

Министерство образования и науки Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

С.Г. ФИЛАТОВА

# РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Утверждено  
Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК  
2018

УДК 621.396.2(075.8)  
Ф 517

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *А.Г. Вострецов*,  
д-р техн. наук, профессор *И.С. Грузман*

**Филатова С.Г.**

Ф 517 Радиотехнические системы: учебное пособие / С.Г. Филатова. –  
Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 119 с.

ISBN 978-5-7782-3518-2

В настоящем издании в кратком, конспективном виде изложен теоретический материал курса «Радиотехнические системы». Рассмотрены основные особенности систем передачи информации, радиолокации, радионавигации, радиоразведки и радиопротиводействия. Даны сведения об организации систем, их характеристиках, используемых сигналах и методах обработки. Приведены вопросы и задачи для самостоятельной подготовки и углубленного изучения дополнительного материала.

Работа подготовлена на кафедре теоретических основ радиотехники  
для студентов IV курса, обучающихся по направлению  
подготовки бакалавров 11.03.01 – Радиотехника

УДК 621.396.2(075.8)

ISBN 978-5-7782-3518-2

© Филатова С.Г., 2018

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2018

## **ВВЕДЕНИЕ**

Конспект лекций по курсу «Радиотехнические системы» предназначен для самостоятельной и углубленной подготовки студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 11.03.01 – Радиотехника. Для успешного освоения материала студентам необходимо быть знакомыми с курсами «Статистическая теория радиотехнических систем», «Устройства сверхвысоких частот и антенны», «Статистическая радиотехника», «Радиопередающие устройства», «Основы радиоприема», «Обработка информации в радиотехнических системах».

Курс «Радиотехнические системы» является заключительным в программе подготовки бакалавров, поэтому основная его цель – систематизация знаний, полученных за все время обучения, а также формирование основных профессиональных компетенций, таких как:

- способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования деталей, узлов и устройств радиотехнических систем;
- готовность выполнять расчет и проектирование деталей, узлов и устройств радиотехнических систем в соответствии с техническим заданием;
- способность разрабатывать проектную и техническую документацию, оформлять законченные проектно-конструкторские работы.

В настоящем издании после каждой лекции приведены вопросы для самоконтроля, примеры задач для решения самостоятельно и на практических занятиях, а также перечень тем для подготовки к экзамену. Кроме того, даны вопросы для самостоятельного изучения с использованием списка литературы, приведенного в конце учебного пособия.

# **ТЕМА 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

## **ЛЕКЦИЯ 1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ РТС. КЛАССИФИКАЦИЯ РТС**

### **ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (РТС) – это комплекс взаимодействующих между собой *радиотехнических устройств*, предназначенных для выполнения задач, связанных с передачей или извлечением информации и ее обработкой.

Особенностью радиотехнических систем является наличие протяженной линии связи, в которой распространяются сигналы. РТС характеризуются:

- наличием источников излучения большой мощности;
- необходимостью учета условий распространения радиосигналов на большие расстояния;
- высоким уровнем помех и внешних воздействий из-за неоднородности среды распространения;
- открытостью линии связи, приводящей к утечке информации.

РАДИОТЕХНИКА – это область науки и техники, использующая электромагнитные волны различной частоты, распространяющиеся в закрытых линиях связи или в открытом пространстве, для передачи, извлечения и обработки *информации*.

В настоящее время происходит ускорение развития *информационных* потребностей человеческого общества и средств их обеспечения (систем хранения, обработки и передачи информации). Большую роль в информационном обеспечении играет *радиотехника*.

ИНФОРМАЦИЯ – совокупность сведений о свойствах объектов, изменении их состояния, о протекании процессов в природе, обществе и т. п.

Для передачи и хранения информации используют различные знаки, или символы, например, фразы человеческой речи, буквы и слова письменной речи, жесты, ноты, слова и т.п.

**СООБЩЕНИЕ** – совокупность знаков (символов), отображающих ту или иную информацию.

При передаче сообщения от источника к получателю используют или какой-либо материальный носитель (бумагу, диск, флеш-карту и т. п.), или физический процесс. Последний называется сигналом. Передача сообщений в РТС осуществляется с помощью электрических, оптических или радиосигналов.

**РАДИОСИГНАЛ** – это сигнал, использующий в качестве носителя информации радиоволны, свободно распространяющиеся в пространстве (атмосфере Земли и других планет, в водной среде и земных покровах, космическом пространстве). Чаще всего используют гармонические сигналы с несущей частотой  $\omega_0 \gg 0$ , модулированные случайным сигналом, несущим полезную информацию.

Аналитически детерминированный гармонический сигнал можно представить в следующем виде:  $s(t) = a \cos(\omega t + \varphi)$ , здесь  $t$  – время;  $a$  – амплитуда;  $\omega = 2\pi f$  [рад/с] – циклическая частота;  $\varphi$  [рад] – начальная фаза сигнала.

Сообщение может быть представлено конкретным значением параметра сигнала (например,  $a = 0$  – информация о том, что сигнала нет,  $a > 0$  – сигнал есть) или последовательным изменением во времени любого числа параметров сигнала:  $a = a(t)$ ,  $\omega = \omega(t)$  или  $\varphi = \varphi(t)$ .

**МОДУЛЯЦИЯ** – процесс отображения информации в параметрах сигнала.

Для передачи сообщения от источника к приемнику используют канал связи.

**КАНАЛ СВЯЗИ** – это физическая среда, которая используется для передачи сигнала от источника к приемнику.

В РТС в качестве физической среды могут выступать атмосфера (в этом случае используются радиосигналы), линии проводной связи (электрические цепи), микрополосковые линии, волоконно-оптические кабели, волноводы и т. п.

В материальных электрических цепях *радиосигнал* распространяется и проявляется в регистрирующих приборах в виде изменения *токов* и *напряжений*. В пространстве он распространяется в виде *электромагнитных волн*, а регистрируется также в виде электрических токов и напряжений, которые можно преобразовать в звук, видимое изображение или отметку на экране индикатора (например, ЭЛТ).

РАДИОВОЛНЫ – электромагнитные волны в диапазоне частот от 3 Гц до 3000 ГГц.

Особенности *радиоволн*:

- распространение на большие расстояния (радио и телевидение);
- огибание препятствий и земной поверхности, отражение от ионосферы (дальняя радиосвязь);
- проникание в глубь суши и воды (радиозондирование);
- прохождение через облака и туман (дождь, снег);
- отражение от металлических предметов (радиолокация);
- разная степень отражения от поверхности суши и воды (радиозондирование);
- возможность направленного излучения (дальние радиорелейные линии и спутниковая радиосвязь);
- высокая скорость передачи и возможность передачи большого объема информации (спутниковая связь);
- возможность генерации сигналов большой мощности и выделения слабых сигналов (радиозондирование планет и радиоастрономия).

### ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ РТС

Каждая РТС в соответствии с системным подходом должна рассматриваться в развитии с учетом своего жизненного цикла.

**1 этап. Замысел.** На основе потребностей общественного развития определяются принципы действия РТС, оценивается возможность достижения требуемых результатов в условиях современного состояния науки и техники, формулируется задание на проектирование.

**2 этап. Исследование.** Иницируются необходимые теоретические и экспериментальные исследования в области использования радиоволн для передачи и обработки информации. Проводится поиск системотехнических решений, макетное изготовление и исследование характеристик макета.

**3 этап. Проектирование.** Составляется задание на создание объекта на основе первичного описания. Первичным описанием является ТЗ, в него входят сведения о назначении, параметрах, функционировании и т. п. Создание объекта – это его изготовление и придание заданных свойств и характеристик. Разрабатывается конструкторская, технологическая и эксплуатационная документация (по ЕСКД и ЕСТД).

**4 этап. Производство.** Изготовление опытно-промышленной серии. Испытание. Уточнение документации. Серийное производство.

**5 этап. Эксплуатация.** Работа системы сопровождается обслуживанием, ремонтом, профилактикой, изготовлением испытательных стендов и т. д.

**6 этап. Модернизация.** Усовершенствование всей системы или ее частей с использованием новых принципов и новой элементной базы.

**7 этап. Утилизация.** Прекращение действия систем определенного вида, вторичное использование узлов и деталей, отбор цветных и драгоценных металлов.

В процессе разработки, изготовления и эксплуатации РТС происходит взаимодействие этапов. Каждый этап связан с предшествующим и последующим. Качество исполнения этапа влияет на качество РТС. На первых двух этапах основная роль принадлежит *разработчикам* (физикам, расчетчикам, радиотехникам). На третьем и четвертом этапах основную роль играют *конструкторы* и *технологи* радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). На пятом – *инженеры* и *техники* по эксплуатации.

## ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РТС

*Параметр* – величина, описывающая количественное свойство изделия (например, мощность, масса, полоса пропускания и т. п.). *Характеристика* – описание свойства развернуто в зависимости от времени или частоты (например, амплитудно-частотная характеристика).

Основные параметры и характеристики РТС:

- *назначение* – тип информации, информационные характеристики, скорость передачи, объем передаваемой информации, многофункциональность (прием-передача), пропускная способность;
- *точность* – степень искажения информации при определенных характеристиках сообщения, дальностях, помеховой обстановке;
- *разрешающая способность* – способность независимо обрабатывать информацию при сдвиге сигнала по частоте, фазе, направлению прихода радиоволн;
- *дальность действия* и *направленность* при заданной точности;
- *помехоустойчивость* – способность обеспечивать дальность действия и точность при действии помех;
- *диапазон частот* и *потребляемая мощность*;
- *электромагнитная совместимость* – возможность совместного функционирования с другими РТС;

- *устойчивость к внешним воздействиям, надежность;*
- *стоимость* – затраты на проектирование и изготовление при условии обеспечения заданных характеристик;
- *сложность и трудоемкость обслуживания, ремонта, эксплуатации,* обозначающие требования к количеству и квалификации персонала;
- *массогабаритные показатели и скрытность действия;*
- *функциональная надежность* – возможность обеспечения основных показателей качества при заданных условиях эксплуатации;
- *перспективность* – способность к удовлетворению потребностей общества в течение длительного времени.

При проектировании РТС совокупность параметров и характеристик регламентируется техническим заданием, которое согласовывается между заказчиком и проектировщиком. При изготовлении и эксплуатации – техническими и эксплуатационными условиями.

## КЛАССИФИКАЦИЯ РТС

### По используемым частотам

Диапазон рабочих частот современных РТС: от 3 Гц до 3000 ГГц. Рабочую частоту РТС выбирают в зависимости от ее функционального назначения и условий распространения радиоволн. Все рабочие частоты делятся на частотные диапазоны, представленные в табл. 1. В соответствии с используемыми диапазонами называются и классифицируются РТС (например, «Местная УКВ радиостанция»).

Таблица 1

#### Деление радиосигналов по частотным диапазонам

Диапазон частот	Диапазон длин волн	Название, свойства, применение		
3...30 Гц	100...10 Мм	<b>СверхДВ</b> – сверхдлинные волны	<b>КНЧ</b> – крайне низкие частоты	<b>Декаметровые</b>
		Легко огибают Землю, слабо поглощаются земной поверхностью, проникают в глубину морской воды, хорошо отражаются от ионосферы		
		Связь с подводными лодками, геофизические исследования		
30...300 Гц	10...1 Мм	<b>СверхДВ</b> – сверхдлинные волны	<b>СНЧ</b> – сверхнизкие частоты	<b>Мегаметровые</b>
		Легко огибают Землю, слабо поглощаются земной поверхностью, проникают в глубину морской воды, хорошо отражаются от ионосферы		
		Связь с подводными лодками, геофизические исследования		



Продолжение табл. 1

Диапазон частот	Диапазон длин волн	Название, свойства, применение		
300...3000 Гц	1000...100 км	<b>СверхДВ</b> – сверхдлинные волны	<b>ИНЧ</b> – инфранизкие частоты	<b>Гектокилометровые</b>
		Легко огибают Землю, слабо поглощаются земной поверхностью, проникают в глубину морской воды, хорошо отражаются от ионосферы		
		Связь с подводными лодками		
3...30 кГц	10...100 км	<b>СверхДВ</b> – сверхдлинные волны	<b>ОНЧ</b> – очень низкие частоты	<b>Мириаметровые</b>
		Проникают в глубину почвы и воды; очень мало поглощаются в Земле и огибают ее; отражаются от ионосферы и днем, и ночью; огибают, не отражаясь, обычные объекты; очень громоздкие антенны		
		Организация дальней связи с подводными лодками; геофизические исследования (исследование состояния разных слоев атмосферы, зондирование)		
30...300 кГц	1...10 км	<b>ДВ</b> – длинные волны	<b>НЧ</b> – низкие частоты	<b>Километровые</b>
		Мало поглощаются в Земле и частично огибают ее; отражаются от ионосферы ночью; огибают, не отражаясь, обычные объекты; громоздкие антенны		
		Радиовещание, любительская радиосвязь, радиотелеграфная связь, радионавигационные службы, связь с подводными лодками		
0,3...3 МГц	100...1000 м	<b>СВ</b> – средние волны	<b>СЧ</b> – средние частоты	<b>Гектометровые</b>
		Поглощаются в Земле; интенсивно отражаются от ионосферы ночью; огибают, не отражаясь, обычные объекты; антенны средних размеров		
		Радиовещание с амплитудной модуляцией (АМ), любительская радиосвязь, промежуточные частоты в супергетеродинных приемниках, 500 кГц – стандартная частота для подачи сигнала бедствия		
3...30 МГц	10...100 м	<b>КВ</b> – короткие волны	<b>ВЧ</b> – высокие частоты	<b>Декаметровые</b>
		Сильно поглощаются в Земле; интенсивно, но с малыми потерями и избирательно отражаются от ионосферы ночью; слабо отражаются от обычных объектов; антенны небольших размеров		
		Радиовещание с АМ, любительская радиосвязь, профессиональная радиосвязь		
30...300 МГц	1...10 м	<b>УКВ</b> – ультракороткие волны	<b>ОВЧ</b> – очень высокие частоты	<b>Метровые</b>
		Очень сильно поглощаются в Земле; не отражаются от ионосферы; распространяются в пределах прямой видимости; интенсивно отражаются от обычных объектов; антенны компактные; просто достигается направленность излучения и приема		
		Радиовещание с частотной модуляцией (ЧМ), телевизионное вещание, радиолокация, связь с космическими объектами, любительская и профессиональная радиосвязь		

Диапазон частот	Диапазон длин волн	Название, свойства, применение		
0,3...3 ГГц	0,1...1 м	<b>УКВ</b> – ультракороткие волны	<b>УВЧ</b> – ультравысокие частоты	<b>Дециметровые</b>
		Распространяются только в пределах прямой видимости; не отражаются от ионосферы; интенсивно отражаются от обычных объектов; просто достигается направленность излучения и приема Телевизионное вещание, любительская радиосвязь, радиорелейная связь, радиолокация, мобильная сотовая связь, wi-fi		
3...30 ГГц	1...10 см	<b>УКВ</b> – ультракороткие волны	<b>СВЧ</b> – сверхвысокие частоты	<b>Сантиметровые</b>
		Распространяются только в пределах прямой видимости; избирательно поглощаются в атмосфере; интенсивно отражаются от объектов; просто достигается высокая направленность излучения и приема Радиолокация, спутниковое телевидение, спутниковая связь, любительская радиосвязь, wi-fi		
30...300 ГГц	0,1...1 см	<b>УКВ</b> – ультракороткие волны	<b>КВЧ</b> – крайне высокие частоты	<b>Миллиметровые</b>
		Сильно поглощаются в атмосферных образованиях; просто достигается очень высокая направленность излучения и приема Космические линии связи, дистанционное зондирование атмосферы и гидрометеоров с поверхности Земли, радиоастрономия, различные прикладные задачи (например исследование плазмы, спектроскопия и пр.)		

## По характеру сообщений, циркулирующих в системе

### *Непрерывные (аналоговые) РТС*

В аналоговых РТС носителем информации служит непрерывный детерминированный гармонический радиосигнал:  $s(t) = a \cos(\omega t + \varphi)$ .

Если пропорционально информационному сигналу изменяется амплитуда несущей  $a(t)$ , то имеется *амплитудная модуляция* (АМ). Если исходной информации поставлена в соответствие частота  $\omega(t)$ , то это *частотная модуляция* (ЧМ). И, наконец, если в зависимости от информационного сигнала изменяется фаза  $\varphi(t)$ , то получаем *фазовую модуляцию* (ФМ).

*Примеры:* радиовещание; пеленгационные системы; доплеровские радиолокационные системы (РЛС); навигационные системы определения координат по разности фаз между РТС. ■

## *Импульсные РТС*

В импульсных системах несущий сигнал представляет собой последовательность радиоимпульсов, в которой информацию могут нести как изменяющиеся параметры отдельных импульсов, например, амплитуда (АИМ – амплитудно-импульсная модуляция), частота следования импульсов (ЧИМ – частотно-импульсная модуляция), момент появления импульса или фаза (ВИМ – время-импульсная модуляция или ФИМ – фазоимпульсная модуляция), его длительность (ШИМ – широтно-импульсная модуляция), так и параметры всей последовательности (число импульсов в последовательности, интервал между ними).

*Примеры:* импульсные радиолокационные системы; импульсные радионавигационные системы; радиопереговоры ключом; телеграф. ■

## *Цифровые РТС*

В цифровых системах информация содержится в последовательности различных символов (дискретных сигналов). Полезная информация заключена в наличии и отсутствии сигналов в их последовательности.

Цифровой сигнал может быть получен на передающей стороне от цифрового источника, например компьютера, или при помощи импульсно-кодовой модуляции аналогового сигнала, включающей в себя процедуры дискретизации, квантования и кодирования.

Для радиотехнической передачи цифровых сигналов используется *манипуляция* – скачкообразное изменение параметра (амплитуды, частоты, фазы) непрерывного сигнала с одного фиксированного значения на другое.

Цифровые системы являются наиболее перспективным направлением создания РТС, так как в таких системах влияние помех мало сказывается на приеме сигналов, обеспечивается высокая точность передачи, меньше требований к стабильности характеристик аппаратуры.

## **По назначению**

### *РТС передачи информации*

*Примеры:* местная (малоканальная) связь; радиорелейная связь; радиовещание и телевидение; сотовая мобильная связь; передача команд; телеметрия; спутниковая радиосвязь. ■

Современные системы передачи информации, как правило, работают в микроволновом (СВЧ) диапазоне, обладают высокой информационной пропускной способностью и многоканальны (рис. 1).

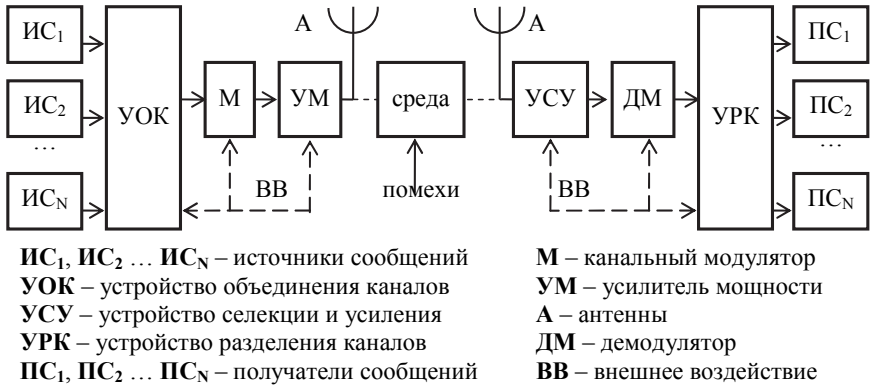
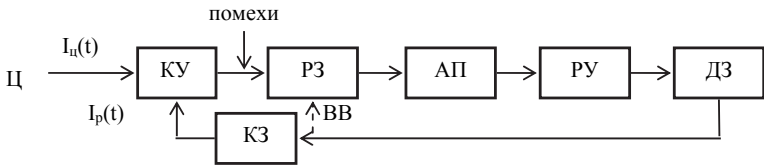


Рис. 1. Обобщенная структурная схема многоканальной системы передачи информации

### РТС радиуправления

*Примеры:* радиуправление космическими аппаратами; управление ракетами; подрыв боевых снарядов. ■

В качестве примера рассмотрим структурную схему системы радиуправления зенитной ракетой (рис. 2).



**Ц** – движущаяся цель  
**КУ** – командное устройство  
**РЗ** – радиозвено  
**КЗ** – кинематическое звено  
**АП** – автопилот  
**РУ** – рулевое управление  
**ДЗ** – динамическое звено  
**ВВ** – внешнее воздействие

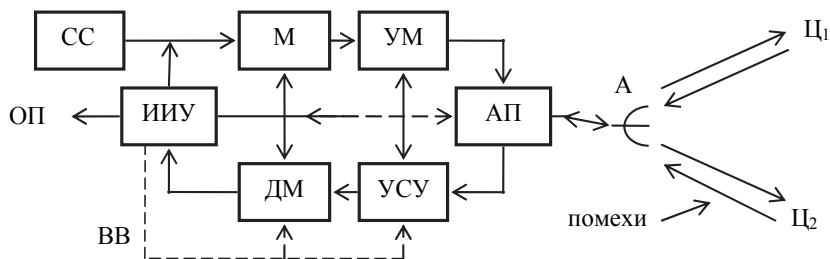
Рис. 2. Структурная схема системы радиуправления зенитной ракетой

Командное устройство выявляет соотношение между пространственным положением и движением цели  $I_{ц}(t)$  и ракеты  $I_{р}(t)$  и выдает команды через радиозвено на автопилот, который управляет рулями. Динамическое звено фиксирует реакцию ракеты на управляющее воздействие. Кинематическое звено определяет закономерности перехода положения ракеты и цели в пространстве и формирует оптимальную траекторию полета ракеты.

### РТС извлечения информации

*Примеры:* радиоразведка полезных ископаемых; радиоразведка состояния поверхности Земли; радиоразведка РТС противника; радиолокация; радионавигация; радиоастрономия. ■

Рассмотрим структурную схему РТС извлечения информации (рис. 3) на примере радиолокационной системы (РЛС).



**СС** – система синхронизации

**УМ** – усилитель мощности

**УСУ** – устройство селекции и усиления

**Ц<sub>1</sub>, Ц<sub>2</sub>** – цели

**ВВ** – внешнее воздействие

**ИИУ** – измерительно-индикаторное устройство

**М** – канальный модулятор

**АП** – антенный переключатель

**А** – антенны

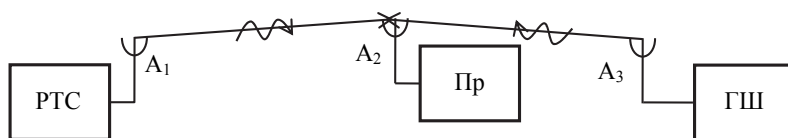
**ДМ** – демодулятор

Рис. 3. Структурная схема радиолокационной системы извлечения информации

### РТС разрушения информации

*Пример:* системы радиопротиводействия. ■

Системы радиопротиводействия (рис. 4) предназначены для искажения информации или нарушения работы канала связи противника.



**РТС** – передающая радиосистема

**А1 – А3** – антенны

**Пр** – приемник

**ГШ** – генератор шума

Рис. 4. Структурная схема системы радиопротиводействия

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Каким образом связаны этапы жизненного цикла РТС?
2. Как выглядит сигнал в радиотехническом канале для аналоговых (импульсных, цифровых) РТС?
3. В чем отличие сигналов с амплитудной (фазовой, частотной) модуляцией от сигналов с амплитудной (фазовой, частотной) манипуляцией?
4. Какие радиотехнические системы функционируют в ОНЧ (НЧ, СЧ, ВЧ, ОВЧ, УВЧ, СВЧ, КВЧ) диапазонах? Привести примеры.
5. Какие параметры описывают РТС?

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Какие источники информации используются в радиотехнических системах?
2. Как изменится структурная схема системы передачи информации, если для передачи будут использованы не аналоговые, а цифровые сигналы?
3. Как выглядит структурная схема системы спутниковой навигации?
4. В каком диапазоне частот функционируют современные спутниковые системы радионавигации?
5. В чем отличие систем разрушения информации от систем передачи информации?
6. Какие виды модуляции кроме АМ, ЧМ, ФМ вы можете назвать?

## ЗАДАЧИ

1. Любительский радиоприемник функционирует в диапазоне КВ. Рассчитать минимальный размер вибратора Герца, который используется в качестве приемной антенны.
2. Определить, в каком частотном диапазоне может быть использована параболическая антенна с радиусом раскрытия зеркала 5 м и шириной диаграммы направленности на уровне половинной мощности 1 радиан.
3. Определить, в каком частотном диапазоне будет работать РТС, которая излучает радиоволны длиной 15 см. Какими свойствами обладают радиоволны в этом диапазоне? Можно ли организовать дальнюю (загоризонтную) связь при помощи такой РТС без дополнительных ретрансляторов?

## ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ

1. РТС: основные определения, жизненный цикл РТС.
2. РТС: параметры и характеристики качества.
3. РТС: основные определения, классификация РТС.
4. РТС: классификация по назначению, обобщенные структурные схемы.

## ЛЕКЦИЯ 2. ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РТС ВЛИЯНИЕ ЗЕМЛИ НА ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РТС ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РТС

### ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РТС

ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РТС – это максимальное расстояние, на котором обеспечивается функционирование РТС с заданными характеристиками качества.

В зависимости от задач, решаемых системой, этими характеристиками, например, могут быть вероятности ошибок или точность измерения координат.

Рассмотрим дальность действия РТС в свободном пространстве. Под свободным пространством понимается среда, в которой:

- отсутствует затухание радиоволн (из-за поглощения);
- отсутствует отражение радиоволн (нет эффекта многолучевости).

Дальность действия  $R$  в этом случае ограничивается только техническими характеристиками РТС (рис. 5).



Рис. 5. Дальность действия РТС

Эффективная поверхность антенны  $S$  пропорциональна геометрической площади антенны  $S_a$  с коэффициентом использования  $k_{\text{исп}}$ :  
 $S = k_{\text{исп}} S_a$ .

**ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ** – минимальная мощность полезного сигнала на входе приемника, при которой обеспечиваются заданные характеристики качества функционирования системы.

Чувствительность приемника  $P_{\text{пр min}}$  можно определить следующим образом:

$$P_{\text{пр min}} = kT_0 K_{\text{ш}} \Delta f q^2 L,$$

где  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана;  $T_0$  – температура приемника [в К];  $K_{\text{ш}}$  – коэффициент шума (зависит от входных усилительных каскадов);  $\Delta f$  – ширина спектра сигнала,  $q^2 = 2E / N_0$  – отношение сигнал/шум (ОСШ);  $L$  – потери за счет неоптимальности.

В случае *изотропной* (равномерно излучающей) антенны плотность потока мощности  $\Pi_2$ , создающаяся в точке приемной апертуры [7]:

$$\Pi_2 = \frac{P_c}{4\pi R^2}.$$

В случае направленной антенны, ориентированной максимумом диаграммы направленности на приемную антенну [7]:

$$\Pi_2 = \frac{P_c G_1}{4\pi R^2}.$$

Мощность в точке приема  $P_{\text{пр}} = \Pi_2 S_2$ , где  $S_2 = G_2 \lambda^2 / 4\pi$  [7], получаем

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_c G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2}.$$


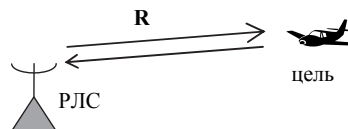
В свободном пространстве чувствительность приемника ограничивает дальность действия РТС:



$$R_{\max \text{ СВ}} = \sqrt{\frac{P_c G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{\text{пр min}}}}$$

Величину  $P_c/P_{\text{пр min}}$  называют энергетическим потенциалом системы.

Дальность действия РЛС в свободном пространстве зависит также от активности цели.

