителя от коротких замыканий. Диоды Д82–Д85 предназначены для создания цепи тока разряда конденсаторов С1–С48 при отключенной нагрузке высоковольтного выпрямителя.

Модулятор управляет работой высокочастотного генератора. Если в передающем устройстве применена анодная модуляция, то он включает анодное питание генератора СВЧ на время, равное длительности зондирующего импульса. Принципиальной особенностью модулятора РЛС (в отличие от модуляторов других радиотехнических устройств) является осуществляемая им транс-

формация мощности. Модулятор передающего устройства РЛС накапливает энергию, поступающую от высоковольтного выпрямителя, в течение времени, примерно равного периоду повторения T_{Π} . При этом

$$\mathcal{E}_M = P_B T_{\Pi}, \quad (1.4)$$

где \mathcal{E}_M – энергия, накопленная модулятором;
 P_B – мощность высоковольтного выпрямителя.

Накопленная энергия отдается модулятором в нагрузку в течение длительности импульса. Следовательно,

$$\mathcal{E}_M = P_M t_{И}, \quad (1.5)$$

где P_M – мощность выходных импульсов модулятора.

Отсюда получаем

$$P_B = P_M \cdot \frac{t_{И}}{T_{\Pi}}. \quad (1.6)$$

Поскольку $t_{И} \ll T_{\Pi}$, то $P_B \ll P_M$. Это дает возможность при конструировании РЛС выбирать высоковольтный выпрямитель меньшей мощности и, следовательно, меньших габаритов и массы.

Состав модулятора определяется его типом. Однако для всех подобных устройств характерно наличие таких элементов, как зарядный дроссель, накопитель энергии, коммутирующий элемент, импульсный трансформатор, цепи защиты и коррекции.

Рассмотрим схемы основных типов импульсных модуляторов, применяемых в РЛС РТВ.

В передающих устройствах РЛС РТВ наиболее широкое применение получили два типа импульсных модуляторов:

- 1) с полным разрядом накопителя энергии;
- 2) с частичным разрядом накопителя энергии.

Накопителем энергии может являться электрическое поле конденсатора или магнитное поле катушки индуктивности. В качестве накопителя энергии может использоваться также искусственная длинная линия, которая эквивалентна емкости или индуктивности. В настоящее время в большинстве случаев используются емкостные накопители, т. к. индуктивные накопители характеризуются весьма низким КПД.

На рис. 1.16 показана блок-схема передатчика РЛС, работающего в режиме анодной импульсной модуляции. Как показано на схеме, импульсный модулятор состоит из двух основных элементов: накопителя энергии и коммутирующего устройства. При разомкнутом коммутирующем устройстве во время паузы между импульсами происходит накопление энергии в накопителе.

При замыкании коммутатора накопленная за время длительности импульса энергия расходуется на питание генератора СВЧ.

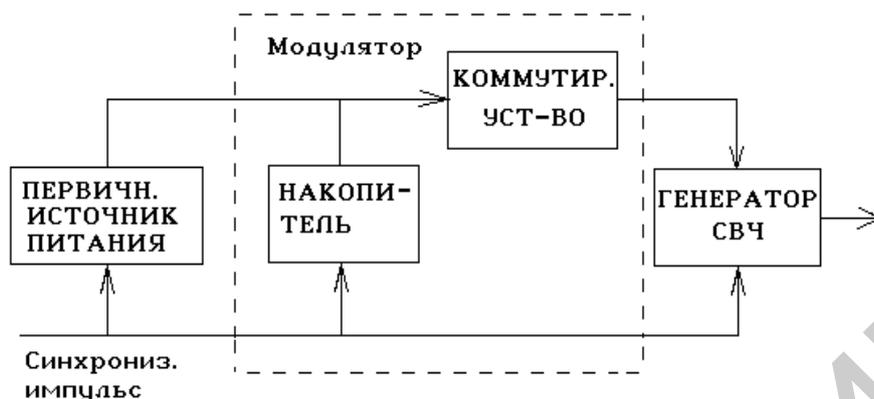


Рис. 1.16. Блок-схема передатчика РЛС, работающего в режиме анодной импульсной модуляции

В качестве коммутирующего устройства могут использоваться электронная лампа (триод), транзисторный активный коммутатор, газоразрядные (ионные) приборы (тиратроны, тиристоры) и управляемые искровые разрядники.

Основным преимуществом коммутирующих устройств на электронных лампах и транзисторах является малая инерционность, позволяющая включать и выключать их на любое время с помощью маломощного управляющего импульса, подаваемого на управляющий электрод (сетку лампы или базу транзистора) коммутатора. Однако электронные лампы обладают большим внутренним сопротивлением, и поэтому коммутаторы на электронных лампах имеют сравнительно низкий КПД.

Ионные и тиристорные коммутирующие устройства обладают малым внутренним сопротивлением и легко пропускают токи в десятки и сотни ампер. Недостатком ионных коммутирующих устройств является то, что с помощью управляющего импульса можно точно определить только момент начала разряда накопителя. Управлять же размыканием ионного коммутатора значительно труднее. Поэтому окончание разряда накопителя определяется временем разряда накопителя, т. е. зависит от параметров самого накопителя.

1.4.16. Модуляторы с емкостными накопителями

Такие модуляторы широко применяются в современных РЛС. (рис.1.17)

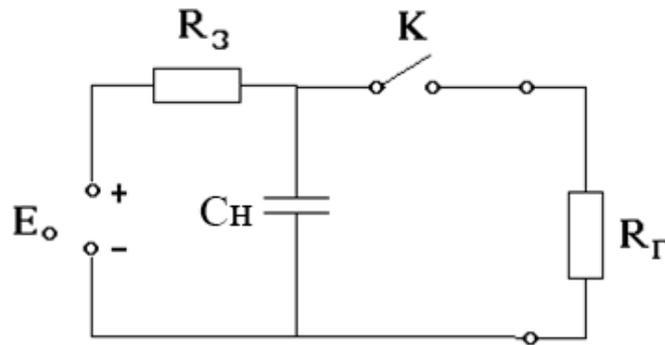


Рис. 1.17. Упрощенная схема модулятора:

C_H – конденсатор, накапливающий энергию; K – коммутатор, изображенный в виде выключателя; R_3 – ограничительное или зарядное сопротивление; R_G – сопротивление СВЧ-генератора, питаемое модулятором; E_0 – напряжение питания

В паузах между импульсами коммутатор K разомкнут, и конденсатор C_H заряжается от источника питания через сопротивление R_3 , запасая энергию. Напряжение на конденсаторе повышается до напряжения источника E_0 . В конце заряда коммутатор K замыкается, подключая конденсатор C_H к генератору, на который он разряжается. После разряда конденсатора коммутатор вновь размыкается, происходит новый заряд накопительной емкости и т. д.

Сопротивление R_3 определяет продолжительность заряда и ограничивает ток от источника питания во время замыкания коммутатора. Величину этого сопротивления берут во много раз больше R_G , для того чтобы заряд конденсатора происходил сравнительно медленно, а ток, протекающий по R_3 в течение разряда конденсатора, был пренебрежимо мал. В рассмотренном модуляторе возможны режимы полного и частичного разряда накопительной емкости. В первом случае коммутатор, замкнувшись, не размыкается до полного разряда накопительной емкости, при котором напряжение на ней становится равным нулю. Осциллограммы напряжений на отдельных узлах модулятора, работающего в режиме полного разряда, изображены на рис. 1.18 (полужирная линия).

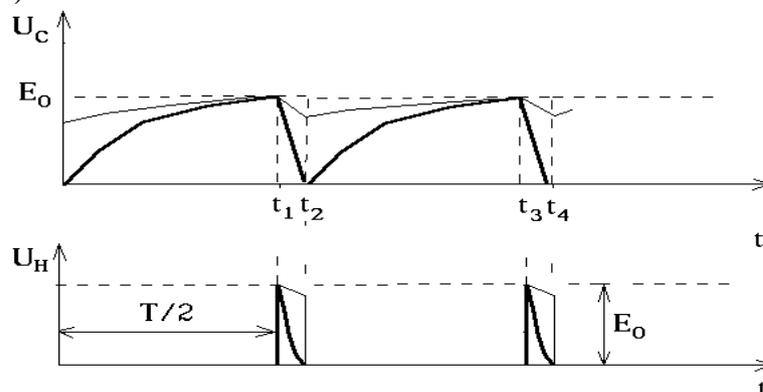


Рис. 1.18. Осциллограммы напряжений на отдельных узлах модулятора

Недостатками модуляторов, работающих в режиме полного разряда накопительной емкости, являются неудовлетворительная, далекая от прямоугольной форма импульса и низкий КПД (около 50 %), поэтому они используются крайне редко.

При работе модулятора в режиме частичного разряда коммутатор замыкается на короткое время (равное t) и размыкается, когда конденсатор еще сохраняет заряд, а напряжение U_c имеет значительную величину.

1.4.17. Модуляторы с искусственной линией (линейные модуляторы)

Известно, что разомкнутая на конце линия, заряженная до напряжения $E_{л}$, при разряде на сопротивление $R = r$ создает прямоугольный импульс напряжения с амплитудой $E_{л}/2$ и длительностью t :

$$t = 2dL'C', \quad (1.7)$$

где d – длина линии;

L', C' – распределенные индуктивность и емкость линии.

Используя линию в качестве накопителя энергии, можно построить модуляторы с режимом полного разряда, вырабатывающие импульсы с хорошей прямоугольной формой. Однако длина линии получается неприемлемой для размещения в передатчиках. Вместо реальных линий в модуляторах можно использовать искусственные линии, составленные из отдельных индуктивностей и емкостей (рис. 1.19).

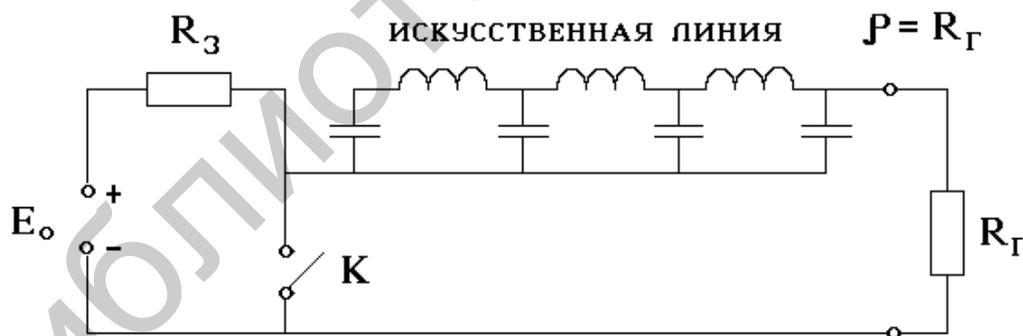


Рис. 1.19. Схема искусственной накопительной линии

Импульсные модуляторы с искусственными линиями широко используются в современных передающих устройствах РЛС (например, РЛС 55Ж6). Они отличаются компактностью, высоким КПД и дают возможность получать импульсы весьма большой мощности с формой, мало отличающейся от прямоугольной.

Рассмотрим процессы в модуляторе с искусственной цепочной линией (см. рис. 1.19), состоящей из трех секций.

Волновое сопротивление линии равно сопротивлению нагрузки $r = R_r$. При разомкнутом коммутаторе К источник питания заряжает линию до напряжения линии $U_n = E_0$. После заряда коммутатор замыкается и присоединяет линию к генератору R_r . Так как сопротивление $R_r = r$, то при замыкании коммутатора на зажимах генератора возникает мгновенное напряжение, равное $E_0/2$. Благодаря этому колебания в генераторе возникают резко и передний фронт импульса получается крутым. Другая половина напряжения $E_0/2$ падает на волновом сопротивлении линии и вызывает бегущую волну напряжения, распространяющуюся к разомкнутому концу линии, частично разряжая ее по мере распространения. От разомкнутого конца линии волна отражается без перемены полярности и, вернувшись к началу линии, полностью поглощается нагрузкой.

В схеме (см. рис. 1.19) напряжение источника должно быть в 2 раза больше напряжения питания генератора. Для устранения этого недостатка применяется схема (рис. 1.20), в которой линия заряжается через катушку индуктивности L_3 с малым сопротивлением потерь. Катушка составляет с емкостью линии контур, и заряд линии приобретает характер затухающих колебаний (см. рис. 1.20). Через половину периода напряжение на линии повышается до $U_n = 2E_0$. В этот момент замыкается коммутатор, и напряжение на генераторе становится равным $U_n/2 = E_0$, т. е. напряжению источника.

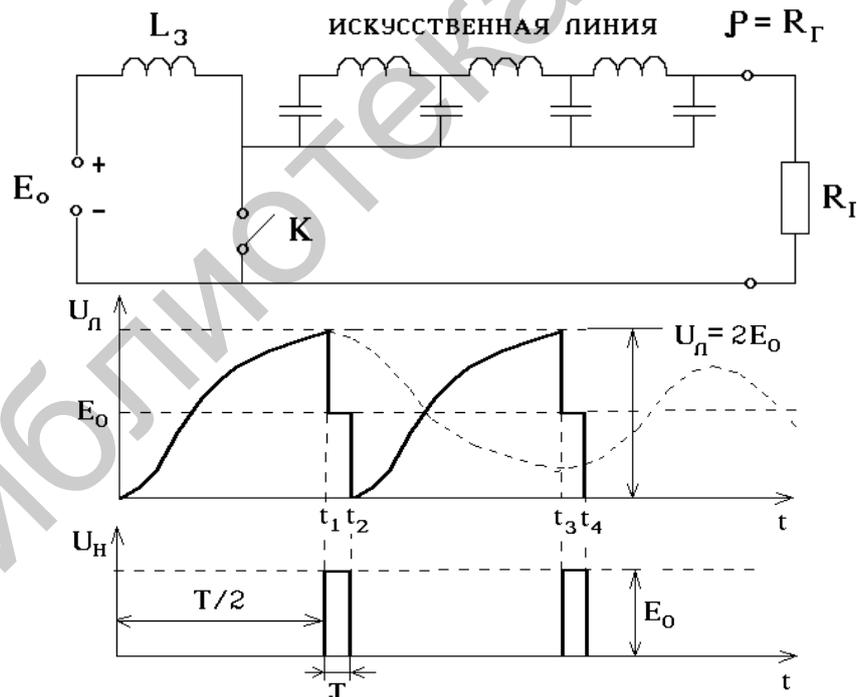


Рис. 1.20. Искусственная накопительная линия с зарядом через катушку индуктивности

КПД модулятора при заряде линии через индуктивность повышается до 90–95 %. Но для реализации указанных преимуществ зарядная катушка должна

иметь значительный коэффициент индуктивности. Кроме того, коммутатор должен замыкаться точно в моменты максимума напряжения на линии. Все это существенно усложняет конструкцию модулятора и схему управления коммутатором. Поэтому на практике последовательно с зарядной индуктивностью часто включают диод, как показано на рис. 1.21. При таком дополнении линия, зарядившись до максимума в первую половину периода (см. рис. 1.21), из-за односторонней проводимости диода не может разрядиться, и напряжение на ней сохраняется постоянным до замыкания коммутатора.

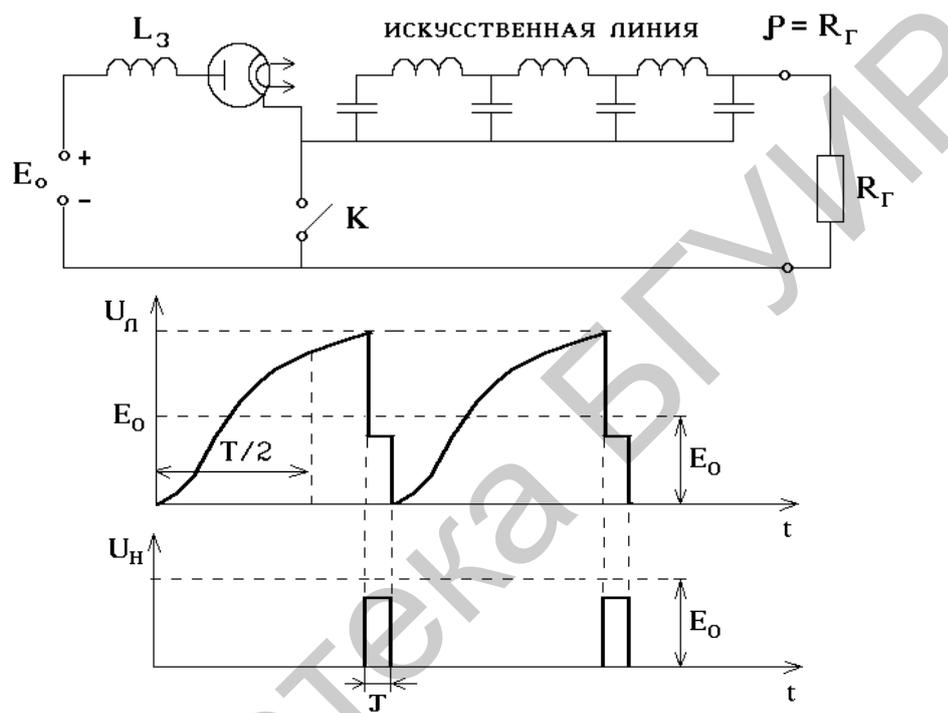


Рис. 1.21. Искусственная накопительная линия с зарядом через катушку индуктивности, дополненная диодом

Таким образом, в рассмотренном примере отпадает необходимость в согласованном с колебаниями замыкании коммутатора, и схема управления упрощается. При этом уменьшается и коэффициент индуктивности зарядной катушки.

Вследствие потерь напряжения на внутреннем сопротивлении диода и сравнительно низкой добротности зарядного контура ($Q < 10$) минимальное напряжение на линии оказывается не выше $(1,7-1,8)E_0$, а КПД модулятора составляет 85–90 %.

В целях увеличения выходного напряжения модулятора и улучшения параметров модулирующего импульса применяют схему, показанную на рис. 1.22.

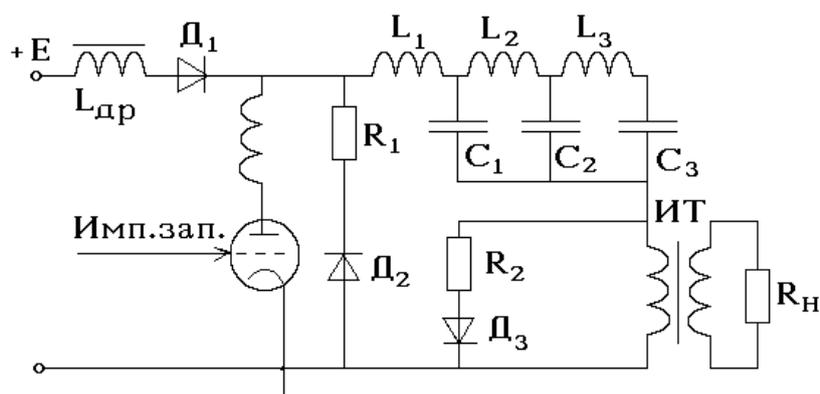


Рис. 1.22. Схема модулятора

В схеме модулятора формирование импульса заканчивается при полном разряде накопителя через коммутатор и импульсный трансформатор, который согласует сопротивление нагрузки с волновым сопротивлением формирующей линии и увеличения выходного напряжения модулятора. В случае аварийной работы модулятора на несогласованную нагрузку предусматриваются защитные цепи (диод Д2).

Длительность заднего фронта импульса определяется действием многих факторов. Для улучшения его формы применяют корректирующие цепи (диод Д3).

Подобная схема модулятора используется в передающем устройстве РЛС 55Ж6, П-18, 5Н84А, 19Ж6.

1.4.18. Приемная система

Приемная система РЛС предназначена для усиления высокочастотных сигналов, принятых антенной (сигналов от целей, местных предметов, активных и пассивных помех, несинхронных импульсных помех и др.), преобразования их в сигналы промежуточной частоты, видеосигналы и дальнейшего усиления их до величины, необходимой для обеспечения работоспособности системы защиты от пассивных помех, индикаторной системы.

Приемное устройство радиолокационных сигналов РЛС выполняет следующие основные функции:

- усиление полезного сигнала с шумом (помехами);
- избирательность (чаще всего частотная) – выделение сигнала из принимаемой смеси сигнала и шума (помех);
- усиление выделенного полезного сигнала до уровня, обеспечивающего заданное качество обработки и функционирования оконечных устройств;
- преобразование полезного сигнала, включающее преобразование частоты;
- демодуляцию полезного сигнала (декодирование).

Функции усиления и избирательности реализуются линейными устройствами преобразования на различных частотах: высокой (f_c – частота

зондирующего сигнала), промежуточной ($f_{пр} = |f_c - f_r|$, где f_r – частота гетеродина) и низкой.

Функции, связанные с переносом спектра из одной области частот в другую, реализуются нелинейными устройствами (смесителями) в сочетании с линейными фильтрами высокочастотного тракта.

Структурные схемы приемной системой оказываются различными в зависимости от того, какие функции, каким образом и на каких частотах реализуются.

На рис. 1.23 представлена обобщенная структурная схема приемной системы РЛС. Элементы этой схемы имеют место в любой РЛС, хотя тракт конкретной РЛС может и не содержать их полный набор. В РЛС обычно все радиолокационные приемники строятся по супергетеродинному типу.

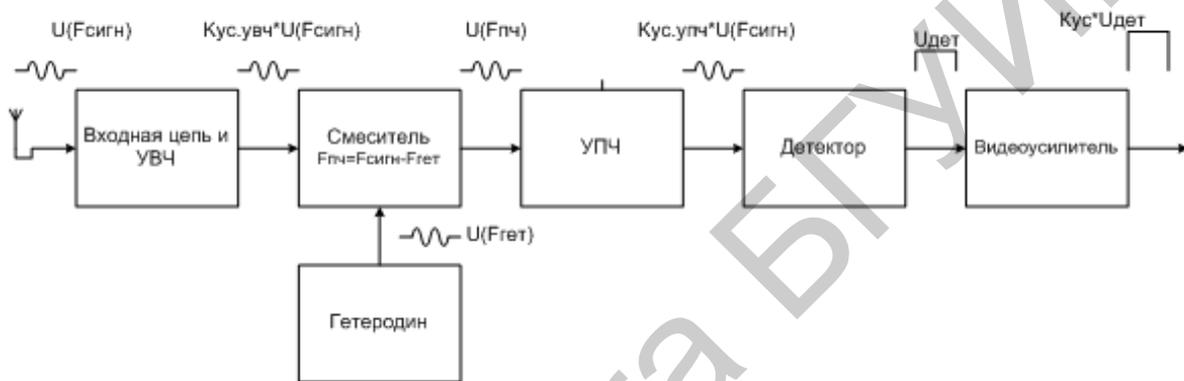


Рис. 1.23. Обобщенная структурная схема приемной системы РЛС

Общий принцип работы приемной системы такой же, как у любого супергетеродинного радиолокационного приемника. Элементами высокой частоты выделяются и усиливаются принятые эхосигналы непосредственно на сверхвысокой частоте. Затем с помощью гетеродина и смесителя эхосигналы преобразуются в сигналы промежуточной частоты, на которой осуществляется основное усиление в приемном устройстве. Усиленные сигналы промежуточной частоты детектируются, преобразуются в видеоимпульсы, усиливаются еще раз и поступают на индикаторы и другие системы станции.

