

Министерство науки и высшего образования и Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники

**Мещеряков А.А.**

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**ПРАКТИКУМ**

Томск, 2024

**УДК 629.78, 621.396**  
**М56**

**Рецензент:**

**Куприц В.Ю.**, доцент кафедры радиотехнических систем ТУСУР, канд. техн. наук

**Мещеряков А. А.**

**М56** Радиотехнический комплекс мониторинга космических аппаратов Практикум. Учебно-методическое пособие по курсу «Сети и системы космической связи» для студентов радиотехнических специальностей / Мещеряков А. А. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024 – 55 с.

Настоящее учебно-методическое пособие составлено с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО).

Учебно-методическое пособие предназначено для проведения практических занятий по курсу «Сети и системы космической связи» со студентами радиотехнических специальностей.

Основной задачей проведения практических занятий является повторение принципов действия и технических характеристик радиотехнических устройств и систем контроля за космическими аппаратами, анализ принятых технических решений, структурные и, частично, функциональные схемы, конструкторские решения и т.д.

Внимание уделено основным международным понятиям, определениям и системным требованиям, предъявляемым к системам космической связи. Рассмотрены системы радиоконтроля параметров сигнала систем космической связи. Приведена методика расчета энергетических характеристик космических радиолиний для решения расчетных заданий.

Приведены планы практических занятий, материалы по рейтинговой раскладке контрольных работ и тестовые вопросы.

Одобрено на заседании каф. РТС протокол № 4 от 16.11.2023 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ» ДЛЯ СТУДЕНТОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ.....	4
1.1 Цель проведения занятий .....	4
1.2 Содержание занятий.....	5
2. МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ».....	8
2.1 Тема: «Основные понятия и определения».....	8
2.2. Тема: «Общие сведения о системах космической связи».....	12
2.3 Тема: «Общие характеристики и принципы построения радиотехнических комплексов мониторинга КА».....	16
2.4 Тема: «Математические модели сигналов и помех».....	20
2.5 Тема: «Обнаружение и измерение параметров радиосигналов КА».....	29
2.6 Тема: «Контроль радиосигналов и помех».....	45
2.7 Тема: «Обработка информации, автоматический сбор, сортировка и архивация данных в комплексе мониторинга КА».....	53
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	55

## ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития телекоммуникационных технологий показывают, что радиоэлектронная обстановка в околоземном космическом пространстве будет усложняться. Этому будет способствовать как значительное увеличение количественного состава орбитальной группировки и появление многоспутниковых систем, так и освоение новых частотных диапазонов, а также развертывание программно-определяемых сетей.

В настоящее время в околоземном космическом пространстве функционируют более 700 космических аппаратов (КА) различной государственной принадлежности. При этом запланировано развертывание крупных систем на базе мини-, микро-КА связи большого количественного состава (например, орбитальная группировка OneWeb будет включать 720 КА). Вместе с этим известны факты скрытого размещения аппаратуры связи на космических аппаратах иного целевого назначения различной государственной принадлежности, а также запуска неизлучающих «бумажных» спутников.

Данные факторы обуславливают повышение эффективности мониторинга радиоэлектронной обстановки, в том числе предъявляют все более высокие требования к составу и характеристикам средств радиоконтроля и системы управления ими.

Существующая российская наземная сеть системы контроля за излучениями радиоэлектронных средств, включающая средства различной ведомственной принадлежности (ГКРЧ, МО РФ, ФСБ и другие организации), имеет ограниченные возможности по обеспечению полноты и непрерывности радиоэлектронного контроля, в том числе при решении следующих основных задач:

- проведение измерений параметров излучений радиоэлектронных средств (РЭС) спутниковых служб радиосвязи различного назначения и оценка их соответствия нормам, установленным решениями о выделении спектра радиочастот, либо разрешениями на использование радиочастот или радиочастотных каналов;

- осуществление спутникового радиоконтроля в целях обеспечения международно-правовой защиты скоординированного частотного ресурса (частотно-поляризационных планов) и выполнения международных соглашений;

- поиск и определение местоположения источников радиопомех по заявкам администраций связи, в том числе иностранных государств, российских операторов спутниковой связи и вещания и пользователей частотного ресурса;

- выявление российских и зарубежных космических аппаратов связи и вещания, не санкционированно использующих частотный ресурс.

В условиях увеличения количественного состава объектов и средств радиоконтроля, освоения новых диапазонов и структур сигналов, в настоящее время ставится задача оптимального планирования применения средств радиоконтроля относительно их территориальной доступности и ведомственной принадлежности.