Система с активным ответом	Система с пассивным ответом
	
<p>Плотность потока мощности в точке расположения «Цели»: <math>\Pi_o = \frac{P_{\text{изл з}} G_z}{4\pi R^2}</math>.</p> <p>Мощность входного сигнала на приемной аппаратуре «Цели»: <math>P_{\text{пр о}} = \Pi_o S_{\text{эф о}} = \frac{P_{\text{изл з}} G_z}{4\pi R^2} S_{\text{эф о}}</math>. Аналогично, мощность входного сигнала на аппаратуре РЛС: <math>P_{\text{пр з}} = \frac{P_{\text{изл о}} G_o}{4\pi R^2} S_{\text{эф з}}</math>.</p> <p>Следовательно, <math>R_{\max з} = R_{\max о}</math> при <math>\lambda_з \approx \lambda_o</math>. Условие энергетического баланса:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <math display="block">\frac{P_{\text{пр о}}}{P_{\text{пр з}}} = \frac{P_{\text{изл з}}}{P_{\text{изл о}}}</math> </div>	<p>Плотность потока мощности в точке расположения «Цели»: <math>\Pi_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{изл}} G_{\text{РЛС}}}{4\pi R^2}</math>. Отражающие свойства цели характеризуются <i>эффективной поверхностью рассеяния</i> цели <math>\sigma_{\text{ц}}</math>.</p> <p>Мощность отраженного целью сигнала: <math>P_{\text{отр}} = \Pi_{\text{ц}} \sigma_{\text{ц}}</math>. Плотность потока мощности в точке расположения РЛС: <math>\Pi_{\text{РЛС}} = \frac{P_{\text{отр}}}{4\pi R^2}</math>. Мощность входного сигнала на приемной аппаратуре РЛС: <math>P_{\text{пр}} = \Pi_{\text{РЛС}} S_{\text{эф РЛС}}</math>,</p> $P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{изл}} G_{\text{РЛС}} S_{\text{эф РЛС}} \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^2 R^4}$

Дальность действия РЛС с активным ответом:

$$R_{\max \text{ СВ}} = \sqrt{\frac{P_{\text{изл о}} G_o S_{\text{эф з}}}{4\pi P_{\text{пр з min}}}}, \text{ или } R_{\max \text{ СВ}} = \sqrt{\frac{P_{\text{изл з}} G_z S_{\text{эф о}}}{4\pi P_{\text{пр о min}}}}$$

Дальность действия РЛС с пассивным ответом:

$$R_{\max \text{ СВ}} = 4 \sqrt{\frac{P_{\text{изл}} G_{\text{РЛС}} S_{\text{эф РЛС}} \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^2 P_{\text{пр min}}}}$$

### ВЛИЯНИЕ ЗЕМЛИ НА ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РТС

В связи с тем, что радиоволны УКВ диапазона распространяются только в пределах прямой видимости (рис. 6), для учета влияния сферичности Земли вводится понятие *радиогоризонт*. Его дальность учитывает высоты нахождения антенн  $h_1$ ,  $h_2$  и определяется по формуле

$$R_{\max} = 4.12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

[км]                      [м]                      [м]

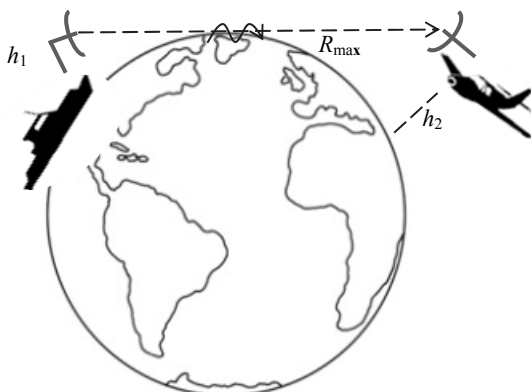


Рис. 6. Влияние сферичности Земли на дальность действия РТС

Кроме того, на распространение радиоволн влияет их отражение от поверхности Земли. Высота неровностей  $\delta$ , при которой поверхность Земли можно считать гладкой [2],  $\delta \leq \frac{\lambda}{16} \sin \psi$ , где  $\lambda$  – длина излучаемой волны;  $\psi$  – угол падения волны.

Напряженности прямой и отраженной волны (рис. 7) отличаются:

- из-за диаграммы направленности антенны (ДНА);
- изменения амплитуды и фазы волны при отражении;
- геометрической разности хода.

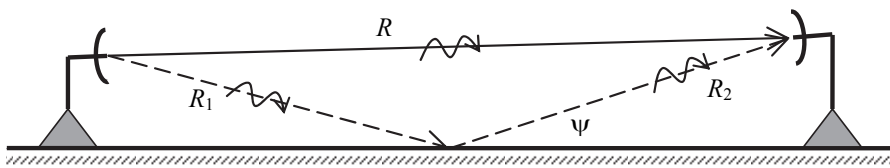


Рис. 7. Влияние отражения от поверхности Земли на дальность действия РТС

Разность фаз прямой и отраженной волн определяется по формуле  $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta R}{\lambda}$ , где  $\Delta R = (R_1 + R_2) - R$  – разность расстояний, которые прошли прямая и отраженная волна. Напряженность электрического поля в точке приема складывается из напряженностей прямой и отраженной волны:  $E_{\text{ц}} = E_1 + E_2 = E_1 + r_{\text{отр}} E_1 e^{-j\gamma}$ , где коэффициент отражения от Земли  $r_{\text{отр}}$  показывает, во сколько раз амплитуда отраженной волны отличается от амплитуды прямой волны,  $\gamma = \varphi_{\text{отр}} + \Delta\varphi$ . Вводится интерференционный множитель [2]:

$$F_0 = \left| \frac{E_{\text{ц}}}{E_1} \right| = \left| 1 + r_{\text{отр}} \cos \gamma - jr_{\text{отр}} \sin \gamma \right| = \sqrt{(1 + r_{\text{отр}} \cos \gamma)^2 + r_{\text{отр}}^2 \sin^2 \gamma}.$$

При  $r_{\text{отр}} = 1$ ,  $\varphi_{\text{отр}} = \pi$ :  $F_0 = 2 \left| \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \right|$  и  $R_{\text{max}} = R_{\text{max CB}} F_0$ .

## ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РТС

При распространении в атмосфере Земли радиосигналы затухают, это вызвано их рассеянием и поглощением:

- молекулами кислорода;
- частицами пыли, дыма;
- парами и каплями воды (дождь, туман, снег).

В связи с этим происходит экспоненциальное уменьшение плотности потока мощности сигналов, а значит, и уменьшение максимальной дальности действия РТС [7]:  $R_{\max} = R_{\max \text{ СВ}} e^{-0.5\alpha R_{\max}}$ , здесь  $\alpha$  – коэффициент затухания.

Заметим, что радиоволны с длиной волны больше 10 см ( $f_0 < 300$  МГц) хорошо проходят через атмосферу даже при наличии природного рассеяния (дождь и снег).

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие параметры антенны влияют на дальность действия РТС?
2. Для каких систем (с активным или пассивным ответом) дальность действия будет больше?
3. Каким образом поверхность Земли влияет на дальность действия РТС?
4. Какие параметры радиотехнического сигнала определяют чувствительность приемника?
5. Как определить дальность действия РТС в УКВ диапазоне?

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Каким образом рефракция в атмосфере влияет на распространение радиоволн?
2. Каким образом на распространение радиоволн влияет подстилающая поверхность?
3. Каким образом на распространение радиоволн влияет отражение от ионосферы?
4. В чем заключается особенность распространения радиоволн микроволнового диапазона?

## ЗАДАЧИ

1. Рассчитать мощность передатчика для обеспечения дальности действия 100 км при активном ответе  $G_{\text{отв}} = 2$ . Коэффициент усиления антенны  $G = 1000$ ,  $\lambda = 20$  см,  $\tau_{\text{и}} = 10$  мкс, отношение сигнал/шум  $q = 5$ , шумовая температура приемника 400 К, коэффициент потерь в системе  $L_{\text{п}} = 3$  дБ.

2. Рассчитать мощность передатчика для обеспечения дальности действия 50 км при пассивном ответе  $\sigma_{\text{ц}} = 15$  м<sup>2</sup>. Чувствительности приемников и характеристики антенн РЛС с пассивным ответом и запросчика принять одинаковыми. Коэффициент усиления антенны  $G = 2000$ ,  $\lambda = 10$  см,  $\tau_{\text{и}} = 1$  мкс, отношение сигнал/шум  $q = 10$ , шумовая температура приемника 600 К, коэффициент потерь в системе  $L_{\text{п}} = 6$  дБ.

3. Как и почему изменится дальность действия радиолокационной системы, если энергия излучаемого сигнала возрастет в 10 раз?

**Задачи для самостоятельной работы и решения на практическом занятии:** 3.60–3.91 [1].

## ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ

1. Дальность действия РТС в свободном пространстве.
2. Влияние Земли и атмосферы на дальность действия РТС.

## ЛЕКЦИЯ 3. ЭФФЕКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ РАССЕЯНИЯ ЦЕЛИ ЭПР ОБЪЕМНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЦЕЛИ ЭПР ПОВЕРХНОСТНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЦЕЛИ

### ЭФФЕКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ РАССЕЯНИЯ ЦЕЛИ

В расчетах дальности действия РТС трудно учесть характеристики, присущие каждой конкретной цели (габариты, конфигурацию). Поэтому вводится стандартная мера отражающих свойств целей, которая носит название *эффективная поверхность рассеяния* и позволяет формализовать расчеты дальности действия. Эти расчеты опираются не на

конкретные характеристики целей, а на их ЭПР, имеющую размерность площади.

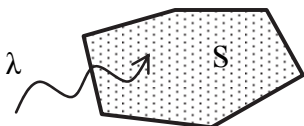
**ЭФФЕКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ РАССЕЯНИЯ (ЭПР)** количественно равна площади непоглощающей и равномерно во всех направлениях рассеивающей электромагнитные волны поверхности, которая при расположении нормально лучу радиолокатора создает у его приемной антенны поле той же интенсивности, что и реальная цель.

Отражение электромагнитной волны от цели может быть без изменения поляризации и с изменением на ортогональную. Плотность потока мощности отраженной от цели волны определяется по формуле

[7]  $\Pi_{\text{отр}} = \frac{\Pi_1 \sigma_{\text{ц}}}{4\pi R^2}$ , откуда ЭПР цели ( $E_{\text{отр}}$ ,  $E_1$  – напряженность поля):

$$\sigma_{\text{ц}} = 4\pi R^2 \frac{\Pi_{\text{отр}}}{\Pi_1} = 4\pi R^2 \frac{|E_{\text{отр}}|^2}{|E_1|^2}, \text{ так как } \Pi \sim E^2.$$

### ЭПР ПРОСТЫХ ЦЕЛЕЙ



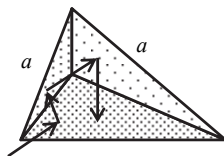
**Пластина** ( $S$  – площадь пластины;  $\lambda$  – длина облучающей волны) [20]:

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}.$$

**Угловые отражатели** (используются в качестве радиолокационных ориентиров и могут служить средством радиолокационной маскировки).

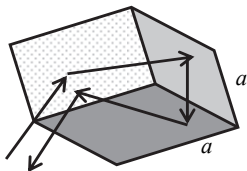
Для отражателя с треугольными гранями [20]

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{4\pi}{3} \frac{a^4}{\lambda^2}.$$



Для отражателя с квадратными гранями [7]

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}.$$



**Шар** (элементы конструкций цели, шары-зонды, гидрометеоры).

Характер отражения зависит от соотношения между диаметром и длиной волны, а также от материала. При  $d_{\text{ш}} \ll \lambda$  шар ведет себя как электрический вибратор малых размеров [20];  $\sigma_{\text{ц}} = 690 \frac{d_{\text{ш}}^6}{\lambda^4}$  – металлический шар;  $\sigma_{\text{ц}} = 306 \frac{d_{\text{ш}}^6}{\lambda^4} \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon' + 2}$  – диэлектрический шар. Например, для воды относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon' = 80$ . При  $d_{\text{ш}} \gg \lambda$  ЭПР шара будет  $\sigma_{\text{ц}} = \pi r_{\text{ш}}^2$  [20].

Для сложных целей ЭПР определяется экспериментально.

### ЭПР ОБЪЕМНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЦЕЛИ

В радиолокационной практике часто встречается отражение от *объемно-распределенных целей*, состоящих из большого числа отражателей, относительно близко расположенных и занимающих значительную область пространства (рис. 8).

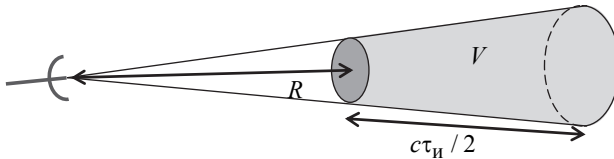


Рис. 8. ЭПР объемно-распределенной цели

Для объемно-распределенной цели коэффициент направленного действия (КНД) антенны по азимуту и углу места определяется следующим образом [20]:  $G_{\alpha} = \alpha_{0,5} R$ ,  $G_{\beta} = \beta_{0,5} R$ , здесь  $R$  – расстояние до объекта;  $\alpha_{0,5}$  – ширина луча по азимуту;  $\beta_{0,5}$  – ширина луча по углу места. Вводится понятие *радиолокационный объем* [20]:

$$V = \frac{\pi}{4} G_{\alpha} G_{\beta} \frac{c\tau_{\text{ц}}}{2}.$$

ЭПР объемно-распределенной цели  $\sigma_{\text{ц}} = Vn\sigma_0$ , где  $n$  – количество элементарных отражателей в единице объема;  $\sigma_0$  – эффективная отражающая поверхность одного отражателя.

Пример: для дождя  $n\sigma_0 \approx 6 \cdot 10^{-14} I^{1.6} \lambda^{-4}$ , где  $I$  – интенсивность дождя, мм/ч. ■

### ЭПР ПОВЕРХНОСТНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЦЕЛИ

Примерами поверхностно-распределенных целей являются травяной покров, лес, пашня, кустарник, волны на водной поверхности.

В отличие от объемно-распределенной цели в данном случае трудно выделить отдельные отражающие элементы, так как, располагаясь случайным образом, они образуют сплошной поверхностный слой, от которого происходит рассеянное отражение электромагнитных волн (рис. 9).

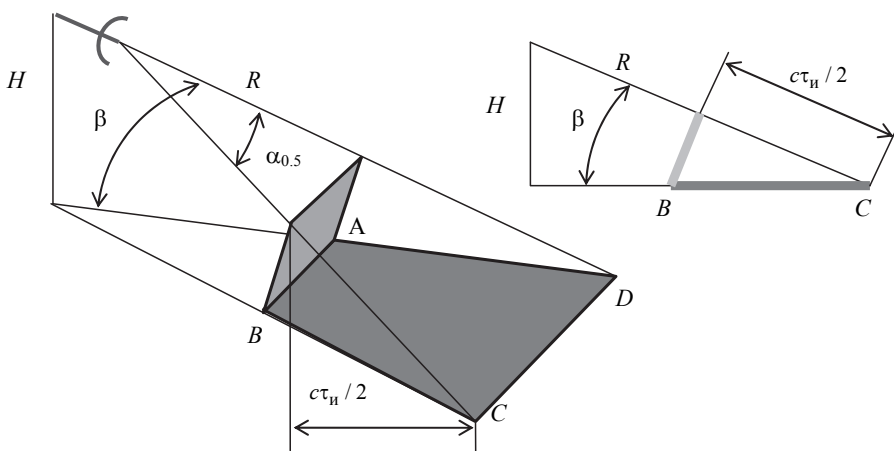


Рис. 9. ЭПР поверхностно-распределенной цели

Пусть РЛС, находящаяся на высоте  $H$ , излучает импульсы длительностью  $\tau_n$ . По азимуту облучаемая площадка ограничена шириной ДНА:  $AB = \alpha_{0,5} R$ .

Границы разрешаемой площадки по дальности зависят от длительности излучаемого импульса и угла визирования  $\beta$  [20]:

$$BC = \frac{c\tau_n}{2} \frac{1}{\cos\beta}.$$



Величина эффективной площади рассеяния в случае однородной поверхности со случайным расположением неровностей пропорциональна площади, формирующей отраженный сигнал. Площадь поверхности, перпендикулярной линии визирования:

$$S = AB \cdot BC \sin \beta = \alpha_{0.5} R \frac{c\tau_{и}}{2} \operatorname{tg} \beta.$$

ЭПР поверхностно-распределенной цели пропорциональна этой площади с коэффициентом рассеяния  $\sigma_0$ , описывающим влияние отражающих свойств поверхности  $\sigma_{ц} = S\sigma_0$ . Для малых углов  $\beta$  получаем  $\operatorname{tg} \beta \approx \sin \beta = \frac{H}{R}$ , а значит,  $\sigma_{ц} = \alpha_{0.5} H \frac{c\tau_{и}}{2} \sigma_0$ .

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие простейшие объекты используются для определения ЭПР в радиолокации?
2. От каких параметров объекта зависит ЭПР? От каких параметров облучающего сигнала зависит ЭПР?
3. Каким образом определяется ЭПР сложных целей?
4. Приведите примеры объемно-распределенных целей.
5. Приведите примеры поверхностно-распределенных целей.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Каким образом ЭПР зависит от угла облучения цели?
2. Что такое коэффициент направленного действия? Каким образом он влияет на ЭПР объемно-распределенной цели?
3. Как определить ЭПР полуволнового вибратора?
4. Для чего необходимо увеличивать отражающие свойства цели? Каким образом это осуществляется?

### ЗАДАЧИ

1. Определить ЭПР объемно-распределенной цели – участка дождя интенсивностью 15 мм/ч, если КНД  $G_{\alpha} = 2$ ,  $G_{\beta} = 3$ , длительность зондирующего импульса 10 мкс, радиосигналы имеют частоту 850 МГц.

2. Определить ЭПР металлического шара диаметром 18 см, облучаемого радиосигналом с частотой 50 ГГц.

3. Рассчитать мощность передатчика для обеспечения дальности действия РТС 50 км при облучении металлического шара диаметром 10 см. Коэффициент усиления антенны  $G = 2000$ ,  $\lambda = 1$  м,  $\tau_{\text{и}} = 1$  мкс, отношение сигнал/шум  $q = 10$ , шумовая температура приемника 600 К, коэффициент потерь в системе  $L_{\text{п}} = 6$  дБ.

**Задачи для самостоятельной работы и решения на практическом занятии:** 3.43–3.56 [1].

### **ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ**

1. ЭПР цели. ЭПР простейших целей.
2. ЭПР поверхностно-распределенной цели.
3. ЭПР объемно-распределенной цели.

## ТЕМА 2. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

### ЛЕКЦИЯ 4. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИЯ РТС ПИ. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ РТС ПИ

#### ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Передача информации с помощью РТС имеет особенности в зависимости от типа сообщений, типа обмена и дальности действия и др., которые необходимо учитывать при проектировании.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ (РТС ПИ) – это радиотехнические системы, использующие радиосигналы для передачи информации (рис. 10).

Радиотехнические системы передачи информации включают в себя:

**источники сообщений;**

**получателей сообщений;**

**канал:** → технические средства

(радиоэлектронная аппаратура – РЭА)

радиолиния: → *среда распространения,*

*радиосигналы,*

*помехи*

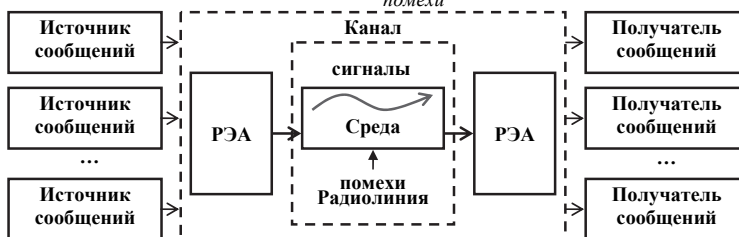


Рис. 10. Структура РТС ПИ

В настоящее время применяется большое количество разнообразных РТС ПИ с дальностью действия от 1 км (местная связь) до 1000 млн км (космическая связь). Основной проблемой использования радиосигналов в пространстве является открытость такой системы, что обуславливает затухание сигнала, наличие помех, а также возможность перехвата сообщений.

Однако РТС ПИ в отличие от систем проводной связи не требуют сооружения дорогостоящих направляющих систем (например, прокладки кабеля) и дают возможность организации связи вне поверхности Земли, а также для передачи информации между движущимися объектами.

### КЛАССИФИКАЦИЯ РТС ПИ

Главные признаки, по которым можно классифицировать РТС ПИ, следующие: вид передаваемых сообщений, количество каналов, режим использования каналов, тип радиоканалов, вид информации и т. д. (табл. 2)

Таблица 2

#### Классификация РТС ПИ

Вид передаваемых сообщений	Речевые, телеграфные, данные, телевизионные, телеметрия, команды управления, факсимильная передача неподвижных изображений
Количество каналов	Одноканальные, многоканальные
Режим использования каналов	Односторонние; двусторонние: симплексные (поочередные); дуплексные (одновременные); полудуплексные
Тип каналов	Спутниковые; наземные: тропосферные, ионосферные, метеорные, радиорелейные
Вид информации	Непрерывные, дискретные, импульсные, цифровые
Вид модуляции	Амплитудная, частотная, фазовая
Используемая рабочая частота	Длинноволновые, коротковолновые, сантиметровые, НЧ, ВЧ, СВЧ, УКВ и т. д.
Дальность действия	Космическая связь, глобальные, магистральные, зонные, местные
Назначение системы	Служебные, морские (торговый флот, рыболовецкая, военно-морская), авиации (гражданский воздушный флот, военная авиация) и т. д.

Среда распространения	Проводные системы передачи информации, кабельные (коаксиальные, волоконно-оптические), воздушные
Мобильность	Стационарные, автомобильные, переносные
Вид питания	Сетевое питание, батарейные, с автономным генератором
По требованиям к точности и помехоустойчивости	

Часто требуется совместное использование многих систем передачи информации, разнесенных в пространстве. Такую совокупность РТС ПИ называют сетью. Реальные сети объединяют тысячи источников и потребителей информации и имеют сложную иерархическую структуру (магистральные, зонавые и местные сети, первичные и вторичные). В состав сети помимо абонентских пунктов входят узлы связи, в которых распределяется информация между абонентами.

### ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ РТС ПИ

Основная доля затрат при реализации системы связи приходится на высокочастотную и мощностную часть техники (передатчики, линии связи). Для параллельной передачи многих сообщений с целью экономии ресурсов используют многоканальные системы. В основе использования одной линии связи в качестве нескольких каналов связи лежит теория линейного разделения каналов (сигналов) (рис. 11).

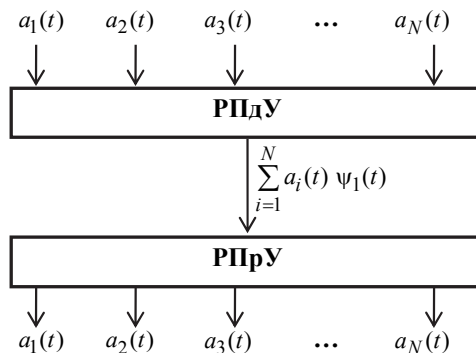


Рис. 11. Обобщенная структурная схема многоканальной системы

Пусть имеется  $N$  источников и  $N$  получателей сообщений. Требуется доставить сообщения по общей линии связи, используя такие сигналы, которые можно разделить на приемной стороне без ошибок. Ошибки могут возникнуть в результате перекрестных искажений (попадание сообщения в чужой канал).

Пусть в  $N$ -канальной системе имеется  $N$  сигналов-переносчиков сообщений  $\psi_1(t), \psi_2(t), \dots, \psi_N(t)$ . Тогда в канале будет наблюдаться

аддитивная смесь:  $\sum_{i=1}^N a_i(t) \psi_i(t)$  – групповой сигнал, где  $a_i(t)$  – информационный сигнал. В приемном тракте имеется  $N$  однотипных устройств, настроенных на «свой» сигнал-переносчик.

Разделение сигналов основано на идее линейной фильтрации. В каждом канале на приемной стороне имеется устройство с импульсной характеристикой  $h_k(t) \sim \psi_k(t)$ .

При ортонормированности функций  $\psi_k(t)$  получим на приемной

стороне:  $\sum_{i=1}^N (a_i(t) \psi_i(t), \psi_k(t)) = a_k(t)$ . Однако достаточно, чтобы

функции  $\psi_k(t)$  были линейно независимы. Тогда для успешного разделения на приемной стороне необходимо, чтобы импульсные характеристики приемных устройств образовывали взаимный базис с функциями переносчика.

*Пример:* двухканальная система.

На выходе передатчика:

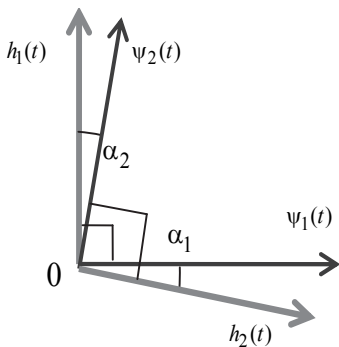
$$a_1(t) \psi_1(t) + a_2(t) \psi_2(t).$$

На выходе первого канала:

$$\begin{aligned} a_1(t) (\psi_1(t), h_1(t)) + a_2(t) (\psi_2(t), h_1(t)) = \\ = a_1(t) \cos \alpha_2. \end{aligned}$$

На выходе второго канала:

$$\begin{aligned} a_1(t) (\psi_1(t), h_2(t)) + a_2(t) (\psi_2(t), h_2(t)) = \\ = a_2(t) \cos \alpha_1. \end{aligned}$$



Получаем разделение каналов на выходе приемника. ■

В приведенном примере полезный эффект приемника пропорционален полезному сообщению с коэффициентом  $\cos \alpha_k < 1$ , т. е. ОСШ уменьшается, а значит, система работает в энергетически невыгодном режиме. Поэтому реальные системы строят на ортонормированных сигналах.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Какие сообщения могут быть переданы посредством РТС ПИ?
2. Какой переносчик сообщения должен использоваться для организации энергетически оптимальной передачи информации?

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

1. Какие виды помех действуют в радиотехническом канале связи?
2. Как можно классифицировать РТС ПИ в зависимости от типа источника сообщений?
3. Какие примеры РТС ПИ с различным режимом использования каналов можно назвать?

### **ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ**

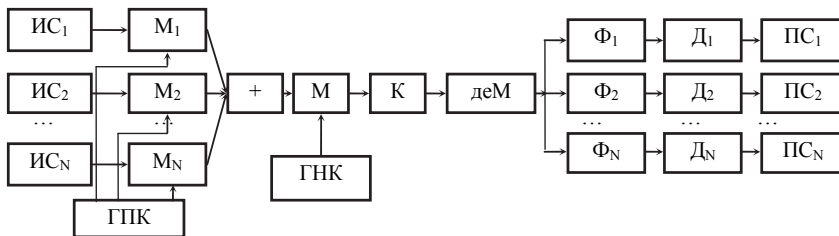
1. РТС ПИ: основные определения, классификация.
2. РТС ПИ: принцип линейного разделения каналов.

## **ЛЕКЦИЯ 5. ПРИНЦИП ЧАСТОТНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ. ПРИНЦИП ВРЕМЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ. МНОГОКАНАЛЬНАЯ РТС ПИ С ИМПУЛЬСНО-КОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

### **ПРИНЦИП ЧАСТОТНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ (ЧРК)**

Системы с ЧРК предназначены для более полного использования частотного ресурса канала связи. В качестве переносчика в системах с ЧРК используются гармонические колебания:  $\psi_i(t) = \cos \omega_i t$ , здесь  $\omega_i$  – поднесущая частота;  $\psi_i(t)$  – поднесущее колебание;  $i$  – номер канала.

Как правило, все системы многоканальной связи с ЧРК являются системами с двухступенчатой модуляцией (рис. 12). На первой ступени осуществляется перенос спектра сигнала на промежуточную частоту с целью их разнесения по частотному диапазону при объединении каналов. Назначение второй ступени модуляции – перенесение спектра группового (управляющего) сигнала на рабочую (несущую) частоту системы.