Построение приемного устройства по супергетеродинной схеме имеет ряд преимуществ. Дело в том, что на промежуточной частоте можно обеспечить более стабильное и устойчивое усиление, чем на высокой частоте. Кроме того, относительная полоса частот, занимаемая полезным сигналом на промежуточной частоте, получается больше, что позволяет обеспечить высокую избирательность по соседнему каналу и упрощает согласованную фильтрацию. Следует заметить, что частоту гетеродина в супергетеродинном приемнике можно менять вслед за любым изменением частоты передатчика без подстройки фильтров промежуточной частоты.

Супергетеродинным приемникам присущи и некоторые особенности:

– в перестраиваемых приемниках требуется сопряжение (совместимость) настроек контуров входной цепи, усилителя высокой частоты (УВЧ) и гетеродина. При работе на фиксированных частотах этот недостаток отсутствует;

– наличие преобразователя частоты приводит к появлению побочных каналов приема: зеркального, комбинационных, интермодуляционных.

Входная цепь и УВЧ обеспечивают предварительную селекцию по частоте и предварительное усиление сигнала. Предварительная селекция по частоте осуществляется в преселекторе, в качестве преселекторов используются отдельные колебательные системы или совокупности нескольких связанных колебательных систем. На частотах от 200 до 1000 МГц в качестве преселекторов применяются отрезки длинных линий, а на частотах свыше 1000 МГц – объемные резонаторы, поскольку здесь отрезки длинных линий вследствие потерь из-за поверхностного эффекта не обладают высокой добротностью.

УВЧ должен обеспечивать такой уровень внутренних шумов приемного тракта, при котором суммарный уровень внешних и внутренних шумов будет близок к минимальному, определяемому только внешними шумами. Практически достаточно иметь уровень внутренних шумов, равный уровню внешних шумов либо в несколько раз (но не более чем на порядок) меньший. УВЧ подключается к антенне с помощью пассивных элементов, объединенных под общим названием «тракт высокой частоты» на прием или *входные цепи* (фидерный тракт).

Преобразователь частоты (смеситель) (рис. 1.24) осуществляет перенос спектра частот сигнала в область промежуточных частот. Основными его параметрами являются коэффициенты шума и передачи мощности, влияющие на чувствительность тракта, а также динамический диапазон по сигнальному входу и значение промежуточной частоты, влияющие на степень подавления приема по зеркальному каналу и электромагнитную совместимость.

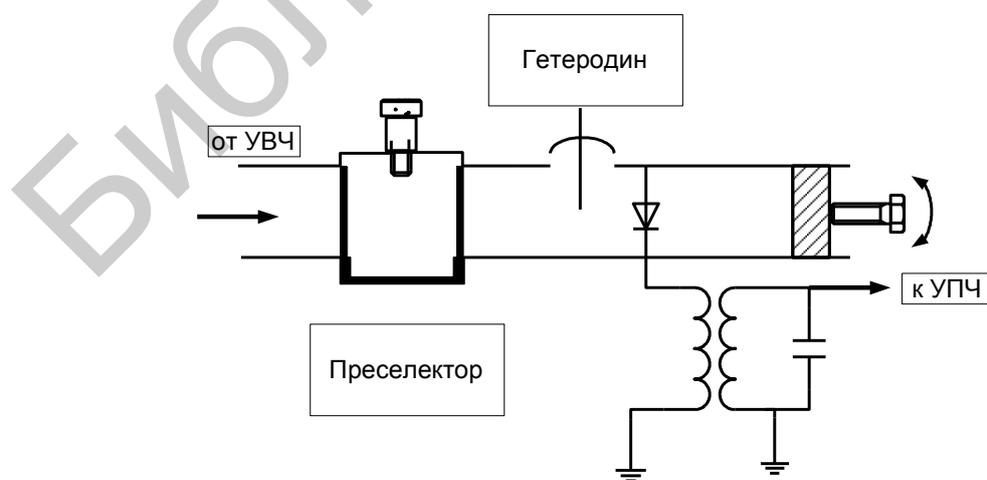


Рис. 1.24. Полупроводниковый смеситель волноводного типа

Преобразование частоты осуществляется следующим образом: сигнал и колебания гетеродина одновременно воздействуют на смеситель, представляющий собой нелинейный элемент (как правило, высокочастотный диод). В результате на выходе смесителя получается сложное колебание, содержащее составляющие с частотой сигнала f_c , его гармоник $2f_c$, $3f_c$, составляющие с f_r и его гармоник $2f_r$, $3f_r$ и большое число комбинационных составляющих с частотами

$$f = |nf_r + mf_c|, m, n = 1, 2, \dots$$

Промежуточная частота $f_{пр}$ – одна из комбинационных частот:

$$f_{пр} = |f_r - f_c|, \text{ при } f_r < f_c.$$

Зеркальный канал (рис. 1.25) образуется на частоте $f_{зк} = f_r + f_{пр} = f_c + 2f_{пр}$ при $f_r > f_c$ (при верхней настройке гетеродина) и $f_{зк} = f_r - f_{пр} = f_c - 2f_{пр}$ при $f_r < f_c$ (при нижней настройке гетеродина).

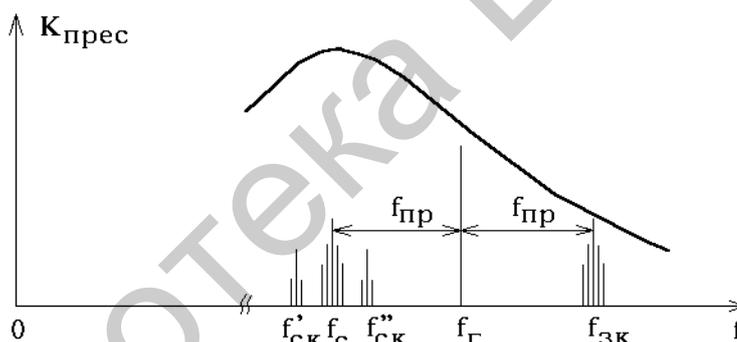


Рис. 1.25. Амплитудно-частотная характеристика смесителя волноводного типа

Основная обработка сигналов производится на промежуточной частоте.

Согласованная фильтрация одиночных узкополосных эхосигналов производится, как правило, в усилителе промежуточной частоты (УПЧ), представляющем собой многокаскадный усилитель с линейными фильтрами, формирующими частотную характеристику требуемого вида. Для достаточного предварительного усиления сигналов по мощности и согласования с низкоомной нагрузкой применяют специальные каскады предварительного усиления промежуточной частоты.

Для обеспечения линейной обработки сигналов принимаются меры по расширению динамического диапазона УПЧ, например, с помощью систем регулирования усиления. Выходное напряжение УПЧ поступает, как правило, на амплитудный или фазовый детектор. Параметры детекторов существенно зависят от амплитуды детектируемого сигнала. Граничное значение амплитуды,

начиная с которого параметры детектора становятся приемлемыми и стабильными, составляют от 0,5 до 1 В в зависимости от типов диодов, используемых в детекторе. Поэтому на УПЧ, кроме обеспечения согласованной фильтрации, возложена также функция усиления сигналов до величины, необходимой для нормальной работы детекторов.

Видеоусилитель представляет собой широкополосный усилитель видеочастот, полоса пропускания которого согласована со спектром усиливаемого сигнала до уровня, необходимого для нормальной работы индикаторных устройств и аппаратуры автоматического обнаружения сигналов. Прохождение сигнала по схеме супергетеродинного приемника проиллюстрировано на рис. 1.26.

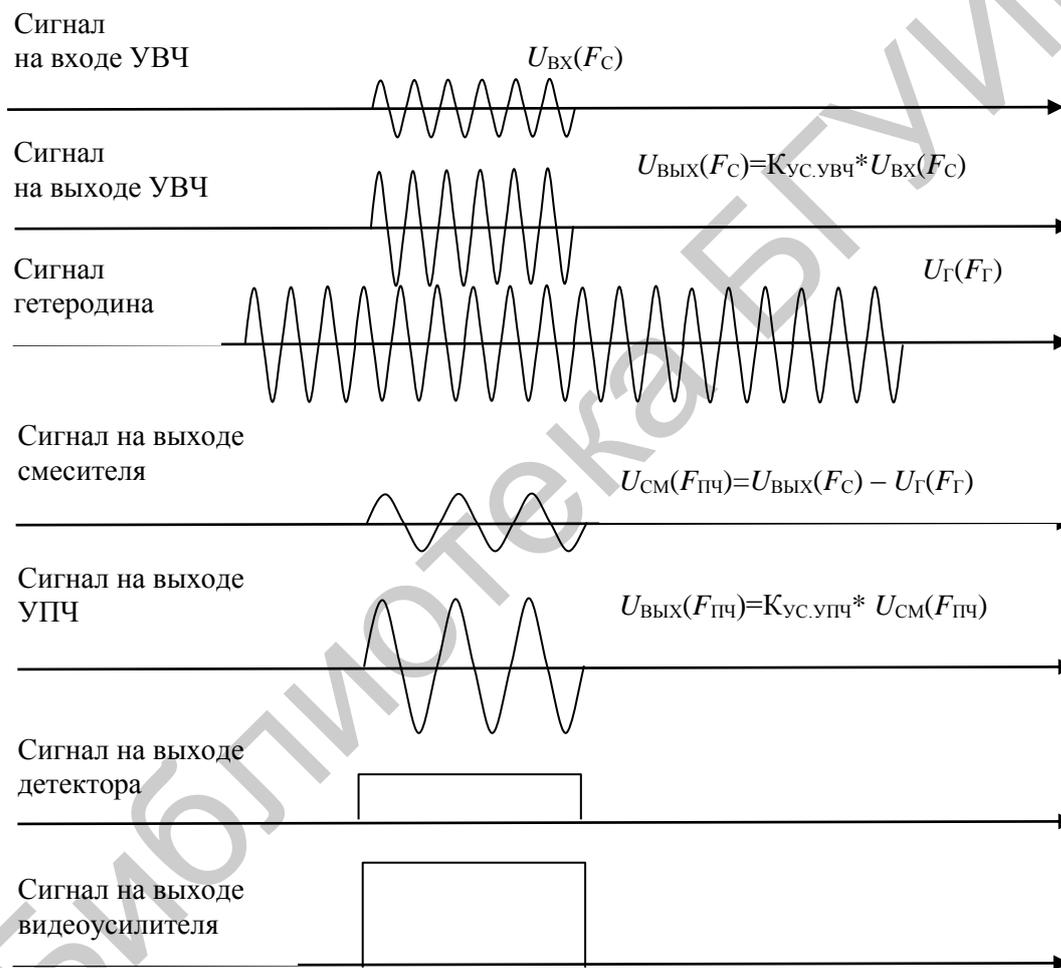


Рис. 1.26. Прохождение сигнала по схеме супергетеродинного приемника

1.4.19. Основные технические параметры приемного устройства

Параметры тракта приема и фильтрации сигналов определяются параметрами основных его составляющих: приемного устройства и аппаратуры защиты от помех.

Под техническими параметрами будем понимать прежде всего электрические параметры, основными из которых являются:

- предельная и пороговая чувствительности приемника или коэффициент шума;
- динамический диапазон по входу и выходу;
- диапазон рабочих частот;
- полоса пропускания и частотная избирательность.

Под **чувствительностью** приемного устройства понимают способность приемника выполнять свои функции при приеме слабого сигнала на фоне помех.

Чувствительность современных радиолокационных приемников ограничивается в основном уровнем их собственных шумов и составляет 10^{-12} – 10^{-15} Вт. На практике для характеристики радиолокационных приемников различают: предельную, пороговую и реальную чувствительности.

Предельной чувствительностью приемника называют минимальную мощность или напряжение сигнала, наводимого в антенне, при которых отношение сигнал/шум на выходе линейной части приемника, т. е. на выходе высокочастотного тракта, равно единице. Данный параметр характеризует мощность сигнала на входе приемника, равную эквивалентной мощности шумов приемника, пересчитанных на его вход, с учетом мощности шумов антенны, атмосферы, космоса, Земли.

Под **пороговой чувствительностью** понимается минимальный сигнал, наводимый в антенне, при котором приемное устройство работает с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги. Таким образом, пороговая чувствительность определяется на выходе системы обработки (например, детектора) и используется для сравнения приемных устройств с одинаковой системой обработки.

Рассмотрим понятие коэффициента шума приемника $K_{ш}$, служащего для оценки шумовых свойств высокочастотного тракта приемника. **Коэффициент шума приемника** – это число, показывающее, во сколько раз отношение сигнал/шум на выходе приемника меньше, чем отношение сигнал/шум на его входе. Коэффициент шума приемного устройства всегда больше единицы. Влияние собственных шумов на $K_{ш}$ тем меньше, чем больше коэффициент усиления по мощности K_p .

Под **динамическим диапазоном** приемника понимают диапазон возможных значений входного сигнала, при котором обеспечивается линейное усиление сигнала (приемник работает с допустимой величиной нелинейных искажений). Минимальный уровень входного сигнала ограничивается уровнем внутренних шумов приемника, т. е. предельной чувствительностью.

Максимальный уровень ограничен допустимыми нелинейными искажениями в каскадах приемника.

Диапазон рабочих частот приемника – это область частот, в пределах которой обеспечивается его функционирование с заданными параметрами. Перестройка рабочих частот осуществляется обычно изменением емкости или индуктивности колебательных систем входных цепей, УВЧ и гетеродина.

Избирательностью приемника называют его способность выделять сигнал и ослаблять воздействие мешающих сигналов и помех. На практике используют пространственную, амплитудную, временную, частотную избирательность. Наибольшее распространение получила **частотная избирательность**, которая основана на различии в частоте сигнала и помехи.

1.4.20. Влияние технического состояния элементов приемного устройства на боевые возможности РЛС

Основное влияние приемное устройство оказывает на дальность обнаружения воздушных объектов, эффективность работы аппаратуры защиты от помех, ошибки измерения координат и ухудшение разрешающей способности РЛС.

Выход из строя приемного устройства приводит к небоеспособности РЛС. Неисправность блоков УВЧ, преобразователей частоты, УПЧ, детекторов, системы АПЧ приемника приводит к выходу из строя РЛС. Нарушение нормальной работы схем когерентного канала снижает возможности РЛС по защите от пассивных помех.

Изменение параметров основных элементов приемного тракта приводит к изменению отдельных показателей боевых возможностей РЛС. Так, ухудшение чувствительности приемного устройства сказывается на снижении дальности обнаружения целей. Влияние изменения величины коэффициента шума (чувствительности) приемника на дальность обнаружения оценивается по основной формуле радиолокации. Ухудшение (увеличение) коэффициента шума вызывает сжатие зоны обнаружения.

Ухудшение точности работы системы АПЧ, ее неверная настройка приводит к тому, что некоторые составляющие основной частоты частотного спектра сигнала оказываются за пределами полосы пропускания УПЧ. Это вызывает уменьшение амплитуды, увеличение длительности и искажение формы сигнала, следовательно, и снижение дальности обнаружения объектов, ухудшение разрешающей способности и точности измерения координат.

Стабильность работы тракта когерентного гетеродина влияет на эффективность работы систем защиты от пассивных помех и показатели помехозащищенности РЛС. В свою очередь, стабильность работы когерентного канала и других элементов приемника во многом зависит от постоянства величин и частоты источников питания, наличия экранирования схем, обеспечения виброустойчивости и т. п. Выход из строя пеленгационного канала или его отдельных элементов исключит возможность определения и выдачи пеленга на ПАП, снизит возможности РЛС по работе в условиях АШП.

1.4.21. Принципы обработки радиолокационной информации в автоматизированных системах управления

В автоматизированных системах управления информация о радиолокационных целях, содержащаяся в выходных сигналах приемников РЛС, перед использованием для управления войсками подвергается специальной обработке.

Обработкой радиолокационной информации называют процесс выделения из выходных сигналов приемников РЛС сведений о радиолокационных целях и постоянного уточнения этих сведений.

Обычно процесс обработки РЛИ условно разбивают на три этапа, называемые соответственно первичной, вторичной и третичной обработкой.

Основными задачами *первичной обработки* РЛИ являются:

- выделение из действующей на выходе приемника смеси «сигнал + шум» полезных сигналов, несущих информацию о радиолокационных целях;
- определение координат обнаруженных целей.

Кроме того, на этапе первичной обработки производятся первичная нумерация обнаруженных целей и кодирование измеренных координат для передачи по каналам связи или ввода в ЭВМ с целью последующей обработки.

На этапе *вторичной обработки* по отдельным замерам координат целей производится построение и непрерывное сопровождение их траекторий. В ходе сопровождения производится сглаживание траектории, для уменьшения ошибок измерения координат осуществляется прогнозирование (экстраполяция) положения цели на будущие моменты времени. Кроме того, при вторичной обработке выполняется ряд специальных расчетов для представления обработанной информации в форме, наиболее удобной для последующего использования.

После вторичной обработки РЛИ может быть использована в автоматизированных системах наведения истребителей-перехватчиков и управления зенитно-ракетными комплексами.

На командных пунктах для создания общей картины о воздушной обстановке в пределах большой территории радиолокационная информация, поступающая от различных удаленных друг от друга источников, должна быть объединена. Сбор и объединение информации, поступающей от различных источников, представляет собой *третичную обработку* РЛИ.

В зависимости от степени участия человека в процессах обработки информации различают неавтоматизированные, автоматизированные и автоматические системы обработки РЛИ.

В неавтоматизированных системах обнаружение отметок от целей, определение их координат, сопровождение траекторий и другие важнейшие операции обработки выполняются человеком-оператором.

В автоматизированных системах отдельные операции обработки РЛИ выполняются ЭВМ (спецвычислителем). Благодаря этому достигаются более высокие скорость и точность обработки по сравнению с неавтоматизированными системами. Характерной особенностью

автоматизированной системы обработки РЛИ является то, что в ней человеку-оператору принадлежит главная, решающая роль.

В автоматических системах все операции обработки РЛИ выполняются ЭВМ и автоматическими устройствами. Функции человека-оператора в этих системах состоят лишь в их пуске и контроле функционирования.

1.4.22. Первичная обработка РЛИ

На этапе первичной обработки РЛИ осуществляется анализ выходных сигналов приемника РЛС, полученных в течение одного периода сканирования луча локатора (в РЛС кругового обзора – в течение одного оборота антенны).

В автоматизированных системах первичной обработки выходные сигналы приемника РЛС после усиления поступают на электронно-лучевой индикатор для отображения на его экране картины воздушной обстановки. Вследствие действия различных помех на экране индикатора вместе с отметками от наблюдаемых радиолокационной станцией воздушных объектов имеют место хаотически расположенные помеховые отметки.

Наблюдая картину на экране индикатора, оператор производит обнаружение полезных отметок, соответствующих реальным целям, и производит измерение их координат.

Обнаружение полезных отметок осуществляется оператором обычно визуально. Качество обнаружения в такой системе полностью определяется психофизиологическими характеристиками оператора.

Для определения координат обнаруженных целей оператор в автоматизированных системах обработки РЛИ пользуется полуавтоматическими устройствами съема (рис. 1.27).

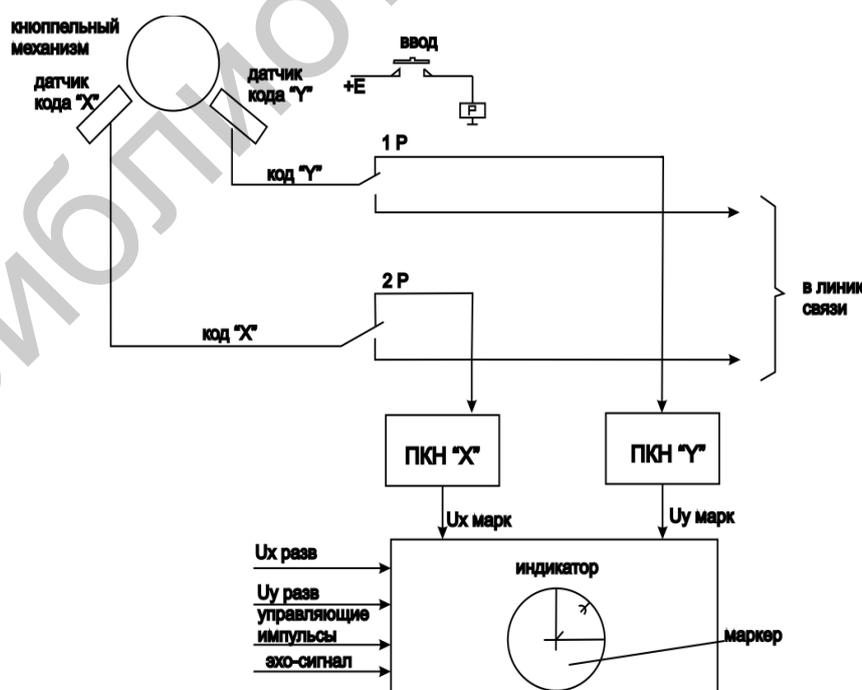


Рис. 1.27. Принцип полуавтоматического съема координат

Эхосигналы, поступающие на индикатор с выхода приемника РЛС, благодаря действию развертывающих напряжений $U_{\text{хразв}}$ и $U_{\text{уразв}}$ вызывают появление на экране индикатора яркостных отметок, положение которых соответствует координатам наблюдаемых радиолокационной станцией целей. Одновременно с отметками от целей на экране индикатора высвечивается специальная отметка – маркер. Положение этого маркера на экране индикатора оператор может изменять, вращая шарик (перемещая рукоятку) кноппельного механизма. С кноппельным механизмом связаны датчики, вырабатывающие цифровые коды, пропорциональные перемещению рукоятки этого механизма вдоль каждой из двух осей координат X и Y .

В преобразователях кода в напряжение (ПКН « X » и ПКН « Y ») цифровые коды « X » и « Y » преобразуются в соответствующие напряжения отклонения луча индикатора.

Под воздействием управляющих импульсов, вырабатываемых в аппаратуре АСУ, высвечивание на индикаторе маркера и отметок от целей производится поочередно, однако вследствие большой длительности послесвечения экрана оператор видит их на экране одновременно.

Обнаружив очередную отметку от цели, оператор вращением шарика (перемещением ручки) кноппельного механизма добивается совмещения маркера с обнаруженной отметкой и нажимает кнопку съема (ввода). При этом снимаемые с кодовых датчиков цифровые коды координат X и Y маркера, а следовательно, и обнаруженной цели выдаются через контакты 1Р и 2Р реле съема Р в линию связи или на вход вычислительного устройства.