Может быть применен один из подходов, реализуемый способом последовательного одиночного контроля определенных радиочастотных диапазонов заблаговременно назначенных космических аппаратов связи. Показателем эффективности такого подхода является количество частот и каналов, подвергшихся радионаблюдению. Однако, он не учитывает плотность расположения КА на геостационарной орбите и возможность одновременного радиомониторинга ретрансляторов одного КА несколькими средствами радиоконтроля. В связи с этим разработка новых подходов и методов, направленных на разрешение данных сложностей представляется актуальной и востребованной задачей.

# **1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ» ДЛЯ СТУДЕНТОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**

## **1.1 Цель проведения занятий**

Практические занятия направлены на закрепление и расширение знаний, полученных на лекциях.

Практические занятия по курсу специализации, каким является указанный курс, направлены на анализ и подробное изучение наиболее важных и сложных космических радиосистем: спутниковых систем связи, спутниковых навигационных систем и наземных систем радиоконтроля за космическими аппаратами. Изучению подлежат принципы построения систем, анализ принятых технических решений, структурные и, частично, функциональные схемы, конструкторские решения и т.д. Внимание уделено основным международным понятиям, определениям и системным требованиям, предъявляемым к системам космической связи. Рассмотрены системы радиоконтроля параметров сигнала систем космической связи. Приведена методика расчета энергетических характеристик космических радиолиний для решения расчетных заданий.

Предусмотрен тестовый контроль полученных знаний в объеме рейтинговой раскладки для данной дисциплины. Общее количество баллов на практические занятия – 45, разбиты они следующим образом:

- посещаемость 10 баллов,
- тестовый контроль 25 балла,
- активность на занятиях 10 баллов.

Тестовый контроль проводится в виде трех контрольных тестовых работ по изучаемым темам; каждая контрольная содержит четыре варианта по 10 вопросов.

## **1.2 Содержание занятий**

### **Занятие 1.**

*Тема занятий. Основные понятия и определения.*

Основные международные понятия и определения в области систем космической связи, установленные «Регламентом радиосвязи»: спутниковая связь и спутниковое вещание, фиксированная (ФСС) и подвижная (ПСС) спутниковые службы, радиовещательная спутниковая служба (РСС), службы космической связи, космические станции (радиоретрансляторы), земные станции.

*Тематический план.*

Повторение материала о параметрах и принципах работы радиотехнических систем обеспечения полета космических аппаратов. – 45 минут.

Изучение материала видах и задачах, решаемых КА - 30 минут.

Тестовый контроль – 15 минут.

### **Занятие 2.**

*Тема занятий. Общие сведения о системах космической связи.*

Основные системные требования, предъявляемые к системам космической связи.

*Тематический план.*

Повторение материала о зонах обслуживания, пропускной способности, видах и качестве предоставляемых услуг.. – 45 минут.

Изучение методов многостанционного доступа. - 30 минут.

Тестовый контроль – 15 минут.

### **Занятие 3.**

*Тема занятий. Общие характеристики и принципы построения радиотехнических комплексов мониторинга КА.*

Обобщенная схема радиокомплекса мониторинга КА.

*Тематический план.*

Система радиолокационного контроля траектории движения КА.- 45 минут.

Тестовый контроль – 15 минут.

Система радиолокационного контроля для различных типов орбит и КА (изучение по методическому пособию и обсуждение) - 30 минут.

#### **Занятие 4.**

*Тема занятия. Общие характеристики и принципы построения радиотехнических комплексов мониторинга КА.*

Продолжение изучения темы.

Система контроля параметров сигнала систем космической связи.

*Тематический план.*

Повторение материала о принципах построения космических РТС космических систем - 45 минут.

Анализ обобщенной функциональной схемы радиоконкомплекса мониторинга КА - 30 минут.

Обсуждение результатов - 15 минут.

#### **Занятие 5.**

*Тема занятия. Математические модели сигналов и помех.*

Аддитивные шумы и мультипликативные помехи.

*Тематический план.*

Рассмотрение методов аналитического и геометрического представления сигналов и помех (изучение по методическому пособию и обсуждение) - 45 минут.

Обсуждение влияния аддитивных шумов и мультипликативных помех на параметры сигнала систем космической связи - 45 минут.

#### **Занятие 6.**

*Тема занятия. Обнаружение и измерение параметров радиосигналов КА.*

Характеристики спутниковых каналов связи.

*Тематический план.*

Методика расчета энергетических характеристик космических радиолоний (изучение по методическому пособию и обсуждение) - 45 минут.

Примеры расчета для нескольких значений параметров - 30 минут.

Обсуждение результатов - 15 минут.

#### **Занятие 7.**

*Тема занятия. Обнаружение и измерение параметров радиосигналов КА.*

Продолжение изучения темы.

Расчет бюджета спутникового радиоканала.