$ИС_1, ИС_2 \dots ИС_N$  – источники сообщений  
 $М_1, М_2 \dots М_N$  – каналные модуляторы  
 ГПК – генератор поднесущих колебаний  
 $\Phi_1, \Phi_2 \dots \Phi_N$  – каналные фильтры  
 ГНК – генератор несущего колебания  
 деМ – демодулятор группового сигнала

К – канал  
 $Д_1, Д_2 \dots Д_N$  – детекторы  
 М – групповой модулятор  
 $ПС_1, ПС_2 \dots ПС_N$  – получатели сообщений

Рис. 12. Структурная схема многоканальной системы связи с частотным разделением каналов

Рассмотрим принцип действия системы с ЧРК и эпюры в частотной области в различных точках системы (рис. 13). Система должна передать  $N$  сообщений от источника к получателю. Пусть все  $N$  сообщений принадлежат одному классу – у всех одинаковая СПМ  $G(f)$ , но различные временные реализации. На первой ступени модуляции могут использоваться различные виды модуляции. Рассмотрим, например, АМ с ОБП (одна боковая полоса). Спектр суммы сигналов равен сумме их спектров (по теореме Фурье). При выборе поднесущих частот руководствуются тем, что сигнал должен быть узкополосным, т. е. чтобы выполнялось условие  $\Delta f \ll f_0$ ; кроме того, спектры различных каналов при объединении не должны перекрываться. Групповой сигнал является управляющим для второй ступени модуляции. На второй ступени также могут использоваться различные виды модуляции. На выходе группового модулятора имеется сигнал со сложным спектром. На приемной стороне сначала происходит демодуляция сигнала, получен-



ного в передатчике на второй ступени модуляции, т. е. получаем групповой сигнал. Затем происходит разделение группового сигнала на сигналы по каналам при помощи полосовых фильтров. После этого необходимо выполнить детектирование сообщений из сигналов в каждом канале.

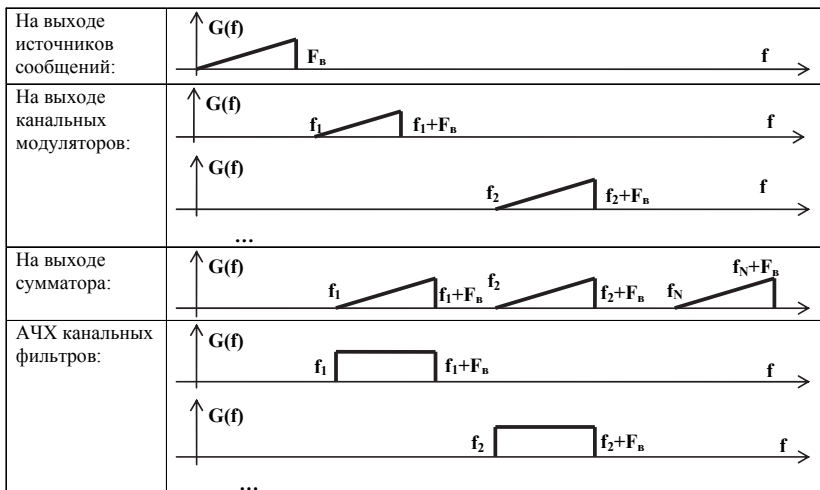


Рис. 13. К принципу организации РТС ПИ с ЧРК (на примере системы с ОБП)

Рассмотрим основные механизмы возникновения помех в системах с ЧРК и способы борьбы с ними.

### 1. Нефинитный спектр сообщения

Способ борьбы:

- предварительная фильтрация сигналов перед модуляторами первой ступени фильтрами с высокой прямоугольностью;
- введение защитных интервалов при формировании группового сигнала.

### 2. Непрямоугольные АЧХ полосовых фильтров

Способ борьбы: использование фильтров с большим коэффициентом прямоугольности.

### 3. Системы с ЧРК очень чувствительны к нелинейности устройств, входящих в эту систему

Способ борьбы: использование линейных устройств.

Для систем с ЧРК вводится понятие *эффективности* использования частотного диапазона.

*Пример:* для телефонной системы с ЧРК полоса сигнала  $\Delta f = 3100$  Гц, защитный интервал  $f_3 = 900$  Гц. Таким образом, на один канал приходится 4000 Гц, а эффективность использования частного пространства составляет  $\Delta f / (\Delta f + f_3) = 3100/4000 = 0.775$ . ■

## ПРИНЦИП ВРЕМЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ (ВРК)

Системы с ВРК предназначены для передачи непрерывных сообщений, несмотря на то что в них на первой ступени используются импульсные виды модуляции. В основе работы системы с ВРК лежит *теорема Котельникова* о дискретизации непрерывных сообщений.

**ТЕОРЕМА КОТЕЛЬНИКОВА.** Если спектр сигнала  $S(t)$  ограничен верхней частотой  $F_B$ , то такой сигнал можно представить в виде последовательности отсчетов  $S_1 = S(t_1)$ ,  $S_2 = S(t_1 + \Delta t)$  ...  $S_i = S(t_1 + (i-1)\Delta t)$ , взятых с шагом  $\Delta t = 1/2F_B$ , и затем восстановить, используя соотношение [3]

$$S(t) = \sum_i S_i \frac{\sin \pi F_B (t - (i-1)\Delta t)}{\pi F_B (t - (i-1)\Delta t)}.$$

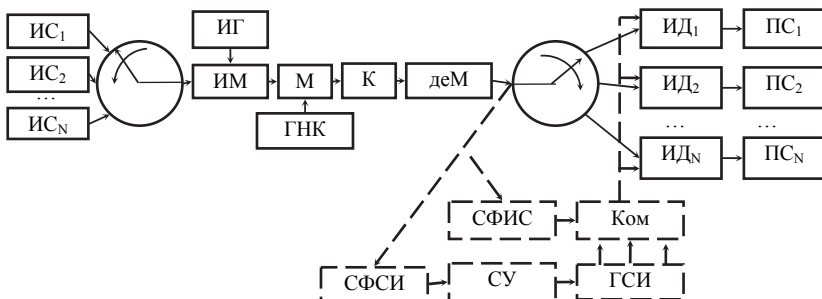
Импульсная характеристика восстанавливающего фильтра [3]

$h(t) = \frac{\sin \pi F_B t}{\pi F_B t}$ . Таким образом, для восстановления непрерывного сигнала по отсчетам используется прямоугольный фильтр нижних частот.

Теорема Котельникова говорит о способе восстановления аналогового сигнала по отсчетам – для восстановления нужно пропустить дискретный сигнал через фильтр нижних частот.

Многоканальная система с ВРК также является системой с двухступенчатой модуляцией (рис. 14). На первой ступени используются импульсные виды модуляции. Рассмотрим многоканальную систему ВРК с АИМ. В такой системе каждый отсчет передается в виде импульса с фиксированным расположением и длительностью (рис. 15). Управляющим параметром является амплитуда. После импульсного модулятора имеется поток видеоимпульсов в одном канале – групповой сигнал, который подвергается модуляции второй ступени. Импульсные

детекторы в схеме представляют собой линейные фильтры нижних частот. Вводится понятие *кадровая синхронизация*. Коммутатор приемника должен быть синхронизирован с коммутатором передатчика.



**ИС<sub>1</sub>, ИС<sub>2</sub> ... ИС<sub>N</sub>** – источники сообщений  
**ИД<sub>1</sub>, ИД<sub>2</sub> ... ИД<sub>N</sub>** – импульсные детекторы  
**ПС<sub>1</sub>, ПС<sub>2</sub> ... ПС<sub>N</sub>** – получатели сообщений  
**ГСИ** – генератор синхроимпульса  
**СФСИ** – согласованный фильтр  
 информационного сигнала  
**ГНК** – генератор несущего колебания  
**деМ** – демодулятор группового сигнала

**К** – канал  
**ИГ** – импульсный генератор  
**М** – каналный модулятор  
**ИМ** – импульсный модулятор  
**СФСИ** – согласованный фильтр  
 синхроимпульса  
**Ком** – коммутатор  
**СУ** – селективный усилитель

Рис. 14. Структурная схема многоканальной системы связи с частотным разделением каналов

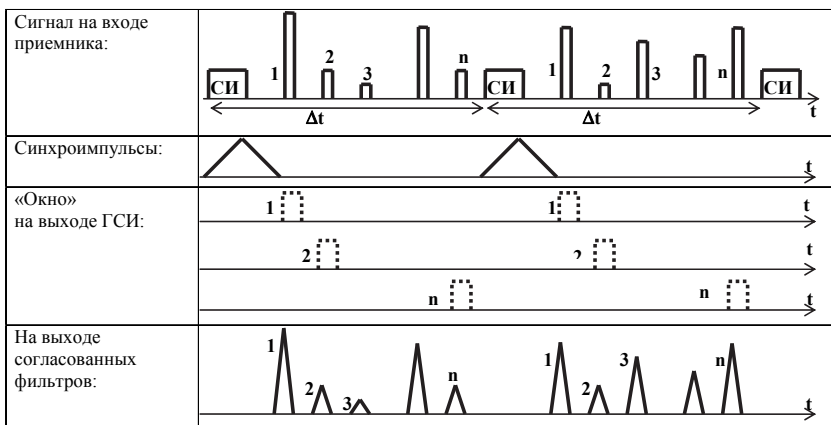


Рис. 15. Принцип организации синхронизации в РТС ПИ с ВРК

КАДР – промежуток времени  $\Delta t$ , содержащий отсчеты от всех каналов, взятые в данном такте.

Рассмотрим принцип синхронизации в системе с ВРК. Кадр  $\Delta t$  разбит на  $N + 1$  промежутков. Все  $N$  информационных импульсов различаются только информационным параметром (амплитудой в АИМ).

Синхроимпульс отличается по своей природе от информационного сигнала, например по длительности или кодовой комбинации.

Рассмотрим основные механизмы возникновения помех в системах с ВРК и способы борьбы с ними.

### 1. Искажение формы импульсов при прохождении через демодулятор из-за переходных процессов (рис. 16)

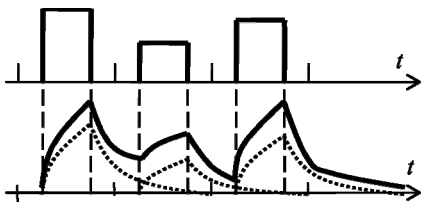


Рис. 16. Искажение фронтов импульсных сигналов

Способы борьбы:

- применение «идеальных» фильтров;
- введение защитных интервалов при формировании группового сигнала.

Ширина спектра группового сигнала без применения защитных интервалов:

$$\Delta F = \frac{N + 1}{\Delta t}.$$

Ширина спектра группового сигнала при использовании защитных интервалов, равных длительности импульса:

$$\Delta F_3 = \frac{N + N + 1}{\Delta t}.$$

Таким образом, чем больше каналов, тем больший частотный ресурс нужен для передачи; платой за повышение помехоустойчивости является расширение полосы.

### 2. Ошибки в системе синхронизации

Способ борьбы: увеличение энергии синхросигнала, использование широкополосных сигналов.

## МНОГОКАНАЛЬНАЯ РТС ПИ С ИМПУЛЬСНО-КОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Системы с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) относятся к системам с ВРК. ИКМ используется для цифровой передачи непрерывных сообщений. Рассмотрим обобщенную структурную схему системы с ИКМ (рис. 17).

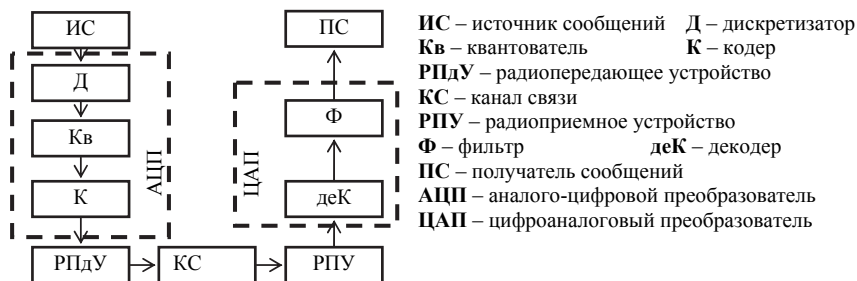


Рис. 17. Структурная схема системы связи с ИКМ

Принцип действия передатчика РТС ПИ с ИКМ (рис. 18):

- непрерывная функция времени (сообщение) от источника поступает на дискретизатор, где превращается в последовательность отсчетов с шагом  $\Delta t \leq 1/2F_B$ :  $S_0 = S(0)$ ;  $S_1 = S(\Delta t)$ ;  $S_2 = S(2\Delta t)$ ; ...  $S_i = S(i\Delta t)$ ;
- совокупность отсчетов (произвольных по уровню) поступает на квантователь, который округляет значение отсчета до ближайшего разрешенного уровня:  $S_0 \rightarrow \Delta S$ ;  $S_1 \rightarrow 3\Delta S$ ;  $S_2 \rightarrow 10\Delta S$ ; ...;  $S_i \rightarrow k\Delta S$ , где  $\Delta S$  – шаг квантования по напряжению (квант). Устанавливается правило квантования, например округление значения до ближайшего целого числа;
- последовательность отсчетов, квантованных по уровню, заменяется на последовательность кодовых комбинаций, каждая из которых соответствует одному разрешенному уровню. Для кодирования уровней используется, например, код Бодо (равномерный, безызбыточный). Чем больше разрядность кода  $n$ , тем короче отдельные элементы сигнала  $\Delta \tau = \Delta t / n$ , тем широкополоснее сигнал на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- радиопередающее устройство осуществляет объединение сигналов от нескольких каналов, модуляцию и непосредственную передачу сигнала.

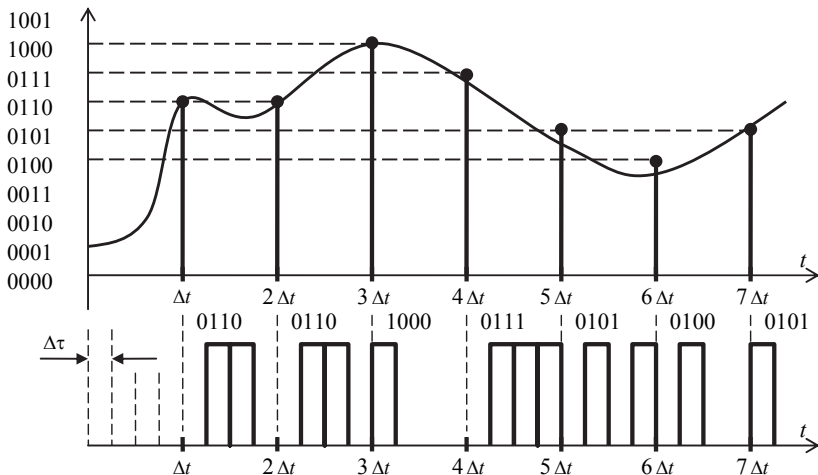


Рис. 18. Принцип формирования сигнала в системе с ИКМ

## ОШИБКИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ИНФОРМАЦИИ В КАНАЛАХ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ

Системы с ИКМ подвержены трем специфическим разновидностям ошибок, в совокупности определяющих качество связи.

### Ошибки дискретизации

Ошибки дискретизации  $P_{д}$  связаны с нарушением теоремы Котельникова и вызваны неограниченным спектром реальных сообщений (рис. 19). Эти ошибки относятся не только к системам с ИКМ, но и ко всем системам, использующим дискретизацию, т. е. ко всем системам с ВРК.

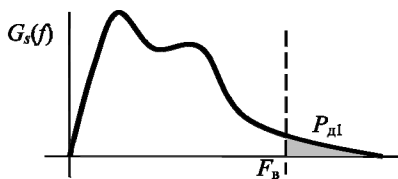


Рис. 19. СПМ аналогового сигнала

$$P_{д1} = \int_{F_B}^{\infty} G_S(f) df$$

– доля потерянной мощности полезного сообщения при искусственном ограничении спектра.

$P_{\text{д}} = 2 P_{\text{д1}}$  – состоит из доли полезного сообщения при искусственном ограничении спектра и из доли мощности, потерянной при фильтрации составляющих, являющихся помехой для полезного сигнала (рис. 20).

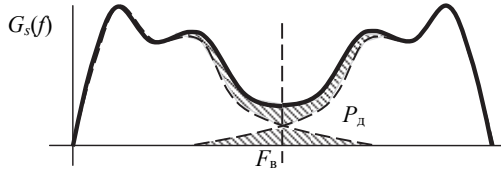


Рис. 20. СПМ дискретного сигнала

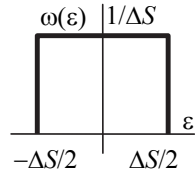
Относительная ошибка дискретизации:

$$\delta_{\text{д}}^2 = 2 \left( \int_{F_{\text{в}}}^{\infty} G_S(f) df \right) \left( \int_0^{\infty} G_S(f) df \right)^{-1}.$$

Уменьшить ошибку можно путем предварительной фильтрации (постановка ФНЧ).

### Ошибки квантования

Пусть при квантовании происходит замена точных значений отсчетов на ближайший уровень квантования  $S(t_i) = S_i$ . Ошибка составляет  $\varepsilon_i = S_i - S(t_i)$ , причем  $-0.5\Delta S < \varepsilon_i < 0.5\Delta S$ , и закон распределения ошибки является *равномерным*.



Математическое ожидание ошибки квантования  $m(\varepsilon) = 0$ .

Дисперсия:

$$D(\varepsilon) = \overline{\varepsilon^2} = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon^2 \omega(\varepsilon) d\varepsilon = \int_{-\Delta S/2}^{\Delta S/2} \frac{\varepsilon^2}{\Delta S} d\varepsilon = \frac{\varepsilon^3}{3 \cdot \Delta S} \Big|_{-\Delta S/2}^{\Delta S/2} = \frac{\Delta S^2}{12}.$$

Относительная дисперсия ошибки квантования:  $\delta_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{P_{\text{кв}}} = \frac{D(\varepsilon)}{P_{\text{с}}}$ .

Вводится понятие пик-фактора как статистической числовой мощ-

ностной характеристики сигнала:  $K_{\Pi}^2 = \frac{P_{c \max}}{P_{c \text{ ср}}}$  – это пик-фактор по мощности,

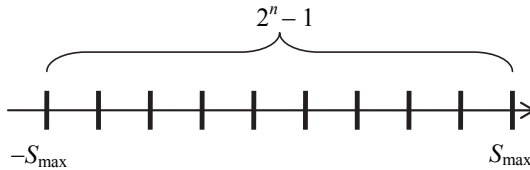
$$P_c = \frac{P_{c \max}}{K_{\Pi}^2}, \quad \delta_{\text{КВ}}^2 = \frac{\Delta S^2 K_{\Pi}^2}{12 P_{c \max}}, \quad P_{c \max} = S_{\max}^2.$$

Величина кванта однозначно связана с разрядностью использующегося кода.

Общее количество слов:  $N = 2^n$ .

Количество промежутков:  $k = 2^n - 1$ .

Величина кванта:  $\Delta S = \frac{2S_{\max}}{2^n - 1}$ .

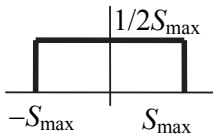


Относительная дисперсия ошибки квантования:

$$\delta_{\text{КВ}}^2 = \frac{4S_{\max}^2}{(2^n - 1)^2} \frac{K_{\Pi}^2}{12 P_{c \max}} = \frac{K_{\Pi}^2}{3(2^n - 1)^2}.$$

*Пример:* рассмотрим случай, когда сигнал равномерно распределен по всей области своих значений.

Дисперсия сигнала:



$$\sigma_S^2 = \int_{-S_{\max}}^{S_{\max}} S^2 \frac{1}{2S_{\max}} dS = \frac{S_{\max}^2}{3} = \frac{P_{c \max}}{3}.$$

Так как  $\sigma_S^2 = P_c$ , то  $P_c = P_{c \max} / 3$ , т. е.  $K_{\Pi}^2 = 3$  (для равномерного распределения), а значит,  $\sigma_{\text{КВ}}^2 = (2^n - 1)^{-2}$ . При  $n \gg 1$  получаем  $\sigma_{\text{КВ}}^2 = 2^{-2n}$ , а  $q^2 = 2^{2n}$ . ■



*Ошибки, связанные с действием шума в канале связи*

Пусть в канале связи имеется цифровая информация (поток битов) и аддитивный шум. В приемном устройстве из-за действия шума может возникнуть ошибочная ситуация: «0» воспринимается как «1»; «1» воспринимается как «0».

Таким образом, ошибки демодулятора – это механизм снижения качества цифровой связи.

Решение	$S_1(t) + U_{\text{ш}}(t) \rightarrow S_0(t)$	$S_0(t) + U_{\text{ш}}(t) \rightarrow S_1(t)$	$S_0(t) + U_{\text{ш}}(t) \rightarrow S_0(t) ;$ $S_1(t) + U_{\text{ш}}(t) \rightarrow S_1(t)$
Ошибка	$\xi = 1 - 0 = 1$	$\xi = 0 - 1 = -1$	$\xi = 0$

Если рассматривать ошибки, предполагая, что  $p_0 = p_1 = 0.5$ ,  $p_{01} = p_{10} = p_{\text{ош}}$ , где  $p_{\text{ош}}$  – вероятность битовой ошибки, то  $p(\xi = 1) = p_1 p_{10} = 0.5 p_{\text{ош}}$  и  $p(\xi = -1) = p_0 p_{01} = 0.5 p_{\text{ош}}$ . Полная вероятность ошибки:  $p_{\text{ош}\Sigma} = p(\xi = 1) + p(\xi = -1) = p_1 p_{10} + p_0 p_{01} = p_{\text{ош}}$ . Легко видеть, что математическое ожидание ошибки  $m_\xi = 0$ , дисперсия ошибки  $d_\xi^2 = p_{\text{ош}}$ . Вместо кода ЦАП выдает значения  $S_i$  (амплитуда импульса):

$$S_i = \Delta S \sum_{i=1}^n a_i \cdot 2^{i-1}, \text{ где } a_1 a_2 \dots a_n \text{ – двоичное слово, } a_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, 2^i - 1 \text{ –}$$

цена разряда. Ошибки на выходе ЦАП определяются ошибками демодулятора.

$$\eta = \Delta S \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot 2^{i-1} \text{ – шумовая составляющая амплитуды импульса.}$$

Дисперсия шума:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ш}}^2 &= P_{\text{ш}} = \overline{\eta^2} = \Delta S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \overline{\xi_i \cdot \xi_j} \cdot 2^{i-1} \cdot 2^{j-1} = \\ &= \Delta S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{\xi}^2 \delta_{ij} 2^{i-1} 2^{j-1} = \sigma_{\xi}^2 \Delta S^2 \sum_{i=1}^n 2^{2(i-1)} = P_{\text{ош}} \Delta S^2 \frac{2^{2n} - 1}{3}. \end{aligned}$$

Здесь  $\overline{\xi_i \xi_j}$  – корреляция для потока битовых ошибок. При  $n \gg 1$  имеем  $\Delta S \approx 2S_{\max} 2^{-n}$ ,

$$P_{\text{ш}} = P_{\text{ош}} \left( 2S_{\max} 2^{-n} \right)^2 \frac{2^{2n} - 1}{3} = \frac{4}{3} P_{\text{ош}} S_{\max}^2.$$

Относительная ошибка, вызванная действием шума в канале:  $\delta_{\text{ш}}^2 = \frac{P_{\text{ш}}}{P_c} = \frac{4}{3} P_{\text{ош}} K_{\text{п}}^2$ . Для равновероятного распределения  $\delta_{\text{ш}}^2 = 4P_{\text{ош}}$ .

Таким образом, влияние шума на качество связи выражается только через вероятности ошибок  $P_{\text{ош}}$ , выдаваемых демодулятором. Процесс образования ошибок в цифровой связи носит импульсный характер в отличие от систем аналоговой связи, где шум является непрерывным процессом. Частота импульсной помехи зависит от качества канала связи. В качественных системах связи необходимо иметь  $P_{\text{ош}} \ll 1$ . Наихудшими свойствами обладает система  $P_{\text{ош}} = 0.5$ .

#### *Общий анализ ошибок в системе с ИКМ*

Мощность шума (ошибки) на выходе системы с ИКМ определяется по выражению  $P_{\text{ош}} = P_{\text{д}} + P_{\text{кв}} + P_{\text{ш}}$ . Относительная ошибка

$\delta_{\text{ош}}^2 = \frac{P_{\text{ош}}}{P_c} = \delta_{\text{д}}^2 + \delta_{\text{кв}}^2 + \delta_{\text{ш}}^2$ . Отношение сигнал-шум на выходе системы

$$q_{\text{вых}}^2 = \frac{1}{\delta_{\text{ош}}^2} = \frac{P_{\text{ош}}}{P_c} = \frac{1}{\delta_{\text{д}}^2 + \delta_{\text{кв}}^2 + \delta_{\text{ш}}^2}.$$

При использовании ИКМ в системах дальней радиосвязи происходит накопление ошибок, вызванных действием шума в канале связи, поэтому требуется обеспечить систему с малой вероятностью битовой ошибки на каждом участке связи. Наибольший вклад вносит относительная дисперсия ошибки квантования. Обычно при расчете полагают, что [5]

$$\delta_{\text{д}}^2 + \delta_{\text{ш}}^2 \approx (10 \dots 15) \% \delta_{\text{ош}}^2, \quad \delta_{\text{кв}}^2 \approx (85 \dots 90) \% \delta_{\text{ош}}^2.$$

Одним из способов уменьшения ошибки квантования является увеличение разрядности АЦП (уменьшение величины кванта). Плата за уменьшение ошибок квантования:

- при увеличении разрядности АЦП происходит уменьшение длительности одного бита, что влечет за собой расширение спектра сигнала;
- уменьшение длительности бита приводит к снижению энергии сигнала, что вызывает уменьшение ОСШ, а значит, возрастает относительная дисперсия ошибок, вызванных действием шума в канале.

*Пример:* сначала использовали 7-разрядный АЦП, затем заменили на 8-разрядный АЦП. Выигрыш по относительной дисперсии ошибок:

$$\frac{\delta_{\text{КВ}n=8}^2}{\delta_{\text{КВ}n=7}^2} = \frac{2^{14}}{2^{16}} = \frac{1}{4} \text{ (6 дБ)}.$$

Мощность сигнала при этом надо увеличить  $\Delta P = 8/7$  (0.6 дБ). Полоса спектра сигнала также увеличивается в 8/7 раз.

**Вывод:** происходит обмен качества связи на полосу, требуемую для передачи сообщения. ■

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В чем основное отличие цифровых РТС ПИ от РТС ПИ с временным разделением каналов?
2. Из-за чего возникают искажения передаваемого сигнала в системах с частотным разделением каналов и как можно их уменьшить?
3. Из-за чего возникают искажения передаваемого сигнала в системах с временным разделением каналов и как можно их уменьшить?
4. Какой механизм искажения сигнала наиболее существен в цифровых РТС ПИ?
5. При каких условиях возможно восстановление без искажения аналогового сигнала по его отсчетам?

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Какие виды модуляции сигналов могут быть использованы на первой ступени модуляции в системах с частотным разделением каналов?

2. Какие виды импульсной модуляции сигналов применяются в системах с временным разделением каналов?
3. Какие способы квантования сигналов могут быть использованы в цифровых системах?
4. Что такое помехоустойчивое кодирование и в каких системах оно применяется?

### ЗАДАЧИ

1. Рассчитать, насколько увеличится полоса цифровой системы передачи при изменении количества уровней квантования в 5 раз.
2. Рассчитать параметры группового сигнала для 7-канальной СПИ с ВРК, если  $F_B = 3.4$  кГц, в системе используется ВИМ, индекс временной модуляции  $m_{ВИМ} = 7$ . Для синхронизации используется код Баркера,  $B = 7$ , а для передачи информации – простые импульсы.
3. Рассчитать ширину спектра высокочастотного сигнала в СПИ с ЧРК, если число каналов  $N = 6$ , спектр сообщения ограничен частотой  $F_B = 3.4$  кГц, а защитный интервал  $\Delta F_3 = 2$  кГц. В системе используется однополосная амплитудная, а затем частотная модуляция с  $m_{ЧМ} = 7$ .