Наряду с полуавтоматическими устройствами съема координат целей в современных АСУ предусматриваются также устройства автоматического обнаружения отметок от целей и определения их координат. Автоматическое обнаружение целей основано на анализе с помощью автоматических устройств или ЭВМ-пачек эхосигналов.

Вследствие того что радиолокационный луч имеет определенные угловые размеры, радиолокационная цель в течение времени ее нахождения в пределах этого луча облучается зондирующими импульсами многократно. Поэтому в течение одного периода сканирования луча на вход приемника РЛС от каждой цели поступает не один отраженный эхосигнал, а серия этих сигналов, называемая пачкой (рис. 1.28).

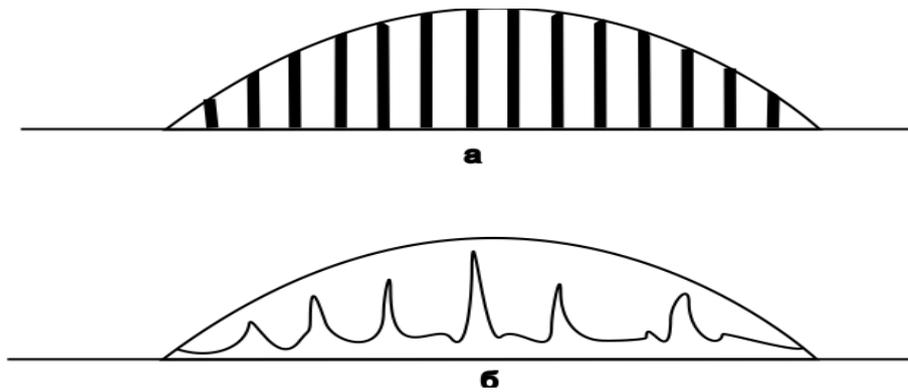


Рис. 1.28. Вид пачки эхосигналов:

a – при отсутствии помехи флуктуаций отражающей поверхности цели;
б – при наличии помех и флуктуаций отражающей поверхности цели

Огибающая пачки импульсов (см. рис. 1.28, *a*) соответствует форме диаграммы направленности антенны РЛС. Моменты появления импульсов в пачке определяются частотой посылок зондирующих импульсов и дальностью до цели.

В реальных условиях импульсы в пачке вследствие флуктуации отражающей поверхности цели и действия различных помех изменяются случайным образом (см. рис. 1.28, *б*).

Импульсы на входе приемника РЛС могут появляться также и при отсутствии цели в пределах луча локатора. Однако эти импульсы, обусловленные различными помехами, случайны не только по амплитуде, но и по моментам появления.

Различия в характеристиках последовательности импульсов пачки при наличии и отсутствии в какой-либо точке пространства воздушного объекта позволяют построить автоматические устройства обнаружения радиолокационных целей.

Принцип автоматического обнаружения показан на рис. 1.29.

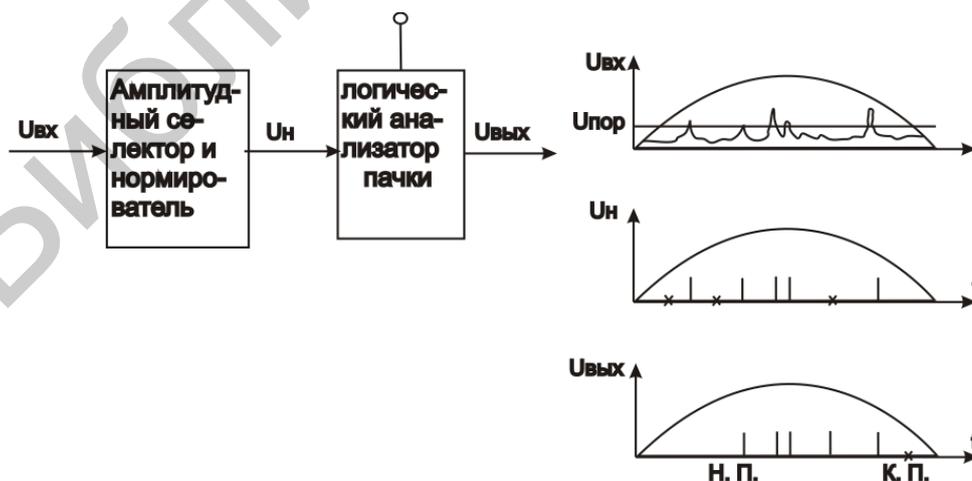


Рис. 1.29. Упрощенная схема автоматического обнаружителя и диаграммы его работы:

Н. П. – начало пачки; К. П. – конец пачки

Выходные сигналы приемника РЛС поступают на вход амплитудного селектора и нормирователя. Здесь принятые сигналы ограничиваются снизу. Уровень ограничения $U_{\text{пор}}$ выбирается так, чтобы отсеять наиболее плотную часть шумовых выбросов, имеющих малую амплитуду.

Все сигналы, превышающие порог $U_{\text{пор}}$, выравняются нормирователем по амплитуде. Эти сигналы поступают на вход логического анализатора пачки. Работа логического анализатора основана на проверке удовлетворения поступающей на его вход последовательности импульсов некоторым заданным критериям: критерию фиксации начала пачки, критерию фиксации конца пачки и критерию обнаружения.

При выполнении критерия фиксации начала пачки логический анализатор начинает выдавать серию импульсов, если во входной последовательности на n смежных отдаленных друг от друга равными интервалами T_3 позициях появляется подряд не менее l импульсов. Обычно величины l и n выбираются равными двум, трем или четырем, при этом $l \leq n$.

По критерию фиксации конца пачки логический анализатор прекращает выдачу серии импульсов, если через время $t = mT_3$ (где m – постоянное число) после фиксации начала пачки имеет место не менее S пропусков подряд. Величина S обычно не превышает значения $S = 3$.

На рис. 1.29 начало и конец пачки указаны для $l = 2$, $n = 3$, $S = 2$.

Выделенная по критериям фиксации начала и конца пачки последовательность импульсов считается пачкой полезных эхосигналов, если выполняется некоторый заданный критерий обнаружения. Например, требуется, чтобы пачка содержала не менее некоторого заданного числа импульсов.

При автоматическом обнаружении целей также автоматически осуществляется измерение их координат: дальности, азимута и угла места или высоты цели. Автоматическое измерение координат целей рассмотрим на примере определения только одной из ее координат – дальности.

Дальность до цели $D_{\text{ц}}$ может быть определена по времени запаздывания t_3 отраженного эхосигнала относительно момента послышки в пространство зондирующего импульса:

$$D_{\text{ц}} = \frac{1}{2c} t_3, \quad (1.8)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения в воздушном пространстве электромагнитной энергии.

Схема, поясняющая принцип автоматического измерения дальности, показана на рис. 1.30.

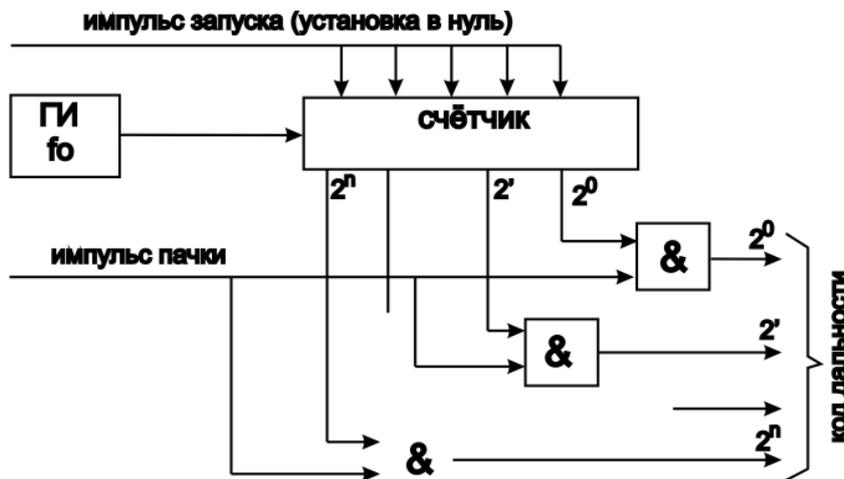


Рис. 1.30. Схема, поясняющая принцип автоматического измерения дальности до цели

Импульсами запуска, определяющими моменты посылок в пространство зондирующих импульсов РЛС, производится установка в нуль счетчика. Вследствие этого накапливаемое счетчиком число пропорционально количеству импульсов, поступающих на него от генератора импульсов (ГИ) с момента действия очередного импульса запуска.

Частота следования f_0 счетных импульсов выбирается намного большей частоты следования импульсов запуска.

В момент поступления импульса пачки в схеме рис. 1.30 открываются конъюнкторы $\&_1 - \&_n$, и на выход устройства выдается параллельный двоичный код накопленного счетчиком числа импульсов, следующих с частотой f_0 .

Этот двоичный код оказывается пропорциональным дальности до цели. Действительно, за время t_3 на вход счетчика поступит N счетных импульсов от генератора импульсов:

$$N = t_3 f_0,$$

откуда

$$t_3 = \frac{N}{f_0}.$$

Подставляя значение t_3 из последнего выражения в предыдущую формулу, получим

$$D_{\text{ц}} = \frac{1}{2cf_0} N = KN; \quad K = \frac{1}{2cf_0},$$

где K – постоянный коэффициент.

1.4.23. Вторичная обработка РЛИ

Сведения о воздушных объектах, полученные в результате первичной обработки, не избавлены полностью от влияния различных помех. Вследствие этого возникает необходимость дальнейшей обработки радиолокационной

информации на основе использования информации, полученной в нескольких смежных обзорах пространства.

Очередным этапом обработки РЛИ является вторичная обработка. В отличие от первичной она производится над сведениями о целях, полученными за несколько периодов обзора пространства.

Вторичная обработка предназначена для устранения ошибок, оставшихся после первичной обработки, а также для извлечения дополнительных сведений о целях, таких как данные об их скоростях, курсовых углах и т. п. Сущность вторичной обработки состоит в обнаружении траекторий движущихся целей и в их непрерывном сопровождении.

Вторичная обработка РЛИ может производиться вручную (визуально), полуавтоматически и автоматически.

В полуавтоматических системах вторичной обработки обнаружение траекторий, называемое также захватом целей на сопровождение, производится оператором путем наблюдения отметок на экране индикатора и анализа характера их перемещения от обзора к обзору.

Обнаружив на экране индикатора новую отметку, оператор с помощью специального устройства, аналогичного по принципу действия схеме рис.1.31, производит съем координат этой отметки.

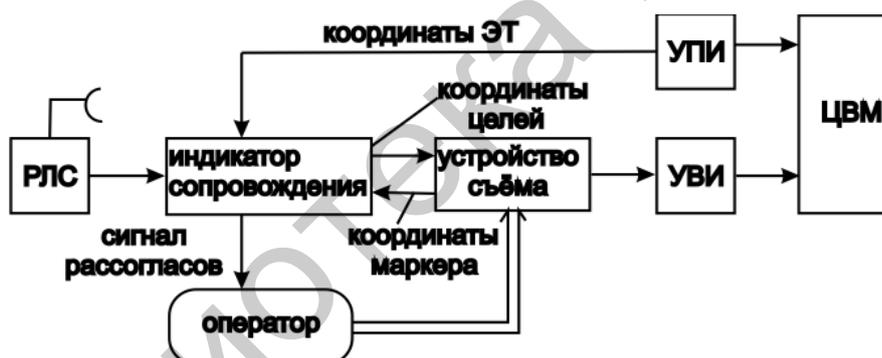


Рис. 1.31. Схема полуавтоматического сопровождения траекторий

Принцип полуавтоматического сопровождения траекторий (см. рис. 1.31) состоит в следующем.

Если в очередном периоде обзора пространства на экране индикатора вновь появляется отметка, находящаяся на небольшом удалении от первой, то оператор производит съем координат второй отметки и с помощью специальной кнопки выдает в ЭВМ признак вновь обнаруженной траектории.

Сопровождение обнаруженных траекторий может осуществляться полуавтоматически или автоматически.

Оператор, произведя обнаружение новой траектории, осуществляет съем координат первых двух отметок от цели. Эти данные через устройство выдачи информации (УВИ) поступают в ЭВМ, где по определенному алгоритму производится расчет координат ожидаемой отметки от цели в будущем периоде

обзора пространства. Такая предсказанная отметка называется экстраполяционной точкой (ЭТ).

Координаты ЭТ с выхода ЭВМ через устройство приема информации (УПИ) поступают на аппаратуру индикатора сопровождения, обуславливая появление на его экране специальной отметки – ЭТ.

При поступлении от РЛС очередной отметки от цели оператор, наблюдая картину на экране индикатора, производит визуальное сравнение координат текущей отметки и экстраполяционной точки, после чего с помощью устройства съема выдает через УВИ в ЭВМ необходимые поправки (корректуры) для расчета координат очередной ЭТ. Далее процесс повторяется.

Таким образом, в ходе полуавтоматического сопровождения траекторий оператор в каждом периоде обзора пространства производит измерение рассогласования в координатах текущей отметки и экстраполяционной точки, а также осуществляет на основе этого измерения ввод в ЭВМ необходимых поправок (корректур). Результатом сопровождения траекторий являются вырабатываемые ЭВМ уточненные данные о координатах, составляющих скорости и других параметрах каждой из сопровождаемых целей.

Наряду с полуавтоматическим сопровождением траекторий в АСУ также используется принцип автоматического сопровождения. Сущность этого принципа поясним с помощью схемы, показанной на рис. 1.32.

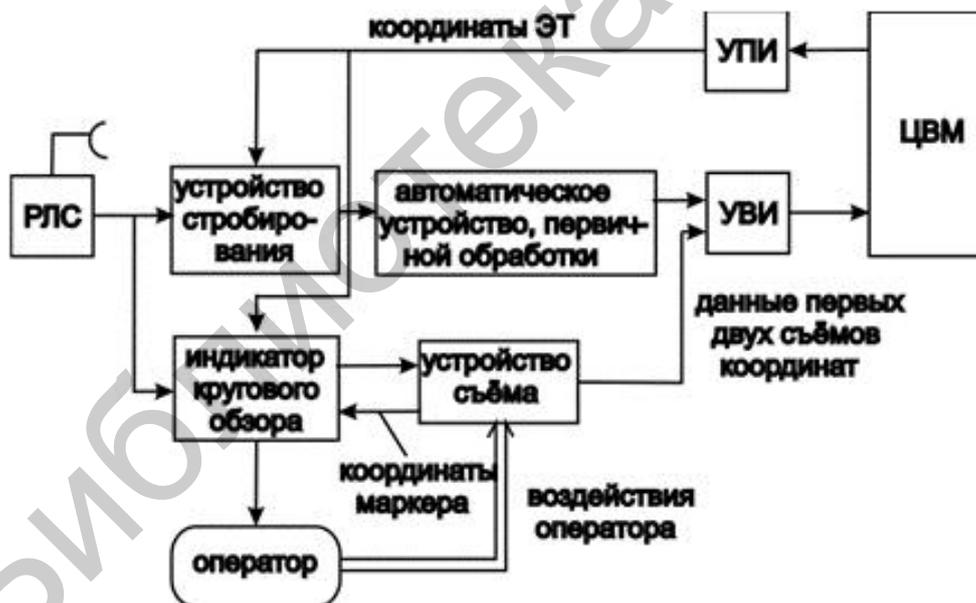


Рис. 1.32. Схема автоматического сопровождения траекторий

Оператор, обнаружив на экране индикатора новую отметку, производит съем ее координат в двух смежных обзорах пространства.

По данным первых двух съемов координат цели цифровая вычислительная машина, как и при полуавтоматическом сопровождении, производит расчет координат экстраполяционной точки. Данные о координатах

ЭТ через устройство приема информации поступают в устройство стробирования.

Устройство стробирования выдает для обработки только те поступающие от РЛС эхосигналы, которые приходят из ограниченной зоны обзора пространства, называемой стробом. Центр строба совпадает с ЭТ.

Форма строба может быть различной в зависимости от выбранной при обработке системы координат, способа технической реализации стробирования и других факторов. Наиболее распространенные в АСУ формы стробов показаны на рис. 1.33.

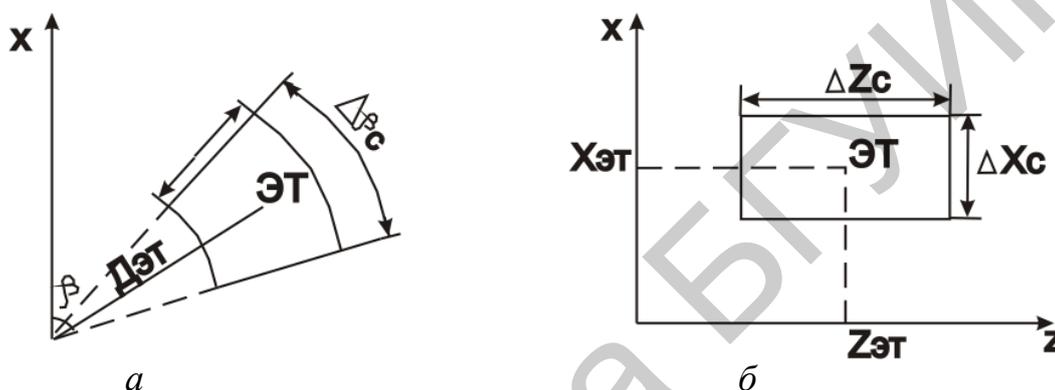


Рис. 1.33. Формы стробов:

a – в полярной системе координат; *б* – в прямоугольной системе координат

Сигналы, поступающие из области пространства, соответствующей выставляемому стробу, подвергаются первичной обработке в автоматическом устройстве.

Измеренные автоматическим устройством координаты отметок, лежащих внутри строба, выдаются в виде цифровых кодов в ЭВМ, где производится расчет координат очередной экстраполяционной точки.

Функции оператора при автоматическом сопровождении траекторий после первых двух съёмов координат заключаются лишь в контроле по индикатору кругового обзора за работой автоматической системы сопровождения.

В современных АСУ производится цифровая обработка сигнала, поступающего с выхода приемника РЛС. Благодаря такой обработке обнаружение цели и захват ее на сопровождение происходит полностью автоматически. В этом случае функции оператора сводятся к анализу воздушной обстановки и контролю работы аппаратуры.

Большое значение при вторичной обработке РЛИ имеет сопровождение постановщиков активных помех.

Как известно, радиолокационная станция позволяет измерить лишь азимут (угол места) постановщика активных помех, определяемый как азимут (угол места) середины сектора шумовой засветки (рис. 1.34). Это не дает возможности по данным одной РЛС однозначно определить местоположение постановщика активных помех. В связи с этим определение его координат осуществляется в процессе третичной обработки по данным об азимутах и углах места, получаемых от нескольких радиолокационных станций. Для решения этой задачи системы вторичной обработки РЛИ должны непрерывно сопровождать постановщики активных помех по угловым координатам.

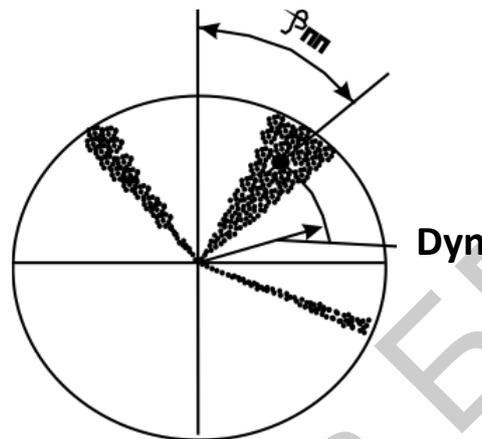


Рис. 1.34. К сопровождению постановщика активных помех

Сопровождение постановщика активной помехи может производиться аналогично сопровождению обычной радиолокационной цели, если ему вместо недостающей координаты – дальности – приписать некоторую условную дальность $D_{уп}$ и результаты сопровождения снабжать специальным признаком «постановщик активных помех».

Значение $D_{уп}$ может быть выбрано любым, однако для удобства работы оператора величину $D_{уп}$ принимают равной максимальному значению шкалы дальности индикатора, на котором решаются задачи сопровождения.

Наряду с решением описанных выше задач в процессе вторичной обработки производится выявление дополнительных сведений о целях, например, данных об их скоростях, курсовых углах и т. п.

1.4.24. Третичная обработка РЛИ

Третичной обработкой РЛИ называют сбор и объединение радиолокационной информации, поступающей от нескольких источников, расположенных в различных пунктах.

Одной из основных задач третичной обработки РЛИ является приведение отметок от целей, выдаваемых различными источниками, к единой системе координат. Это обусловлено тем, что каждая из радиолокационных станций измеряет координаты целей относительно своей точки стояния, т. е. в своей системе координат. Если бы не производилось преобразование отметок к

единой системе координат, то в пункте сбора информации одна и та же цель, наблюдаемая одновременно различными РЛС, представлялась бы несколькими отметками, расположенными в различных точках экрана устройства отображения.

Второй причиной появления в пункте третичной обработки нескольких отметок от одной и той же цели является неодновременность локации этой цели различными РЛС. Поэтому вместе с преобразованием информации к единой системе координат осуществляется ее приведение к единому началу отсчета времени.

Третьей причиной появления в пункте третичной обработки нескольких отметок от одной цели является наличие погрешностей в измерении координат целей радиолокационными станциями и в расчетах, производимых в ходе вторичной обработки. В связи с этим в пунктах третичной обработки возникает необходимость в так называемом отождествлении отметок, полученных от различных источников. В процессе отождествления несколько близко расположенных от какой-либо цели отметок, полученных от различных источников, заменяются одной отметкой с уточненными координатами.

Следует отличать отождествление отметок от группирования информации, производимого при необходимости также на этапе третичной обработки. При группировании информации одной отметкой с осредненными координатами заменяются отметки от нескольких расположенных близко друг к другу целей. Такая отметка на устройствах отображения информации сопровождается обычно дополнительными буквенно-цифровыми символами, содержащими сведения о количестве объединенных отметок, о расстояниях между целями в группе и т. п.

Особое место среди задач третичной обработки занимает определение координат постановщиков активных помех триангуляционным методом. Сущность этого метода (рис. 1.35) состоит в том, что по измеренным значениям азимутов $\beta_{1п}$ и $\beta_{2п}$ и известному расстоянию (базе) между РЛС №1 и РЛС №2 вычисляется положение вершины C треугольника ABC .