Выполняется расчет: 1) одного из параметров бортовой аппаратуры при заданной энергетике наземной аппаратуры и протяженности трассы ИСЗ-Земля; 2) протяженности трассы ИСЗ-Земля при заданной энергетике наземной и бортовой аппаратуры.

*Тематический план.*

Анализ уравнения дальности в варианте распространения сигнала в одном направлении (изучение по методическому пособию и обсуждение) - 45 минут.

Расчеты для нескольких значений параметров - 30 минут.

Обсуждение результатов - 15 минут.

*Рекомендации.* Уравнение дальности представить в обычной и логарифмической формах. Расчет вести, выражая величины в относительных единицах (дБ/Вт). Использовать книгу: Энергетические характеристики космических радиолоний. / Под ред. О.А. Зенкевича. – М.: Сов. Радио, 1972.

#### **Занятие 8.**

*Тема занятия. Контроль радиосигналов и помех.*

*Тематический план.*

Измерения параметров сигналов и помех в радиоконплексах мониторинга КА.  
Задачи, решаемые радиоконплеком, принцип построения систем - 45 минут.

Принципы дальнометрии при непрерывных сигналах – 45 минут.

*Рекомендации.* Обратить внимание на построение временных и фазовых дальномеров.

### **Занятие 9.**

*Тема занятия.* Обработка информации, автоматический сбор, сортировка и архивация данных в комплексе мониторинга КА

Алгоритмы обработки результатов измерений сигналов. Автоматический сбор, сортировка и архивация данных. Формирование отчетов и событий за определённый период времени.

*Тематический план.*

Основные задачи обработки информации в космических радиосистемах.

Основы методики обработки результатов измерений - 45 минут.

Определение параметров орбиты КА при обработке информации – 45 минут.

## 2. МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»

### 2.1 Тема: «Основные понятия и определения»

Спутниковая связь является новым направлением науки и техники, появившимся в последние десятилетия. Она основывается на последних достижениях в области ракетной техники, космической технологии, информатики, цифровой техники связи. Многие из терминов в этой передовой области за это время сложились, другие еще окончательно не устоялись, а третьи только появляются и еще не вошли в обиход, поскольку имеют разные наименования в разных научных школах.

Ниже приводятся определения основных понятий в соответствии с «Регламентом радиосвязи», а также сложившейся к настоящему времени практикой применения терминов в спутниковых системах связи.

Космическая радиосвязь — радиосвязь, при которой используют космические станции, расположенные на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) или других космических объектах.

Космическая станция (КС) — станция, расположенная на объекте, который находится за пределами основной части атмосферы Земли (либо предназначен для вывода за ее границы), например на ИСЗ.

Земная станция (ЗС) — станция радиосвязи, расположенная на земной поверхности и предназначенная для связи с космическими либо с земными станциями через космические станции или космические объекты, например пассивные ИСЗ. В отличие от земных станций станции наземных систем радиосвязи, не относящихся к космическим системам связи или радиоастрономии, называются наземными.

Спутниковая связь (СС) — связь между земными станциями через космические станции или пассивные ИСЗ.

Таким образом, спутниковая связь — частный случай космической радиосвязи.

Спутниковая линия — линия связи между земными станциями с помощью одного ИСЗ на каждом направлении (рис. 1.1), включая участки «Земля — спутник» (линия вверх) и «спутник — Земля» (линия вниз).

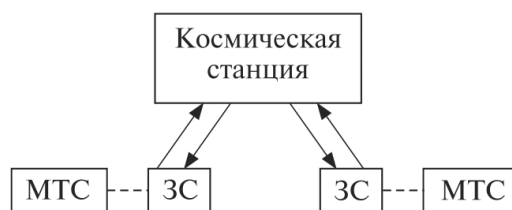


Рис. 1.1 - Спутниковая линия связи

Земные станции соединяются с узлами коммутации сетей связи (например, с междугородной телефонной станцией (МТС) или оптоволоконными и радиорелейными линиями связи), с источниками и потребителями программ телевидения, звукового вещания с помощью наземных соединительных линий (рис. 1.1). Земные станции могут устанавливаться непосредственно на МТС, телецентрах и поблизости от других источников и потребителей информации.

Спутниковое вещание — передача радиовещательных программ (телевизионных и звуковых) от передающих земных станций к приемным через космическую станцию — активный ретранслятор. Спутниковое вещание — частный случай спутниковой связи, отличающийся передачей определенного класса односторонних (симплексных)



сообщений, принимаемых одновременно несколькими ЗС или же большим числом приемных станций при циркулярном виде передач.