**Задачи для самостоятельной работы и решения на практическом занятии:** 4.1–4.26 [1].

### ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ

1. Многоканальные РТС ПИ с ЧРК: принцип построения, структурные схемы.
2. Многоканальные РТС ПИ с ЧРК: ошибки в системах с частотным разделением.
3. Многоканальные РТС ПИ с ВРК: принцип построения, структурные схемы.
4. Многоканальные РТС ПИ с ВРК: ошибки в системах с временным разделением.
5. Цифровые многоканальные РТС ПИ: принцип ВРК, особенности построения систем с ИКМ.
6. Цифровые многоканальные РТС ПИ: структурные схемы, ошибки в цифровых РТС ПИ.

**ЛЕКЦИЯ 6. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ  
В СИСТЕМАХ СВЯЗИ. ЛЧМ-СИГНАЛЫ  
ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ  
НА ОСНОВЕ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИИ  
ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫЕ БИНАРНЫЕ  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ. M-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ  
КОДЫ ГОЛДА**

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

Широкополосные сигналы определяются через базу сигнала [7]  $B = \Delta f_c \tau_c$ , где  $\Delta f_c$  – полоса частот (ширина спектра) сигнала;  $\tau_c$  – длительность сигнала. Для простых сигналов  $B \approx 1$ . Для широкополосных сигналов  $B \gg 1$ .

*Пример:* радиоимпульс (рис. 21)

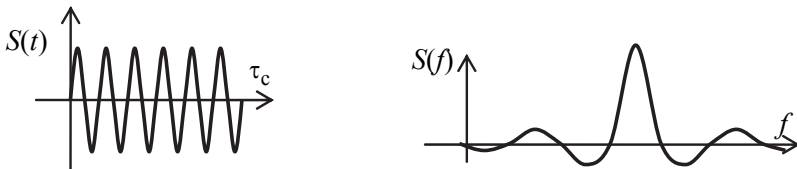


Рис. 21. Простой радиосигнал: временное и частотное представление

Для прямоугольного радиоимпульса ширина спектра по первым нулям определяется длительностью импульса  $\Delta f_c \approx \tau_c^{-1}$ , тогда база  $B = \Delta f_c \tau_c = 1$ . Простой сигнал является однопараметрическим. С помощью такого сигнала нельзя перейти к сложным сигналам, так как сложные сигналы имеют больше степеней свободы. ■

В цифровой системе связи:  $\tau_c$  – длительность одного бита;  $V = 1/\tau_c$  – число бит, переданных за одну секунду (техническая скорость передачи информации);  $B = \Delta f_c/V$  – соотношение между полосой частот сигнала и скоростью передачи. Фактически  $V$  – это полоса сообщения.

## ЛЧМ-СИГНАЛЫ

ЛИНЕЙНО ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫЙ (ЛЧМ) СИГНАЛ – это сигнал с линейным изменением частоты внутри импульса:

$$S(t) = \begin{cases} S_0 \sin(2\pi f_0 t + bt^2), & 0 \leq t \leq \tau_{\text{и}}, \\ 0, & t < 0, t > \tau_{\text{и}}. \end{cases}$$

Здесь  $b = \pi \Delta f_{\text{д}} / \tau_{\text{и}}$  – крутизна ЛЧМ;  $\Delta f_{\text{д}}$  – девиация частоты (наибольшее отклонение мгновенной частоты модулированного радиосигнала при частотной модуляции от значения его несущей частоты), которая определяет ширину спектра радиосигнала.

При оптимальной обработке ЛЧМ-импульса сигнал после согласованного фильтра имеет длительность, меньшую в  $B$  раз, чем входной сигнал (рис. 22).

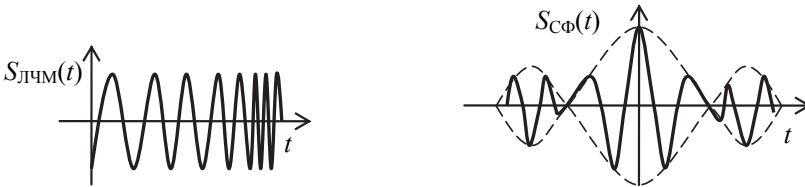


Рис. 22. ЛЧМ-сигнал и его сжатая форма после согласованного фильтра

Достоинства ЛЧМ-сигналов:

- энергия ЛЧМ-импульса увеличивается за счет длительности сигнала, а не за счет повышения его амплитуды;
- улучшается условие наблюдения сигнала на фоне помехи за счет согласованной фильтрации в приемнике (после согласованного фильтра увеличивается ОСШ);
- сжатие импульса по времени приводит к увеличению точности оценки его временного положения (улучшение синхронизации, увеличение разрешающей способности).

## ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ НА ОСНОВЕ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИИ

Для формирования широкополосных сигналов в цифровых системах передачи информации широко используется бинарная модуляция (фаза принимает значение 0 и  $\pi$ ):

$$S(t) = S_l(t) \cos(\omega_0 t + \pi f_l(t)),$$

где  $f_l(t)$  – бинарная функция, принимающая значения 0 или 1;  $l$  – номер функции;  $S_l(t)$  – информационное сообщение, принимающее значение +1 или -1.

В итоге (рис. 23) получаем сигнал, сформированный двумя управляющими сигналами. Ширина спектра такого сигнала  $\Delta f_c = \tau_0^{-1}$ , где  $\tau_0$  – длительность импульса. Длительность кодовой комбинации  $\tau_c = n\tau_0$ . База такого сигнала  $B = \Delta f_c \cdot \tau_c = \tau_0^{-1} \cdot n \cdot \tau_0 = n$ .

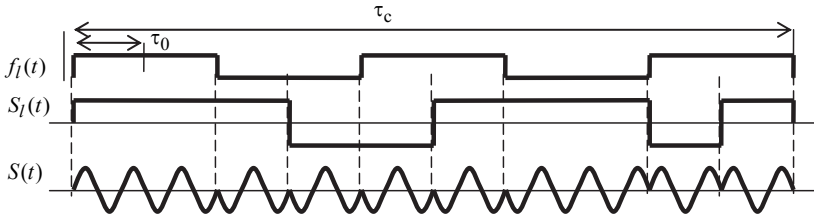


Рис. 23. Пример формирования сигнала при бинарной модуляции

Если ввести комплексный сигнал  $\dot{S}(t) = S_l(t)e^{j(\omega_0 t + \pi f_l(t))} = S_l(t)e^{j\omega_0 t} e^{j\pi f_l(t)}$ , то  $S(t) = \text{Re}\{\dot{S}(t)\}$ .

Комплексная огибающая

$$\dot{S}_l(t) = S_l(t)e^{j\pi f_l(t)} = S_l(t)[\cos \pi \cdot f_l(t) + j \sin \pi f_l(t)] = S_l(t)a_l(t),$$

$$\dot{S}(t) = S_l(t)a_l(t)e^{j\omega_0 t},$$

$$S(t) = \text{Re}\{\dot{S}(t)\} = S_l(t)a_l(t) \cos \omega_0 t.$$

Таким образом, фазовую манипуляцию, выраженную в изменении  $f_l(t)$ , можно заменить на амплитудную манипуляцию при помощи множителя  $a_l(t)$ , при этом между ними существует однозначная связь, выраженная в таблице:

$f_l(t)$	1	0
$a_l(t)$	-1	1

Одно из назначений такой манипуляции – использование в цифровых системах со свободным доступом к каналам, т. е. *асинхронно-адресных системах связи* (ААСС) (рис. 24).

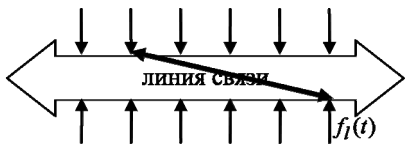


Рис. 24. Организация ААСС

Количество абонентов определяется числом  $l$ . Для связи используются:  $f_l(t)$  (или  $a_l(t)$ ) – адресный сигнал;  $S_l(t)$  – информационный сигнал (случайный);  $S_l(t)a_l(t)$  – битовый поток.

В системах со свободным доступом в канале присутствует много сигналов на частоте  $\omega_0$ . Максимальное число сигналов  $l$ .  $k$ -й получатель должен из всего информационного потока выделить «свой» сигнал. Все остальные сигналы являются помехой. Все сигналы имеют похожую структуру:  $S_k(t) = S_k(t - \tau_k)a_k(t - \tau_k)\cos(\omega_0 t - \varphi_k)$ , здесь  $\tau_k$  – параметр асинхронности. Тогда помеха

$$N = \sum_{i=1, i \neq k}^l S_i(t).$$

В ААСС применяется корреляционный прием (рис. 25).

Реакция приемника на «свой» сигнал должна быть синхронной и синфазной, т. е. должна иметь место фазовая, тактовая и цикловая синхронизация. На выходе корреля-

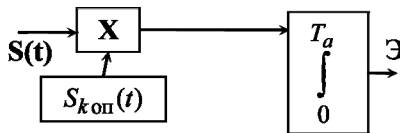


Рис. 25. Корреляционный приемник, используемый в ААСС



лятора максимум сигнала равен энергии сигнала. При поступлении «чужого» сигнала ( $i \neq k$ ) вычисляется ВКФ, т. е. выходной эффект пропорционален:

$$B_{ik}(\tau_k) = \int_0^{T_a} S_i(t) S_{k \text{оп}}(t - \tau_k) dt = \int_0^{T_a} a_i(t) a_k(t - \tau_k) dt.$$

Максимум значений этого интеграла меньше значений АКФ:

$$\sum_{i=1, i \neq k}^l B_{ik}(\tau_k) \ll \mathcal{E}.$$

Если это соотношение выполняется, то система работает эффективно.

Требования к виду сигналов  $a_i(t)$ :

- АКФ должна быть максимально обостренной при нулевых сдвигах  $\tau_k$ ;
- значения ВКФ должны быть как можно меньше при *любых* сдвигах  $\tau_k$ .

### ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫЕ БИНАРНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ M-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Эффективность ААСС характеризуется свойствами ансамбля сигналов.

$$a_1(t), a_2(t), a_3(t), \dots, a_Q(t) \leftrightarrow f_1(t), f_2(t), f_3(t), \dots, f_Q(t).$$

Степень широкополосности сигнала связана с периодом последовательности непосредственно:  $B = N$ . Период также является определяющим для корреляционных свойств. Чем больше период, тем выгоднее использовать комбинацию. Разные периоды получаются выбором разных обратных связей в схеме.

Важным вопросом является количество различных сигналов в системе, так как оно определяет емкость системы связи (количество абонентов, способных одновременно занимать канал). В зависимости

от количества сигналов все системы разделяются на системы малого объема  $Q \ll N$ , нормальные системы  $Q \approx N$ , системы большого объема  $Q \gg N$ .

Для  $M$ -последовательностей объем системы определяется по формуле [5]  $Q = \frac{\varphi(2^n - 1)}{n}$ , где  $\varphi(x)$  – функция Эйлера.

*Пример:* для  $N = 7$ ,  $Q = 2$  (малая система сигналов). ■

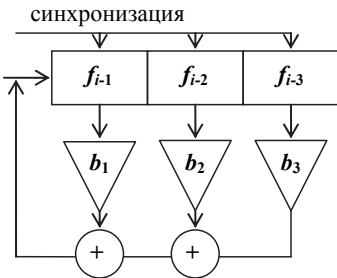
Обычно для малых  $n$  системы сигналов – малого объема.

К системе сигналов, которые могут быть использованы в многоканальных системах передачи информации, предъявляются следующие требования: хорошие корреляционные свойства; нормальный или большой объем системы.

Наиболее широкое распространение получил рекуррентный принцип генерирования сигналов  $f(t)$ . Принцип рекуррентности:  $f_i = f_{i-1}b_1 + f_{i-2}b_2 + f_{i-3}b_3 + \dots + f_{i-n}b_n$ . Текущее значение битовой последовательности формируется при помощи  $n$  предшествующих отсчетов этой же функции. Коэффициенты  $b_k$  являются константами для данной кодовой комбинации (принимают значения «0» и «1»). Число  $n$  определяет глубину рекурсии, его называют порядком рекуррентного соотношения (порядком кодовой комбинации).

Генератор псевдослучайной последовательности строится на основе сдвигового регистра, содержащего  $n$  разрядов.

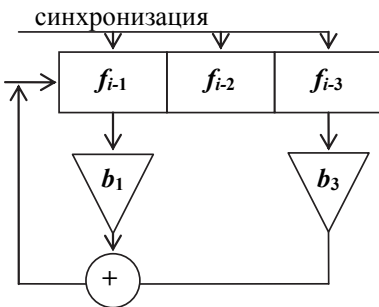
*Пример:*  $n = 3$ .



i	$b_k$			$f_i$
	1	1	1	
	$f_{i-1}$	$f_{i-2}$	$f_{i-3}$	
0	0	1	1	<b>0</b>
1	0	0	1	<b>1</b>
2	1	0	0	<b>1</b>
3	1	1	0	<b>0</b>
4	0	1	1	<b>0</b>

Исходное состояние системы определяется заданием состояний разрядов сдвигового регистра. Коэффициент  $b_n$  всегда равен 1. Управление работой сдвигового регистра осуществляется тактовыми импульсами. Полученное значение  $f_i$  поступает на сдвиговой регистр. Имеющиеся в нем значения сдвигаются вправо на один разряд, а в первую ячейку записывается значение  $f_i$ . Значение последней ячейки стирается. Процесс продолжается до тех пор, пока не получают первоначальное значение сдвигового регистра. Полученная последовательность является периодической, так как число различных состояний регистра ограничено и определяется разрядностью сдвигового регистра:  $N = 2^n$ . Состояние, когда все биты равны нулю, является вырожденным (так как при этом нет генерации), а значит, период:  $N = 2^n - 1$ . Последовательность, полученная в примере, имеет период меньше, чем  $N$ , а значит, не является последовательностью максимальной длины ( $M$ -последовательностью). Влиять на период можно при помощи коэффициентов  $b_k$ .

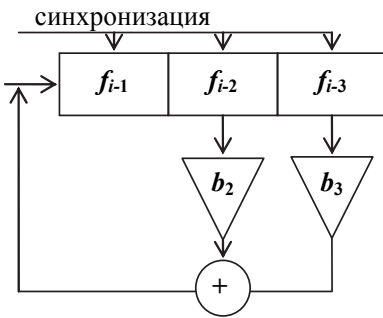
Пример:  $n = 3$ .



1	$b_k$			$f_i$
	1	0	1	
	$f_{i-1}$	$f_{i-2}$	$f_{i-3}$	
0	0	1	1	1
1	1	0	1	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	1
4	1	0	1	0
5	0	1	1	1
6	1	1	0	0
7	0	1	1	1

Получившаяся в примере последовательность является последовательностью максимальной длины, так как ее длина является  $N = 7$ . При изменении исходного состояния сдвигового регистра  $M$ -последовательность сдвигается по времени. Вид коэффициентов  $b_k$  влияет на вид получаемой последовательности. Изменяя  $b_k$ , можно получить различные  $M$ -последовательности.

Пример:  $n = 3$ .



$i$	$b_k$			$f_i$
	0	1	1	
	$f_{i-1}$	$f_{i-2}$	$f_{i-3}$	
0	0	1	1	0
1	0	0	1	1
2	1	0	0	0
3	0	1	0	1
4	1	0	1	1
5	1	1	0	1
6	1	1	1	0
7	0	1	1	0

Рассмотрим корреляционные свойства  $M$ -последовательностей. Пусть имеются две последовательности  $S_k(i)$  и  $S_l(i)$ , где  $i$  – дискретное время;  $k, l$  – номера сигналов. ВКФ находится по уравнению

$$B_{kl}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_k(i) \oplus S_l(i + \tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_k(i) a_l(i + \tau).$$

Максимум автокорреляционной функции:

$$B_{kk}(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_k(i) a_k(i) = 1.$$

Следует различать функции корреляции одиночной  $M$ -последовательности и периодически повторяющихся последовательностей. Для одиночных сигналов и АКФ, и ВКФ точно равны нулю при  $|\tau| \geq N$ . Для периодических сигналов всегда есть составляющие. АКФ и ВКФ являются периодическими функциями с периодом  $N$ .

Особенности АКФ  $M$ -последовательностей:

- ширина основного пика АКФ равняется длительности одного элемента (происходит сжатие в  $N$  раз по сравнению со входом);
- после главного пика есть боковые лепестки.

Пример: Найдем АКФ последовательности 0101110.

$\tau$					1	-1	1	-1	-1	-1	1								
-7	-1	-1	-1	1															
-6	1	-1	-1	-1	1														
-5	-1	1	-1	-1	-1	1													
-4	1	-1	1	-1	-1	-1	1												
-3		1	-1	1	-1	-1	-1	1											
-2			1	-1	1	-1	-1	-1	1										
-1				1	-1	1	-1	-1	-1	1									
0					1	-1	1	-1	-1	-1	1								
1						1	-1	1	-1	-1	-1	1							
2							1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1					
3								1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1				
4									1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1			
5										1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1		
6											1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	
7												1	-1	1	-1	-1			
АКФ	0	1/7	-2/7	1/7	-2/7	1/7	-2/7	7/7	-2/7	1/7	-2/7	1/7	-2/7	1/7	-2/7	1/7	0		
$\tau$	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7				

Аналогично вычисляется АКФ для периодической последовательности и ВКФ (рис. 26). ■

После нормировки величина боковых лепестков пропорциональна  $1/\sqrt{N}$ . Для периодической  $M$ -последовательности за пределами главного пика присутствует постоянный уровень, равный  $1/N$ . ВКФ также имеет пики, что является недостатком, из-за которого переходят к кодам, построенным на основе  $M$ -последовательностей с определенным видом АКФ.

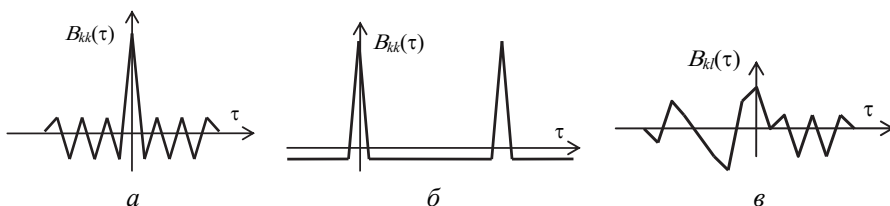


Рис. 26. АКФ одиночной (а) и периодической (б)  $M$ -последовательности, ВКФ  $M$ -последовательностей (в)

## КОДЫ ГОЛДА

Коды Голда принадлежат к числу производных кодов. Они являются вторичными кодами, построенными на основе  $M$ -последовательностей. Коды Голда имеют похожие корреляционные свойства. Коды Голда приемлемы для систем связи с многостанционным доступом. Основным достоинством этих кодов является нормальный объем сигналов, поэтому они пригодны для систем связи с большим количеством абонентов.

Для формирования семейства кодов Голда используются две разные  $M$ -последовательности (получающиеся при различных видах обратной связи)

$$\left. \begin{array}{l} a_k(i) \\ a_l(i) \end{array} \right\} a_{\Gamma j}(i) = a_k(i)a_l(i+j),$$

где  $j$  – номер кодовой комбинации Голда ( $j = [0, Q-1]$ ). В силу периодичности  $a_k(i)$  и  $a_l(i)$   $a_{\Gamma j}(i)$  получается периодической с тем же периодом. Всего можно построить  $N+2$  сигналов кода Голда. Не любую пару  $M$ -последовательностей можно использовать для генерации кодов Голда, так как корреляционные свойства кодов Голда эквивалентны корреляционным свойствам  $M$ -последовательностей только при определенном виде ВКФ образующих  $M$ -последовательностей. ВКФ двух периодических  $M$ -последовательностей должна быть **трехуровневая** (рис. 27).

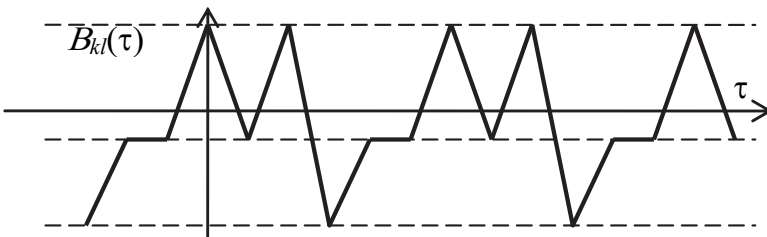


Рис. 27. Пример трехуровневой ВКФ двух  $M$ -последовательностей, образующих код Голда

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В чем состоит основное отличие широкополосных сигналов от простых?
2. Из-за чего происходит увеличение ОСШ после согласованной обработки ЛЧМ-сигнала?
3. Какие широкополосные сигналы применяются в цифровых системах?

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. В каких радиотехнических системах используются широкополосные сигналы?
2. Каким образом осуществляется генерация ЛЧМ-импульсов в СВЧ технике?

## ЗАДАЧИ

1. По рекуррентному уравнению  $f_i = f_{i-1} + f_{i-3} + f_4$  рассчитать последовательность. Является ли она последовательностью максимальной длины?
2. Рассчитать ВКФ последовательностей 1001110 и 0101110.
3. Определить базу ЛЧМ сигнала, если девиация частоты  $\Delta f_d = 1$  кГц, длительность импульса 15 мкс.

## ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ

1. Применение широкополосных сигналов в радиотехнических системах. ЛЧМ-сигналы.
2. Широкополосные сигналы на основе фазовой манипуляции. Псевдослучайные бинарные последовательности:  $M$ -последовательности, коды Голда.

## **ТЕМА 3. СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИИ**

### **ЛЕКЦИЯ 7. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАКТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЛС СИГНАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РЛС КЛАССИФИКАЦИЯ РЛС**

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (РЛС) – это системы, которые служат для обнаружения объектов в пространстве, измерения их координат и параметров движения с помощью радиотехнических средств.

Получение информации в РЛС сопряжено с наблюдением некоторой области пространства при помощи радиолокационных станций или радиолокаторов. Наблюдаемые объекты называются радиолокационными целями. Типичными целями являются самолеты, ракеты, корабли, наземные инженерные сооружения и пр.

Информационными параметрами в радиолокации являются:

- дальность между целью и радиолокатором  $R$  ;
- угловые координаты объекта:
- азимут  $\alpha$  – угол между направлением на цель и северным направлением, измеренный в горизонтальной плоскости;
- угол места  $\beta$  – угол между вектором наклонной дальности и его проекцией на горизонтальную плоскость;
- радиальная (относительно радиолокатора) составляющая скорости движения объекта  $V$  .

В задачу радиолокационного наблюдения иногда входит также задача распознавания целей.

Высота цели определяется по формуле  $h = R \sin \beta$  . Координаты цели на горизонтальной поверхности земли находятся из соотношений:  $x = R \cos \beta \sin \alpha$  ,  $y = R \cos \beta \cos \alpha$  .



## ТАКТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЛС

- Зона действия – это область пространства, в которой РЛС выполняет свое назначение. Обычно это максимальная дальность действия системы.

- Измеряемые координаты и точность их измерения определяются назначением РЛС, существуют одно-, двух- и трехкоординатные РЛС. Погрешности измерения координат ограничивают возможности использования РЛС. Обычно увеличение точности ведет к усложнению конструкции системы.

- Разрешающая способность характеризует возможность раздельного наблюдения нескольких целей и измерения их параметров. Различают разрешающую способность по дальности, по направлению и по скорости. Цели, не разрешаемые ни по дальности, ни по направлению, ни по скорости, воспринимаются радиолокатором как одна цель.

- Помехозащищенность характеризует способность РЛС выполнять свои функции при воздействии помех.

- Пропускная способность определяется плотностью потока обрабатываемых с заданной точностью целей.

- Время развертывания – время приведения РЛС в рабочее состояние.

- Надежность определяется вероятностью выхода РЛС из строя или длительностью безотказной работы.

Тактические характеристики определяются техническими характеристиками РЛС: способом обзора пространства; формой и шириной ДНА<sup>1</sup>; видом модуляции зондирующих сигналов; способом обработки сигналов в приемнике; методом измерения координат; несущей частотой излучаемых колебаний; мощностью передатчика; чувствительностью приемника; габаритами, массой аппаратуры; потребляемой энергией.

## СИГНАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РЛС

Большое значение для обеспечения заданной помехоустойчивости и разрешающей способности имеют структура зондирующего сигнала и способ модуляции. В РЛС применяются следующие типы сигналов.

---

<sup>1</sup> ДНА – диаграмма направленности антенны.

### **Непрерывные (квазинепрерывные):**

- высокое разрешение по скорости;
- трудность развязки приемного и передающего тракта, необходимость отдельных антенн передатчика и приемника.

*Область применения:* доплеровские измерительные системы и высотомеры.

### **Импульсные:**

- большая мощность импульса;
- хорошая помехозащищенность;
- высокое разрешение по дальности;
- работа на одну антенну.

*Область применения:* РЛС обзорного и координатного типа.

### **Комбинированные и ЛЧМ<sup>2</sup> сигналы:**

- высокое разрешение по дальности и скорости;
- возможность использования согласованных фильтров, позволяющих выделять сигналы на фоне сильных помех.

*Область применения:* РЛС с большой дальностью обнаружения.

### **Последовательности (пачки) импульсов:**

- возможность использования фильтров-накопителей и гребенчатых узкополосных фильтров, выявляющих сигналы на фоне сильных помех.

*Область применения:* РЛС с большой дальностью обнаружения.

## **КЛАССИФИКАЦИЯ РЛС**

### **В зависимости от наличия источников излучения**

РЛС	Цель	
	Пассивная	Активная
Активная	Активные РЛС	Системы с активным ответом (запросные)
Пассивная	Системы пассивной радиолокации	Беззапросные системы

В активных РЛС используется явление отражения радиоволн от цели. Для того чтобы цель была обнаружена, ее отражающие свойства должны отличаться от отражающих свойств окружающей среды (цель должна обладать радиолокационным контрастом). Применение актив-

---

<sup>2</sup> ЛЧМ – линейно-частотно модулированный.

ных РЛС связано с большими энергетическими затратами, так как отраженный сигнал составляет незначительную часть излучаемого.

РЛС с активным ответом принимают переизлученные (в ответ на запрос РЛС) сигналы ответчика, установленного на цели. Благодаря тому что сигнал переизлучается, а не отражается, эти системы энергетически более выгодны, чем просто активные РЛС. К таким системам относятся военные системы радиолокационного опознавания «свой-чужой». Но наличие ответчика на борту движущегося объекта (цели) демаскирует его, что является недостатком.

В беззапросных системах на цели установлен передатчик, а РЛС осуществляет функции приема сигнала и измерения требуемых параметров. В таких системах не все параметры сигнала можно эффективно измерить, например, для точного измерения радиальной скорости и дальности РЛС и цель должны иметь высокостабильные эталонные генераторы.

Системы пассивной радиолокации используют собственное излучение объектов: например, тепловое излучение в коротковолновой части радиодиапазона или длинноволновое излучение струи ракетных двигателей, плазменных образований, облака при ядерном взрыве. К таким системам относят системы радиоастрономии, использующие радиоизлучение небесных тел. Системы пассивной радиолокации содержат лишь приемно-измерительные устройства, характеризуются малыми энергетическими затратами и высокой скрытностью. Недостатком таких систем является инерционность – необходимость значительного времени приема и/или обработки для выделения слабых сигналов на фоне помех.

## **В зависимости от назначения РЛС**

### *РЛС обзорного типа*

Задачи: наблюдение пространства, обнаружение целей и их положение относительно рельефа местности и друг друга.

Различают РЛС кругового обзора и секторальные.

### *Координатные РЛС следащего типа*

Задачи: точное измерение координат, выдача информации о движении.

Используются в системах управления зенитными ракетами, в системах управления космическими аппаратами и т. п.

### *Специализированные измерители*

К ним относятся радиовысотомеры, доплеровский измеритель вектора скорости.