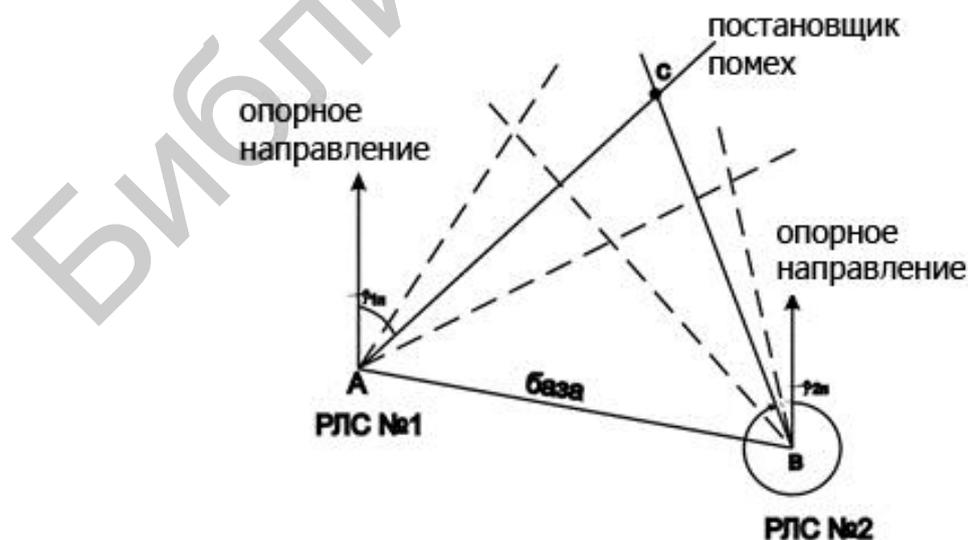


Рис. 1.35. Определение координат постановщика активных помех

Все операции третичной обработки могут выполняться автоматически, однако в ряде случаев выполнение отдельных из них может возлагаться на оператора.

1.5. Классификация радиоэлектронной техники радиотехнических войск

Удовлетворительно разрешить противоречия выбора основных параметров и конструктивных решений с целью обеспечения больших дальностей и высот обнаружения, хороших точностей измерения координат, разрешающих способностей и возможностей обнаружения маловысотных целей в одной конструкции РЛС РТВ не удастся. По этой причине парк РЛС РТВ должен содержать как минимум два класса:

- РЛС с антеннами больших размеров и мощными передатчиками, но с вынужденно ограниченными высотами подъема h_A ;
- РЛС маловысотного поля со сравнительно небольшими и легкими антеннами, что обеспечивает размещение их на вышках (мачтах) при $h_A = 30...60$ м.

Первый класс содержит РЛС повышенной дальности действия, обеспечивающие создание основного РЛП на больших и средних высотах. У второго класса РЛС зоны обнаружения могут быть значительно меньше как по дальности, так и по углу места, чем у РЛС первого класса (рис. 1.36).

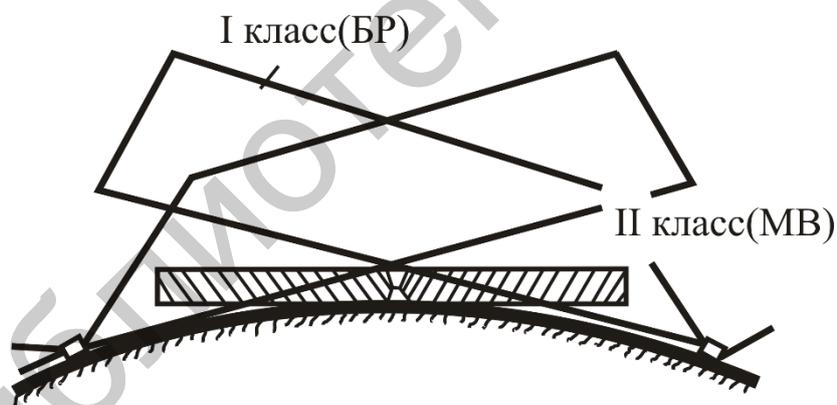


Рис. 1.36. Соотношение зон обнаружения различных классов радиолокационных станций

РЛС первого класса являются основными источниками РЛИ. Они обеспечивают радиолокационную разведку воздушного противника на максимальных дальностях и добывание наиболее точной боевой информации, чему способствуют большие размеры антенн и, следовательно, узкие лучи ДНА, а также высокие значения отношения сигнал/помеха в трактах приема. Эти РЛС целесообразно оснащать всем комплексом средств помехозащиты и высокопроиз-

водительными средствами обработки и передачи РЛИ. К настоящему времени наиболее устоявшимися являются два названия 1-го класса:

- «РЛС обнаружения, наведения и целеуказания» (РЛС ОНЦУ), что отражает полноту выполнения задач;
- «РЛС боевого режима» (РЛС БР), что отражает обобщенный функциональный признак.

В РЛС первого класса используют главным образом короткие дециметровые волны $\lambda = 13\text{--}25$ см, что обеспечивает удовлетворительный выбор значений A , b_A , ε_A , а также генерацию и канализацию необходимой средней мощности излучения на СВЧ.

РЛС второго класса – «маловысотного поля», или «маловысотные» – по назначению, перечню и качеству выполнения задач не отличаются от РЛС 1-го класса и также являются, по существу, РЛС ОНЦУ БР, но с меньшей пространственной зоной ответственности, что позволяет достичь необходимого качества боевой и разведывательной информации при существенно меньших весах, габаритах и стоимости аппаратуры. Способность к подъему антенн на десятки метров в отдельных типах РЛС маловысотного поля может отсутствовать, но обязательны высокая защищенность от пассивных помех (отражений от фона Земли), мобильность и существенно меньшие, чем у РЛС 1-го класса, стоимость производства и сложность эксплуатации.

В силу ограниченных зон видимости маловысотных целей класс РЛС МВП является многочисленным по общему количеству образцов. Очень важна унификация РЛС этого класса с соответствующими РЛС радиотехнических подразделений и частей сухопутных войск.

РЛС МВП выполняют либо с длиной волны $\lambda = 10$ см (трехкоординатные РЛС), либо в дециметровом диапазоне волн (РЛ дальномеры с легкими антеннами для подъема на мачтах).

РЛС БР и РЛС МВП предназначены главным образом для решения боевых задач военного времени, они имеют высокую стоимость при ограниченном ресурсе до ремонта (примерно 10–12 тыс. часов). Систематическое расходование этого ресурса на боевом дежурстве в мирное время экономически нецелесообразно. По этой причине оправдано существование 3-го класса РТВ – «РЛС дежурного режима» (РЛС ДР), которые технически проще, значительно дешевле, чем соответствующие РЛС 1-го и 2-го классов. РЛС ДР должны обеспечивать в основном добывание разведывательной информации, дальнейшее обнаружение и предупреждение о воздушном противнике, контроль и обеспечение полетов своей авиации. У РЛС ДР допустимы несколько сниженные тактико-технические характеристики по точности измерения координат и разрешению целей, помехозащищенности.

РЛС ДР могут выполняться во всех диапазонах волн, используемых в РТВ. Особое значение имеет использование метровых волн. Выбор диапазона длин волн РЛС ДР будет рассмотрен ниже. Кроме трех основных классов РЛС, в интересах РТВ ВВС создаются РЛС специального назначения, которые условно можно объединить в 4-й класс. К ним относятся:

– РЛС программного обзора, обеспечивающие «силовую» борьбу с ПАП, раскрытие состава целей и, возможно, классов (типов) ЛА; эти РЛС должны использовать очень узкие лучи ДНА, разнообразные, в том числе широкополосные и сверхширокополосные, зондирующие сигналы, электронное скандирование лучом ФАР и выполнять задачи по целеуказанию (ввиду ограниченных поисковых возможностей);

– РЛС для горных позиций, обладающие повышенной защищенностью от пассивных помех, устойчивостью к жестким метеоусловиям, способностью работать в разреженной атмосфере, при дистанционном управлении и контроле состояния;

– РЛС для удаленных и малонаселенных районов тундры для автономной работы без боевых расчетов;

– РЛС САЗО для управления полетами и наведения авиации ВВС;

– РЛС МВП на специальных носителях – привязанных аэростатах.

Мощными источниками РЛИ в едином РЛП служат самолетные (вертолетные) РЛС и комплексы.

Специальные РЛС могут работать в различных диапазонах волн и с использованием технических решений, отличных от основных классов РЛС РТВ. Их общей особенностью является то, что они дополняют основной парк РЛС РТВ в соответствии с особыми задачами и условиями и не могут самостоятельно служить основой РЛП.

Подсистемы радиолокационных средств пассивной локации и САЗО строятся как дополнение основным радиолокационным средствам активной эхолокации путем введения в РЛС пеленгационных каналов для ПАП, сопряжения, встраивания в РЛС наземных радиолокационных запросчиков системы опознавания государственной принадлежности и обеспечения прохождения и обработки дополнительной РЛИ от этих источников в АСУ РТВ.

Цель классификации состоит в разделении множества РЛС на группы (классы), обладающие общими признаками, несмотря на многообразие их конструктивных, технических решений. Это дает возможность анализировать особенности построения РЛС с позиций системотехники.

Выбранные для классификации признаки должны отражать наиболее существенные черты РЛС. Число их не должно быть слишком большим, чтобы классификация не потеряла смысл, и не слишком малым, чтобы не обеднять полноту характеристики РЛС. Наиболее полную характеристику РЛС дает классификация, в основу которой положены как технические, так и тактические признаки (рис. 1.37).

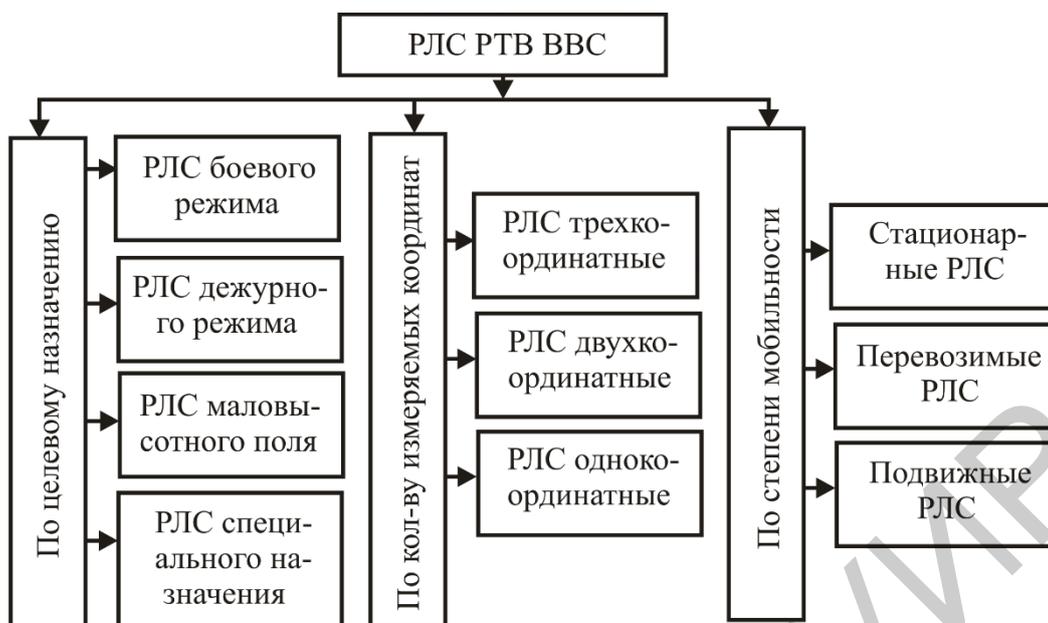


Рис. 1.37. Классификация радиолокационных станций РТВ по тактическим признакам

К тактическим признакам относятся:

- целевое назначение РЛС;
- степень мобильности;
- количество измеряемых координат и др.

Наиболее существенными техническими признаками являются:

- метод радиолокации, используемый в РЛС;
- метод дальнометрии или вид зондирующих сигналов;
- диапазон рабочих волн (частот);
- число независимых радиолокационных каналов.

Как видно из изложенного, целевое назначение РЛС – один из основных тактических признаков, зачастую определяющий не только их тактические, но и технические характеристики.

Характеризуя классификацию РЛС по техническим признакам (рис. 1.38), остановимся на последних двух группах.

Главными достоинствами импульсных РЛС являются простота измерения дальности по цели, а также возможность использования одной антенны для излучения зондирующих и приема отраженных сигналов. К недостаткам относится необходимость применения передатчиков с большими импульсными мощностями и сложность измерения скорости цели, особенно с высокой точностью.

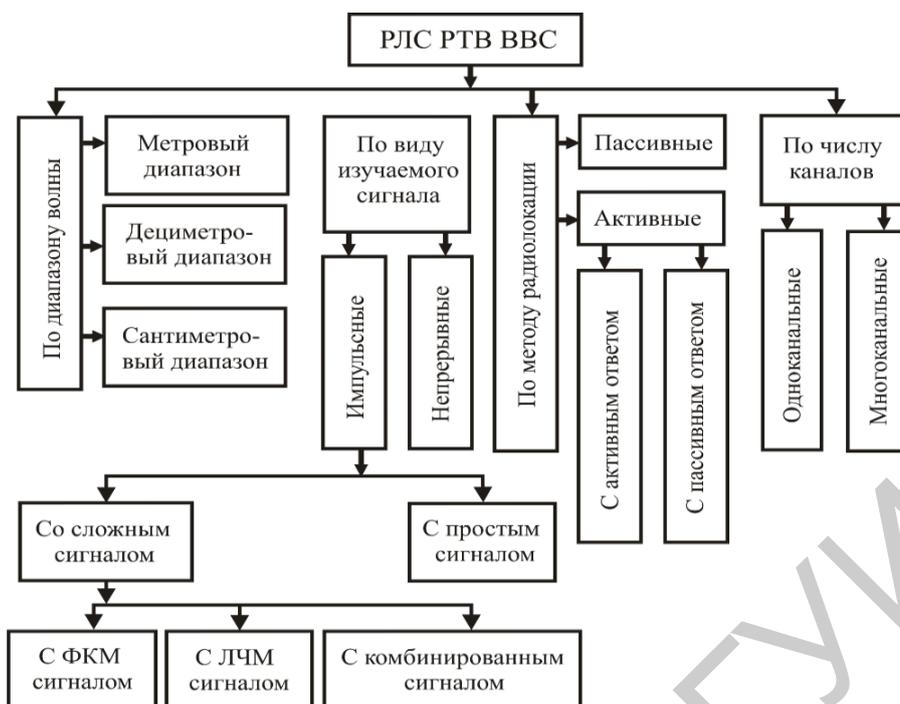


Рис. 1.38. Классификация радиолокационных станций РТВ по техническим признакам

РЛС с непрерывным излучением обеспечивают селекцию целей по скорости и однозначно измеряют скорость в широком диапазоне ее возможных изменений, работают при относительно малой мощности излучения. К недостаткам РЛС с непрерывным излучением следует отнести сложность развязки приемного и передающего трактов, сложность выходных устройств, особенно при необходимости наблюдения за многими целями по нескольким параметрам. По виду зондирующих сигналов импульсные РЛС делят на:

- некогерентные;
- когерентно-импульсные:
 - а) без внутриимпульсной модуляции (узкополосные);
 - б) с внутриимпульсной модуляцией – частотной или фазовой (широкополосные).

В РЛС с непрерывным излучением могут использоваться:

- немодулированные незатухающие колебания;
- частотно-модулированные колебания;
- непрерывные шумоподобные сигналы.

В зависимости от числа радиолокационных каналов РЛС подразделяют на одноканальные и многоканальные. Последние, в свою очередь, могут быть частотно-многоканальными, пространственно-многоканальными и пространственно-частотно-многоканальными. В частотно-многоканальных РЛС используется несколько приемопередатчиков, работающих на разных частотах, но в пределах одной и той же диаграммы направленности антенны. Цель облучается

одновременно на нескольких частотах, а выходные сигналы каналов обрабатываются совместно. В пространственно-многоканальных РЛС антенна имеет парциальную диаграмму направленности.

По методу дальнометрии РЛС могут быть разделены на две большие группы:

- РЛС с импульсным излучением;
- РЛС с непрерывным излучением.

Сигналы излучаются и принимаются на одной частоте. При этом передатчик может быть общим для всех парциальных каналов. Число приемных каналов должно соответствовать количеству парциальных лепестков. В пространственно-частотно-многоканальных РЛС в пределах каждого парциального лепестка сигналы излучаются и принимаются на своей частоте.

Достоинством многоканальных РЛС является повышенная помехозащищенность и дальность действия, которая обеспечивается увеличением суммарной излучаемой мощности при допустимых значениях пиковой мощности в каждом из каналов.

К недостаткам относится большая сложность (прежде всего антенных систем) и малая мобильность.

Библиотека БГУИР

2. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ РЛС ОТ ПОМЕХ

2.1. Анализ защищенности РЛС от активных помех

Оценка боевых возможностей РЛС при воздействии активных помех может быть получена на основе анализа уравнения противорадиолокации, которое имеет следующий вид:

$$\frac{P_{\text{ср}} T_{\text{обз}} G_{\text{э}} A \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^2 D_{\text{обн}}^4(\beta, \varepsilon)} F_{\text{л}}^4(\varepsilon) \geq \nu(N_0 + \sum_{i=1}^m \frac{P_i G_i F_i^2(\beta_{\text{л}}, \varepsilon_{\text{л}}) A F_{\text{л}}^2(\beta - \beta_i) F_{\text{л}}^2(\varepsilon_i)}{4\pi \Delta f_i D_{\text{ПАП}i}^2} \alpha_i \gamma_i) \quad (2.1)$$

где P_i – мощность излучения на выходе антенна i -го ПАП;
 Δf_i – ширина энергетического спектра шумовой помехи i -го ПАП;
 G_i – коэффициент усиления антенны i -го ПАП;
 $F_i(\beta_{\text{л}}, \varepsilon_{\text{л}})$ – значение нормированной диаграммы направленности антенны i -го ПАП в направлении на РЛС $(\beta_{\text{л}}, \varepsilon_{\text{л}})$;
 $D_{\text{ПАП}i}$ – дальность до постановщика помех;
 β_i, ε_i – сферические координаты i -го ПАП;
 α_i – коэффициент качества помехи, учитывающий отличие ее временной структуры от структуры теплового (гауссова) шума ($0 \leq \alpha \leq 1$);
 γ – коэффициент поляризационного несовершенства помехи, учитывающий различие поляризации сигнала и помехи ($0 \leq \gamma \leq 1$);
 $F_{\text{л}}(\beta - \beta_i) \cdot F_{\text{л}}(\varepsilon - \varepsilon_i)$ – нормированная диаграмма направленности антенны РЛС в направлении i -го ПАП;
 β, ε – угловые координаты максимума диаграмма направленности антенны РЛС.

Как следует из (2.1), воздействие помех особенно интенсивно при нахождении одного или нескольких ПАП в главном лепестке диаграммы направленности антенны РЛС ($\beta_i = \beta; \varepsilon_i = \varepsilon; F_{\text{л}}(\beta - \beta_i) \cdot F_{\text{л}}(\varepsilon - \varepsilon_i) = F_{\text{л}}(0) = 1$), когда дальность обнаружения «нешумящих» целей, прикрываемых ПАП, может снижаться до единиц–десятков километров. Помимо появления таких секторов эффективного подавления возникает «сжатие» зоны обнаружения РЛС в других направлениях (рис. 2.1).

Количественно изменение зоны обнаружения РЛС при воздействии шумовых помех характеризуют коэффициентом сжатия $K_{\text{д}}(\beta)$ и шириной сектора эффективного подавления $\Delta\beta_{\text{эф}}$. Коэффициент сжатия $K_{\text{д}}(\beta)$ определяется как отношение дальности обнаружения нешумящей цели без помех и дальности ее обнаружения при воздействии внешних помех (высота полета фиксирована).

Для изодальностного участка зоны обнаружения коэффициент сжатия имеет вид

$$K_d(\beta) = \sqrt[4]{1 + \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^m \frac{P_i G_i F_i^2(\beta_{Л}, \epsilon_{Л}) A F_{Л}^2(\beta - \beta_i) F_{Л}^2(\epsilon_i)}{4\pi \Delta f_i D_{ПАПi}^2} \alpha_i \gamma_i}. \quad (2.2)$$

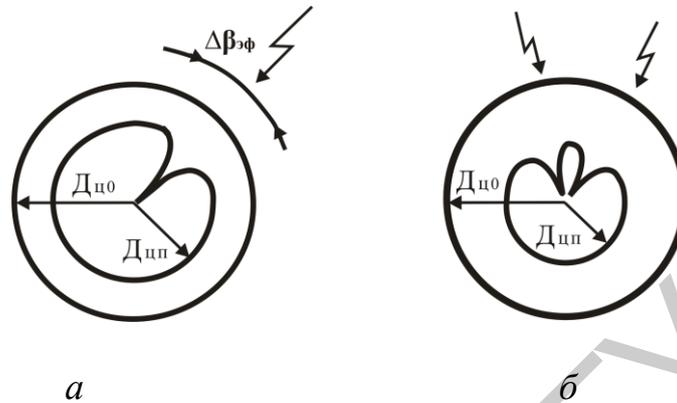


Рис. 2.1. Изменение зоны обнаружения РЛС при воздействии одного (а) и нескольких (б) постановщиков активных помех

В режиме самоприкрытия дальность обнаружения $D_{ОБН}(\beta, \epsilon)$ i -го постановщика (дальность самоприкрытия $D_{Сi}$) определяется расстоянием до него $D_{ПАПi} = D_{Сi} = D_{ОБН}(\beta = \beta_i, \epsilon = \epsilon_i)$, при котором (2.1) обращается в тождество. Если пренебречь внутренним шумом, то получим

$$D_{Сi} = \sqrt{\frac{P_{СР} T_{ОБЗ} G_{Э} \sigma_{Ц} \Delta f_i F_{Л}^2(\epsilon_i)}{4\pi \nu P_i G_i F_i^2(\beta_{Л}, \epsilon_{Л}) \alpha_i \gamma_i}}. \quad (2.3)$$

Используя (2.3), приведем уравнение (2.2) к виду

$$K_d(\beta) = \sqrt[4]{1 + \sum_{i=1}^m \left(\frac{D_{\max}}{D_{ПАПi}} \right)^2 \left(\frac{D_{\max}}{D_{Сi}} \right)^2 F_{Л}^2(\beta - \beta_i) F_{Л}^2(\epsilon_i)}, \quad (2.4)$$

где D_{\max} – максимальная дальность обнаружения на изодальностном участке ($f(\epsilon) = 1$) при отсутствии внешних помех.

Сектор эффективного подавления – это диапазон угловых координат, в пределах которого ПАП обеспечивает полное самоприкрытие и маскировку целей. Ширина сектора зависит от мощности помехи, энергетического потенциала РЛС, ширины диаграммы направленности приемной антенны РЛС, а также от наличия и эффективности средств защиты.

При отсутствии в РЛС мер защиты от шумовых помех ее зона обнаружения может настолько сжаться, что РЛС будет не в состоянии выполнять свои задачи.

2.2. Методы защиты РЛС от активных шумовых помех

2.2.1. Технические методы защиты

Анализ уравнений (2.1)–(2.4) показывает, что повышение индивидуальной защищенности РЛС от шумовых помех достигается:

- увеличением энергетического потенциала РЛС («силовая» борьба с помехой);
- пространственной селекцией эхосигналов от целей на фоне помех;
- использованием поляризационного (γ) и временного «несовершенства» (α) отдельных видов помех;
- расширением динамического диапазона приемных устройств.