В зависимости от типа земных станций и их назначения в системах связи различаются следующие службы радиосвязи:

- фиксированная спутниковая служба (ФСС) — служба радиосвязи между земными станциями, локализованными в определенных, строго фиксированных пунктах с использованием одного или нескольких спутников. К фиксированной спутниковой службе относят также фидерные линии (линии подачи программ на космическую станцию) для других служб космической радиосвязи, например для радиовещательной спутниковой или спутниковой подвижной службы;

- подвижная спутниковая служба (ПСС) — служба радиосвязи между подвижными земными станциями (или между подвижными и фиксированными ЗС) с участием одной или нескольких космических станций. В зависимости от места установки подвижной ЗС различают сухопутную, морскую, воздушную подвижные спутниковые службы;

- радиовещательная спутниковая служба (РСС) — служба радиосвязи, в которой сигналы космических станций предназначены для непосредственного приема населением. При этом непосредственным приемом программ считается как индивидуальный, так и коллективный прием, причем в этом последнем случае программа может доставляться индивидуальным абонентам с помощью наземной системы распределения — кабельной или эфирной. Сам же термин «радиовещание» объединяет как телевизионное, так и звуковое вещание. Определенная таким образом радиовещательная спутниковая служба включает в себя только те виды систем спутникового вещания, которые предназначены для приема на сравнительно простые и недорогие приемные установки с качеством, достаточным для абонента, но часто более низким, чем для магистральных линий подачи программ.

Системы, относящиеся к ФСС, могут использоваться также для распределения радиовещательных программ. Так, например, отечественные системы «Орбита» и «Москва», изначально предназначенные для распределения по территории страны телевизионных программ и программ звукового вещания через ИСЗ, относятся к ФСС. Принятые станцией «Орбита» программы высокого качества подают на телецентры, снабженные передатчиком большой мощности, а сама станция «Орбита» при этом является достаточно сложным строительным и техническим сооружением. Часто различие между фиксированной и вещательной службами в некоторых случаях стирается. Однако при их классификации учитывается то, что этим службам выделены различные полосы частот.

При передаче радиовещательных программ с помощью систем ФСС различают прямое и косвенное распределение программ. При прямом распределении программы подаются от системы ФСС непосредственно на наземные вещательные станции без каких-либо промежуточных распределительных систем, а при косвенном распределении программы поступают от земных станций ФСС для дальнейшего распределения по наземным сетям к различным наземным вещательным станциям.

Системы спутниковой связи (ССС) применяют для передачи различных видов информации, таких, как:

- программ телевидения, когда различают системы обмена между равноправными земными станциями, а также для циркулярного распределения программ от передающей станции к большому числу приемных;

- других видов симплексных сообщений, чаще всего циркулярного характера: изображений газетных полос, программ звукового вещания;

- телефонных сообщений, дуплексных по своему характеру; каналы тональной частоты и их группы можно использовать для обмена другими видами информации — телеграфной, дискретной от ЭВМ и других источников.

В зависимости от вида информации различают универсальные многофункциональные спутниковые системы, ЗС которых обмениваются различными видами информации (таковы Intelsat, «Орбита», ССС Канады Telesat и другие), и специализированные — для передачи одного вида или нескольких однородных видов информации (например, системы спутникового вещания «Экран», НТВ-Плюс для циркулярного распределения телевизионного и звукового вещания).

По охватываемой территории, размещению и принадлежности ЗС, а также структуре управления ССС можно отметить:

- международные, в состав которых входят станции различных стран; такие системы могут быть глобальными, со всемирным охватом пользователей, такие, как «Интерспутник», Intelsat, либо региональными, как Eutelsat, Arabsat, Asiasat;

- национальные, когда все ЗС расположены в пределах одной страны, в том числе зонавые, все ЗС которой расположены в пределах одной из зон (административной области, района) страны;

- ведомственные (деловые, фирменные) системы, ЗС которых принадлежат одному ведомству (одной организации, фирме) и передают только деловую или другую информацию в интересах этого ведомства.

В состав любой ССС, несмотря на функциональное и конструктивное различие, всегда входит несколько одинаковых по назначению элементов:

- космические станции, иногда называемые космическими аппаратами, представляющие собой ретрансляционное приемопередающее устройство на борту ИСЗ с антеннами для приема и передачи радиосигналов и системами жизнеобеспечения: источниками энергоснабжения, системами ориентации антенн (на Землю), солнечными батареями, системами коррекции положения ИСЗ на орбите, терморегулирования и тому подобное;

- земные станции в составе комплекса технических средств для связи с КА различного типа. Перечислим основные из них:

Приемные ЗС распределительных систем (систем спутникового вещания) — самый простой тип станций, работающих только в режиме приема телевизионных, радиовещательных и других циркулярных программ, например изображений газетных полос; обычно приемные ЗС для удешевления снабжают простой и недорогой антенной малого размера, а число таких ЗС в системе может быть достаточно велико.