### **По функциональному назначению РЛС**

#### *Некогерентные РЛС*

Задачи: определение дальности и угловых координат

#### *Когерентно-импульсные системы селекции движущихся целей*

Задачи: выделение цели по доплеровскому смещению на основе различия скоростей движения цели и помех.

#### *Некогерентные системы селекции движущихся целей*

Задачи: определение движущейся цели по разностному сигналу в системе череспериодной компенсации (сигналы задерживаются на период и вычитаются из новых сигналов)

#### *Импульсно-доплеровские РЛС*

Задачи: выделение движущихся целей на фоне отражения от земной поверхности.

Используются когерентные импульсные сигналы с большой частотой следования.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Чем отличаются азимут и угол места?
2. Какие сигналы используются в РЛС? Применяются ли цифровые сигналы?
3. Какими свойствами должна обладать цель в пассивной радиолокации?
4. Какие основные физические законы используются в радиолокации для определения радиолокационных параметров?

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

1. Каким образом определяется зона действия РЛС?
2. Как зависит ширина диаграммы направленности антенны от параметров антенны?

## ЗАДАЧИ

1. В РЛС увеличена рабочая длина волны в два раза при сохранении чувствительности приемника, дальности действия в свободном пространстве и разрешающей способности по дальности и угловым координатам. Как это повлияет на требуемую мощность передатчика РЛС?

2. В РЛС уменьшена рабочая длина волны в три раза при сохранении размеров антенны и дальности действия в свободном пространстве. Как это повлияет на разрешающую способность РЛС по угловым координатам и необходимую мощность передатчика?

3. Как изменится дальность действия РЛС, если при неизменной длине волны необходимо в два раза улучшить разрешающую способность РЛС по угловым координатам?

## ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ

1. Основные сведения об РЛС: информационные параметры, тактические характеристики.

2. Основные сведения об РЛС: используемые сигналы, классификация РЛС.

## ЛЕКЦИЯ 8. ИЗМЕРЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ В РЛС ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ В РЛС ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ИМПУЛЬСНЫЕ ДОПЛЕРОВСКИЕ РЛС

### ИЗМЕРЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ В РЛС

В основе измерения дальности в РЛС лежит свойство электромагнитной волны прямолинейно и с постоянной скоростью распространяться в однородной среде (рис. 28).

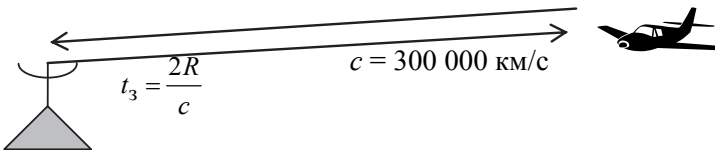


Рис. 28. Определение дальности в РЛС

## Фазовый метод

Фазовый метод основан на измерении времени запаздывания, производимом путем измерения разности фаз между модулирующими колебаниями, которые выделяются из излучаемого и принимаемого сигнала.

Пусть излучаемый сигнал описывается выражением  $U_{\text{изл}}(t) = U_0 \cos \omega_0 t$ . Тогда принимаемый сигнал запишется следующим образом:  $U_{\text{пр}}(t) = U_0 \cos \omega_0(t - t_3)$ . Разность фаз:  $\Delta\varphi = \omega_0 t_3 = \omega_0 \frac{2R}{c}$ . Дальность определяется из соотношения

$$R = \frac{\Delta\varphi c}{2\omega_0} = \frac{\Delta\varphi c}{2\pi f_0} = \frac{\lambda_0}{2} \frac{\Delta\varphi}{2\pi}$$

Поскольку для однозначного измерения разности фаз должно выполняться условие  $0 < \Delta\varphi < 2\pi$ , максимальная дальность, на которой возможно однозначное измерение фазовым методом:  $R_{\text{max}} \leq \frac{2\pi c}{2\omega_0} = \frac{\pi c}{\omega_0} = \frac{\lambda_0}{2}$ . Для однозначного измерения на расстоянии  $R_{\text{max}}$  частота должна выбираться из условия:  $\omega_0 \leq \pi c / R_{\text{max}}$ .

*Пример:* если  $R_{\text{max}} = 100$  км, то  $f_0 \leq 1,5$  кГц. Это низкие частоты, на которых невозможно осуществлять радиолокацию. ■

Достоинства и недостатки метода:

- + выбором частоты  $\omega_0$  может быть обеспечена высокая точность измерений;
- невозможность одновременно измерять дальности нескольких объектов;
- необходимость подавлять излучаемый сигнал, который поступает в качестве паразитного воздействия на вход приемника;
- сложность реализации.

*Область применения:* при измерении дальности объектов, оборудованных ретрансляторами.

## Импульсный метод

Импульсный метод основан на измерении времени запаздывания импульсов сигнала, отраженного от цели (рис. 29).

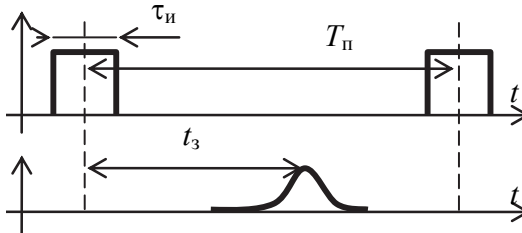


Рис. 29. Импульсный метод измерения дальности

Зондирующие сигналы следуют с периодом  $T_{п}$ . Период следования импульсов определяется из условия однозначного измерения дальности  $t_{3\max} \leq T_{п}$  и определяет максимальную дальность (зону обзора):  $R_{\max} = 0.5c T_{п}$ . При  $R > 0.5c T_{п}$  возникает ошибка, кратная  $0.5c T_{п}$ .

Время запаздывания отраженного сигнала относительно зондирующих импульсов  $t_3$  определяет дальность

до цели:  $R = 0.5c t_3$ . Разрешающая способность по дальности зависит от длительности зондирующего импульса  $\tau_{и}$ :  $\delta R = 0.5c \tau_{и}$ .

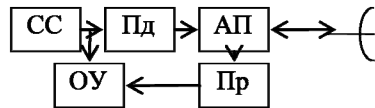
Достоинства и недостатки метода:

+ сравнительная простота конструкции, нет необходимости осуществлять развязку приемного и передающего тракта, так как используется импульсный режим излучения (рис. 30);

+ легко реализовать измерение дальности нескольких целей;

– не пригоден для измерения малых дальностей, наличие «мертвой зоны».

*Область применения:* широко применяется в РЛС различного назначения.



Пд – передатчик

Пр – приемник

АП – антенный переключатель

СС – система синхронизации

ОУ – оконечное устройство

(измеряет время запаздывания)

Рис. 30. Структурная схема импульсного измерителя дальности

## Частотный метод

Частотный метод основан на использовании непрерывного сигнала с частотной модуляцией (рис. 31). Если цель неподвижна, то частота принимаемого сигнала изменяется по тому же закону, но с запаздыванием  $t_3 = 2R/c$  (рис. 32).

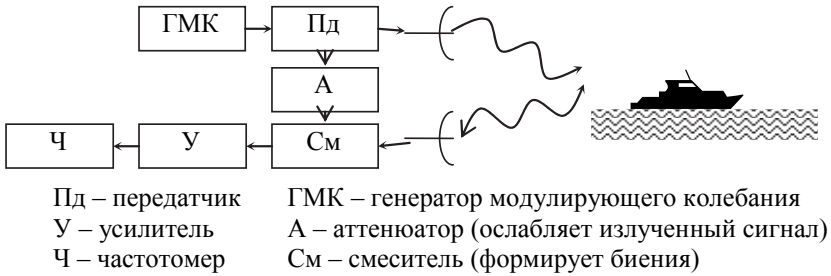


Рис. 31. Структурная схема измерителя дальности частотным методом

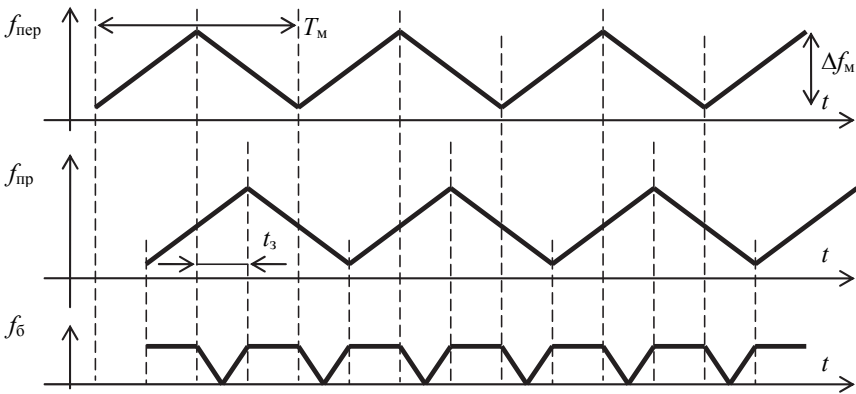


Рис. 32. Частотный метод измерения дальности неподвижной цели:

$\Delta f_M$  – девиация частоты;  $T_M = 1/F_M$  – период модуляции излучаемого колебания

Разность частот или частота биений определяется по формуле

$$f_{\text{б}} = t_3 \frac{df}{dt} = \frac{df}{dt} \frac{2R}{c},$$



где  $\frac{df}{dt} = \frac{2\Delta f_M}{T_M} = 2\Delta f_M F_M$  – скорость изменения частоты излучаемого сигнала. Получаем

$$f_0 = 2\Delta f_M F_M \frac{2R}{c} = 4\Delta f_M F_M \frac{R}{c} = 4\Delta f_M \frac{R}{T_M c}.$$

Таким образом, дальность определяется из соотношения

$$R = \frac{f_0 T_M c}{4 \Delta f_M} = \frac{f_0 c}{4 \Delta f_M F_M}.$$

Если имеется несколько неподвижных целей, то каждой цели соответствует своя частота биений. Минимальная разность частот биений двух целей, которые могут быть зафиксированы раздельно, равна  $F_M$ .

Этой разности соответствует разность расстояний:  $\Delta R = \frac{c}{4 \Delta f_M}$ .

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПО ДАЛЬНОСТИ  $\Delta R$  определяется девиацией частоты  $\Delta f_M$  или шириной спектра излучаемого сигнала:  $\Delta R = \frac{c}{4 \Delta f_M}$ .

Если цель движется, вследствие эффекта Доплера возникает дополнительное смещение частот  $f_d$  (рис. 33). При приближении цели к РЛС доплеровское смещение положительно (частота принимаемого сигнала больше, чем у зондирующего). При удалении цели доплеровское смещение отрицательно.

При  $\Delta f_M \ll f_{изм}$  (а это условие всегда выполняется) смещение постоянно за период модуляции:  $f_{01} = f_0 - f_d$  и  $f_{02} = f_0 + f_d$ , следовательно, частота биений и доплеровское смещение:  $f_0 = 0.5(f_{01} + f_{02})$ ,  $f_d = 0.5(f_{02} - f_{01})$ .

Таким образом, определив  $f_{01}$  и  $f_{02}$ , можно найти дальность цели и ее скорость:

$$R = \frac{f_0 T_M c}{4 \Delta f_M}, \quad V = \frac{f_d c}{2 f_0} = \frac{f_d \lambda_0}{2}.$$

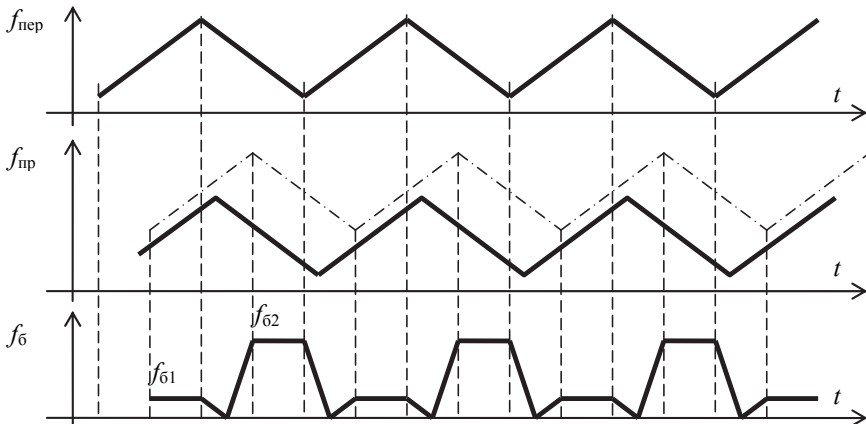


Рис. 33. Частотный метод измерения дальности подвижной цели

Приведенные соотношения справедливы только для симметричного пилообразного закона частотной модуляции.

Достоинства и недостатки метода:

- + малая пиковая мощность по сравнению с импульсным методом при высокой точности и разрешающей способности по дальности;
- + возможность измерения очень малых расстояний;
- сложность реализации при измерении дальностей нескольких объектов;
- трудность развязки приемного и передающего трактов;
- высокие требования к линейности измерения частоты при измерении дальности многих объектов.

*Область применения:* радиовысотомеры малых высот, радиодальномеры для измерения расстояний до близких целей; при измерении дальности до одного объекта может применяться гармонический закон изменения частоты, что упрощает аппаратуру.

## ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ В РЛС

### Амплитудный метод

*Метод максимума* (анализа огибающей) реализуется с помощью остронаправленной антенны. Применяется этот метод преимущественно в РЛС обзорного типа. Метод основан на том, что огибающая

амплитуд пачки импульсов принимаемого сигнала изменяется в соответствии с формой диаграммы направленности антенны и достигает максимального значения в момент времени, когда луч антенны направлен на цель. Измеренное направление определяется положением луча антенны в этот момент времени (рис. 34).

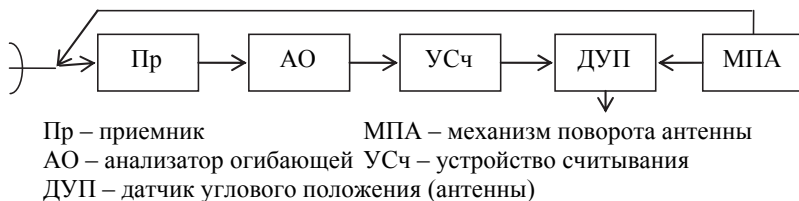


Рис. 34. Структурная схема измерителя угловых координат по максимальной амплитуде отраженного сигнала

**ПЕЛЕНГАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА** – это нормированное выходное напряжение в зависимости от угловой координаты.

В пассивном режиме пеленгационная характеристика пропорциональна диаграмме направленности антенны (ДНА), в активном – квадрату ДНА. Разрешающая способность по направлению определяется шириной пеленгационной характеристики.

Пассивный режим

$$f_{\Pi}(\alpha) = f_a(\alpha)$$

Активный режим

$$f_{\Pi}(\alpha) = f_a^2(\alpha)$$

Достоинства и недостатки метода:

+ простота технической реализации;

– относительно малая точность, которая зависит от ширины ДНА, → повышение точности требует узкой ДНА → увеличение размера раскрыва антенны и усложнение конструкции пеленгатора.

Метод сравнения реализуется с помощью направленной антенны, имеющей два пересекающихся в пространстве лепестка (рис. 35).

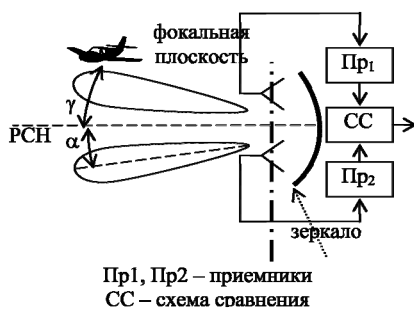


Рис. 35. Структурная схема многоканального (моноимпульсного) измерителя угловых координат

Облучатели расположены в фокальной плоскости зеркала, но смещены относительно фокуса, что приводит к отклонению максимумов лепестков ДНА от геометрической оси зеркала на угол  $\alpha_0$ .

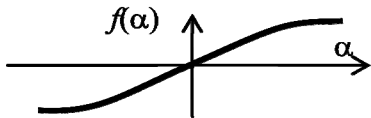


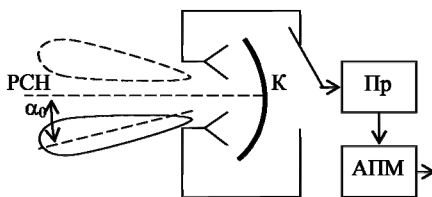
Рис. 36. Пеленгационная характеристика измерителя угловых координат по методу сравнения амплитуд

При импульсном режиме работы благодаря одновременному сравнению принятых сигналов полная информация об угловых координатах цели может быть извлечена из каждого импульса.

*Достоинство метода:* позволяет обеспечить при равных условиях более высокую точность по сравнению с методом максимума.

В одноканальном пеленгаторе (рис. 37) облучатели поочередно подключаются ко входу приемника с помощью коммутатора. Сигналы целей, смещенные относительно РСН, модулированы по амплитуде. Параметры модуляции (амплитуда и фаза) зависят от степени и стороны смещения.

Метод основан на сравнении амплитуд сигналов, принятых по этим лепесткам. При равенстве амплитуд направление на цель совпадает с равносигнальным направлением (РСН). При отклонении цели от РСН возникает сигнал рассогласования, величина которого определяется степенью отклонения  $\gamma$ . Пеленгационная характеристика показана на рис. 36.



Пр – приемник К – коммутатор  
АПМ – анализатор параметров модуляции

Рис. 37. Структурная схема одноканального измерителя угловых координат

### Фазовый метод

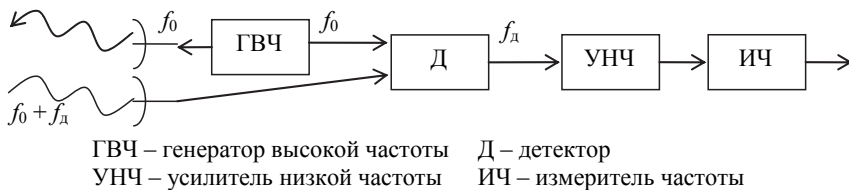
Информация о направлении извлекается из фазовых соотношений сигналов, принятых в разных точках пространства.

Фазовый метод получил большее распространение в радионавигационных системах и будет рассмотрен в соответствующем разделе.

**РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПО УГЛОВЫМ КООРДИНАТАМ** зависит от ширины диаграммы направленности антенны.

## ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Определение радиальной скорости в радиолокации основано на измерении доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала относительно частоты зондирующего сигнала (рисю. 38).



*Рис. 38.* Структурная схема измерителя радиальной скорости

Генератор высокой частоты создает незатухающие колебания с частотой  $f_0$ , которые излучаются в пространство. Часть мощности зондирующего сигнала поступает в приемный канал в качестве опорного напряжения. Отраженный от цели сигнал отличается от зондирующего

$$\text{на } f_d = f_0 \frac{2V}{c}.$$

При сложении двух колебаний с разными частотами возникают биения, проявлением которых является амплитудная модуляция суммарного сигнала с частотой  $f_d$ . Детектор выделяет огибающую биений – доплеровский сигнал, который поступает после усиления в измеритель частоты.

Для измерения скорости могут использоваться и непрерывные, и импульсные сигналы.

Непрерывные сигналы	Импульсные сигналы
Простота конструкции; однозначность измерений; отсутствие «мертвой зоны»; трудность развязки приемного и передающего тракта (две антенны); высокие требования к кратковременной стабильности частоты передатчика	Работа на одну антенну; усложнение конструкции; неоднозначность измерений; наличие «мертвой зоны»

### Импульсные доплеровские РЛС

В импульсно-доплеровских РЛС используется когерентный импульсный сигнал с большой частотой следования зондирующих

импульсов (десятки или сотни килогерц). Из-за большой частоты имеется возможность однозначно измерять доплеровскую частоту, т. е. радиальную скорость. Но период следования может быть меньше времени запаздывания сигналов от удаленной цели, в этом случае измерение дальности может быть неоднозначным.

Импульсно-доплеровские РЛС обычно устанавливаются на летательных аппаратах (самолетах, ракетах) и предназначены для обнаружения и наблюдения движущихся целей на фоне отражений от земной поверхности (рис. 39). Доплеровское смещение частоты сигнала, отраженного элементами земной поверхности, зависит от скорости движения летательного аппарата и ориентации элемента относительно РЛС:

$$f_{\text{д}} = \frac{2V}{\lambda_0} \cos \gamma.$$

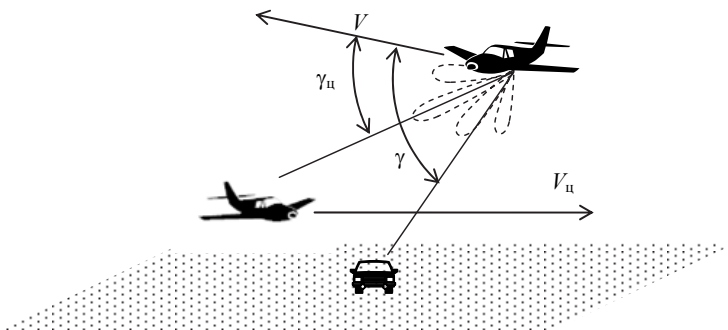


Рис. 39. К принципу работы импульсно-доплеровских РЛС

Сигналы пассивной помехи принимаются как по основному лучу ДНА, так и по боковым лепесткам, т. е. при  $\gamma = 0$  и  $\pi$   $f_{\text{дmax}} = \pm \frac{2V}{\lambda_0}$ .

Спектр пассивной помехи занимает полосу  $2f_{\text{дmax}}$ , а центр совпадает с несущей частотой  $f_0$  зондирующего сигнала (рис. 40).

Если РЛС и цель движутся на встречных курсах, то частота Доплера полезного сигнала определяется по формуле

$$f_{\text{дц}} = \frac{2(V + V_{\text{ц}})}{\lambda_0} \cos \gamma_{\text{ц}}.$$

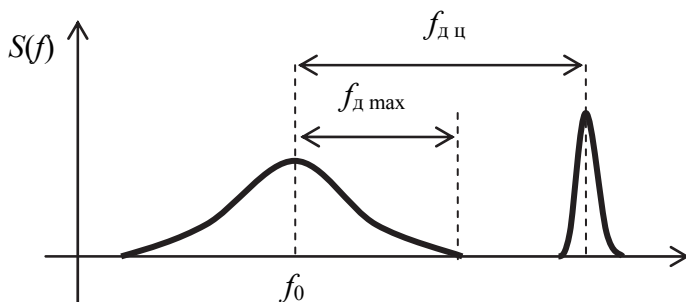


Рис. 40. Спектр наблюдаемого сигнала

Спектр последовательности зондирующих импульсов показан на рис. 41.

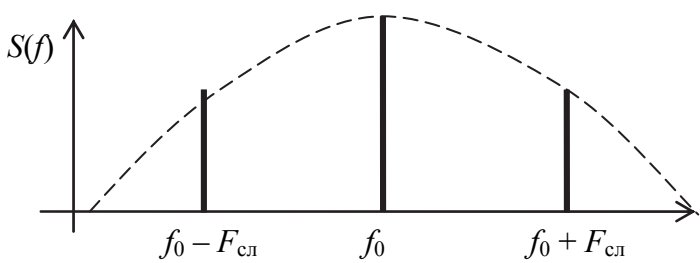


Рис. 41. Спектр последовательности зондирующих импульсов

Спектр отраженного сигнала представляет собой свертку спектра наблюдаемого сигнала со спектром зондирующих импульсов (рис. 42).

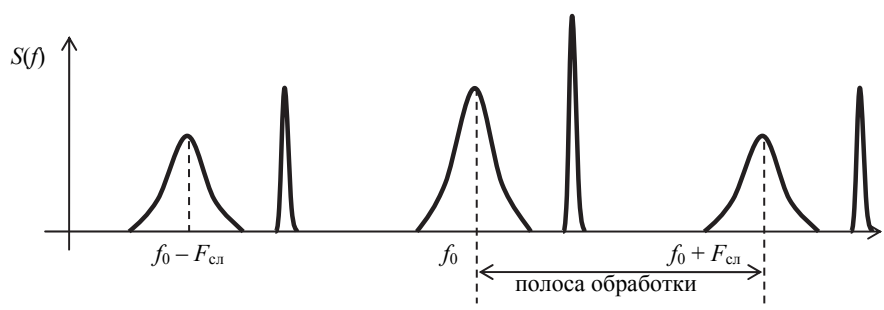


Рис. 42. Спектр отраженного сигнала

Частота следования выбирается больше возможной максимальной доплеровской частоты. Обычно рассматривается одна полоса, это приводит к энергетическим потерям, но обработка сигнала упрощается.

Обнаружить сигналы доплеровской частоты можно при помощи набора настроенных «встык» полосовых фильтров – совокупность фильтров образует многоканальный гребенчатый фильтр, перекрывающий весь диапазон возможных частот Доплера (рис. 43).

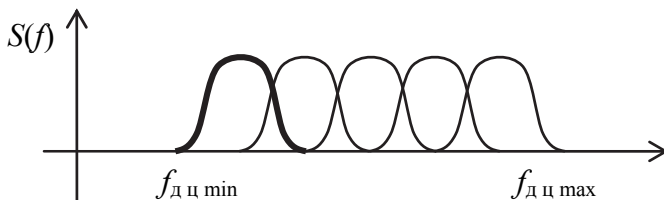


Рис. 43. Амплитудно-частотные характеристики фильтров, используемых для обработки сигналов в импульсно-доплеровских РЛС

Ширина полосы фильтра обратно пропорциональна времени накопления сигнала и определяет разрешение целей по частоте (скорости). Обнаружение происходит по превышению выходным сигналом порогового уровня. Величина частоты отождествляется с номинальным значением частоты фильтра, на выходе которого зарегистрирован полезный сигнал.

Спектр цели и пассивной помехи разделяется в гребенчатом фильтре, поэтому ОСШ не зависит от мощности помехи, что указывает на потенциально высокий эффект импульсно-доплеровских РЛС.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие преимущества есть у частотного, импульсного и фазового методов определения дальности?
2. От чего зависит разрешающая способность по дальности?
3. Как определить разрешающую способность по угловым координатам?
4. В каком режиме разрешающая способность по угловым координатам будет больше: в активном или пассивном?



## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Каким образом определяется разрешающая способность по дальности и угловым координатам в РЛС кругового обзора?
2. Что такое пропускная способность РЛС и от чего она зависит?
3. Что такое «мертвая зона» и каким образом можно ее уменьшить?

## ЗАДАЧИ

1. РЛС, использующая ЛЧМ-сигнал, измеряет дальность цели, движущейся в сторону РЛС со скоростью 600 км/ч. Длительность импульса 10 мкс, девиация частоты 1 МГц, несущая частота 200 кГц. Какова будет ошибка измерения дальности за счет движения цели [1]?

2. Оценить возможность использования частоты 1.2 ГГц для оперативного измерения скорости автомобиля от 60 до 120 км/ч. Измерение выполняется на расстоянии не более 200 м. Ширина диаграммы направленности антенны не должна превышать 20° [1].

3. В ЧМ-дальномере непрерывный зондирующий сигнал имеет симметричный пилообразный закон модуляции частоты с параметрами:  $T_m = 1$  мс,  $W = 10$  МГц. Для дальности  $R_{\max} = 75$  км изобразить закон изменения частоты биений во времени, определить среднюю частоту биений и относительную погрешность измерения дальности. Сделать вывод о целесообразности применения сигнала с такими параметрами [1].

**Задачи для самостоятельной работы и решения на практическом занятии:** 3.1–3.14 [1].

## ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ

1. Методы измерения дальности в РЛС: фазовый, импульсный, частотный.
2. Измерение угловых координат в РЛС. Амплитудный метод. Метод сравнения.
3. Измерение радиальной скорости. Импульсные доплеровские РЛС.

## ЛЕКЦИЯ 9. СЛЕДЯЩИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ОБЗОР ПРОСТРАНСТВА РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ РАДИОТЕПЛОЛОКАЦИЯ

### СЛЕДЯЩИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ

Координаты цели и их производные меняются с течением времени, поэтому измеряемые параметры сигнала также являются функциями времени, т. е. *процессами*:  $a(t) = a_c(t) + a_{\text{ш}}(t)$ . Задача измерителя – формирование оценки  $\hat{a}^*(t)$ , которая в максимальной степени, согласно некоторому критерию, соответствует действительному закону изменения параметра сигнала  $a_c(t)$ , искаженному шумом  $a_{\text{ш}}(t)$ .