Метод «силовой» борьбы обеспечивает снижение коэффициента сжатия $K_d(\beta)$ в результате увеличения дальности D_{Ci} . Сюда же можно отнести уменьшение требуемого значения коэффициента различимости:

$$\nu = 0,5Lq_{\text{ПОР}}^2, \quad (2.5)$$

где L – коэффициент потерь в реальном тракте обработки эхосигналов $L > 1$;

$q_{\text{ПОР}}^2$ – параметр обнаружения $q_{\text{ПОР}}^2 = 2\mathcal{E}_{\text{ПР}} / N_0$.

Коэффициент L уменьшается при оптимизации приемного устройства. Параметр $q_{\text{ПОР}}^2$ может быть уменьшен при переходе к многочастотному зондирующему сигналу и выборе рационального значения времени облучения цели $t_{\text{ОБЛ}}$.

Метод «силовой» борьбы направлен на повышение отношения сигнал/помеха на выходе приемного устройства и, следовательно, на увеличение дальности обнаружения цели в шумовых помехах за счет увеличения энергии зондирующего сигнала $\mathcal{E}_u = P_{\text{И}}\tau_{\text{И}}M_{\text{П}}$ и повышения ее концентрации в пространстве (увеличения коэффициента усиления антенны на излучение G_u). Его целью не является ослабление помехи на входе приемного устройства или в трактах обработки.

Если увеличение импульсной мощности $P_{\text{И}}$ и длительности импульса $\tau_{\text{И}}$ встречает одинаковые затруднения в РЛС любого назначения, то возможности увеличения коэффициента усиления антенны G_u и числа импульсов в пачке $M_{\text{П}}$ особенно ограничены в обзорных РЛС РТВ, где стремление к увеличению G_u и $M_{\text{П}}$ вступает в противоречие с требованием обеспечения высокого темпа обзора пространства. Поэтому высокая эффективность метода может быть достигнута лишь в специализированных РЛС РТВ, предназначенных специально для ведения «силовой» борьбы, а также для анализа состава и прикрытых помехами целей. Эти РЛС не ведут обзор пространства, а работают по целеуказанию от обзорных РЛС (с командного пункта), поэтому могут иметь узкий луч и зондировать заданное направление длительное время. Это, однако, не означает, что в обзорных РЛС следует отказаться от повышения энергетического потенциала. Если увеличение энергетического потенциала до технически возможных преде-

лов не позволит обнаруживать на больших дальностях сами постановщики помех, то оно приведет к увеличению дальности обнаружения нешумящих целей вне секторов эффективного подавления.

В обзорных РЛС перспективным с точки зрения повышения их защищенности от шумовых помех является отказ от равномерного обзора пространства и переход к адаптивному обзору, при котором распределение энергии по направлениям (время зондирования отдельных направлений) определяется исходя из воздушной и помеховой обстановки в зоне обнаружения РЛС.

Следует иметь в виду, что повышение энергетического потенциала за счет увеличения числа импульсов в пачке будет иметь место лишь в том случае, когда при обработке производится накопление импульсов в пачке. Накопление может быть когерентным и некогерентным. При когерентном накоплении импульсы пачки складываются в фазе (рис. 2.2), в результате чего амплитуда сигнала на выходе накопителя возрастает в M_{Π} раз (при одинаковой амплитуде всех импульсов пачки), мощность – в M_{Π}^2 раз.

Шумовые выбросы при этом складываются со случайными амплитудами и фазами, в результате чего мощность помехи на выходе накопителя возрастает в M_{Π} раз и отношение сигнал/помеха по мощности возрастает в M_{Π} раз.

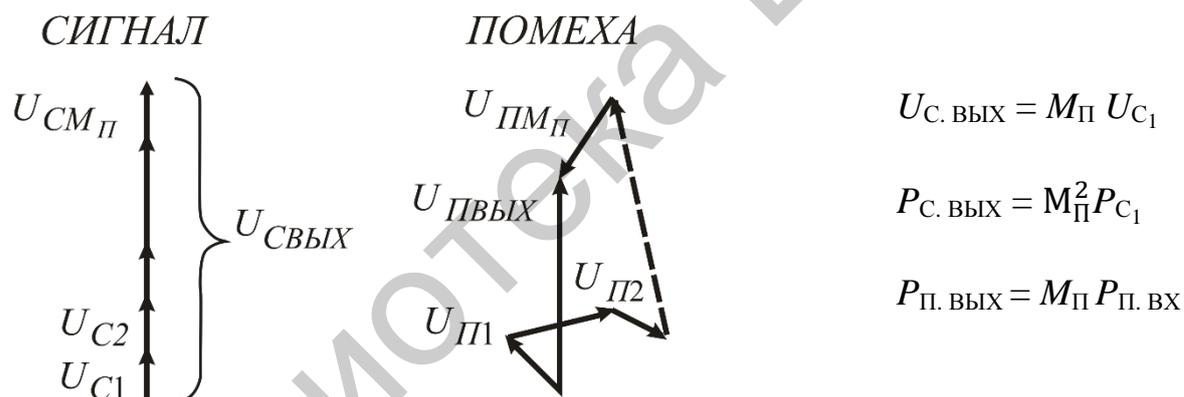


Рис. 2.2. Пояснение принципа когерентного накопления пачки

Некогерентное накопление производится после амплитудного детектора, когда информация о начальной фазе сигналов и шумовых выбросов нарушена, а сигналы и помеховые выбросы представляют собой импульсы одинаковой полярности. Увеличение отношения сигнал/помеха на выходе некогерентного накопителя происходит вследствие того, что импульсы пачки появляются более или менее регулярно и имеют более или менее постоянную амплитуду, в то время как амплитуда шумовых выбросов имеет случайный характер. В результате некогерентного накопления импульсов пачки отношение сигнал/шум на мощности возрастает не в M_{Π} раз, как при когерентном накоплении, а только в $\sqrt{M_{\Pi}}$ раз.

Когерентное накопление пачки эхосигналов применяют в современных РЛС с истинной когерентностью. Накопление производится в каждом кольце

дальности в M параллельных доплеровских фильтрах. В РЛС с эквивалентной когерентностью применяется некогерентное накопление пачки на экране ИКО с послесвечением или с помощью рециркуляторов (рис. 2.2.2), схем логической обработки пачки к/м и т. д.

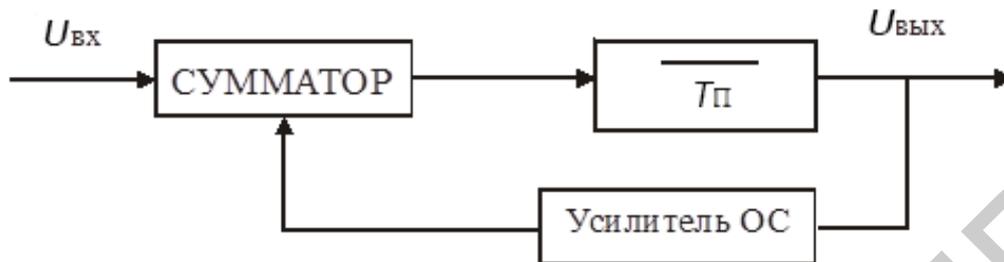


Рис. 2.3. Структурная схема рециркулятора

Улучшение пространственной селекции является важнейшим способом защиты РЛС от активных помех всех видов. Оно достигается за счет сужения главного лепестка и уменьшения уровня боковых лепестков диаграммы направленности антенны, в результате чего обеспечивается сужение сектора эффективного подавления и уменьшение коэффициента сжатия зоны обнаружения РЛС.

Наряду с принятием всех мер снижения фона боковых лепестков в настоящее время в РЛС осуществляется избирательное адаптивное подавление бокового приема в направлении каждого постановщика помехи путем компенсации помехи, принятой по боковым лепесткам, помехой, принятой с того же направления вспомогательной антенной. Диаграмма направленности вспомогательной антенны перекрывает боковые лепестки основной антенны (рис. 2.4).

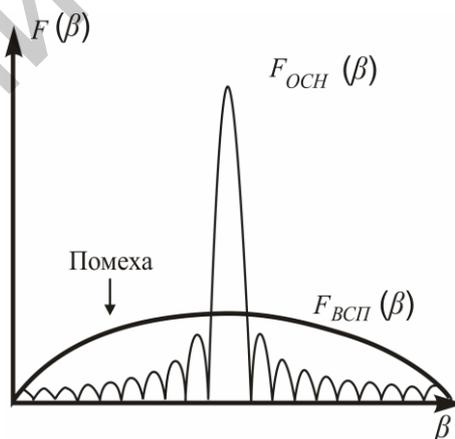


Рис. 2.4. Диаграмма направленности основной и вспомогательной антенн

Помеховые колебания, принятые основной антенной по боковым лепесткам и вспомогательной антенной, коррелированы, но отличаются друг от дру-

га по интенсивности (см. рис. 2.4) и имеют сдвиг по фазе $\Delta\varphi$, обусловленный разностью хода ΔD (рис. 2.5):

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta D = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\beta_A - \beta_{\Pi}),$$

где d – расстояние между фазовыми центрами основной и вспомогательной антенн;

β_A – направление максимума основной антенны;

β_{Π} – азимут помехоносителя.

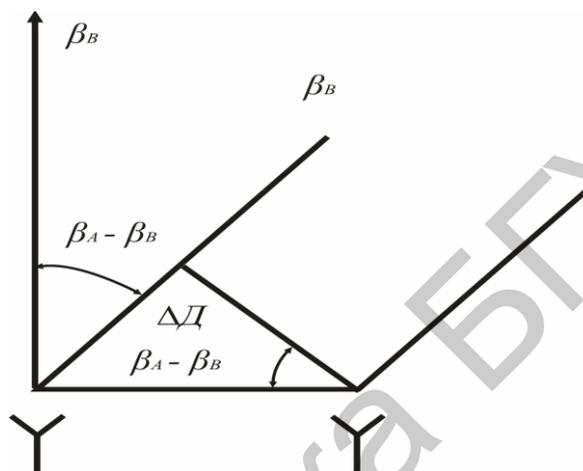


Рис. 2.5. К пояснению разности хода ΔD

Подавление помеховой составляющей осуществляется в автокомпенсаторе (квадратурном или гетеродинном). Автокомпенсатор обеспечивает подавление помехи на 10–25 дБ и тем самым уменьшает коэффициент сжатия зоны обнаружения в 1,7–4 раза.

Одноканальный (с одним вспомогательным каналом) автокомпенсатор способен подавлять помеху, действующую лишь с одного направления. При одновременном действии в зоне обнаружения РЛС нескольких помехоносителей, действующих с разных направлений, необходим многоканальный автокомпенсатор, число вспомогательных каналов которого должно быть не меньше числа разрешаемых помехоносителей, действующих одновременно в пределах сектора интенсивных боковых лепестков. Многоканальные автокомпенсаторы сложны, имеют большое время настройки, поэтому в настоящее время в РЛС находят применение автокомпенсаторы с числом вспомогательных каналов не более пяти.

На рис. 2.6 представлены структурная схема и векторная диаграмма квадратурного автокомпенсатора. Управление процессами самонастройки в квадратурном автокомпенсаторе осуществляется на видеочастоте, поэтому переменнотокители в цепях обратной связи выполнены на базе фазовых детекторов, интеграторы – на базе RC-фильтров с постоянной времени, существенно превышающей длительность эхосигнала. Фазовые детекторы в единстве с соответствующими

ющими RC-фильтрами выполняют функцию коррелятора. Перемножители в цепях основного и дополнительного каналов выполнены на базе усилителей с управляемым коэффициентом усиления.

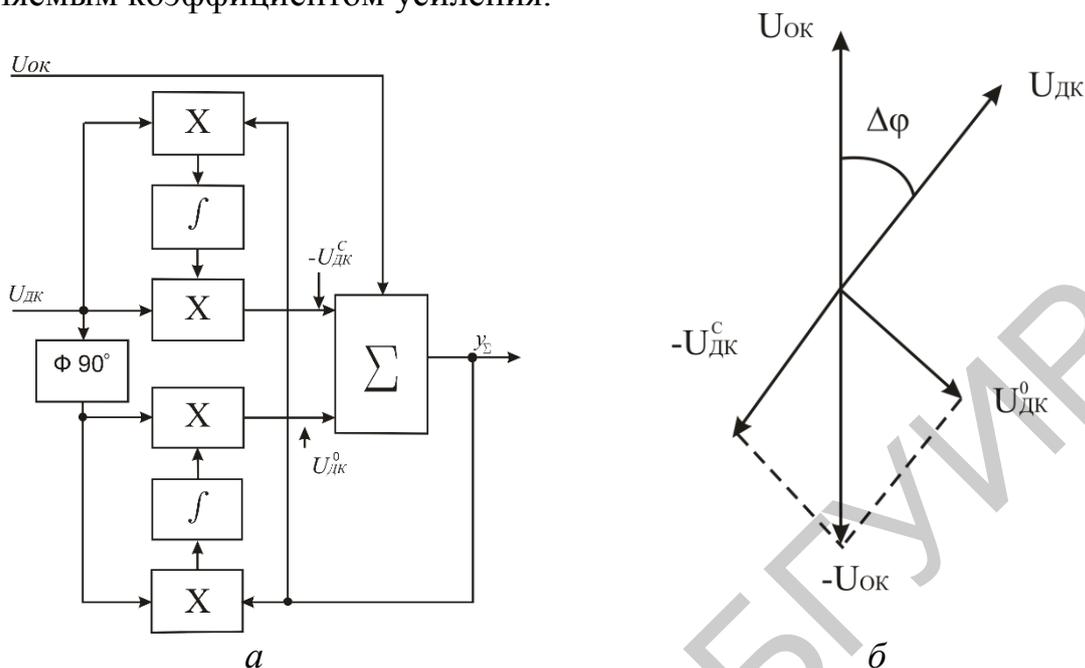


Рис. 2.6. Одноканальный квадратурный автокомпенсатор:

a – схема;

X – перемножитель сигналов; *f* – интегратор; *Σ* – сумматор; *Ф* – фазовращатель; *б* – векторная диаграмма

Сигналы помехи на входах основного и дополнительного каналов автокомпенсатора сдвинуты друг относительно друга на некоторую фазу $\Delta\varphi$ (рис. 2.6, б). Синфазный и квадратурный (ортогональный) подканалы автокомпенсатора посредством управления амплитудой и фазой составляющих $U_{\text{дк}}^{\text{с}}$ и $U_{\text{дк}}^{\text{о}}$ формируют помеху дополнительного канала, равную по амплитуде, но противоположную по фазе помехе основного канала, обеспечивая ее когерентную компенсацию в сумматоре автокомпенсатора.

В гетеродинном автокомпенсаторе (рис. 2.7) управление амплитудой и фазой помехи дополнительного канала осуществляется на промежуточной частоте. Поэтому конструктивно гетеродинный автокомпенсатор оказывается несколько проще квадратурного (отсутствует квадратурный подканал). Перемножители сигналов здесь выполнены на базе смесителей, а интегратор – на базе узкополосного кварцевого фильтра.

В первоначальный момент времени в силу узкополосности и, следовательно, инерционности интегратора управляющее напряжение на втором входе смесителя дополнительного канала отсутствует, и помеховый сигнал основного канала с выхода сумматора поступает на второй вход смесителя корреляцион-

ной обратной связи, на первый вход которого поступает сигнал помехи дополнительного канала.

Сигнал на разностной частоте (на частоте гетеродина) с соответствующей фазовой структурой через узкополосный интегратор поступает на управляемый вход смесителя дополнительного канала, обеспечивая равенство фазы и амплитуды помехи дополнительного канала фазе и амплитуде помехи основного канала и, следовательно, ее когерентную компенсацию в сумматоре. Корреляционная обратная связь обеспечивает непрерывную минимизацию дисперсии помехи на выходе сумматора.

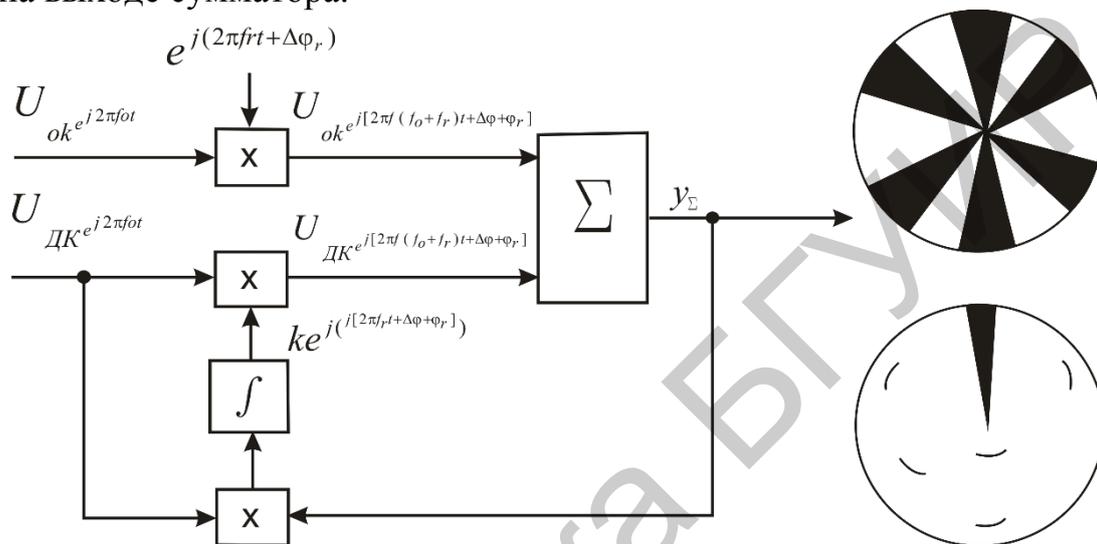


Рис. 2.7. Одноканальный гетеродинный автокомпенсатор

Справа на рис. 2.7 показаны индикаторы кругового обзора при действии в зоне РЛС одного источника помех до и после включения автокомпенсатора. В первом случае наблюдаются мощные засветы ИКО помехой, принятой как по основному, так и по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны. Очевидно, что обнаружить цели на фоне этих засветов не представляется возможным. Во втором случае остается сектор засвета только от помехи, принятой основным лепестком. Этот сектор называется сектором эффективного подавления. Помимо того, что появляется возможность обнаружения целей, ранее прикрытых помехами, одновременно происходит некоторое сужение сектора эффективного подавления. Последнее явление связано с тем, что коэффициент усиления дополнительной антенны на скатах основного лепестка диаграммы направленности соизмерим с коэффициентом усиления основной антенны (см. рис. 2.4), обеспечивая некоторую компенсацию активной помехи на этих участках и, следовательно, упомянутое сужение сектора эффективного подавления. Прикрытым помехой в этом случае остается только сам источник помех (режим самоприкрытия). Следует заметить, что рассмотренный эффект подавления помех характерен как для квадратурного, так и для гетеродинного автокомпенсаторов, так как потенциальные возможности по помехозащите у них одинаковые.

Широкие возможности пространственной компенсации помех открываются по мере освоения приемных ФАР с управляемыми усилителями на выходе антенной решетки. Такие антенны, получившие название адаптивных ФАР, позволяют автоматически формировать диаграммы направленности с числом провалов, соответствующим числу разрешаемых по углу помехоносителей.

Рассмотрим использование «несовершенства» помехи.

Под «совершенной» понимают помеху с равномерным распределением мощности по спектру в широком диапазоне частот, хаотической поляризацией и временной структурой типа внутреннего шума приемника. Отступление от любого из этих условий является «несовершенством» помехи, которое можно использовать для защиты от нее РЛС.

Одним из видов «несовершенных» помех является прицельная по частоте помеха, мощность которой сосредоточена в сравнительно узкой полосе частот Δf_{Π} (в 2–5 раз превышающей ширину полосы пропускания приемника РЛС). Такая концентрация мощности выгодна противнику, так как позволяет при ограниченной средней мощности передатчика помех повысить спектральную плотность помехи $N_{\Pi} = P_{\Pi} / \Delta f_{\Pi}$. Способом защиты РЛС от прицельной помехи является перестройка частоты, особенно непрерывная (от импульса к импульсу). В этом случае противник либо вынужден переходить к теоретически более «совершенной», но энергетически менее выгодной заградительной помехе, либо же достаточно часто выключать передатчик прицельной помехи, чтобы произвести разведку новой частоты РЛС, что позволит во время пауз обнаруживать помехоноситель. Практически у заградительной помехи также имеет место «несовершенство», заключающееся в том, что ее спектральная плотность не является одинаковой по всей ширине спектра. В этом случае перестройка РЛС позволяет отыскать участки в спектре помехи с малой спектральной плотностью. Перейти к заградительной или скользящей по частоте помехе противника вынуждает также использование разных частот в угломестных каналах РЛС и применение многочастотных зондирующих сигналов.

Для подавления шумовых помех может быть эффективно использовано их поляризационное несовершенство. В настоящее время применяются помехи с равномерной эллиптической (круговой) или наклонной под 45° к горизонту линейной поляризацией. Такие помехи воздействуют на РЛС с любой поляризацией зондирующего сигнала. Несовершенство помех с такими видами поляризации состоит в том, что горизонтальная и вертикальная составляющие их вектора поляризации коррелированы между собой, т. е. жестко связаны по амплитуде и фазе, следовательно, могут быть взаимно скомпенсированы с помощью поляризационного автокомпенсатора (рис. 2.8), если в РЛС предусмотреть их отдельный прием.

Ориентация излучателей приемной антенны соответствует поляризации зондирующего сигнала РЛС. Она служит антенной основного канала автокомпенсатора, использующего поляризационное несовершенство помехи. Антенна вспомогательного канала имеет излучатели, идентичные основному, но ориентированные ортогонально. Автокомпенсатор с использованием поляризацион-

ных различий полезного сигнала и помехи позволяет подавить помеху, воздействующую по главному лепестку диаграммы направленности приемной антенны и, следовательно, обнаружить сам помехоноситель.

Комплексный коэффициент передачи K , как и в случаях с квадратурным и гетеродинным автокомпенсаторами, обеспечивает равенство фазы и амплитуды помехи дополнительного канала фазе и амплитуде помехи основного канала и, следовательно, когерентную компенсацию последней.