Передающие ЗС системы спутникового вещания — станции, осуществляющие передачу на участке «Земля — ИСЗ» циркулярных программ для последующего распределения по сети приемных станций. Если такая передающая ЗС находится в пределах обслуживаемой зоны и на ней возможен прием сигналов, излучаемых ИСЗ этой системы, то прием обычно используется для контроля качества вещания.

Приемопередающие ЗС, работающие в сети дуплексной телефонной связи (в том числе с возможностью передачи по телефонным каналам или группам каналов других видов сообщений — телеграфных, данных, программ звукового вещания и пр.), а также в сети обмена телевизионными программами.

Контрольные ЗС — станции для контроля режимов работы ретранслятора космической станции, соблюдения земными станциями сети важных для работы всей сети параметров — излучаемой мощности, частоты передачи, поляризации, качества модулирующего сигнала. Функции контрольной могут возлагаться на одну из передающих или приемопередающих станций сети.

Контрольные и центральные станции сети имеют возможность обмена информацией со станциями сети по специально создаваемой подсистеме служебной связи. Обычно эта подсистема работает через тот же ИСЗ, через который работает основная сеть.

Земные станции системы управления и контроля ИСЗ — станции, осуществляющие управление функционированием КС и подсистемами ИСЗ, а также контролирующие их

состояние, режим вывода ИСЗ на орбиту при первоначальных испытаниях и вводе в эксплуатацию КС.

Соединительные наземные линии служат для соединения ЗС с источниками и потребителями передаваемой информации. Земная станция обычно удалена от них для уменьшения воздействия помех, обеспечения требований по углам закрытия антенн и др. Это соединительные линии от приемопередающей ЗС к междугородной телефонной станции (МТС) или какому-либо другому узлу коммутации телефонной сети, от приемной ЗС к телевизионному передатчику, типографии, радиовещательной станции.

Выносное оборудование — та часть оборудования спутниковой связи, которая может располагаться не на станциях спутниковой связи, а на других объектах. Так, на МТС могут устанавливаться необходимые для работы спутниковых каналов эхозаградители, аппаратура уплотнения, каналообразования и модуляции.

Центр управления системой связи — осуществляет руководство эксплуатацией системы и ее развитием, т. е. вводом в действие новых ЗС и ИСЗ, расписанием их работы, предоставлением ретрансляторов потребителям, проведением ремонтно-профилактических работ и т. п. Центр управления обычно соединяют со станциями сети каналами служебной связи.

#### *Распределение полос частот между службами*

Согласно действующему Регламенту радиосвязи любое частотное присвоение для земной или космической станции подлежит регистрации в Международном союзе электросвязи (МСЭ), «если использование данной частоты может причинить вредные помехи какой-либо службе другой администрации, или частота должна быть использована для международной связи, или если желательно формальное международное признание использования этой частоты». Таким образом, практически все спутниковые системы должны быть зарегистрированы, а в процессе регистрации должна быть проведена проверка совместимости заявляемых систем с уже действующими или заявленными ранее. При этом используются два подхода для удовлетворения потребностей стран в спутниковых системах при одновременном обеспечении их ЭМС, это:

1) постепенное повышение загрузки полос частот и уплотнение позиций на геостационарной орбите, основанные на международной координации, и

2) разработка международных перспективных планов априори для использования отдельных полос частот какой-либо спутниковой службой.

Распределение полос частот между различными службами радиосвязи является сложной процедурой и проводится МСЭ на конференциях радиосвязи на базе научных исследований стран-членов МСЭ, представляемых в исследовательские комиссии сектора радиосвязи.

Основным документом, регламентирующим использование частот, является Регламент радиосвязи с Таблицей распределения полос частот между службами и техническими ограничениями, необходимыми при совместном использовании частот различными службами, а также процедурами координации систем и правилами регистрации частотных присвоений в Бюро радиосвязи МСЭ.

Названная Таблица распределения частот Регламента радиосвязи содержит полосы частот для использования службами радиосвязи в пределах 9 кГц...275 ГГц. Таблица состоит из трех столбцов, каждый из которых соответствует одному из трех Районов. В таблице оговорены полосы частот, выделенные для служб космической радиосвязи.

Ниже приводятся полосы частот, распределенные согласно Регламенту радиосвязи, между различными спутниковыми службами.

Для службы межспутниковой радиосвязи, обеспечивающей связь между ИСЗ связи, выделены полосы частот, ГГц: 22,55...23,55; 32...33; 54,25...58,2; 59...64; 116...134; 170...182; 185...190.