Входное напряжение – сложная нелинейная функция измеряемого процесса:  $U(t, a(t)) = S(t, a_c(t)) + U_{\text{ш}}(t)$ , при этом процесс  $a_c(t)$  обычно является аргументом гармонической или другой сложной функции, поэтому измерители процесса, закодированного в сигнале, будут нелинейными фильтрами.

Строгое решение нелинейной задачи связано с математическими трудностями, поэтому применяют приближенное решение, справедливое при большом ОСШ. В реальных измерителях это условие всегда выполняется, так как точные измерения возможны только при большом ОСШ.

При большом ОСШ параметры сигнала становятся распределены по гауссовскому закону, что позволяет воспользоваться процедурой линеаризации. Она состоит в том, что из входного сигнала формируются линейная функция малых отклонений  $a' = a - a^0$  относительно опорного значения  $a^0$ , близкого к реальному значению  $a_c(t)$ .

Устройство, в котором сравниваются  $a$  и  $a^0$ , является *дискриминатором*. Значение  $a^0$  вводят в дискриминатор заранее. При любой форме сигнала  $S(t)$  и законе  $S(t, a_c(t))$  при достаточно малой разности  $a' = a - a^0$  можно обеспечить линейность характеристики дискриминатора.

Выходной сигнал дискриминатора:  $V' = V'_c - V_{ш}$ , где  $V'_c = V_c - V^0$  – действительное отклонение от опорного значения;  $V_{ш} = V - V_S$  – аддитивный гауссовский широкополосный шум.

Если  $a(t)$  не выходит за пределы линейного участка характеристики дискриминатора, то на выходе дискриминатора можно поставить линейный фильтр Калмана или Винера (рис. 44), который в оптимальном случае вырабатывает оценки  $V'^*(t - t_0)$  малых разностей  $V' = V(t) - V^0$ , где  $t_0$  – задержка в фильтре. Здесь нелинейное устройство – дискриминатор обеспечивает линеаризацию измерителя.

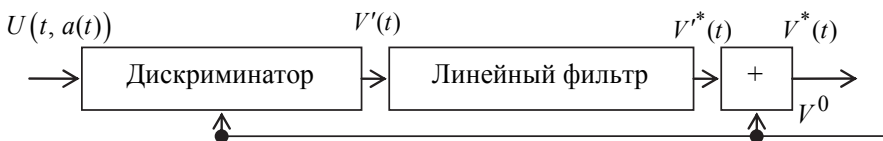


Рис. 44. Структурная схема измерителя

Для определения структуры оптимального линейного фильтра надо знать корреляционные функции шума и измеряемого процесса. Критерием оптимальности служит минимум дисперсии отклонения оценки процесса на выходе фильтра от его истинного значения.

*Ограничения:*

- у реального процесса  $V' = V(t) - V^0$  с течением времени выходит за границы линейного участка характеристики дискриминатора, т. е. оценка становится невозможной;
- наличие времени запаздывания  $t_0$ , которое недопустимо в системах, работающих в реальном времени.

Эти ограничения можно преодолеть в случае наблюдения коррелированных процессов, основанного на предположении, что параметры цели не могут изменяться скачкообразно в силу динамики движения (наличие допустимых ускорений/кренов/перегрузок). Плавный характер процесса позволяет предсказать следующее значение параметра на основе предыдущих.

На выходе дискриминатора ставят *экстраполятор* («предсказывающий» фильтр), с выхода которого сигнал подают в качестве опорного обратно на дискриминатор. Чем точнее экстраполятор

предсказывает значение сигнала, тем лучше линеаризуется процесс в дискриминаторе.

*Вопросы:*

- как дискриминатор настраивается на опорное значение процесса, вырабатываемое экстраполятором?
- как измерять входной сигнал в режиме слежения?

Для решения этих вопросов вводится дополнительный элемент в виде схемы поиска и захвата (рис. 45).

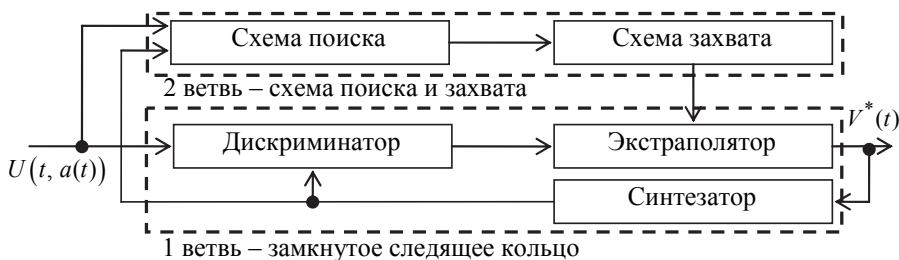


Рис. 45. Структурная схема следящего измерителя

Дискриминатор выполняется в виде фильтра или коррелятора. Фильтр должен быть настроен на текущее опорное значение параметра  $V^0$ , а на коррелятор подается сигнал с параметром  $V^0$ . Для этого между дискриминатором и экстраполятором включают синтезатор – устройство, настраивающее фильтр на заданное опорное значение или синтезирующее опорный сигнал. Основное требование к синтезатору – отсутствие дополнительных ошибок.

Чтобы ввести начальное опорное значение в дискриминатор, надо принудительно перестраивать выходной параметр  $V^0$  экстраполятора до тех пор, пока он не станет необходимой величины. Для перестройки экстраполятора вводят схему поиска, а сам факт, что в процессе поиска параметр достиг нужной величины, фиксируется схемой захвата.

Схема захвата в оптимальном варианте – это обнаружитель и реле захвата, при этом порог обнаружителя выбран по оптимальному критерию. Обнаружитель вырабатывает корреляционный интеграл и по превышению порога реле свидетельствует о настройке обнаружителя и дискриминатора на нужное значение параметра.

Алгоритм работы схемы в режиме поиска:

- 1) экстраполятор и синтезатор перестраивают по определенному закону дискриминатор и обнаружитель схемы захвата;
- 2) превышение порога, когда опорное значение примерно совпадает с истинным;
- 3) прекращение поиска, срабатывает реле захвата;
- 4) замыкается следящее кольцо, работа в режиме измерения.

В случае замирания сигнала или срабатывания реле от помехи напряжение на выходе обнаружителя пропадает и реле размыкается, вновь работает схема поиска до тех пор, пока не наступит повторный захват.

На начальном этапе слежения имеют место переходные процессы, устраняющие первоначальное рассогласование, затем наступает установившийся режим, когда рассогласование в среднем равно нулю.

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ОБЗОР ПРОСТРАНСТВА

### Классификация

#### 1. Последовательный

Луч локатора последовательно перемещается в пространстве. Обзор может вестись:

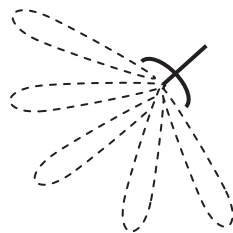
- по **детерминированной (жесткой) программе** (механический обзор по заданной траектории, периодическое облучение цели → наблюдается отраженная пачка радиоимпульсов);

- по **адаптивной (гибкой) программе** (с помощью *фазированных антенных решеток (ФАР)*).

#### 2. Одновременный

Формируется множество лучей, перекрывающих весь сектор обзора.

Основной недостаток – сложность аппаратуры.



### РЛС с ФАР

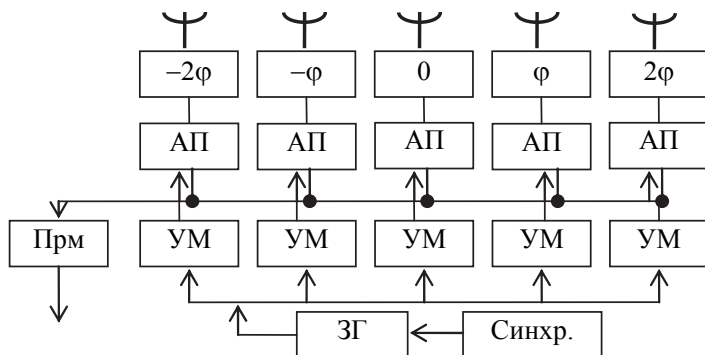
Рассмотрим принцип работы фазированных антенных решеток. В результате синхронной работы нескольких излучателей, расположенных на одной плоскости, образуется узконаправленный луч с возможностью быстрого изменения направления излучения.

Если все элементы возбуждаются синфазно, то фазовый фронт параллелен плоскости решетки, а ДНА – перпендикулярна.

При фазовом сдвиге в соседних элементах фазовый фронт и ДНА отклоняются.



Задержки излучения каждого элемента по фазе управляются электронно (рис. 46). РЛС с ФАР могут осуществлять любой тип сканирования и произвольное случайное зондирование пространства. Они позволяют сочетать разные режимы работы: последовательный обзор и слежение за целью. Также РЛС с ФАР имеют возможность одновременной работы по нескольким целям в различных режимах (поиск, захват, слежение).



**АП** – антенный переключатель    **Синхр.** – синхронизатор  
**УМ** – усилитель мощности        **Прм** – перемножитель  
**ЗГ** – задающий генератор (формирует зондирующий сигнал)

Рис. 46. Структурная схема системы управления ФАР

Достоинства и недостатки РЛС с ФАР:

+ возможность получать большие мощности при ограниченной мощности усилителей мощности;

- + надежность (работоспособность и свойства сохраняются даже при нарушении работы до 30 % элементов);
- + высокое быстродействие (в том числе из-за отсутствия механически движущихся частей);
- сложность и высокая стоимость;
- потери энергии в фазовращателях.

### РЛС с синтезированной апертурой

К РЛС с синтезированной апертурой относятся РЛС бокового обзора, предназначенные для наблюдения за поверхностью Земли или планет с движущихся летательных аппаратов (самолетов, орбитальных космических аппаратов). Антенна устанавливается неподвижно на летательном аппарате (ЛА). Обзор происходит за счет поступательного движения ЛА. Радиолокационное изображение получается в системе координат (рис. 47).

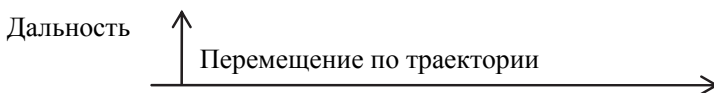
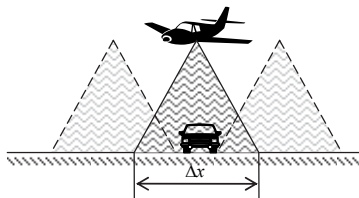


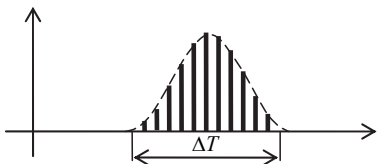
Рис. 47. Система координат для радиолокационного изображения

В этих системах эффект Доплера используется для улучшения точности измерений и разрешающей способности по угловой координате. Решение этой задачи основано на использовании зависимости от угловых координат закономерностей доплеровского смещения частоты, возникающего при совместном движении РЛС и цели.

В случае, когда цель находится на отрезке  $\Delta x$ , в пределах ДНА наблюдается отраженный сигнал. При удалении РЛС от цели на  $D_0$

$\Delta x = 2D_0 \operatorname{tg}\left(\frac{\theta_A}{2}\right) \approx D_0 \theta_A$ , так как  $\theta_A$  – мала (узкий лепесток ДНА), то  $\operatorname{tg}\left(\frac{\theta_A}{2}\right) \approx \frac{\theta_A}{2}$ .





Длительность пачки принимаемого сигнала:

$$\Delta T = \frac{\Delta x}{V} = \frac{D_0 \theta_A}{V},$$

где  $V$  – скорость ЛА.

Если две цели находятся на расстоянии меньшем, чем  $\Delta x$ , то они не разделяются в некогерентных РЛС. В когерентно-импульсных РЛС благодаря согласованной обработке можно разделить частично перекрывающиеся сигналы. Эту обработку можно рассматривать как эквивалентное повышение направленных свойств антенны.

Рассмотрим сущность согласованной обработки. Радиальная (взаимная) скорость РЛС и цели:

$$V_r = \frac{dD}{dt} = \frac{d}{dt} \sqrt{D_0^2 + V^2 t^2} = \frac{V^2 t}{\sqrt{D_0^2 + V^2 t^2}}.$$

Радиальная скорость  $V_r$  является функцией координаты  $x = Vt$ , на малом отрезке пути

$$|x| \leq \frac{\Delta x}{2} = \frac{D_0 \theta_A}{2} : \quad (1)$$

$$V_r \approx \frac{V}{D_0} x = \frac{V^2}{D_0} t.$$

Доплеровская частота

$$f_d = -\frac{2V_r}{\lambda} = -\frac{2Vx}{\lambda D_0} = -\frac{2V^2 t}{\lambda D_0} \quad (2)$$

является линейной функцией  $x$  и  $t$ , т. е. при гармоническом зондирующем сигнале отраженный сигнал будет иметь линейную частотную модуляцию.

При согласованной фильтрации ЛЧМ-сигнала уменьшается его длительность, но пачка импульсов носит разрывный характер. Вследствие когерентности импульсы пачки рассматриваются как



«вырезки» из ЛЧМ-сигнала, существующего в течение всей длительности пачки.

Длительность сжатого сигнала обратно пропорциональна ширине спектра ЛЧМ-сигнала:  $T_{\text{сж}} = \frac{1}{2f_{\text{дmax}}}$ , так как  $f_{\text{дmax}} = |f_{\text{д}}(t)|$  при

$t = T/2$  и при выполнении условий (1) и (2)  $T_{\text{сж}} = \frac{\lambda}{2V\theta_A}$ . За время  $T_{\text{сж}}$

ЛА проходит путь  $\Delta x_{\text{сж}} = VT_{\text{сж}} = \frac{\lambda}{2\theta_A}$ . В когерентной системе разрешение вдоль пути определяется  $\Delta x_{\text{сж}}$ , которое много меньше  $\Delta x$ . Так

как  $\theta_A = \frac{\lambda}{d_A}$ , где  $d_A$  – раскрыв антенны, то линейное разрешение

$\Delta x_{\text{сж}} = \frac{d_A}{2}$  не зависит от дальности до цели, длины волны и составляет половину раскрыва. Гипотетическая антенна, обеспечивающая разрешение вдоль пути  $\Delta x_{\text{сж}}$ , обладает ДН:

$$\theta_{\text{Асж}} = \frac{\Delta x_{\text{сж}}}{D_0} = \frac{\lambda}{2\theta_A D_0} = \frac{\lambda}{2d_{\text{Асж}}},$$

здесь  $d_{\text{Асж}}$  – длина кажущегося раскрыва. Множитель **2** появляется из-за удвоения фазового набег при распространении электромагнитной волны от РЛС и обратно.  $d_{\text{Асж}} = \theta_A D_0 = \Delta x$  – этот кажущийся раскрыв называют *синтезированным*, а РЛС бокового обзора (когерентно-импульсную) – *РЛС с синтезированной апертурой*.

## РАДИОТЕПЛОЛОКАЦИЯ

РАДИОТЕПЛОЛОКАЦИЯ – это пассивная локация, использующая собственное излучение объектов, обусловленное тепловым движением электронов.

Интенсивность радиотеплового излучения тел связана с их температурой. Количественными характеристиками теплового излучения являются спектральная плотность мощности (СПМ) и суммарная

мощность в полосе частот. Идеальным источником теплового излучения служит абсолютно черное тело.

Достоинства и недостатки:

+ отсутствие передающих устройств (высокая скрытность);

– мощность сигналов сравнима с собственными шумами приемника.

### Характеристики теплового излучения

СПМ теплового излучения определяется по формуле

$$g = \frac{dP}{dS} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{Гц} \cdot \text{м}^2} \right].$$

По формуле Рэлея–Джинса для плотности излучения абсолютно черного тела  $g(\lambda, T) = \frac{8\pi}{\lambda^2} kT \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{Гц} \cdot \text{м}^2 \text{ср}} \right]$ , где ср – стерадиан (единица измерения телесного угла).

Спектральная яркость – мощность излучения в полосе 1 Гц,  $S = 1$  м, угол – 1 стерадиан  $B_f = \frac{2}{\lambda^2} kT \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{Гц} \cdot \text{м}^2 \text{ср}} \right]$ . Излучательная способность тела  $\varepsilon = \frac{g_1(\lambda, T)}{g(\lambda, T)}$ , где  $g_1(\lambda, T)$  – плотность излучения реального объекта;  $g(\lambda, T)$  – плотность излучения абсолютно черного тела.

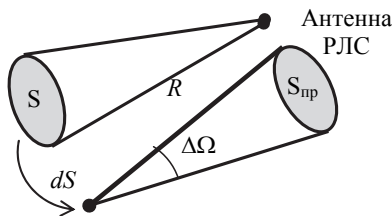
Вводится понятие эквивалентной температуры  $T_э = \varepsilon T$ . Отражательная способность характеризуется коэффициентом отражения  $\varkappa = 1 - \varepsilon$ . Отраженная энергия также может быть охарактеризована некой эквивалентной температурой  $T_{э, \text{отр}} = \varkappa T_{э, \text{ср}}$ . Кажущаяся температура  $T_{\text{каж}} = \varepsilon T + \varkappa T_{э, \text{ср}}$ .

Принцип действия радиотеплолокаторов основан на фиксации температурного контраста  $\Delta T$  между телом и средой. Мощность теплового излучения  $P_c = B_f \Delta f S \Delta \Omega$ , где  $\Delta \Omega$  – телесный угол антенны относительно точки излучения.

$$S = \Omega_A R^2, \quad \Omega_A = \frac{\lambda^2}{S_{\text{пр}}}, \quad S_{\text{пр}} - \text{площадь}$$

приемной антенны,

$$\Omega_A = \frac{4\pi}{G}, \quad G - \text{КНД}^3, \quad \Delta\Omega = \frac{S_{\text{пр}}}{R^2},$$



$$P_c = B_f \Delta f S \Delta\Omega = \left[ \frac{2}{\lambda^2} kT_{\text{каж}} \right] \Delta f \left[ \Omega_A R^2 \right] \left[ \frac{S_{\text{пр}}}{R^2} \right] =$$

$$= \frac{2}{\lambda^2} kT_{\text{каж}} \Delta f \Omega_A S_{\text{пр}} = \frac{2}{\lambda^2} kT_{\text{каж}} \Delta f \frac{\lambda^2}{S_{\text{пр}}} S_{\text{пр}} = 2kT_{\text{каж}} \Delta f .$$

Ограничением является затухание в атмосфере.

$$\sigma_{\text{ш}}^2 = 2kT_{\text{каж}} k_{\text{ш}} \Delta f .$$

Оптимальный приемник теплового излучения (рис. 48–50) включает *накопитель*, в котором происходит интегрирование входного сигнала:

$\int_0^T y^2(t) dt$ . Входной сигнал представляется в виде суммы  $y(t) = AS(t) + n(t)$ , тогда

$$\int_0^T y^2(t) dt \approx \int_0^T S^2(t) dt + 2 \int_0^T S(t)n(t) dt + \int_0^T n^2(t) dt .$$

↑  
независимы  
и не коррелированы

↓  
накопление  
энергии полезного  
сигнала

↓  
накопление  
энергии шума  
приемника

<sup>3</sup> КНД – коэффициент направленного действия.

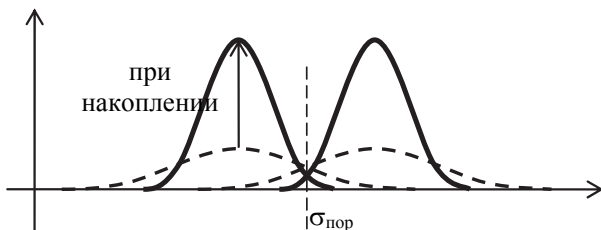
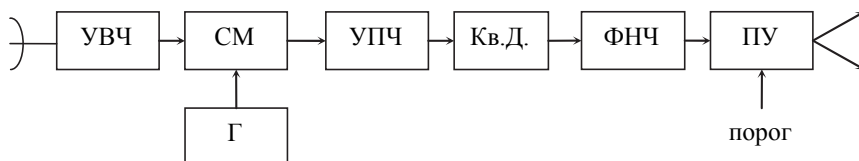


Рис. 48. Изменение ПРВ собственных шумов приемника и теплового излучения от наблюдаемого объекта

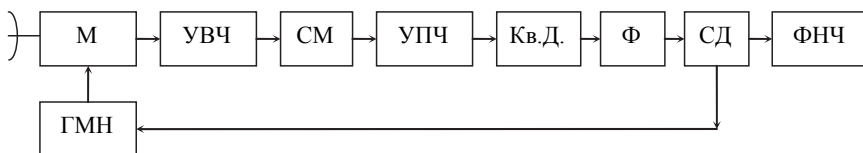
### Структурные схемы приемников теплового излучения



УВЧ – усилитель высокой частоты  
 УПЧ – усилитель промежуточной частоты  
 Кв.Д. – квадратурный детектор  
 ФНЧ – фильтр нижней частоты

СМ – смеситель  
 Г – генератор  
 ПУ – пороговое устройство

Рис. 49. Структурная схема приемника теплового излучения



УВЧ – усилитель высокой частоты  
 УПЧ – усилитель промежуточной частоты  
 Кв.Д. – квадратурный детектор  
 ФНЧ – фильтр нижней частоты  
 СД – синхронный детектор

М – модулятор  
 СМ – смеситель  
 Ф – фильтр  
 ПУ – пороговое устройство  
 ГМН – генератор модулирующего напряжения

Рис. 50. Модуляционная схема приемника теплового излучения

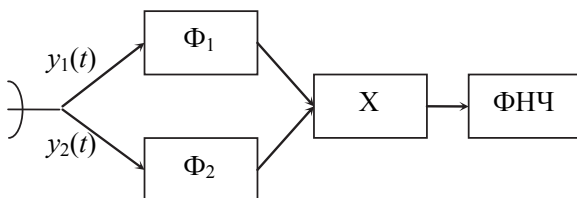
Корреляционный приемник содержит два приемных тракта с независимыми шумами (рис. 51).

$$y_1(t) = S(t) + n_1(t),$$

$$y_2(t) = S(t) + n_2(t),$$

$$\int_0^T y_1(t)y_2(t)dt \approx \int_0^T S^2(t)dt + \int_0^T S(t)n_2(t)dt + \int_0^T S(t)n_1(t)dt + \int_0^T n_1(t)n_2(t)dt.$$

$$\begin{array}{ccccccc} & & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ & & & 0 & & 0 & & 0 \end{array}$$



**ФНЧ** – фильтр нижней частоты

**М** – модулятор

Рис. 51. Корреляционный приемник теплового излучения

Чувствительность приемников теплового излучения определяется по формуле

$$\Delta T_{\text{каж}} = \frac{2T_{\text{ш}}}{\sqrt{\Delta f T}}.$$

*Пример:* при использовании малошумящего усилителя:

$$T_{\text{ш}} = 100 \text{ К}, \Delta f = 10^8 \text{ Гц}, T = 10^2 \text{ с},$$

$$\Delta T_{\text{каж}} = 0.14 \text{ К. } \blacksquare$$

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие системы называются круговыми и почему?
2. Какие принципы используются для построения следящих измерителей?

3. Каким образом работает следящий измеритель в режиме поиска?
4. При помощи каких антенн удобнее реализовывать гибкую программу радиолокационного обзора?
5. За счет чего происходит увеличение разрешающей способности в РЛС с синтезированной апертурой?

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

1. Каков принцип работы радиолокационной системы с селекцией движущихся целей?
2. Какие антенны используют современные радиолокационные станции слежения за подвижными объектами?
3. Каковы точность и дальность действия систем радиотеплолокации?

### **ЗАДАЧИ**

1. В обзорном локаторе антенна вращается со скоростью 90 град/с и имеет ширину ДН  $1^\circ$ . Дальность действия РЛС 150 км. За счет запаздывания сигнала, отраженного от цели, возникает ошибка определения азимута цели. Определить абсолютное значение ошибки измерения азимута при условии, что цель находится на максимальной дальности [1].
2. Пассивная помеха имеет спектр гауссовского типа на рабочей частоте  $f_0 = 3$  ГГц. Среднеквадратическая ширина спектра помехи  $\sigma_f = 60$  Гц. Определить минимальную частоту повторения зондирующих импульсов, при которой двукратная ЧПВ обеспечит коэффициент подавления помехи, равный 40 дБ [1].

**Задачи для самостоятельной работы и решения на практическом занятии:** 3.92–3.99 [1].

### **ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ**

1. Следящие измерители. Принцип действия. Структурные схемы. Алгоритм работы в режиме поиска и слежения.
2. Радиолокационный обзор пространства. РЛС с ФАР.
3. РЛС с синтезированной апертурой.
4. Радиотеплолокация. Принцип действия. Характеристики теплового излучения. Структурные схемы приемников теплового излучения.

## **ТЕМА 4. СИСТЕМЫ РАДИОРАЗВЕДКИ И РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЯ**

### **ЛЕКЦИЯ 10. СИСТЕМЫ РАДИОРАЗВЕДКИ СИСТЕМЫ РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЯ**

#### **СИСТЕМЫ РАДИОРАЗВЕДКИ**

РАДИОРАЗВЕДКА – совокупность мероприятий по сбору данных о параметрах радиоэлектронных систем противника.

Как правило, радиоразведка выполняется с целью определения рабочих частот РТС, типов и периодичности повторения сигналов и направления их прихода.

Рассмотрим пример радиоразведки рабочей частоты РТС противника: частотный диапазон разбивается на поддиапазоны (рис. 52), в которых происходит поиск сигнала (рис. 53).



*Рис. 52. Пример выделения поддиапазонов*

#### **СИСТЕМЫ РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЯ**

РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЕ – совокупность технических мероприятий, направленных на снижение эффективности работы радиоэлектронных средств противника.

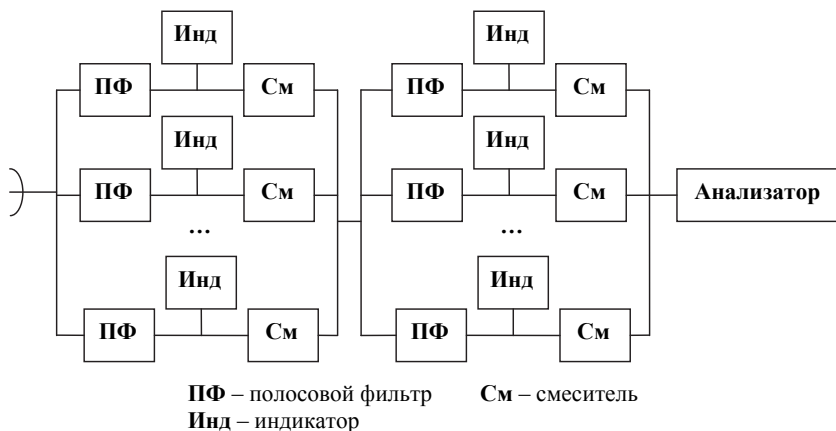


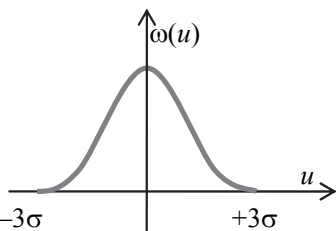
Рис. 53. Упрощенная структурная схема матричного разведывательного приемника

### Помехи

**Универсальной помехой** является белый гауссовский шум, имеющий равномерный спектр в полосе  $\Delta f_{\text{п}}$ .

Дисперсия помехи  $\sigma^2$  определяется мощностью передатчика. Динамический диапазон передатчика  $6\sigma$ .

**Маскирующие помехи** создают мешающий фон и затрудняют обнаружение полезных сигналов и оценку их параметров. По своему характеру маскирующие помехи могут быть случайными (шумовыми) или детерминированными, непрерывными во времени или импульсными.