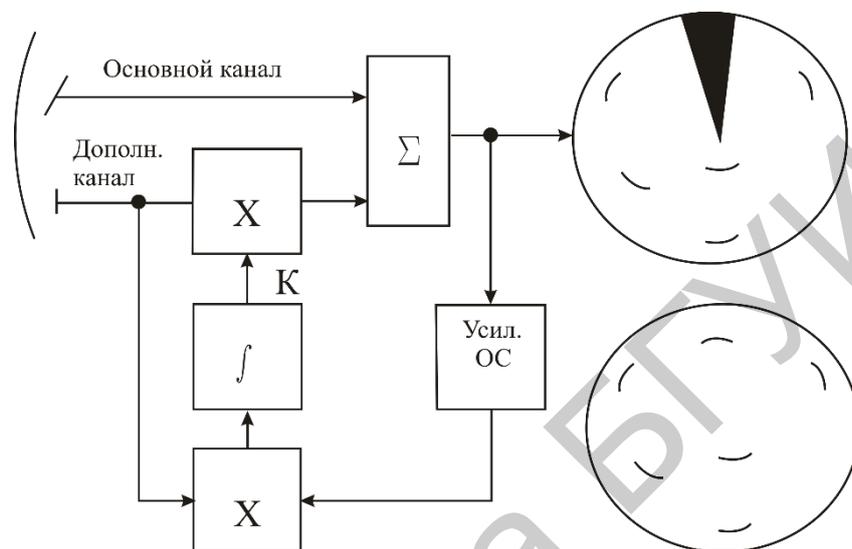


Рис. 2.8. Поляризационный автокомпенсатор помех

Эффективность поляризационного метода защиты от помех существенно снижается при хаотически поляризованной помехе, у которой ортогонально поляризованные составляющие некоррелированы или слабо коррелированы между собой. Однако создание таких помех представляет для противника определенные технические трудности.

При работе в помехах нередко наблюдались случаи, когда отношение удвоенной энергии принятого сигнала к спектральной плоскости помехи $2\mathcal{E}_{\text{ПР}}/((N_0 + N_{\text{П}})L)$ было заметно больше единицы, а цель на фоне такой помехи не обнаруживалась. Причиной этого являлся ограниченный динамический диапазон приемно-индикаторного тракта РЛС.

Диапазон изменения амплитуды входных сигналов, при которых в приемнике еще не происходит ограничение, носит название динамического диапазона приемника. Обычно динамический диапазон определяется по формуле

$$D_{\text{д}} [\text{дБ}] = 201g \frac{|U_{\text{ВХmax}}|}{|U_{\text{ВХmin}}|} = 201g \frac{|U_{\text{ВХmax}}|}{\sqrt{2}\sigma_{\text{МВХ}}},$$

где $\sigma_{\text{МВХ}}$ – среднеквадратическое значение собственных шумов на входе приемника (в пределах его полосы пропускания).

Динамический диапазон приемно-индикаторных трактов РЛС, если не приняты меры по его расширению, оказывается небольшим (8–14 дБ), причем для отдельных элементов тракта он имеет следующие значения: УВЧ – 60–70 дБ, УПЧ – 20–30 дБ, видеоусилитель – 10–20 дБ, ИКО – 8–14 дБ, т. е. наименьший динамический диапазон имеют выходные элементы тракта.

Расширение динамического диапазона приемных устройств достигают тремя методами:

- а) созданием приемников с логарифмическими амплитудными характеристиками (ЛАХ);
- б) применением в приемниках шумовой автоматической регулировки усиления (ШАРУ);
- в) применением ограничения сигналов в широкополосном тракте приемника (до оптимального фильтра).

Для получения ЛАХ приемника параллельно колебательным контурам каскадов УПЧ включает нелинейные резисторы, сопротивление которых зависит от амплитуды колебаний в контуре. При соответствующем подборе характеристик нелинейных резисторов в каскадах УПЧ можно получить логарифмическую амплитудную характеристику приемника (рис. 2.9), что обеспечивает расширение его динамического диапазона.

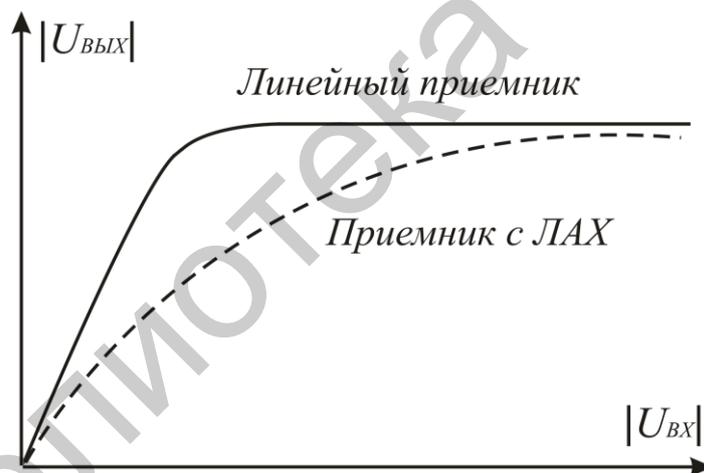


Рис. 2.9. Амплитудные характеристики линейного приемника и приемника с ЛАХ

Эффективной мерой расширения динамического диапазона является также введение автоматической регулировки среднего уровня шума на выходе УПЧ приемника (ШАРУ) (рис. 2.10). Схема ШАРУ представляет собой статическую систему автоматического регулирования коэффициента усиления УПЧ. Продетектированный выходной шум УПЧ сглаживается узкополосным фильтром, благодаря чему на выходе фильтра выделяется напряжение, пропорциональное среднему уровню шума.

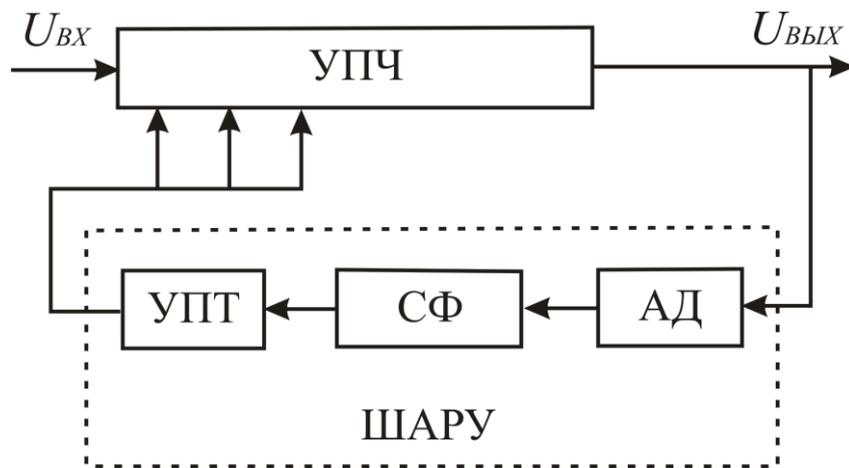


Рис. 2.10. Структурная схема ШАРУ:

УПТ – усилитель постоянного тока; СФ – согласованный фильтр;
АД – амплитудный детектор

Это напряжение усиливается в УПТ и подается на первые 2-3 каскада УПЧ для регулирования их коэффициента усиления. Чем выше уровень помехи на входе УПЧ, тем больше величина регулирующего напряжения на выходе схемы ШАРУ и тем меньше коэффициент усиления УПЧ. Чтобы реагировать на изменения уровня помехи, которые возникают прежде всего вследствие ведения обзора пространства, схема ШАРУ должна быть достаточно быстродействующей, что обеспечивается выбором постоянной времени сглаживающего фильтра. Быстродействие, однако, не должно быть очень высоким, чтобы схема не срабатывала по полезному сигналу и не ухудшала отношение сигнал/помеха.

Динамический диапазон приемно-индикаторного тракта при введении схемы ШАРУ или применении УПЧ с ЛАХ расширяется до 50–60 дБ. Нужно иметь в виду, что применение схемы ШАРУ и УПЧ с ЛАХ не приводит к улучшению отношения сигнал/помеха, а только стабилизирует шумовую помеху на выходе УПЧ на уровне, значительно меньшем уровня ограничения в последующих элементах приемно-индикаторного тракта, и тем самым способствует обнаружению сигнала в том случае, когда отношение сигнал/помеха больше единицы.

В широкополосном тракте для сжатия динамического диапазона помехи до динамического диапазона согласованного фильтра и последующих элементов приемника иногда применяют ограничение. Примером реализации метода сжатия динамического диапазона помехи является схема с ограничителем перед согласованным фильтром в РЛС со сложномодулированным сигналом (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Схема с ограничителем перед согласованным фильтром

Ограничение помехи обеспечивает стабилизацию интенсивности помехи на таком уровне, чтобы не происходило ограничения в последующих элементах приемника, где ограничение уже недопустимо.

В схеме, изображенной на рис. 2.11, сигналы и выбросы помехи на входе оптимального фильтра также имеют одинаковую амплитуду, определяемую уровнем ограничения. Однако в оптимальном фильтре полезные сигналы сжимаются во времени, и их амплитуда возрастает, сжатия же помеховых выбросов не происходит. В результате на выходе оптимального фильтра сигнал может быть выделен на фоне помехи.

Ограничение приводит к некоторому ухудшению отношения сигнал/шум, однако при этом достаточно простым способом стабилизируется уровень помехи на выходе и предотвращается полная потеря сигнала, которая могла бы иметь место из-за возможного ограничения в последующих цепях приемника.

2.2.2. Организационно-технические методы защиты

Помимо технических мер защиты РЛС от шумовых помех используются меры организационно-технического и тактического характера:

- создание многодиапазонного радиолокационного поля (весогабаритные ограничения в отношении бортовой аппаратуры приведут к уменьшению мощности P_i , переход к заградительной помехе вызовет увеличение диапазона частот Δf);

- повышение плотности группировок РТВ, что вызовет уменьшение в коэффициентах G_i , $F_i(\beta_{л}, \epsilon_{л})$, обусловленное ограничением возможностей противника по созданию прицельно направленных помех;

- первоочередное уничтожение ПАП, приводящее к увеличению минимальной дальности $D_{ПАП_i}$);

- применение многопозиционной (разнесенной) радиолокации (увеличение эффективной поверхности рассеяния ($\sigma_{ц}$), особенно при наблюдении за средствами воздушного нападения противника, разработанными по программе «Stelt»).

Применение нетрадиционных методов радиолокации, новых видов зондирующих сигналов и режимов обзора пространства, широкое использование методов распознавания объектов должно способствовать повышению скрытности радиолокационной системы, обеспечивать высокую информативность и живучесть радиолокационного поля.

Таким образом:

1. При отсутствии мер защиты в РЛС от шумовых помех ее зона обнаружения может настолько сжаться, что РЛС будет не в состоянии выполнять свои задачи.

2. Повышение индивидуальной защищенности РЛС от активных шумовых помех в настоящее время достигается методами «силовой» борьбы, пространственной селекции эхосигнала и расширения динамического диапазона

приемного тракта РЛС, использования несовершенства (поляризационного и временного) помехи.

3. В перспективе для защиты РЛС РТВ от активных шумовых помех ожидается использование новых видов сигналов и нетрадиционных режимов обзора пространства.

2.3. Методы защиты РЛС от активных импульсных помех

2.3.1. Виды активных импульсных помех и краткая характеристика методов их подавления

Виды активных импульсных помех и их положение в общей системе классификации помех приведены на рис. 2.12. Импульсные помехи в зависимости от природы их возникновения могут быть умышленными и непреднамеренными, последние, в свою очередь, могут быть синхронными (период повторения помех соответствует периоду повторения зондирующего сигнала) и несинхронными. Постановка импульсных помех может вестись в целях имитации ложных целей, а также маскировки района боевых действий и структуры ударной группировки. В качестве импульсной помехи может использоваться принятый, условный или излученный бортовой РЛС зондирующий сигнал. Такие помехи называются ответно-импульсными (ОИП).

Ответные помехи могут быть однократными, когда на каждый зондирующий сигнал РЛС излучается один ответный импульс, и многократными, когда на каждый зондирующий сигнал РЛС передатчик помех излучает серию ответных сигналов.

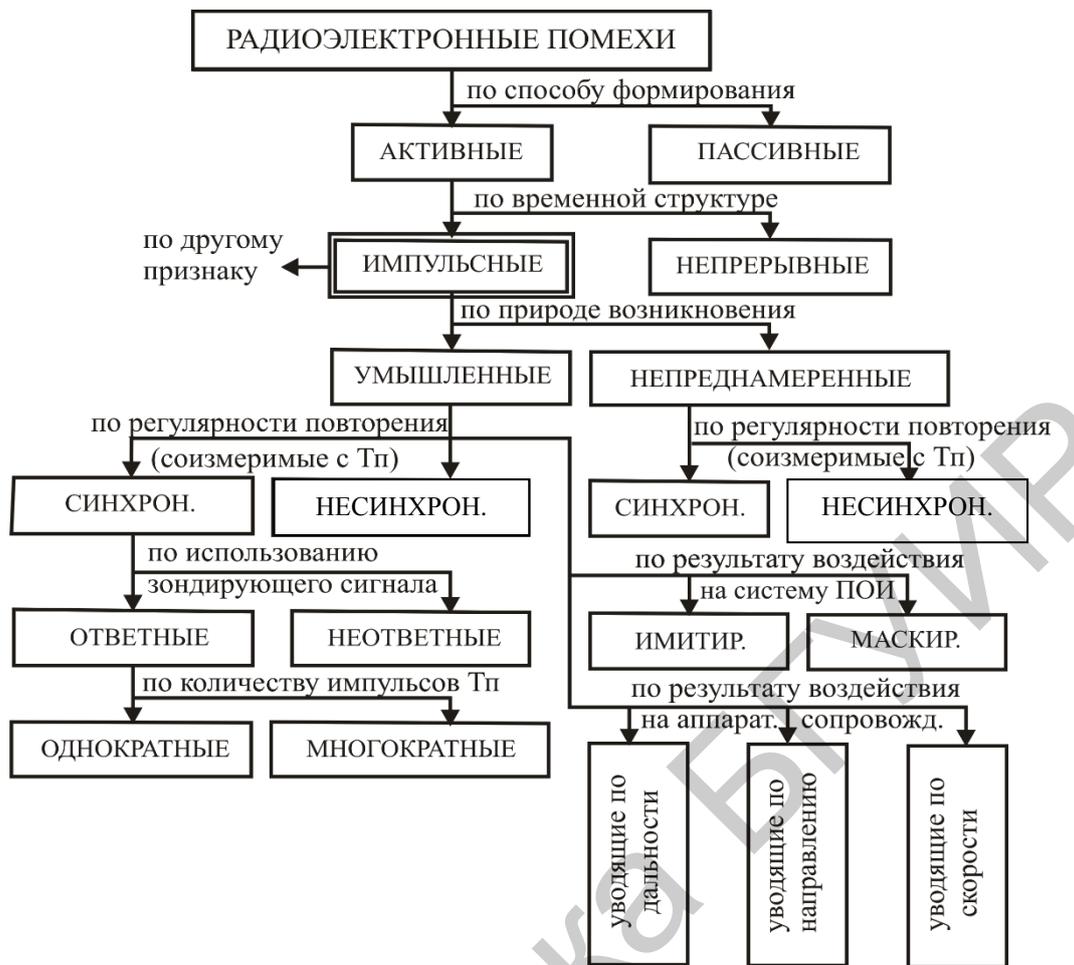


Рис. 2.12. Классификация активных импульсных радиоэлектронных помех

В последнем случае, если выполняется условие (2.6), на экране индикатора наряду с отстающей помехой появляются импульсы опережающей помехи:

$$t_{3 \max} > T_{\Pi} - \frac{2D_{\text{ПАП}}}{C}, \quad (2.6)$$

где $t_{3 \max}$ – максимальная задержка момента излучения импульса ответной помехи относительно времени приема постановщиком помех зондирующего сигнала РЛС;

T_{Π} – период повторения зондирующего импульса;

$D_{\text{ПАП}}$ – дальность до постановщика активной ОИП.

За счет значительной мощности ОИП возможен ее прием по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС. При этом эффективность ОИП значительно повышается. Однократные ответные помехи создаются в основном станциям наведения ракет. Они предназначены для срыва автосопровождения цели (помехи, уводящие по дальности, частоте и угловым координатам). Однократные ОИП можно рассматривать как имитирующие. В то же время, поскольку многократные ОИП затрудняют обнаружение цели, их можно

отнести к маскирующим помехам. Поэтому они могут создаваться обзорным РЛС.

Непреднамеренными импульсными помехами считают взаимные помехи РЛС и различной излучающей аппаратуры.

Методы защиты РЛС от импульсных помех можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, обеспечивающие подавление (ослабление) помех до входа в приемный тракт РЛС, ко второй – методы подавления помех в трактах обработки.

К первой группе методов защиты от импульсных помех относятся следующие:

1) метод пространственной селекции, которая достигается сужением главного лепестка и уменьшением уровня боковых лепестков ДНА, обеспечивает ослабление приема антенной как ответных, так и несинхронных импульсных помех, воздействующих с направлений боковых лепестков;

2) непрерывная (от импульса к импульсу) перестройка РЛС по несущей частоте, обеспечивающая защиту от НИП и опережающих ОИП;

3) ослабление уровня внеполосного и побочного излучения наземных РЭС и уменьшение (ухудшение) чувствительности приемников по побочным каналам приема.

Эти меры направлены прежде всего на снижение уровня внутрисистемных (взаимных) помех, но одновременно снижают также и возможности противника по применению НИП.

К методам подавления импульсных помех в трактах обработки сигналов РЛС относятся методы, основанные на использовании различий:

1) в частотно-временной структуре одиночных импульсов помехи и сигнала;

2) структуре пачки полезных сигналов и помех;

3) направлении прихода импульсов помехи и полезного сигнала.

2.3.2. Схемы селекции по длительности и закону внутриимпульсной модуляции сигналов

2.3.2.1. Схемы селекции по длительности импульсов

В этих устройствах защиты РЛС реализуют методы, основанные на различии ширины спектра одиночных импульсов и полезного сигнала.

К узкополосным помехам относят импульсные помехи, ширина спектра которых меньше спектра полезного сигнала. При использовании зондирующих сигналов без внутриимпульсной модуляции узкополосные помехи удовлетворяют условию

$$\tau_{\text{П}} > \tau_{\text{И}}, \quad (2.7)$$

где $\tau_{\text{П}}$ – длительность импульса помехи;

$\tau_{\text{И}}$ – длительность импульса полезного сигнала.

К широкополосным помехам относят помехи, ширина спектра которых превышает ширину спектра зондирующего сигнала, что для зондирующих сигналов без внутриимпульсной модуляции означает выполнение условия (2.7).

2.3.2.2. Устройства защиты от узкополосных импульсных помех

В качестве устройств защиты от узкополосных импульсных помех используют дифференцирующие цепи в видеотракте приемника и схемы быстродействующей (мгновенной) автоматической регулировки усиления (БАРУ) в тракте УПЧ. Они обеспечивают подавление помех, длительность импульсов которых существенно превышает длительность импульсов полезного сигнала.

Дифференцирующая цепь (рис. 2.13) в видеотракте приемника является простейшим устройством защиты от узкополосных импульсных помех. Принцип подавления длинноимпульсных (узкополосных) помех дифференцирующей цепью поясняется графиками на рис. 2.14.

Отрицательные выбросы от задних фронтов импульсов на выходе дифференцирующей цепи легко устраняются простым диодным ограничителем. Для исключения существенного ослабления полезного сигнала, постоянная времени дифференцирующей цепи выбирается примерно равной $\tau_{И}$.



Рис. 2.13. Дифференцирующая цепь в видеотракте приемника

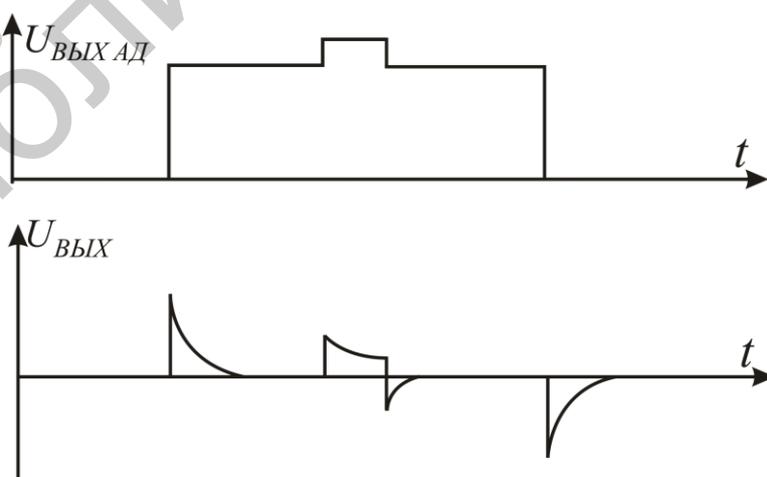


Рис. 2.14. Обработка эхосигнала на фоне узкополосной импульсной помехи в дифференцирующей цепи

Принцип работы БАРУ заключается в уменьшении коэффициента усиления УПЧ при воздействии импульсов помехи большой длительности. Вместе с тем БАРУ не должна реагировать на полезные сигналы. В этом смысле БАРУ можно (по выходному эффекту) рассматривать как некоторую аналогию дифференцирующей цепи (см. рис. 2.13).

Быстродействие БАРУ определяется постоянной времени интегрирующей цепи, выполняющей роль фильтра низких частот. Для исключения подавления полезного сигнала постоянную времени цепи БАРУ выбирают обычно равной $(1-2)\tau_{и}$. Малая постоянная времени цепи обратной связи накладывает существенный отпечаток на схемное решение БАРУ. По соображениям устойчивости не представляется возможным охватить малоинерционной обратной связью регулируемый усилитель с большим коэффициентом усиления.

Поэтому цепь БАРУ должна воздействовать лишь на один-два каскада УПЧ. Требуемый диапазон регулировок обеспечивается за счет охвата отдельными цепями БАРУ нескольких каскадов УПЧ. Подводя итог, следует отметить, что рассмотренные устройства не подавляют полностью длинноимпульсную помеху, а лишь укорачивают ее до длительности полезного сигнала, уменьшая тем самым ее мешающее действие.

2.3.2.3. Устройства защиты от широкополосных импульсных помех

Эффективное подавление импульсных помех, длительность которых значительно меньше длительности полезного сигнала, обеспечивают схемы ШОУ. В состав схемы входят широкополосный усилитель, двусторонний амплитудный ограничитель, узкополосный усилитель (рис. 2.15). Название схемы образовано начальными буквами наименований этих элементов.

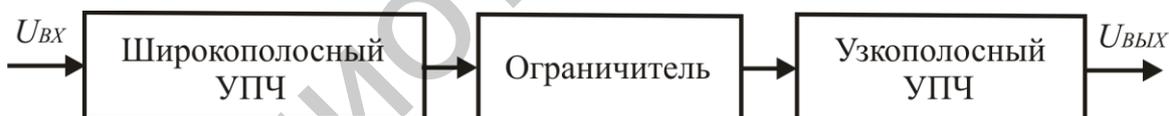


Рис. 2.15. Схема ШОУ

Для понимания работы схемы необходимо помнить известное уравнение закона сохранения энергии импульса (Э):

$$\mathcal{E} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} U^2(t) dt \right| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} G^2(\omega) d\omega \right|.$$

Короткоимпульсная помеха вследствие малого времени ее воздействия на узкополосный УПЧ ослабляется последним по амплитуде (рис. 2.16). Однако, если помеха имеет большую амплитуду, то даже будучи существенно ослабленной в узкополосном УПЧ, она может на его выходе превышать уровень шумов и, следовательно, сохранять свое мешающее действие.