## 2.2. Тема: «Общие сведения о системах космической связи»

### **Общие вопросы структурно-функционального построения систем спутниковой связи и ее составных частей**

#### *Состав системы*

В соответствии с принятой практикой оборудование спутниковых систем связи разделяют на два интегрированных комплекса:

- космический сегмент, образуемый космической станцией или космическим аппаратом, функционирующим на орбите, и центром управления полетом, обеспечивающим функционирование КА в течение срока его эксплуатации;
- земной сегмент в составе земных станций спутниковой связи с необходимыми техническими средствами контроля, управления, служебной связи и сопряжения с наземной сетью.

Технические характеристики космического сегмента, предоставляемого оператором (владельцем) спутника для работы в составе системы, должны поддерживаться этим оператором с необходимым уровнем сервиса.

В составе земного сегмента, кроме технических средств организации спутниковых каналов как основы земного сегмента, находятся также средства контроля, управления, служебной связи и сопряжения с наземной сетью, представляющие собой отдельные подсистемы.

#### *Требования к космическому сегменту*

Космический сегмент предназначен для обеспечения ретрансляции через радиотехнический бортовой комплекс цифровых потоков земных станций в течение всего срока эксплуатации ретрансляторов с заданным уровнем качества и сервиса.

В течение этого срока технические характеристики сегмента должны соответствовать его тактико-техническим требованиям или спецификациям в части:

- допустимых ошибок прицеливания антенн с учетом их деформаций, вызванных тепловыми эффектами и точностью удержания КА на орбите;
- обеспечения работы с основным и резервными комплектами оборудования КА;
- функционирования при полной загрузке всех стволов ретранслятора;
- всех допустимых конфигураций ретрансляционной аппаратуры (модуля полезной нагрузки) и типов ретранслируемых сигналов.

Предполагаемые к использованию в составе космического сегмента системы, должны удовлетворять ряду требований:

- координироваться со всеми Администрациями связи, которые могут испытывать помехи от них;
- нотифицироваться в Международном союзе электросвязи;
- работать в режимах, согласованных в процессе координации.

Оператор космического сегмента должен обеспечивать:

- постоянный и эпизодический телеметрический контроль технических параметров всех узлов платформы и модуля полезной нагрузки, а также модуля служебных систем КА с последующим фиксированием технических показателей;
- резервирование основных узлов в нештатных ситуациях КА по командам с Земли или в автоматическом режиме;
- поддержание КА в точке стояния на ГСО с проведением траекторных измерений фактического положения и последующей выдачей команд в режимах ручного или автоматического управления;
- проведение необходимых регламентных работ на КА для обеспечения его работоспособности в течение всего назначенного срока эксплуатации.

#### *Требования к земному сегменту*

Земной сегмент системы спутниковой связи обеспечивает:

- организацию спутниковых каналов путем формирования требуемых цифровых потоков из сигналов различного вида, перенос их спектров в диапазон частот передачи, прием и демодуляцию радиосигналов для последующего формирования исходящих сигналов;
- сопряжение входящих и исходящих цифровых потоков и аналоговых сигналов с цепями связи государственной сети общего пользования, а также сетями других ведомств;
- управление работой радиотехнического и телекоммуникационного оборудования сети связи по заданным алгоритмам;
- постоянный технический контроль работоспособности оборудования всего земного сегмента.

Требования к техническим характеристикам радиотехнического оборудования земного сегмента формируются на основе известных технических характеристик стволов (транспондеров) ИСЗ, выбора методов модуляции и видов многостанционного доступа к спутниковому ретранслятору, а также на основе установленных параметров качества передаваемой информации.

## **Основные параметры систем спутниковой связи**

### *Параметры земных станций*

Рассмотрим важнейшие параметры земных станций спутниковой связи.

Диапазоны частот приема и передачи, на которые рассчитано оборудование станции, — антенна, приемная и передающая аппаратура. Большинство ЗС ФСС работает в диапазонах 1,5; 4; 11 и 20 ГГц на прием и 1,6; 6; 14 и 30 ГГц на передачу.

Добротность станции на прием G/T, или шумовая добротность (ШД) приемной системы — отношение коэффициента усиления антенны с учетом затухания в фидере (в децибелах на частоте приема) к суммарной шумовой температуре станции (в децибелах относительно 1 К). В настоящее время эта шумовая добротность достигает 42 дБ/К для самых больших применяемых на практике в ЗС спутниковых систем связи антенн (диаметром 32 м) и составляет 20...31,7 дБ/К для ЗС большинства национальных и региональных систем.

Эквивалентная изотропная излучаемая мощность (ЭИИМ) определяется как произведение мощности передатчика на коэффициент усиления антенны (в полосе передачи) относительно изотропной антенны. Этот параметр обычно находится в пределах 50...95 дБВт.