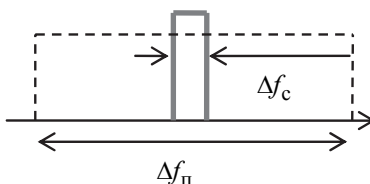


### Заградительные помехи

$$\Delta f_{\text{п}} \gg \Delta f_{\text{с}}$$

Часть мощности сигнала составляет помеха:

$$P_{\text{пвх}} = P_{\text{п}} \frac{\Delta f_{\text{с}}}{\Delta f_{\text{п}}}$$





## Прицельные помехи

$$\Delta f_{\text{п}} = \Delta f_{\text{с}}$$

Особенности:

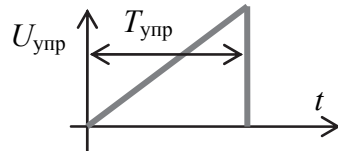
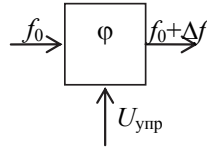
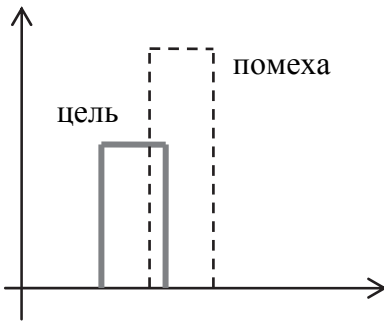
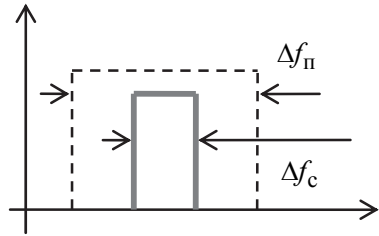
- меньшая мощность по сравнению с заградительными помехами;
- требуется информация о спектре подавляемого сигнала.

**Хаотические импульсные помехи (ХИП)** представляют собой низкочастотный шум.

**Имитационные помехи** создаются для противодействия следящим системам. Они подобны сигналу, но имеют информационные параметры, отличающиеся от истинных (ложные цели, уводящие по дальности, скорости).

Генерируется импульс с заданным сдвигом, больший по мощности, чем отраженный от цели, тем самым создается значительная ошибка в определении параметров цели.

Осуществляется сдвиг частоты, что вносит значительную ошибку в определение параметров цели.



$$\Delta f = \frac{1}{T_{\text{упр}}}$$

Имитационные помехи выгодны энергетически.

## Защита от помех

Методы защиты от помех основаны на различных видах селекции.

*Пространственная селекция* достигается за счет использования антенн с узкой диаграммой направленности и малым уровнем боковых лепестков. Для уменьшения боковых лепестков в ДНА<sup>4</sup> используют функции окна, которые приводят к распределению поля в раскрыве, спадающему к краям апертуры.

*Амплитудная селекция* – это защита от перегрузки приемника (типа АРУ<sup>5</sup>), суть которой состоит в расширении динамического диапазона приемника.

*Временная селекция* заключается в стробировании приемного устройства РЛС на время действия полезного сигнала.

*Частотная селекция* основана на различии спектров сигнала и помехи, производится перестройка частоты РЛС.

*Поляризационная селекция* использует различие в поляризации (как правило, ортогональная поляризация) сигнала и помехи.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие параметры радиотехнических сигналов могут быть определены средствами радиоразведки?
2. Для чего нужны различные виды искусственных помех?
3. Каким образом можно не допустить перегрузки входных цепей приемника при постановке противником мощной помехи?

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. За счет чего можно увеличить скрытность действия РТС?
2. Что такое вторичная обработка и каким образом она позволяет улучшить противодействие помехам?

### ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ

1. Радиоразведка. Принцип организации. Структурная схема.
2. Радиопротиводействие. Виды помех. Методы защиты от помех.

---

<sup>4</sup> ДНА – диаграмма направленности антенны.

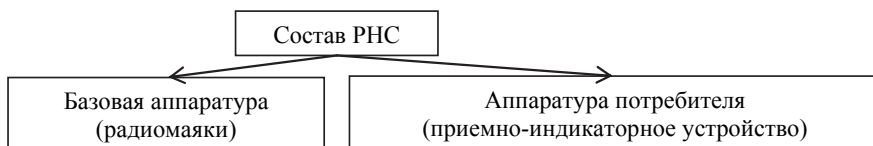
<sup>5</sup> АРУ – автоматическая регулировка усиления.

## ТЕМА 5. СИСТЕМЫ РАДИОНАВИГАЦИИ

### ЛЕКЦИЯ 11. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТОДЫ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧНОСТЬ СИСТЕМ РАДИОНАВИГАЦИИ

РАДИОНАВИГАЦИЯ – это определение объектами своих координат для различных целей.

**Объектами** являются любые движущиеся тела, морские и воздушные суда, наземный транспорт, космические аппараты. Основная задача **радионавигационных систем (РНС)** – **навигация** (управление движением) при помощи **радиосредств**.



Существуют две концепции построения базовой аппаратуры.

Позиционные РНС	Подвижные РНС
Базовая аппаратура размещается в определенных точках (позициях, радионавигационных точках – РНТ)	Базовая аппаратура размещается на подвижных носителях

РНС представляет собой набор радиолиний – радиоприемных и радиопередающих устройств, а также вычислительных средств.

Определение координат производится в два этапа.

1. Измерение **радионавигационного параметра (РНП)**: угловая координата, дальность (расстояние) между потребителем и радиомаяком, разность дальностей и т. д.

2. Вычисление координат по измеренному РНП и передача их пользователю.

ПОВЕРХНОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА (ППО) – это геометрическое место точек, имеющих одно и то же значение РНП.

При работе РНС строит несколько ППО. При формировании двух ППО на их пересечении образуется **линия положения объекта** (ЛПО). Пересечение ППО и ЛПО дает точку, координаты которой и являются координатами объекта.

Для наземных объектов одной из ЛПО является линия, лежащая на поверхности Земли (**ортодромия**).

## МЕТОДЫ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ

### Угломерные методы

#### *Радиопеленгаторный метод*

У объекта нет радиопередатчика, но есть остронаправленная антенна, сканирующая пространство с угловой скоростью  $\Omega$  (рис. 54). Сигнал на приемник объекта не поступает до тех пор, пока антенна не будет точно направлена на радиомаяк. Информацию об угловом положении несет максимум сигнала.

$\Omega t_3 = \alpha$  – угловое положение радиомаяка в системе координат, выбранной объектом (**прямой пеленг** радиомаяка);  $\alpha = \text{const}$  – плоскость (РНП).

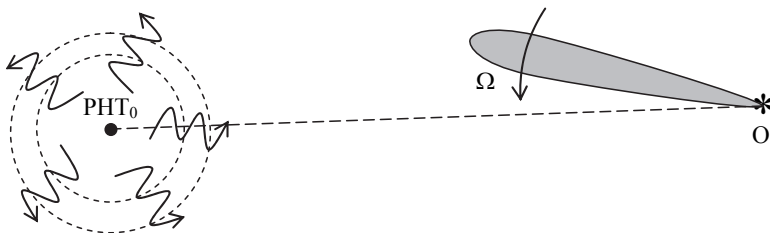


Рис. 54. Сущность радиопеленгаторного метода

Для решения радионавигационной задачи необходимо иметь две РНТ. По  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  легко найти  $x_0$  и  $y_0$ . Для этого приемно-индикаторное устройство (ПИУ) объекта выполняет необходимые геометрические расчеты.

Недостаток: необходимость остронаправленной антенны у каждого объекта (большие размеры антенны):  $\theta_{0,5} \approx \frac{\lambda}{d_a}$  – ширина ДНА, где  $\lambda$  – длина волны, на которой ведется пеленг;  $d_a$  – диаметр антенны.

### Радиомаячный метод

Нагрузка выносится на маяки. На радиомаяке находятся два передатчика и две антенны: изотропная и остронаправленная (рис. 55). У объекта – приемная ненаправленная антенна. Угловая скорость сканирования пространства  $\Omega$  должна быть очень стабильной, так как ее

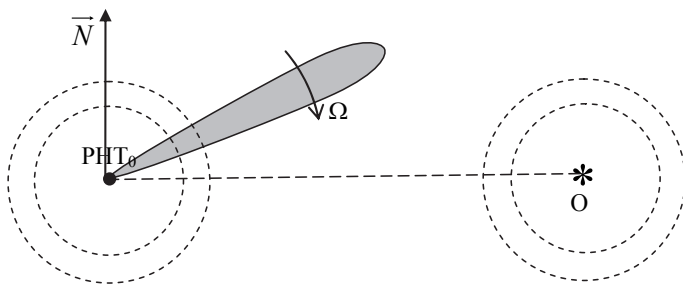


Рис. 55. Сущность радиомаячного метода

нестабильность приводит к ошибкам. ПИУ объекта ведет прием сигналов, излучаемых обеими антеннами. Ненаправленная антенна излучает один импульс за период вращения направленной антенны. Это происходит в момент, когда направленная антенна проходит через опорное направление  $\vec{N}$ . Этот сигнал «запускает» ожидание сигнала направленной антенны (рис. 56).

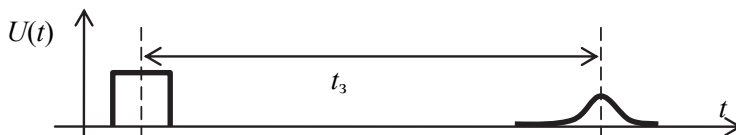


Рис. 56. Напряжение в ПИУ объекта

$\alpha_1 = \Omega t_3$  – угловое направление на объект со стороны радиомаяка (обратный пеленг).

Основные недостатки угломерных методов:

- низкая точность – большие ошибки в определении координат из-за того, что РНП не может быть измерена идеально точно;
- существенно разная точность для близких и дальних объектов.

### Дальномерный метод

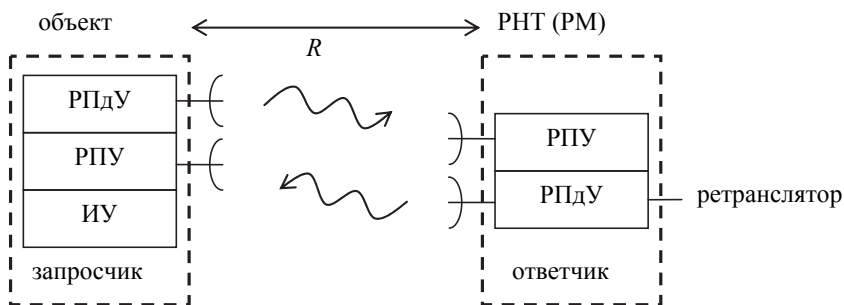


Рис. 57. Структурная схема круговой РНС

В  $t_0 = 0$  объект посылает запросный сигнал. Радиоприемное устройство радиомаяка (рис. 57) принимает его с задержкой  $t_{30}$ .

$t_3 = \frac{2R}{c} + t_{30}$  – время, за которое сигнал прошел расстояние  $R$  и цепи ответчика.

$$R = \frac{(t_3 - t_{30})c}{2}.$$

ПШО является сферой с центром в РНТ (рис. 58). При пересечении двух сфер на поверхности Земли получаются две ТПО, т. е. возникает *неоднозначность измерений*. Способы разрешения неоднозначности: взять третью РНТ или проанализировать географическое расположение вероятных целей.

Дальномерный метод иногда называют **круговой РНС**.

Достоинства и недостатки:

+ самый точный метод;

– необходимо иметь передатчик у каждого объекта.

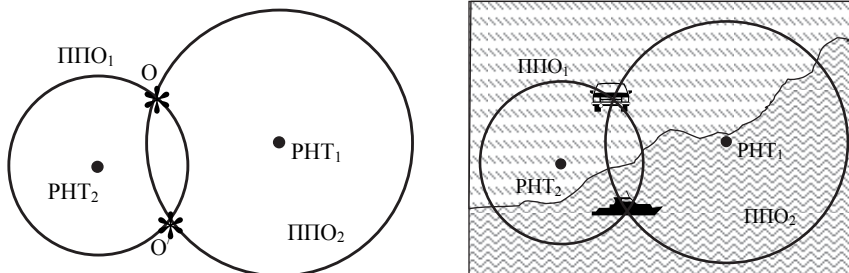


Рис. 58. Сущность дальномерного метода

### Разностно-дальномерный метод

В этом методе РНП является разность расстояний. База РНС – отрезок (расстояние) между двумя РНТ:

$$\begin{cases} \Delta R_{10} = R_1 - R_0, \\ \Delta R_{20} = R_2 - R_0. \end{cases}$$

При значительном удалении объекта от базы РНС происходит асимптотическое приближение к линии А (рис. 59).

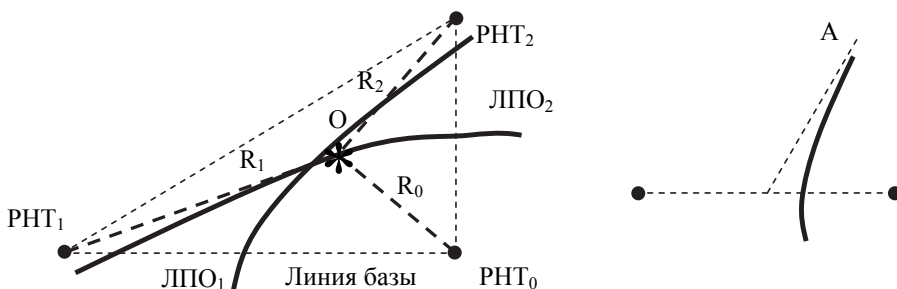


Рис. 59. Сущность разностно-дальномерного метода

Для удаленных объектов обнаруживаются пеленгационные свойства.  
Достоинства и недостатки:

- + не требуется передатчик у объекта;
- + измерители ориентированы на измерение разности расстояний;
- для удаленных объектов точность равна точности угломерных методов.

Организуется синхронизация относительно ведущего РМ (РНТ0), измеряются задержки прихода импульсов (рис. 60).

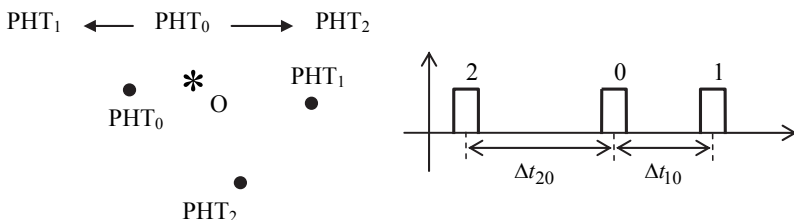


Рис. 60. Определение задержек при РДМ

### ТОЧНОСТЬ СИСТЕМ РАДИОНАВИГАЦИИ

Для оценки точности РНС нужно определить конфигурацию рабочей области РНС.

**ЗОНА ДЕЙСТВИЯ РНС** – это геометрическое место точек, в которых ошибки местоопределения не превышают заданной величины.

Обычно речь идет об определении **границы зоны действия**.

На этапе измерений возникают ошибки  $\Delta p_i$  измерения навигационного параметра  $p_i$ . На расчетном этапе из-за наличия  $\Delta p_i$  координаты также определяются с ошибками.

### Ошибки местоопределения на плоскости (рис. 61)

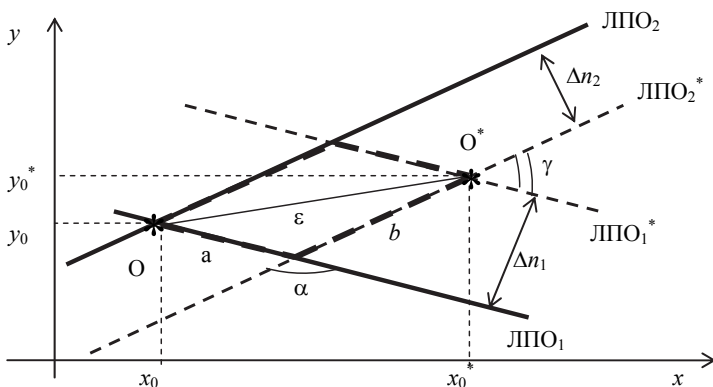


Рис. 61. Механизм возникновения ошибок местоопределения



Есть истинное положение объекта  $O$  и положение объекта, которое определяет система  $O^*$ ,  $\varepsilon$  – отрезок между  $O$  и  $O^*$ :  $\varepsilon = \left| OO^* \right|$ . Чем меньше  $\varepsilon$ , тем лучше. Количественную величину ошибки оценивают моментами. Типичная оценка – СКО (второй момент):

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{\sigma^2} + \sigma_{\varepsilon}^2.$$

Полная мощность ошибки есть мощность постоянной составляющей плюс мощность переменной составляющей.

Из параллелограмма ошибок определяем

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 &= a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha = \\ &= a^2 + b^2 - 2ab \cos(180 - \gamma) = a^2 + b^2 + 2ab \cos \gamma. \end{aligned}$$

$\Delta n_i \leftrightarrow \Delta p_i$  – смещение ЛПО за счет ошибки в измерении параметра  $p_i$ .

$$a = \frac{\Delta n_1}{\sin \alpha}, \quad b = \frac{\Delta n_2}{\sin \alpha}.$$

Так как  $\sin \alpha = \sin(180 - \gamma) = \sin \gamma$ , то

$$a = \frac{\Delta n_1}{\sin \gamma}, \quad b = \frac{\Delta n_2}{\sin \gamma}.$$

Получаем

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 &= \frac{\Delta n_1^2}{\sin^2 \gamma} + \frac{\Delta n_2^2}{\sin^2 \gamma} + 2 \frac{\Delta n_1 \Delta n_2}{\sin^2 \gamma} \cos \gamma = \\ &= \frac{1}{\sin^2 \gamma} (\Delta n_1^2 + \Delta n_2^2 + 2 \Delta n_1 \Delta n_2 \cos \gamma). \end{aligned}$$

Множитель  $\frac{1}{\sin^2 \gamma}$  говорит о том, что ошибка определяется не только

$\Delta n_1$  и  $\Delta n_2$ , но и углом между ЛПО1 и ЛПО2, который зависит от положения объекта на плоскости.

$$\begin{aligned}\overline{\varepsilon^2} &= \frac{1}{\sin^2 \gamma} \left( \overline{\Delta n_1^2} + \overline{\Delta n_2^2} + 2\overline{\Delta n_1 \Delta n_2} \cos \gamma \right) = \\ &= \frac{1}{\sin^2 \gamma} \left( \sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2 + 2r_{n1n2} \cos \gamma \right) = \\ &= \frac{1}{\sin^2 \gamma} \left( \sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2 + \sigma_{n1} \sigma_{n2} \rho \cos \gamma \right),\end{aligned}$$

$\rho = \overline{\Delta n_1 \Delta n_2}$  – коэффициент корреляции между измерениями двух РНП (между ошибками, с которыми измеряется РНП).

Предположим, что  $\rho \rightarrow 0$ , тогда

$$\sqrt{\overline{\varepsilon^2}} = \frac{\sqrt{\sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2}}{\sin \gamma}$$

Обычно представляет интерес область (множество координат  $(x, y)$ ), в которой ошибка равна допустимой  $(\sqrt{\overline{\varepsilon^2}})_{\text{доп}}$ .

### Ошибки измерения ЛПО

Обозначим ЛПО  $p = p(x, y)$  – для любого метода.  $p_0 = p(x, y)$  – проекция на  $x$ - $y$  линии, образуемой при рассечении поверхности  $p = p(x, y)$  плоскостью  $p = p_0$ .

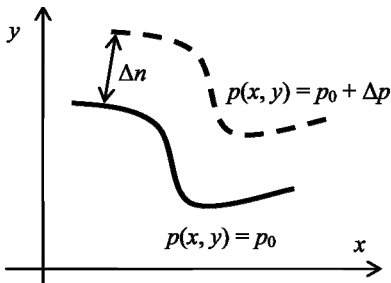


Рис. 62. Определение ошибок измерения ЛПО

Если плоскость получит приращение  $\Delta p$ , то ЛПО получит приращение  $\Delta n$  (рис. 62). Связь между ними устанавливается через градиент:

$$\begin{aligned}|\text{grad } p(x, y)| &= \\ &= \left| \frac{\partial p(x, y)}{\partial n} n_0 \right| = \left| \frac{\partial p(x, y)}{\partial n} \right|.\end{aligned}$$

Переходя к конечным приращениям, получаем

$$|\text{grad } p(x, y)| = \left| \frac{\Delta p}{\Delta n} \right|, \quad \Delta n = \frac{\Delta p}{|\text{grad } p(x, y)|} = c \cdot \Delta p,$$

где

$$c = \frac{1}{|\text{grad } p(x, y)|}; \quad \sigma_n^2 = \frac{\sigma_p^2}{\text{grad}^2 p(x, y)};$$

$$\text{grad}^2 p(x, y) = \left( \frac{\partial p(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial p(x, y)}{\partial y} \right)^2.$$

**Примечание.** В трехмерной навигационной задаче появляется слагаемое  $\left( \frac{\partial p(x, y, z)}{\partial z} \right)^2$ .

### Граница зоны действия угломерного метода

Запишем ЛПО для угломерного метода (рис. 63):  $p = \alpha = \arctg \frac{x_0}{y_0} = p(x, y)$ .

Частные производные:

$$\frac{\partial p(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{y} \left( 1 + \left( \frac{x}{y} \right)^2 \right)^{-1},$$

$$\frac{\partial p(x, y)}{\partial y} = -\frac{x}{y^2} \left( 1 + \left( \frac{x}{y} \right)^2 \right)^{-1},$$

тогда градиент

$$\begin{aligned} \text{grad}^2 p(x, y) &= \frac{1}{y^2} \left( 1 + \left( \frac{x}{y} \right)^2 \right)^{-2} + \frac{x^2}{y^4} \left( 1 + \left( \frac{x}{y} \right)^2 \right)^{-2} = \\ &= \frac{1}{y^2} \left( 1 + \left( \frac{x}{y} \right)^2 \right) \left( 1 + \left( \frac{x}{y} \right)^2 \right)^{-2} = \frac{1}{y^2} \left( 1 + \left( \frac{x}{y} \right)^2 \right)^{-1} = \frac{1}{y^2 + x^2} = \frac{1}{R^2}. \end{aligned}$$

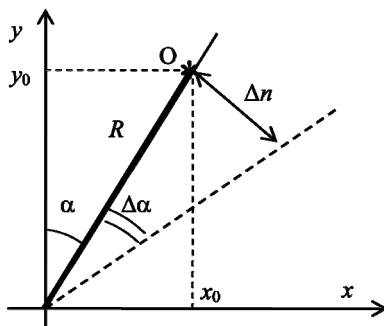


Рис. 63. Определение границы зоны действия угломерного метода

Ошибка определения угловой координаты:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_p}{\text{grad } p(x, y)} = R\sigma_\alpha.$$

$\Delta n \cong R \cdot \Delta\alpha$  – одна из причин низкой точности угломерного метода.

$$\sigma_{ni}^2 = R_i^2(x, y)\sigma_\alpha^2,$$

$$\sqrt{\varepsilon^2} = \frac{1}{\sin \gamma} \sqrt{R_1^2(x, y)\sigma_\alpha^2 + R_2^2(x, y)\sigma_\alpha^2} = \frac{\sigma_\alpha}{\sin \gamma} \sqrt{R_1^2(x, y) + R_2^2(x, y)}.$$

Область (множество координат  $(x, y)$ ), в которой ошибка равна допустимой:

$$\frac{(\sqrt{\varepsilon^2})_{\text{доп}}}{\sigma_\alpha} = \frac{\sqrt{R_1^2(x, y) + R_2^2(x, y)}}{\sin \gamma}.$$

Находя из этого уравнения  $(x, y)$ , можно определить границу зоны действия системы.

Особенности для угломерного метода:

- 1) область действия симметрична относительно линии базы;
- 2) если объект находится на линии базы, то ошибка бесконечна.

### **Граница зоны действия дальномерного метода**

Запишем ЛПО для дальномерного метода:

$$p = R = \sqrt{x^2 + y^2} = p(x, y).$$

Частные производные:

$$\frac{\partial p(x, y)}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad \frac{\partial p(x, y)}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Градиент:

$$\text{grad}^2 p(x, y) = \frac{x^2}{x^2 + y^2} + \frac{y^2}{x^2 + y^2} = 1.$$

Получаем, что ошибки определения координат пропорциональны только ошибкам оценки расстояния:  $\sigma_n = \sigma_p = \sigma_R$ .

Пусть  $\sigma_{R1} = \sigma_{R2} = \sigma_R$ , тогда граница зоны действия определяется из соотношения

$$\left(\sqrt{\varepsilon^2}\right)_{\text{доп}} = \frac{\sigma_R \sqrt{2}}{\sin \gamma}, \quad \sin \gamma = \frac{\sigma_R \sqrt{2}}{\left(\sqrt{\varepsilon^2}\right)_{\text{доп}}}.$$

Местоположение точек, для которых угол  $\gamma$  одинаковый, есть окружность. Окружность минимальных ошибок – это окружность, имеющая диаметр, равный базе:

$$\left(\sqrt{\varepsilon^2}\right)_{\text{min}} = \sigma_R \sqrt{2}.$$

Радионавигационной областью являются внутренние точки круга с критическим (допустимым) значением  $\sin \gamma$  (рис. 64).

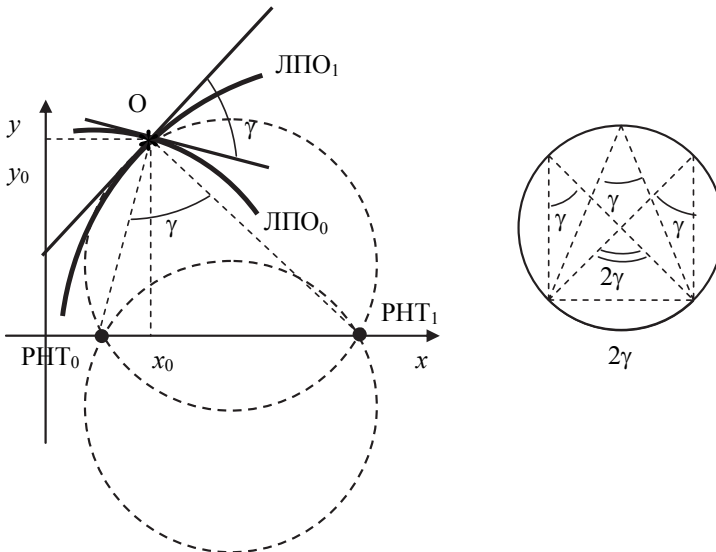


Рис. 64. Определение границы зоны действия дальномерного метода

## Граница зоны действия разностно-дальномерного метода

В качестве радионавигационного параметра используется разность расстояний:  $p = R_A - R_B = \Delta R = p(x, y)$ .

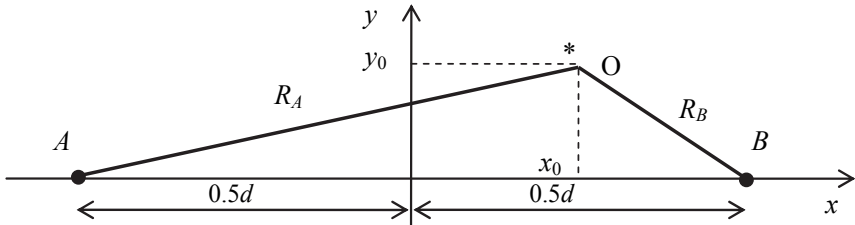


Рис. 65. Определение РНП при РДМ

Необходимые расстояния определяются из соотношений (рис. 65):

$R_A = \sqrt{(0.5d + x)^2 + y^2}$ ,  $R_B = \sqrt{(0.5d - x)^2 + y^2}$ . Тогда ЛПО запишется в виде  $p = R_A - R_B = \sqrt{(0.5d + x)^2 + y^2} - \sqrt{(0.5d - x)^2 + y^2}$ .