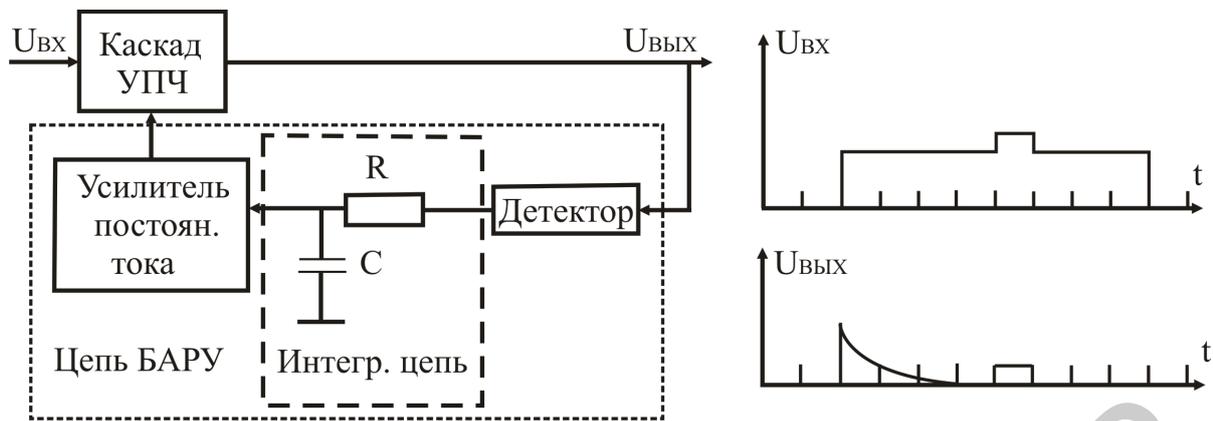


Рис. 2.16. Структурная схема и принцип работы усилителя с БАРУ

Этим обусловлена необходимость ограничения сигналов на входе узкополосного УПЧ. Уровень ограничения устанавливается в зависимости от величины произведения $\Pi_{\text{шупч}} \cdot \tau_{\text{и}}$.

Если это произведение больше 20, то уровень ограничения может быть равен эффективному значению собственных шумов приемника. Жесткое ограничение на уровне «плотной» части шума лишает помеху ее энергетического превосходства над полезным сигналом. В результате на выходе узкополосного УПЧ, как и на его входе, помеха будет скрыта в шумах, поскольку короткий и слабый импульс не успевает «раскачать» высокодобротный контур узкополосного УПЧ. Полезный же сигнал, имеющий большую длительность на входе узкополосного УПЧ, будет растянут до длительности $2\tau_{\text{и}}$ (как в оптимальном фильтре одиночного радиоимпульса), превысит уровень шумов и будет обнаружен. Коэффициент подавления помехи схемой ШОУ можно определить как

$$K_{\text{п}} = \Pi_{\text{шупч}} / \Pi_{\text{упч}}. \quad (2.8)$$

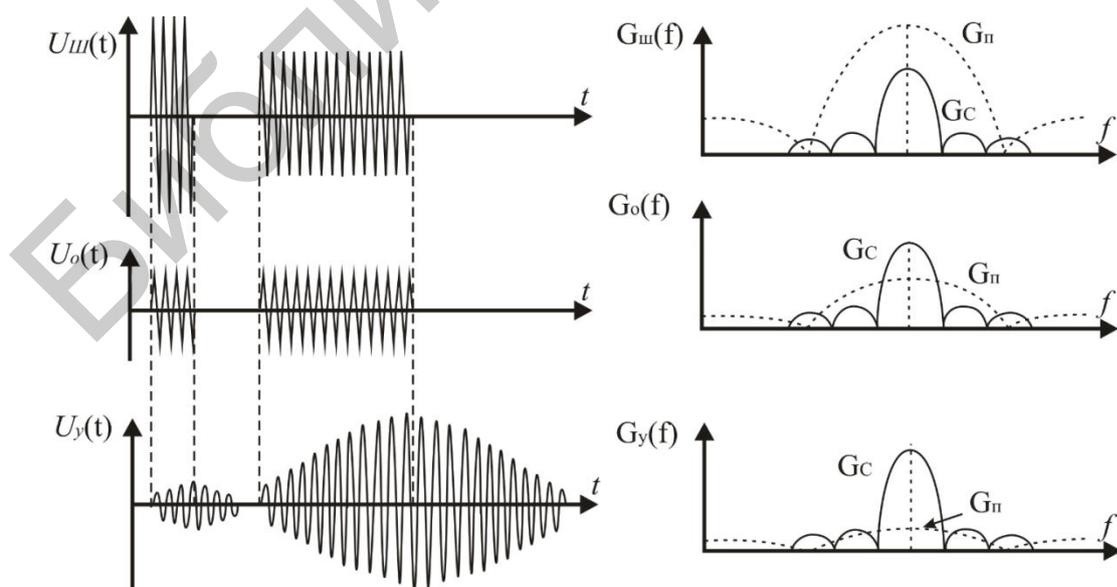


Рис. 2.17. Эпюры напряжений и спектры сигналов схемы ШОУ

Недостатки схемы ШОУ:

4) при включении схемы в приемный тракт РЛС снижается эффективность подавления пассивных помех в системе СДЦ, поскольку ограничение сигналов приводит к расширению спектра флюктуации эхосигналов;

5) имеют место дополнительные потери в отношении сигнал/шум (около 1 дБ).

Схема ШОУ может быть применена и для расширения динамического диапазона приемного устройства в случае шумовой помехи, подобно схеме ограничителя, представленной на рис. 2.16. Ширина полосы пропускания узкополосного фильтра выбирается из условия $P_{\text{УПЧ}} = 1,37/\tau_{\text{ш}}$. Ширина же полосы пропускания широкополосного УПЧ выбирается в 50–100 раз больше: $P_{\text{ШУПЧ}} = (50-100) P_{\text{УПЧ}}$.

В результате на выходе ШУПЧ и ограничителя средняя длительность шумовых выбросов $\tau_{\text{ш}} = 1/P_{\text{ШУПЧ}}$ в 50–100 раз меньше длительности полезного сигнала. Шумовые выбросы воздействуют на узкополосный фильтр короткое время, и их амплитуда на выходе фильтра оказывается небольшой. За время же длительности полезного сигнала амплитуда напряжения на выходе узкополосного фильтра достигает большой величины. В результате полезный сигнал на выходе фильтра может быть выделен из шумовой помехи, хотя на выходе ограничителя амплитуда полезного сигнала и выбросов помехи из-за жесткого ограничения была одинаковой.

2.3.2.4. Схемы селекции по закону модуляции импульсов

В РЛС со сложномодулированным сигналом применяются схемы, которые представляют собой оптимальный фильтр с ограничителем на его входе. Импульсная помеха с отличным от сигнала законом внутриимпульсной модуляции ослабляется оптимальным фильтром при отсутствии ограничителя на входе. Интенсивная же помеха, даже будучи ослабленной фильтром, может на его выходе превышать шум и, следовательно, сохранять свое мешающее действие. Включение ограничителя, как и в схеме ШОУ, позволяет лишить помеху энергетического превосходства над шумом на входе фильтра и тем самым обеспечить полное подавление помехи любой интенсивности. В отличие от схемы ШОУ данная схема обеспечивает подавление помех любой длительности, лишь бы закон их внутриимпульсной модуляции отличался от закона внутриимпульсной модуляции полезного сигнала.

Таким образом, рассмотренные методы, используя различия в длительности и законе модуляции импульсов эхосигналов и импульсных помех, обеспечивают возможность выделения полезного сигнала или же снижение ее мешающего действия.

2.3.3. Схемы селекции импульсов помехи по частоте следования и амплитуде

2.3.3.1. Схемы селекции по частоте следования импульсов

К схемам, обеспечивающим подавление импульсных помех на основе использования различий в структуре их последовательностей (пачек), относятся:

- схемы селекции по частоте следования;
- аналоговые некогерентные накопители (рециркуляторы);
- накопители и программные обнаружители двоично-квантованных сигналов;
- когерентные накопители.

Рассмотрим схемы селекции по частоте следования (рис. 2.18).

Видеосигналы с выхода детектора приемника подаются на блокируемый усилитель и схему выделения несинхронной помехи, включающую в себя линию задержки на период следования и схему вычитания. Полезные сигналы, имеющие период следования, равный времени задержки в линии задержки и одинаковую амплитуду (что достигается путем установки ограничителя), компенсируются в схеме вычитания.

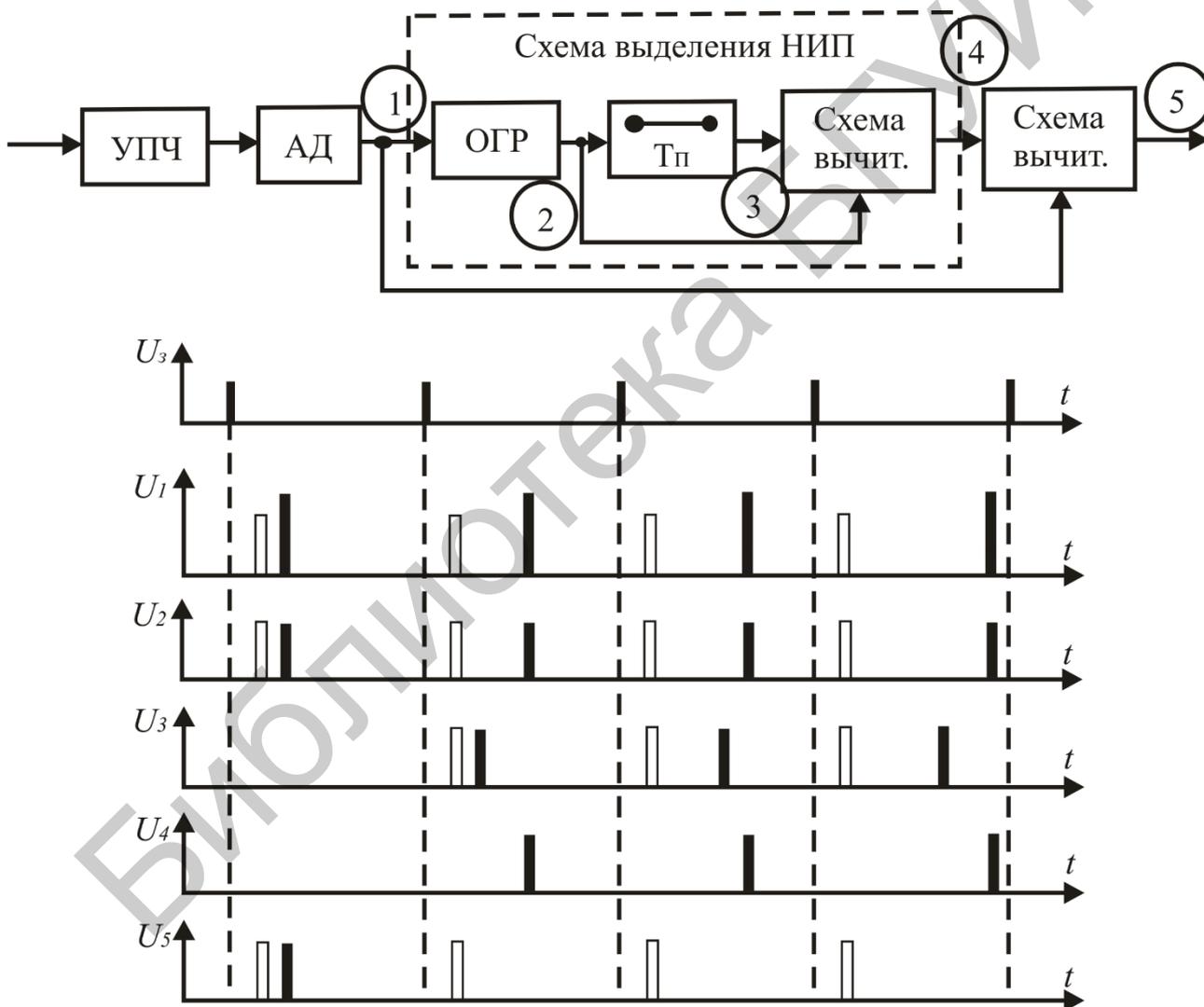


Рис. 2.18. Схема селекции по частоте следования

Помехи, имеющие отличный от сигнала период следования, выделяются схемой и используются для запирания блокируемого усилителя. Схема неэффективна при малом отличии частоты следования помехи от частоты следова-

ния импульсов РЛС. В этом случае импульсы помехи, особенно если они достаточно длительные, могут на входах схемы вычитания частично совпадать по времени и компенсироваться. Вследствие этого запирающий импульс будет короче импульса помехи, и полной ее компенсации происходить не будет.

Аналоговые некогерентные накопители (рециркуляторы) (рис. 2.19) обеспечивают ослабление несинхронной импульсной помехи, поскольку последняя имеет отличный от полезного сигнала период следования и поэтому не накапливается. Однако если импульсы помехи на входе сумматора накопителя имеют большую интенсивность, то, даже не будучи накопленными, они могут на выходе накопителя превысить уровень шума, по которому устанавливается порог обнаружения (уровень яркости экрана индикатора) и, следовательно, сохранять мешающее действие. Поэтому для повышения эффективности накопителя как устройства подавления несинхронных импульсных помех на его входе включают ограничитель сигналов сверху, а на выходе – пороговое устройство.

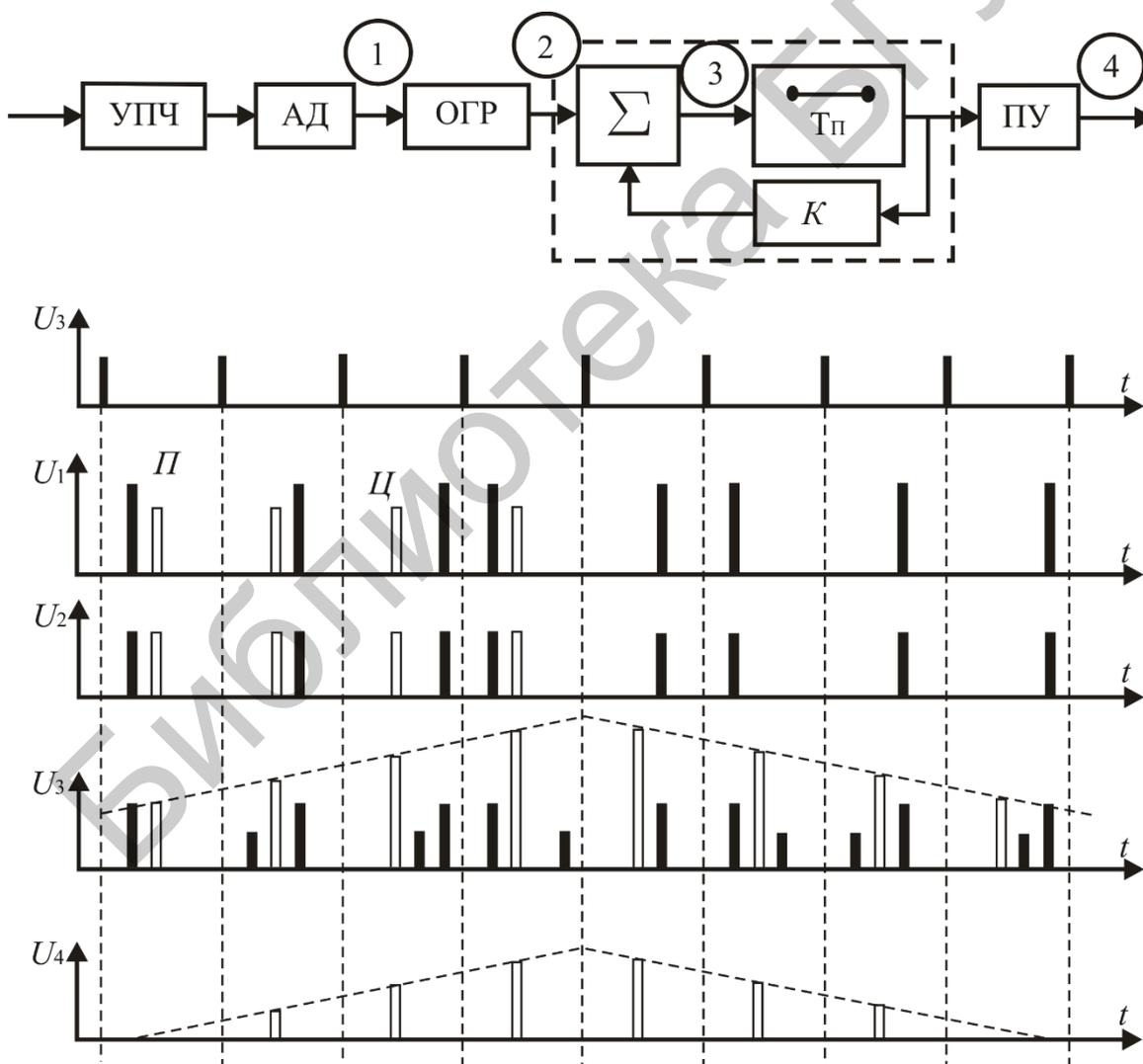


Рис. 2.19. Схема подавления НИП на базе рециркулятора

Уровень ограничения сигналов на входе накопителя устанавливается такой величины относительно уровня шума, чтобы ограниченные по амплитуде импульсы помехи на выходе накопителя оказались соизмеримы с уровнем накопленного шума и не смогли превысить установленный порог.

Накопители (двоичные счетчики) и программные обнаружители двоично-квантованных сигналов с логикой k/m , осуществляя некогерентное накопление импульсов пачки, одновременно обеспечивают эффективное подавление НИП любой интенсивности, поскольку сигналы на входах таких обнаружителей подвергаются нормировке по амплитуде (двоичному квантованию). Аналоговые и дискретные накопители с точки зрения подавления несинхронных импульсных помех эффективнее схемы селекции по частоте следования. Они обеспечивают подавление и таких помех, импульсы которых в соседних периодах следования частично перекрываются.

2.3.3.2. Схемы селекции по амплитуде

Схемы селекции по амплитуде обеспечивают самобланкирование импульсных помех, амплитуда которых превышает установленный порог в канале формирования бланка. Принцип работы схемы селекции по амплитуде представлен на рис. 2.20. Недостатком схемы является возможность самобланкирования полезных сигналов большой амплитуды и прохождение помех малой амплитуды.

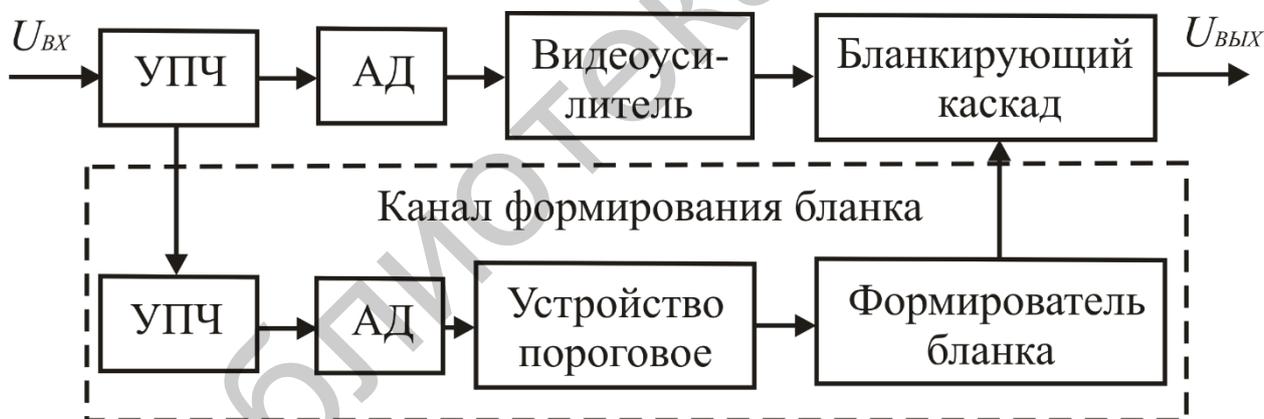


Рис. 2.20. Схема селекции по амплитуде

Отмеченного недостатка лишена схема, позволяющая использовать в качестве порогового напряжения амплитуду помехи, принимаемую с помощью дополнительного канала. Эта схема обеспечивает подавление ответных и несинхронных импульсных помех, принимаемых по боковым лепесткам ДНА, и получила сокращенное название схемы ПБО (схема подавления бокового ответа). Структурная схема ПБО и принцип подавления однократной ответной импульсной помехи изображены на рис. 2.21.

Антенна ПБО формирует ДН, перекрывающую боковые лепестки ДН основной антенны. Продетектированные сигналы с выходов приемников подаются

ся на схему вычитания. Если импульсная помеха воздействует по боковым лепесткам ДН основной антенны, то амплитуда импульсов на выходе ПБО будет больше, чем на выходе основного приемника. Импульсы на выходе схемы вычитания будут иметь отрицательную полярность и ограничиваться последующим ограничителем. Следует иметь в виду, что схема не защищает от воздействия помех по главному лепестку ДН.

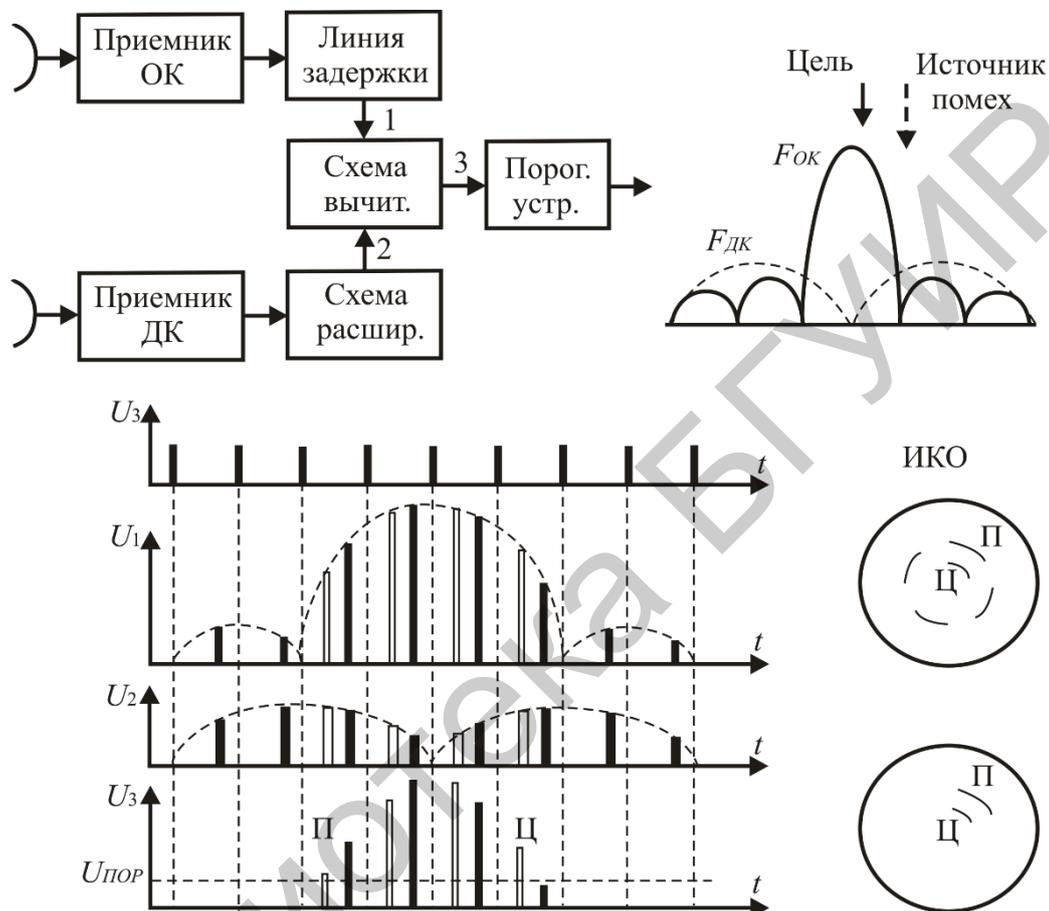


Рис. 2.21. Структурная схема ПБО и принцип подавления ОИП

Таким образом, рассмотренные схемы селекции импульсных помех по частоте следования импульсов и соотношению амплитуды, в отличие от схем селекции, основанных на использовании различий в структуре одиночных импульсов помехи и сигнала, позволяют не только уменьшить влияние импульсных помех, но и при определенных условиях полностью исключить их воздействие.