Для упрощенного расчета помех, создаваемых другим сетям связи, часто указывают максимальную спектральную плотность излучаемой ЗС ЭИИМ (Вт/Гц), несмотря на то что точный расчет перекрестных помех требует знания тонкой структуры применяемых в системе видов сигналов.

Диаметр антенны оказывает решающее влияние на размеры и стоимость ЗС; именно он и определяет добротность и ЭИИМ станции, а также ее пространственную избирательность; если в системе используется разделение сигналов по поляризации, необходимо также знать кроссполяризационные характеристики антенны и указывать, с каким видом поляризации работает станция. В составе ЗС магистральной связи обычно применяют антенны диаметром от 1,5...2,5 до 12 м, иногда до 32 м. Для ЗС сетей корпоративной связи — от 0,45 до 2,5...4 м.

Антенна характеризуется также параметрами опорно-поворотного устройства и всей системы наведения антенны на ИСЗ. Различают антенны полноповоротные, способные направляться в любую точку небосвода и неполноповоротные, имеющие ограниченную область оперативного наведения на источник сигнала. Системы наведения антенн характеризуются также возможной скоростью и ускорением углового перемещения. В последние годы все чаще применяют неполноповоротные, медленно движущиеся и неподвижные антенны, пригодные для работы только с геостационарными ИСЗ.

### *Основные показатели космических станций*

Космические станции характеризуются теми же показателями, что и ЗС: рабочим диапазоном частот, добротностью, ЭИИМ каждого передатчика, поляризацией излучаемых и принимаемых сигналов. Однако значения ряда параметров существенно отличаются от одноименных параметров ЗС. Так, например, шумовая добротность приемного тракта обычно составляет  $-10...+6$  дБ/К, что вызвано не только меньшими размерами бортовой антенны, но и применением упрощенного входного малошумящего усилителя. Оборудование ИСЗ имеет ЭИИМ, как правило, в пределах  $23...45$  дБВт, с повышением до  $52...58$  дБВт на спутниках непосредственного телевизионного вещания.

Важнейшей характеристикой ретранслятора космической станции является число стволов (ретрансляторов), размещаемых на борту.

Стволом ретранслятора или ЗС, или стволом спутниковой связи называется приемопередающий тракт, в котором радиосигналы проходят через общие усилительные элементы в выделенной этому стволу общей полосе частот. Весь диапазон частот, в котором работает спутник связи, принято делить на некоторые полосы шириной  $27...36$ ,  $72...120$  МГц, в которых усиление сигналов осуществляется отдельным трактом — стволом. Несколько стволов могут иметь общие элементы — антенну, волноводный тракт, малошумящий входной усилитель.

Полоса одного ствола может разделяться фильтрами для выделения и последующей демодуляции сигналов от различных земных станций, проходящих через общий ствол ИСЗ (при частотном многостанционном доступе).

Вместо термина «ствол» иногда может применяться термин, заимствованный из английского языка, — «транспондер».

Число транспондеров, одновременно действующих на ИСЗ, может составлять  $6-12$ , достигая  $27-48$  на наиболее мощных ИСЗ. Сигналы от отдельных транспондеров разделяются по частоте, пространству, поляризации. Числом транспондеров, их полосой пропускания и ЭИИМ определяется в основном важнейший суммарный показатель ИСЗ — пропускная способность — число телефонных и телевизионных каналов либо в более общем виде: число двоичных единиц в секунду, которое можно передать через данный ИСЗ. О пропускной способности ИСЗ можно говорить лишь условно, поскольку она зависит от добротности применяемых в системе земных станций и вида применяемых радиосигналов. Пропускная способность, по существу, — характеристика всей системы связи, а не самого ИСЗ. Тем не менее в литературе часто используется понятие пропускной способности (емкости) ИСЗ.

В зависимости от диаграммы направленности бортовых антенн ИСЗ характеризуется зоной покрытия — той частью площади земной поверхности, в пределах которой обеспечивается необходимый уровень сигналов от ИСЗ для приема с заданным качеством при определенной добротности ЗС. Зона покрытия ИСЗ характеризует всю систему спутниковой связи, а не только собственно ИСЗ.

Зона покрытия определяется шириной диаграммы направленности бортовой антенны ИСЗ и рассчитывается как контур, ограниченный пересечением поверхности Земли конусом диаграммы направленности бортовой антенны по заданному уровню, обычно по уровню половинной мощности или  $-3$  дБ. Форма этого контура зависит от координат подспутниковой точки в виде проекции точки размещения ИСЗ на земную поверхность через ее центр, «точки прицеливания» — места пересечения максимума диаграммы бортовой антенны с земной поверхностью, а также от нестабильности положения ИСЗ на орбите и неточности ориентации его антенн. В связи с возможной нестабильностью положения спутника на орбите вводится понятие гарантированной зоны обслуживания, в которой обеспечивается сохранение указанных ранее условий приема и передачи при любых сочетаниях отклонений ИСЗ и антенны ИСЗ от среднего положения.