Частные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(x, y)}{\partial x} &= \frac{1 \cdot 2(0.5d + x)}{2\sqrt{(0.5d + x)^2 + y^2}} - \frac{-1 \cdot 2(0.5d - x)}{2\sqrt{(0.5d - x)^2 + y^2}} = \\ &= \frac{0.5d + x}{R_A} + \frac{0.5d - x}{R_B}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial p(x, y)}{\partial y} = \frac{2y}{2\sqrt{(0.5d + x)^2 + y^2}} - \frac{2y}{2\sqrt{(0.5d - x)^2 + y^2}} = \frac{y}{R_A} - \frac{y}{R_B}.$$

Градиент:

$$\begin{aligned} \text{grad}^2 p(x, y) &= \left( \frac{0.5d + x}{R_A} + \frac{0.5d - x}{R_B} \right)^2 + \left( \frac{y}{R_A} - \frac{y}{R_B} \right)^2 = \\ &= \frac{(0.5d + x)^2}{R_A^2} + \frac{(0.5d - x)^2}{R_B^2} + \frac{2(0.25d^2 - x^2)}{R_A R_B} + \frac{y^2}{R_A^2} + \frac{y^2}{R_B^2} - \frac{2y^2}{R_A R_B} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(0.5d+x)^2 + y^2}{R_A^2} + \frac{(0.5d-x)^2 + y^2}{R_B^2} + \frac{2(0.25d^2 - x^2) - 2y^2}{R_A R_B} = \\
&= 2 \left( 1 + \frac{0.25d^2 - x^2 - y^2}{R_A R_B} \right) = 2 \left| \sin \frac{\varphi}{2} \right|,
\end{aligned}$$

где  $\varphi$  – угол, под которым видна база (рис. 66),  $\varphi = \varphi(x, y)$ . Пусть  $\rho = \overline{\Delta n_1 \Delta n_2} = 0$ , тогда

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{1}{\sin^2 \gamma} \left( \frac{\sigma_{\Delta R1}^2}{4 \left( \sin \frac{\varphi_1}{2} \right)^2} + \frac{\sigma_{\Delta R2}^2}{4 \left( \sin \frac{\varphi_2}{2} \right)^2} \right).$$

Второе слагаемое в скобках появилось из-за того, что при РДМ используются три радиомаяка.

Пусть  $\sigma_{\Delta R1}^2 = \sigma_{\Delta R2}^2 = \sigma_{\Delta R}^2$ , тогда ошибка равна

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{\sigma_{\Delta R}^2}{4 \sin^2 \gamma} \left( \operatorname{cosec}^2 \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{cosec}^2 \frac{\varphi_2}{2} \right).$$

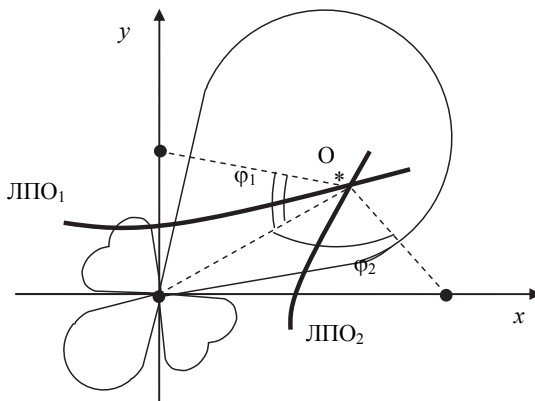


Рис. 66. Граница зоны действия РДМ

Если объект находится в первом квадранте (рис. 66), то  $\gamma = 0.5(\varphi_1 + \varphi_2)$ . Касательные к гиперболам являются биссектрисами углов, под которыми видны базы. Для второго и четвертого квадранта  $\gamma = 0.5(\varphi_1 - \varphi_2)$ .

Ошибки РДМ приближаются к ошибкам ДМ в пределах зоны действия системы. В дальних точках ошибки приближаются к ошибкам угломерного метода (гиперболы асимптотически приближаются к прямым).

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. В чем основное отличие систем радионавигации от систем радиолокации?
2. Каким образом можно определить поверхность положения объекта в системах, использующих различные методы радионавигации?
3. Как влияет ширина диаграммы направленности антенны на точность местоопределения при угломерном методе?
4. Каким образом определяется зона действия радионавигационной системы?

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

1. Каким образом учитывается влияние на точность местоопределения подстилающей поверхности?
2. Каким образом осуществляется функционирование многочастотных фазовых радионавигационных систем?
3. В чем различие фазового и импульсно-фазового методов измерения радионавигационного параметра?

### **ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ**

1. Радионавигационные системы. Основные определения. Состав РНС. Принцип организации. Радионавигационные сигналы.
2. Радионавигационные методы местоопределения. Угломерный метод: радиопеленгаторный и радиомаячный. Дальномерный и разностно-дальномерный методы.
3. Точность систем радионавигации. Ошибки местоопределения на плоскости. Ошибки измерений ЛПО. Граница зоны действия угломерного и дальномерного метода.
4. Точность систем радионавигации. Граница зоны действия разностно-дальномерного метода.



## ЛЕКЦИЯ 12. СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

### СПУТНИКОВЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Спутниковые системы первого поколения основаны на эффекте Доплера: движение спутника вызывает изменение частоты принимаемого сигнала по сравнению с частотой излученного сигнала.

Спутник играет роль радиомаяка. В позиционных РНС точно известны координаты радиомаяка, относительно которых рассчитываются координаты объектов (рис. 67).

Координаты спутника в каждый момент изменяются, из-за этого происходит качественное усложнение систем.

1. Необходимы сверхточные временные шкалы (часы). Эти часы должны быть синхронизированы на всех спутниках (в настоящее время нестабильность составляет  $10^{-15}$ ).

2. Необходим постоянный контроль траекторий спутников, входящих в состав системы (орбитальный контроль). Необходимо располагать решениями уравнений орбит, чтобы в любой момент времени иметь возможность максимально точно определять декартовы координаты спутников, тогда задача упрощается и становится похожей на задачу позиционной радионавигации.

В контрольных точках на Земле имеются контрольно-измерительные комплексы, раз в 12 часов корректирующие уравнения траекторий движения спутников.

**ЭФЕМЕРИДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ** – сведения об орбитах всех спутников.

В течение радионавигационного сеанса эта информация внедряется в радионавигационный сигнал, с помощью которого объект получает координаты спутника. В остальном спутниковая радионавигация такая же, как и позиционная.

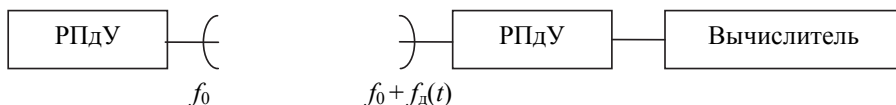


Рис. 67. Структура доплеровских систем спутниковой навигации

На спутнике сигнал излучается на частоте  $f_0$ , на объекте сигнал принимается на  $f_0 + f_d(t)$  (рис. 67),

$$f_d(t) = -af_0 \frac{V_p(t)}{c},$$

где  $V_p(t)$  – радиальная скорость.

Здесь  $a=2$  для классической РН (двойной путь),  $a=1$  для задач связи (одинарный путь).

### Дифференциально-доплеровская (траверзная) радионавигация

В дифференциально-доплеровской радионавигации используется один спутник.

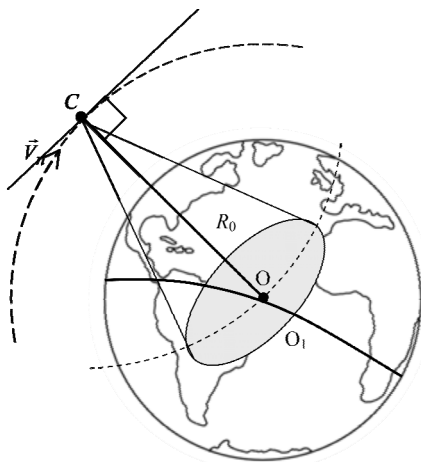


Рис. 68. Принцип построения дифференциально-доплеровской спутниковой РНС

При  $t < t_0$  происходит сближение спутника и объекта ( $f_d > 0$ ). При  $t > t_0$  происходит удаление спутника от объекта ( $f_d < 0$ ). Таким образом, необходимо измерять момент времени  $t_0$ .

**ОБСЕРВАЦИЯ** – состояние спутника, когда он находится в зоне прямой видимости объекта.

Существует одна точка, соответствующая минимальному расстоянию между спутником и объектом в процессе движения спутника, – это траверзное положение (рис. 68). Отрезок ОС перпендикулярен касательной к орбите спутника.

**ТРАВЕРЗНАЯ ТОЧКА** – точка с нулевым значением доплеровской частоты.

Пусть спутник занимает траверзное положение в момент времени  $t_0$ . При  $t < t_0$  происходит сближение спутника и объекта ( $f_d > 0$ ). При  $t > t_0$  происходит удаление спутника от объекта ( $f_d < 0$ ).

Траверзная плоскость является ППО, т. е. нужно вычислить положение спутника на орбите и построить в этой точке перпендикулярную к орбите плоскость.

$$\text{ППО}_1 \cap \text{ППО}_2 = \text{ЛПО}.$$

Рассмотрим точки  $O$  и  $O_1$ . Чем дальше объект находится от спутника, тем меньше приращение расстояний и тем меньше изменение частоты  $f_d$ . Таким образом, для объектов, принадлежащих ЛПО,

разной будет крутизна линии в окрестности  $t_0$ :  $\left. \frac{df_d(t)}{dt} \right|_{t=t_0} = \psi(R_0)$

(рис. 69).

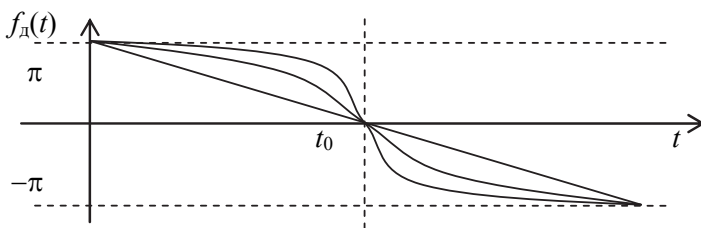


Рис. 69. Зависимость крутизны графика в зависимости от положения на ЛПО

Если рассчитать зависимость  $\psi(R_0)$ , то можно по определенному

значению  $\left. \frac{df_d(t)}{dt} \right|_{t=t_0}$  находить точку положения объекта.

Недостатки:

- низкая точность измерений;
- малое время для анализа сигнала (нет возможности накопления).

### Интегрально-доплеровская радионавигация

Период между измерениями, как правило, составляет  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1} \approx \approx 2$  мин, таким образом, спутник успеваеет преодолеть расстояние между точками измерения  $1 - 2 = 2 - 3 = 1000$  км (рис. 70). Приращения дальностей при этом

$$\int_{t_1}^{t_2} V_p(t) dt = \Delta R_{12}; \quad \int_{t_2}^{t_3} V_p(t) dt = \Delta R_{23}.$$

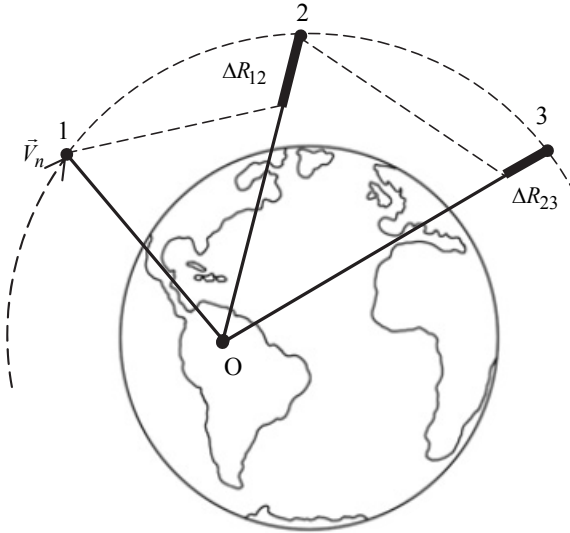


Рис. 70. Принцип построения дифференциально-доплеровской спутниковой РНС

Радиальная скорость зависит от доплеровской частоты  $V_p(t) = -\frac{c}{f_0} f_d(t)$ , таким образом, можно переписать:

$$\Delta R_{12} = -\frac{c}{f_0} \int_{t_1}^{t_2} f_d(t) dt; \quad \Delta R_{23} = -\frac{c}{f_0} \int_{t_2}^{t_3} f_d(t) dt.$$

Достоинства:

- можно понизить энергетическую мощность передатчика;
- применяются принципы РДМ.

*Пример.* Система «Транзит», пять-шесть спутников,  $f_0 = 400$  МГц, низкоорбитальные (11 км).

Время между обсервациями составляло от 35 мин (в полярных областях) до 1,5 ч (на экваторе).

Недостатки:

- большое время ожидания;
- неэффективная система для подвижных объектов.

## **СПУТНИКОВЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ**

При построении спутниковых РНС второго поколения учитывается требование о том, что должна обеспечиваться высокоточная и непрерывная навигация. Это достигается применением средневысотных (среднеорбитальных) спутников, а также использованием нескольких находящихся в зоне радиовидимости спутников для определения координат.

Таким образом, общая концепция построения СРНС второго поколения включает в себя следующие требования:

- количество спутников: от 18 до 24;
- размещены равномерно в трех орбитальных плоскостях, разнесенных по долготе на  $120^\circ$ ;
- орбита: 20 000 км (средневысотная);
- период обращения: 12 ч;
- в зоне радиовидимости: от 4 до 11 спутников.

### **Состав СРНС**

В состав СРНС второго поколения входят следующие устройства.

1. Искусственные спутники Земли. Их особенности:

- имеют собственное системное время, хранимое эталонами частоты;
- временные шкалы всех ИСЗ должны быть синхронизированы;
- используются широкополосные сигналы (двоичные ФМ сигналы), при этом код уникален для каждого спутника.

2. Наземный контрольно-измерительный комплекс. Его функции:

- осуществляет слежение за ИСЗ;
- обеспечивает информацией, необходимой для формирования радионавигационных сигналов и навигационных сообщений.

3. Аппаратура потребителя, на которую вынесены следующие функции:

- выбор рабочего созвездия ИСЗ;

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

### **Радионавигационные сигналы**

#### 1. Дальномерный радионавигационный сигнал:

- несет сведения о параметрах движения потребителя относительно ИСЗ;
- $f_0 \approx 1,5$  ГГц;
- используются фазоманипулированные сигналы, при этом двоичный код – уникальный для каждого ИСЗ, разрядность сдвигового регистра  $n = 10$ ; таким образом, длительность уникальной последовательности  $2^{10} - 1 = 1023$  бит, длительность всей комбинации составляет 1023 мкс, причем комбинация периодически повторяется.

#### 2. Информационный сигнал:

- несет сведения о параметрах движения ИСЗ:
  - эфемериды;
  - поправки на распространение и др.;
- осуществляется дополнительная фазовая манипуляция на 0 и 180°, передается двоичное информационное сообщение, требуемая скорость передачи информации ~50 бит/с, т. е. длительность одного символа ~20 000 мкс.

### **Необходимость систем единого времени СРНС второго поколения**

Пусть используются два спутника. Рассмотрим три ситуации.

1. Временные шкалы согласованы (рис. 71, а).
2. Временные шкалы спутников согласованы, а у объекта рассогласована (рис. 71, б).

3. Временная шкала ПИУ идеально совмещена с временной шкалой ИС31, а рассогласована шкала ИС32 (рис. 71, в).

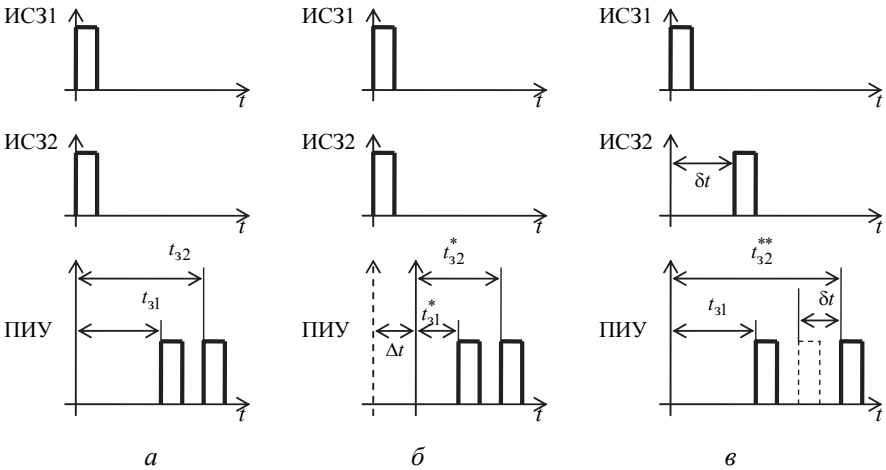


Рис. 71. Влияние рассогласованности временных шкал

В первом случае можно использовать дальномерный метод для определения координат объекта:  $R_i = ct_{3i}$ ,  $i = \{1, 2\}$ . Во втором случае из-за рассогласования шкал возникают псевдодальности (не являются истинными дальностями):  $R_i^* = ct_{3i}^*$ , при этом истинную дальность можно определить как  $R_i = c(t_{3i}^* + \Delta t)$ , следовательно,  $ct_{3i}^* = R_i - c\Delta t$ , а значит,  $R_2^* - R_1^* = R_2 - R_1$ . Таким образом, во втором случае можно использовать разностно-дальномерный метод для определения истинных координат объекта. В третьем случае временная расстройка одинаково сказывается на дальности и на разности дальностей:  $R_1 = ct_{31}$ ;  $R_2^{**} = ct_{32}^{**} = R_2 + c\delta t$ ;  $R_2 = c(t_{3i}^* - \delta t)$ .

Чтобы СРНС была работоспособна, необходимо идеальное совпадение временных шкал ИСЗ, в то время как менее жесткие требования предъявляются к временной шкале объекта, так как в этом случае для корректировки измерений может использоваться РДМ или модификация ДМ.

## СОВРЕМЕННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ

Название системы	Принадлежность	Число спутников	Количество орбитальных плоскостей	Высота орбиты, км	Наклонение орбиты	Примечание
GPS	Министерство обороны США	24 (3)	6	20183	55°	Низкая точность в приполярных районах
ГЛОНАСС	Министерство обороны РФ	24 (3)	3	19100	64,8°	Оптимальная орбита для использования в высоких широтах
Бейдоу	Китай	16				
Галилео	Европейский Союз	27 (3)	3	23224	56°	
IRNSS Indian Regional Navigation Satellite System, индийская региональная спутниковая система навигации	Индия	7		24000 (геосинхронная орбита)		В разработке. Будет использоваться только для нужд Индии
QZSS Quasi-Zenith Satellite System, квазизенитная спутниковая система	Япония	3		Высокая эллиптическая орбита		В разработке

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие требования предъявляются к спутниковым радионавигационным системам?
2. В каком частотном диапазоне функционируют спутниковые радионавигационные системы?



3. В чем состоит основное отличие траверзной радионавигации от интегрально-доплеровской?

4. Для чего необходимо обеспечивать точную синхронизацию в спутниковых системах второго поколения?

5. Какие современные спутниковые системы работают совместно?

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

1. Какие радионавигационные сигналы используются в современных спутниковых РНС?

2. Каково устройство аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем второго поколения?

### **ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ**

1. Спутниковые системы навигации. Спутниковые РНС первого поколения: дифференциально-доплеровские, интегрально-доплеровские РНС.

2. Необходимость систем единого времени в спутниковых РНС второго поколения. Принцип действия системы ГЛОНАСС.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиотехнические системы: сб. задач для индивидуальных занятий студентов. Сост.: А.Н. Молчанов, А.М. Райфельд, А.А. Спектор, И.С. Тырышкин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 79 с.
2. Радиотехнические системы: учебник / Ю.М. Казаринов и др.; под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Академия, 2008. – 589 с.: ил.
3. *Галкин В.А.* Цифровая мобильная радиосвязь: учеб. пособие для вузов по направлению подготовки бакалавров и магистров 550400 – «Телекоммуникации» и по направлению подготовки дипломированных специалистов 654400 – «Телекоммуникации» / В. А. Галкин. – М., 2007. – 432 с. : ил.
4. *Орлова М.В.* Обработка сигналов в комплексированных системах локации : учеб. пособие / М.В. Орлова; Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2007. – 74, [1] с.: схемы. – Режим доступа: <http://www.library.nstu.ru/fulltext/metodics/2007/orlova.rar>.
5. Радиотехнические системы передачи информации : учебное пособие для вузов по специальности «Радиотехника» / В.А. Борисов и др.; под ред. В.В. Калмыкова. – М., 1990. – 302 с.: черт.
6. *Рудой В.М.* Системы передачи информации: учеб. пособие для вузов по специальностям 200700 – «Радиотехника», 201600 – «Радиоэлектронные системы», 201700 – «Средства радиоэлектронной борьбы» направления подготовки дипломированных специалистов 654200 «Радиотехника» / В.М. Рудой. – М., 2007. – 277 с.: ил.
7. Радиотехнические системы: учебник для вузов по специальности «Радиотехника» / Ю.П. Гришин и др.; под ред. Ю.М. Казаринова. – М., 1990. – 495 с.: табл., граф.
8. Радиосистемы передачи информации: учеб. пособие для вузов по специальности 201600 – «Радиоэлектронные системы» направления 654200 – «Радиотехника» / В.А. Васин и др. – М., 2005. – 471 с.: ил.
9. *Бакулев П.А.* Радионавигационные системы: учебник для вузов / П.А. Бакулев, А.А. Сосновский. – М., 2005. – 224 с.: ил.
10. *Васюков В.Н.* Теория электрической связи: учебник / В.Н. Васюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 391 с.: ил. – Режим доступа: [http://elibrary.nstu.ru/source?bib\\_id=vtls000049622](http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000049622).

11. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. Е.Г. Грозы и др. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
12. *Каминский Р.П.* Теория и техника радиолокационных и радионавигационных систем: учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 80 с.: ил.
13. Основы радиотехники и радиолокации. Радиопередающие и радиоприемные устройства: учебное пособие / В.Г. Левичев, Я.В. Степчук, Б.И. Фогельсон. – М.: Воениздат, 1965. – 586 с.: табл., схемы
14. Основы радиолокации: учебное пособие для приборостроительных техникумов / В.С. Нелепец, Г.Б. Белоцерковский. – М.: Оборонгиз, 1954. – 303 с.: ил.
15. Основы радиолокации и телевидения: учебник для радиотехникумов / А.А. Немец, В.И. Федотов. – М.: Высшая школа, 1978. – 201 с.: ил.
16. Основы радиолокации. Ч. 2: конспект лекций для дневной и вечерней форм обучения / А.Г. Сайбель и др.; под ред. А.Г. Сайбеля. – М.: Изд-во МАИ, 1975. – 129 с.: ил.
17. Основы радиотехники и радиолокации: учеб. пособие / В.З. Слуцкий и др. – М.: Воениздат, 1966. 429 с., схемы
18. Теоретические основы радиолокации и радионавигации (обнаружение, разрешение и измерение параметров радиолокационных сигналов): учеб. пособие для дневной и вечерней форм обучения / под ред. Ю.Г. Сосулина; Моск. авиац. ин-т им. С. Орджоникидзе. – М.: Изд-во МАИ, 1980. 70 с.: ил., табл.
19. Радионавигационные системы. В 2 ч. Ч. 2: учеб. пособие / А.М. Алешечкин, В.Н. Бондаренко, В.И. Кокорин. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2003. – 87 с.
20. *Бакулев П.А.* Радиолокационные системы: учебник для вузов по специальности «Радиоэлектронные системы» направления подготовки дипломированных специалистов «Радиотехника». – М.: Радиотехника, 2004. – 319 с.: ил., схемы.
21. *Борукаев Т.Б.* Статистическая динамика следящих радиотехнических систем: конспект лекций для 5 курса РЭФ дневного отделения. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 50 с.: ил.
22. *Власов В.Ф.* Курс радиотехники: учебное пособие для вузов. – М.; Л.: ГЭИ, 1962. – 927 с.
23. *Пестряков В.Б.* Радиотехнические системы: учебник для вузов по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». – М.: Радио и связь, 1985. – 376 с.: ил.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
ТЕМА 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	4
Лекция 1. Основные определения. Жизненный цикл РТС. Классификация РТС .....	4
Вопросы для самоконтроля .....	14
Вопросы для самостоятельной работы .....	14
Задачи .....	14
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	15
Лекция 2. Дальность действия РТС. Влияние Земли на дальность действия РТС. Влияние атмосферы на дальность действия РТС .....	15
Вопросы для самоконтроля .....	20
Вопросы для самостоятельной работы .....	20
Задачи .....	21
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	21
Лекция 3. Эффективная поверхность рассеяния цели. ЭПР объемно-распределенной цели. ЭПР поверхностно-распределенной цели .....	21
Вопросы для самоконтроля .....	25
Вопросы для самостоятельной работы .....	25
Задачи .....	25
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	26
ТЕМА 2. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ .....	27
Лекция 4. Основные определения Классификация РТС ПИ. Принцип построения многоканальных РТС ПИ .....	27
Вопросы для самоконтроля .....	31
Вопросы для самостоятельной работы .....	31
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	31

Лекция 5. Принцип частотного разделения каналов. Принцип временного разделения каналов. Многоканальная РТС ПИ с импульсно-кодовой модуляцией.....	31
Вопросы для самоконтроля .....	43
Вопросы для самостоятельной работы .....	43
Задачи .....	44
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	44
Лекция 6. Широкополосные сигналы в системах связи. ЛЧМ-сигналы. Широкополосные сигналы на основе фазовой манипуляции. Псевдослучайные бинарные последовательности. <i>M</i> -последовательности. Коды Голда .....	45
Вопросы для самоконтроля .....	55
Вопросы для самостоятельной работы .....	55
Задачи .....	55
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	55
<b>ТЕМА 3. СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИИ.....</b>	<b>56</b>
Лекция 7. Основные определения. Тактические характеристики РЛС. Сигналы, используемые в РЛС. Классификация РЛС.....	56
Вопросы для самоконтроля .....	60
Вопросы для самостоятельной работы .....	60
Задачи .....	61
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	61
Лекция 8. Измерение дальности в РЛС. Измерение угловых координат в РЛС. Измерение радиальной скорости. Импульсные доплеровские РЛС .....	61
Вопросы для самоконтроля .....	72
Вопросы для самостоятельной работы .....	73
Задачи .....	73
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	73
Лекция 9. Следящие измерители. Радиолокационный обзор пространства. РЛС с синтезированной апертурой. Радиотеплолокация .....	74
Вопросы для самоконтроля .....	85
Вопросы для самостоятельной работы .....	86
Задачи .....	86
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	86

ТЕМА 4. СИСТЕМЫ РАДИОРАЗВЕДКИ И РАДИОПРОТИВО-	
ДЕЙСТВИЯ .....	87
Лекция 10. Системы радиоразведки. Системы радиопротиводействия.....	87
Вопросы для самоконтроля .....	90
Вопросы для самостоятельной работы .....	90
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	90
ТЕМА 5. СИСТЕМЫ РАДИОНАВИГАЦИИ .....	91
Лекция 11. Основные определения. Методы местоопределения. Точ-	
ность систем радионавигации .....	91
Вопросы для самоконтроля .....	104
Вопросы для самостоятельной работы .....	104
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	104
Лекция 12. Спутниковые навигационные системы .....	105
Вопросы для самоконтроля .....	112
Вопросы для самостоятельной работы .....	113
Перечень тем для подготовки к экзамену .....	113
Библиографический список .....	114

**Филатова Светлана Геннадьевна**

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

**Учебное пособие**

Редактор *И.Л. Кескевич*  
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*  
Корректор *И.Е. Семенова*  
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*  
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

---

Подписано в печать 03.04.2018. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная  
Тираж 100 экз. Уч.-изд. л. 6,97. Печ. л. 7,5. Изд. 368/17. Заказ № 573  
Цена договорная

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20