2.4. Методы повышения защищенности РЛС от пассивных помех

Применение пассивных помех основано на использовании принципа вторичного излучения радиоволн. Пассивные помехи (ПП) для наземных РЛС со-

здаются в настоящее время при помощи так называемых «ловушек» (ложных целей), надувных и уголкового отражателей, а также пассивных отражателей. Неорганизованные ПП возникают вследствие отражений от местных предметов, грозовых туч, дождя, снега. Отражения такого рода могут значительно сократить дальность действия РЛС или скрыть от наблюдения цели в ее зоне обнаружения. Поэтому повышение защищенности РЛС РТВ от ПП является одной из актуальных проблем теории и практики радиолокации.

2.4.1. Критерии защищенности РЛС от пассивных помех

Помехозащищенность РЛС в условиях отражений от местных предметов обычно оценивается коэффициентом подавления мешающих отражений $K_{ПП}$ или коэффициентом подпомеховой видимости $K_{ПВ}$:

$$K_{ПП} = P_{ППВХ} / P_{ППВЫХ}; \quad (2.9)$$

$$K_{ПВ} = \frac{P_{ППВХ}}{P_{СВХ}} : \frac{P_{ППВЫХ}}{P_{СВЫХ}} = \frac{P_{ППВХ} \cdot P_{СВЫХ}}{P_{ППВЫХ} \cdot P_{СВХ}} = K_{ПП} \cdot K_{ПС}. \quad (2.10)$$

Достаточно часто коэффициент подпомеховой видимости определяют как отношение мощности помехи к мощности полезного сигнала на входе приемника РЛС, при котором обеспечивается обнаружение сигнала на выходе устройства обработки с заданной вероятностью правильного обнаружения D_3 при фиксированной вероятности ложной тревоги F_3 :

$$K_{ПВ} = \frac{P_{ППВХ}}{P_{СВХ}} = \frac{\sigma_{ППВХ}^2}{\sigma_{СВХ}^2} \Big|_{D=D_3, F=F_3}. \quad (2.11)$$

На практике помехозащищенность РЛС от пассивных помех оценивают также линейной плотностью дипольных отражателей (числом пачек дипольных отражателей $N_{пач}$, сбрасываемых на каждые 100 м пути), при которой обеспечиваются заданные характеристики обнаружения цели с указанной эффективной отражающей поверхностью $\sigma_{Ц}$.

Эти характеристики связаны друг с другом прямо пропорциональной зависимостью. Так, при радиальной ориентации полосы отражателей отношение мощности помехи к мощности сигнала на входе приемника РЛС может быть определено по формуле

$$\frac{\sigma_{ППВХ}^2}{\sigma_{СВХ}^2} = \frac{\sigma_{пач} N_{пач} \frac{c\tau_{И}}{2}}{100\sigma_{Ц}}, \quad (2.12)$$

где $\sigma_{пач}$ – эффективная отражающая поверхность стандартной пачки отражателей;
 $\tau_{И}$ – длительность импульса на выходе оптимального фильтра.

Если левую часть выражения (2.12) задать равной коэффициенту подпомеховой видимости РЛС $K_{ПВ}$, то можно получить выражение для расчета допустимой линейной плотности отражателей $N_{\text{пач.доп}}$:

$$N_{\text{пач.доп}} = K_{ПВ} \frac{200\sigma_{\text{Ц}}}{c\tau_{\text{И}}\sigma_{\text{ПАЧ}}}. \quad (2.13)$$

Коэффициент подпомеховой видимости существующих РЛС РТВ равен 15–25 дБ (30–300). Тогда при $\sigma_{\text{пач}} = 50 \text{ м}^2$, $\sigma_{\text{Ц}} = 1 \text{ м}^2$, $\tau_{\text{И}} = 1 \text{ мкс}$ допустимая плотность отражателей равна $N_{\text{пач.доп}} = (0,4\text{--}4) \text{ пач} / 100 \text{ м}^2$.

Если полоса отражателей имеет тангенциальную ориентацию, то

$$\frac{\sigma_{\text{ШВХ}}^2}{\sigma_{\text{СВХ}}^2} = \frac{\sigma_{\text{пач}} \Delta\beta_{\text{Л}}}{100\sigma_{\text{Ц}}}, \quad (2.14)$$

откуда

$$N_{\text{пач}} = K_{ПВ} \frac{100\sigma_{\text{Ц}}}{\Delta\beta_{\text{Л}}\sigma_{\text{пач}}}, \quad (2.15)$$

При ширине главного луча ДНА $\Delta\beta_{\text{Л}} = 1^\circ$, дальности до цели, прикрываемой пассивной помехой $D = 100 \text{ км}$, получим $N_{\text{пач.доп}} = (0,4\text{--}4) \text{ пач} / 100 \text{ м}^2$. Вероятный противник способен создавать помеху на значительном интервале маршрута полета с плотностью $N_{\text{пач}} = (1\text{--}2) \text{ пач} / 100 \text{ м}$, а в зоне огневых средств до $N_{\text{пач}} = (10\text{--}12) \text{ пач} / 100 \text{ м}$. Отсюда следует, что защищенность РЛС существующего парка от пассивных помех не всегда удовлетворяет необходимым требованиям.

2.4.2. Пути повышения защищенности РЛС от пассивных помех

Трудность выделения сигналов на фоне пассивных помех обусловлена тем, что помеха, как и полезный сигнал, представляет собой отражения зондирующего сигнала. Различия в протяженности и амплитуде сигнала и помехи могут быть использованы для подавления помехи и выделения сигнала лишь в тех частных случаях, когда цель находится вне облака отражателей. Для выделения сигнала на фоне помехи, когда между ними нет пространственных различий, чаще всего применяют метод скоростной селекции (селекции по частоте Доплера). Для обнаружения сигнала на фоне отражений от метеообразований в некоторых образцах радиолокационной техники (1РЛ139) применяют поляризационную селекцию.

Сложная задача повышения защищенности перспективных РЛС от пассивных помех до уровня требуемой может быть решена лишь с помощью ком-

плекса мероприятий, предусматриваемых при их проектировании и обеспечивающих:

- 1) уменьшение мощности помехи на входе приемника;
- 2) сужение спектра флюктуации помехи;
- 3) оптимизацию системы обработки сигналов на фоне пассивных помех.

2.4.2.1. Уменьшение мощности помехи на входе приемника

Мощность пассивной помехи, воздействующей на вход приемника, равна сумме мощностей отражателей от совокупности отражателей данного разрешаемого объема. Чем меньше разрешаемый объем, тем меньше будет мощность пассивной помехи, при условии, что размеры цели меньше разрешаемого объема и мощность полезного сигнала остается постоянной. Поэтому повышение разрешающей способности РЛС по дальности и угловым координатам является действенной мерой повышения их защищенности от пассивных помех. Если возможности повышения разрешающей способности РЛС РТВ по азимуту уже практически исчерпаны, то возможности по дальности и углу места еще достаточно велики.

Для обеспечения высокой разрешающей способности по дальности в РЛС с небольшой дальностью действия целесообразно применять короткие «гладкие» импульсы, так как они не дают побочных максимумов на выходе оптимального фильтра и более просты в формировании и обработке. В РЛС с большой дальностью действия, где требуется большая энергия зондирующего сигнала, обеспечить которую при коротких импульсах затруднительно, находят применение длинные широкополосные сигналы с разрешающей способностью по дальности порядка десятка метров.

Другой действенной мерой по уменьшению мощности пассивной помехи (отражения от местных предметов) на входе тракта обработки является отрыв диаграммы направленности антенны от линии горизонта.

2.4.2.2 Сужение спектра флюктуации мощности помехи

Энергетический спектр пассивной помехи при когерентном периодическом зондирующем сигнале, как и спектр полезного сигнала, имеет гребенчатую структуру (рис. 2.22, *a*) с интервалом между гребнями, равным частоте следования зондирующих импульсов F_{Π} . Минимально возможная ширина отдельных гребней спектра помехи определяется длительностью пачки и равна

$$\Delta f_{mp \min} = 1 / NT_{\Pi}.$$

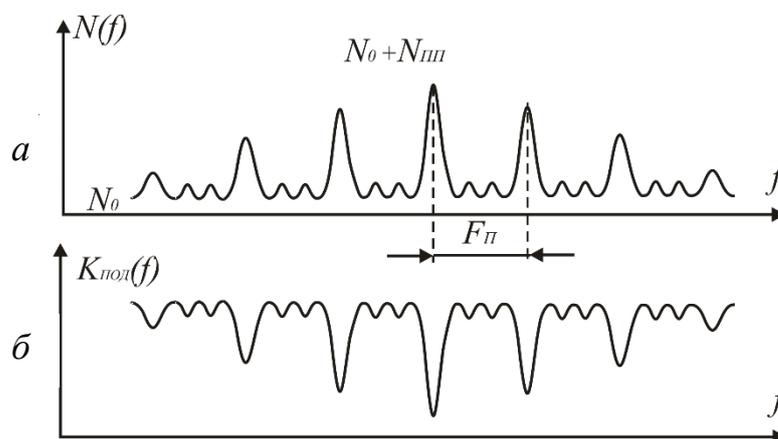


Рис. 2.22. Суммарный спектр пассивной помехи и внутреннего шума (а) и амплитудно-частотная характеристика фильтра подавления (б)

Действительно же ширина гребней спектра оказывается большей. Это обусловлено рядом причин:

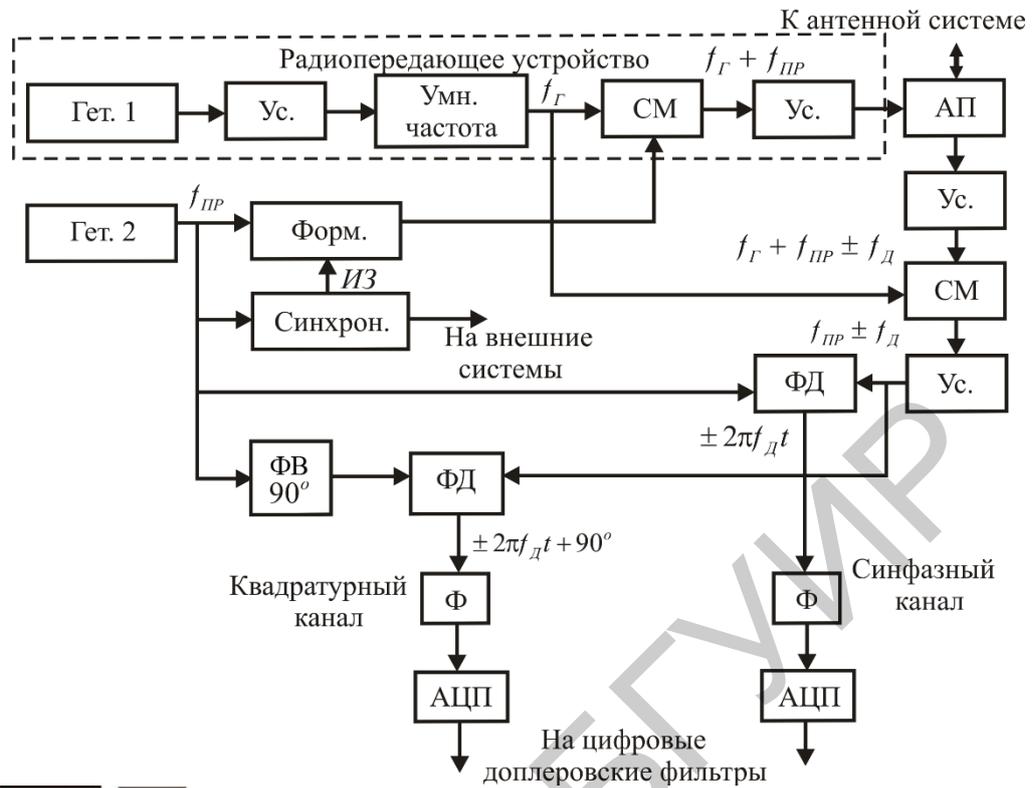
а) взаимным хаотическим перемещением отражателей в импульсном объеме под действием ветра, что приводит к межпериодному случайному изменению амплитуды и фазы помехи и, следовательно, расширению ее спектра;

б) амплитудными и фазовыми флюктуациями помехи, что обусловлено обновлением части отражателей от периода к периоду следования при вращении антенны;

в) нестабильностями параметров РЛС (частоты, амплитуды, длительности и периода следования зондирующего сигнала, частоты местного и когерентного гетеродинов приемника, коэффициента усиления приемника, параметров системы межпериодной обработки пачки), которые вызывают дополнительные амплитудные и фазовые флюктуации помехи.

Расширение спектра помехи затрудняет выделение слабых сигналов на фоне интенсивной пассивной помехи методом частотной селекции. Для повышения стабильности параметров РЛС в настоящее время передающие устройства строятся по схеме с независимым возбуждением и включают в себя мало-мощный низкочастотный возбудитель, несколько каскадов умножителей частоты и усилителей мощности. Структурные схемы таких передающих устройств для ступенчато-частотно-модулированного и фазоманипулированного сигналов представлены на рис. 2.23.

а



б

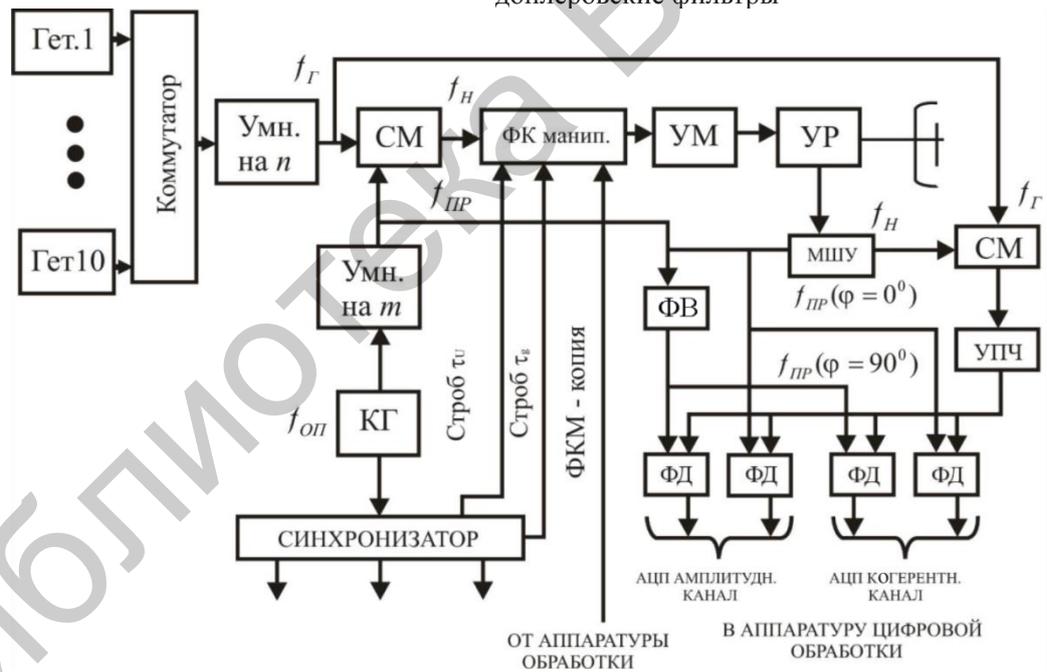


Рис. 2.23. Когерентно-импульсная аппаратура РЛС с истинной когерентностью для ступенчато-частотно-модулированного (а) и фазоманипулированного сигналов (б):

Гет. 1 – маломощный, низкочастотный, высокостабильный генератор; Гет. 2 – генератор промежуточной частоты $f_{ПР}$; Умн. частот. – каскад умножителя частоты; Ус. – каскад усилителей; АП – антенный переключатель; Форм. – формирователь вида зондирующего сигнала; Синхр. – синхронизатор; ФД – фазовый детектор; Ф – фильтр; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ФВ – фазовращатель; ФК манип. – фазокодовый манипулятор; УР – устройство развязки

2.4.2.3. Оптимизация системы обработки сигналов на фоне пассивных помех

Как известно, частотная характеристика оптимального устройства для выделения полезного сигнала на фоне смеси пассивной помехи с энергетическим спектром $N_{\text{ПП}}(f)$ и внутреннего (белого) шума со спектральной плотностью N_0 должна иметь вид

$$\dot{K} = \frac{G_c(f)}{N_0 + N_{\text{ПП}}(f)}. \quad (2.16)$$

Она может быть представлена в виде произведения двух сомножителей

$$\dot{K} = \frac{1}{\sqrt{N_0 + N_{\text{ПП}}(f)}} \cdot \frac{G_c(f)}{\sqrt{N_0 + N_{\text{ПП}}(f)}}, \quad (2.17)$$

и, следовательно, структурная схема оптимального фильтра может быть представлена в виде последовательного соединения двух фильтров (рис. 2.24): фильтра подавления помехи с частотной характеристикой

$$\dot{K}_{\text{под}} = \frac{1}{\sqrt{N_0 + N_{\text{ПП}}(f)}} \quad (2.18)$$

и фильтра накопления, искаженного при прохождении через фильтр подавления помехи сигнала с частотной характеристикой

$$\dot{K} = \frac{G_c(f)}{N_0 + N_{\text{ПП}}(f)}. \quad (2.19)$$

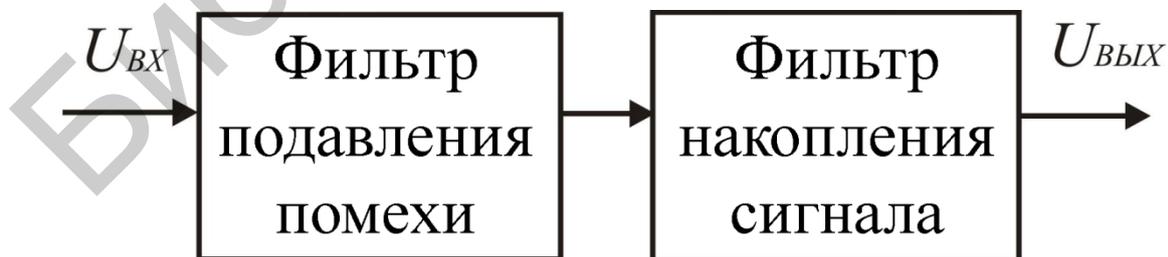


Рис. 2.24. Структурная схема оптимального фильтра при выделении сигнала на фоне пассивных помех

Оптимальный фильтр подавления практически реализовать невозможно, так как на практике соотношение спектральных плоскостей пассивной помехи

и шума, форма и ширина гребней спектра пассивной помехи могут существенно изменяться, что требует и соответствующего изменения параметров частотного фильтра.

Значительную трудность представляет пока и реализация когерентного накопления сигнала на фоне обеленной помехи. Поэтому в существующих РЛС РТВ применяются системы обработки, состоящие из последовательно включенных неоптимального (квазиоптимального) режекторного фильтра и некогерентного накопителя. В качестве режекторных фильтров применяются схемы СДЦ.

Библиотека БГУИР

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорошко, А. Д. Основы построения радиолокационного вооружения РТВ / под ред. В. В. Литвинова. – Харьков : ВИРТА ПВО, 1986.
2. Основы построения РЛС РТВ / В. П. Блохин [и др.] ; под ред. Б. Ф. Бондаренко. – Киев : КВИРТУ ПВО, 1987.
3. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. В 2 ч. Ч. 1 : Основы радиолокации / А. Е. Охрименко. – М. : Воениздат, 1983.
4. Палий, А. И. Радиоэлектронная борьба / А. И. Палий. – 2-е изд. – М. : Воениздат, 1989.
5. Защита от радиопомех / М. В. Максимов [и др.] ; под ред. М. В. Максимова. – М. : Сов. радио, 1976.
6. Швед, Е. И. Подготовка расчетов к боевой работе в условиях электронных помех. В 5 ч. Ч. 4. : Радиотехнические войска. – М. : Воениздат, 1978.
7. Холяво, В. И. Распознавание взаимных помех и меры борьбы с ними. – Москва : Воениздат, 1980.
8. Ширман, Я. Д. Теоретические основы радиолокации / Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков, И. Н. Бусыгин ; под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Советское радио, 1970.
9. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981.
10. Кузьмин, С. З. Основы цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – М. : Советское радио, 1974.
11. Справочник офицера Военно-воздушных сил и войск противовоздушной обороны / под ред. И. П. Азаренка [и др.]. – Минск : Командование ВВС и войск ПВО, 2009.

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень сокращений.....	3
Введение.....	4
1. Основы построения РЛС	5
1.1. Радиотехнические войска как род войск ВВС и ПВО	5
1.2. Понятие о радиолокации.....	8
1.3. Основные принципы и виды радиолокации.....	15
1.4. Принцип работы и общее устройство РЛС	18
1.5. Классификация радиоэлектронной техники радиотехнических войск	62
2. Методы повышения защищенности РЛС от помех	68
2.1. Анализ защищенности ЛРС от активных помех	68
2.2. Методы защиты РЛС от активных шумовых помех	70
2.3. Методы защиты РЛС от активных импульсных помех	81
2.4. Методы повышения защищенности РЛС от пассивных помех	91
Список использованной литературы	99

Библиотека БГУИР

Учебное издание

Соколов Александр Николаевич
Ермак Сергей Николаевич
Романович Александр Геннадьевич и др.

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *А. К. Петрашкевич*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная правка, оригинал-макет *М. В. Касабуцкий*

Подписано в печать 02.06.2017. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 6,05. Уч-изд. л. 6,3. Тираж 30 экз. Заказ 277.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6