Точка стояния ИСЗ на орбите, точка прицеливания его антенны, нестабильности этих параметров существенны для расчета зон обслуживания и взаимных помех между

ССС. Для учета взаимных помех должна быть известна максимальная спектральная плотность излучаемого ИСЗ потока мощности (Вт/м<sup>2</sup>Гц).

Важнейшим параметром ИСЗ, определяющим как надежность, так и экономические характеристики всей системы связи, является срок службы ИСЗ, определяющий время наработки до отказа допустимого числа транспондеров космической станции, определяемое с вероятностью 0,9 и более. В современных ИСЗ благодаря высокой надежности комплектующих изделий и правильной схеме резервирования срок службы достигает 10...12 лет и более.

#### *Основные показатели систем спутниковой связи*

Зона обслуживания — часть земной поверхности, внутри которой необходимо обеспечить нормальную работу земных станций. На этой территории необходимо обеспечить не только выполнение всех требований к зоне покрытия, но и защиту от помех со стороны других радиосистем, в том числе других спутниковых систем связи.

Зона обслуживания системы — это объединенная зона обслуживания отдельных ИСЗ данной системы связи.

Термин «объединенная» означает, что зоны отдельных ИСЗ могут перекрываться.

Пропускная способность системы — это объединение пропускных способностей всех входящих в систему ИСЗ. Пропускная способность системы связи, как и зона обслуживания, может оказаться меньше суммы пропускных способностей отдельных ИСЗ. Дело в том, что для связи между земными станциями, обслуживаемыми разными ИСЗ, часть каналов может транслироваться разными КА последовательно — с помощью двух скачков на линии (Земля — ИСЗ — Земля — ИСЗ — Земля) или через межспутниковые линии связи (Земля — ИСЗ — ИСЗ — Земля).

Пропускная способность системы зависит от числа спутников на орбите и от воздействия помех, создаваемых другими ССС. Система спутниковой связи характеризуется и другими параметрами: количеством и местом дислокации ЗС, числом ИСЗ, типом их орбиты и подспутниковой точкой. Определенной характеристикой спутниковой системы являются также число транспондеров на борту ИСЗ, их полоса пропускания, ширина и номиналы полос частот транспондеров на участках Земля — ИСЗ и ИСЗ — Земля.

Важнейшей характеристикой спутниковой системы связи является метод многостанционного доступа — метод совмещения сигналов различных ЗС для их прохождения через общий транспондер бортового ретранслятора. Многостанционный доступ (МД) позволяет иметь на борту ИСЗ количество транспондеров меньше числа ЗС в системе. Для сокращения их количества применяется МД с разделением сигналов по частоте, форме и времени. Всякий такой способ МД приводит к потере пропускной способности стволов на 3...6 дБ, однако в наиболее совершенных системах с временным разделением (МДВР) эти потери не превышают 0,5...2 дБ.

На характеристики системы связи, такие, как ширина полосы частот, электромагнитная совместимость с другими системами связи, существенно влияет применяемый метод модуляции. Наиболее распространенными являются частотная модуляция (ЧМ) при передаче сообщений в аналоговой форме и фазовая модуляция (ФМ) при передаче сообщений в дискретной форме. Важнейшее значение при ЧМ имеет параметр девиации частоты, при ФМ — число фаз несущей (кратность модуляции), а при передаче программ телевидения — способ передачи звукового сопровождения (временное или частотное совмещение с видеосигналом, частота поднесущей частоты звукового канала и т. п.).

Важной характеристикой системы спутниковой связи является качество организуемых в ней каналов — телевизионных, телефонных и др. Обычно ССС используется для организации передачи международных либо междугородных каналов связи большой протяженности, причем качество каналов должно соответствовать требованиям рекомендаций Международного союза электросвязи (МСЭ) и

государственных нормативных документов. В некоторых системах спутниковой связи, исходя из их назначения или экономических соображений, могут допускаться как более высокие, так и более низкие показатели качества.

### **Контрольные вопросы**

1. Параметры земных станций.
2. Основные показатели систем спутниковой связи.
3. Основные показатели космических станций
4. Чем определяется зона покрытия СС.
5. Чем определяется число транспондеров, одновременно действующих на ИСЗ.
6. От чего зависит пропускная способность системы.
7. Что должно быть известно для учета взаимных помех.

## **2.3 Тема: «Общие характеристики и принципы построения радиотехнических комплексов мониторинга КА»**

### *Обзор существующих систем контроля спутниковых сигналов*

Существующие системы мониторинга обеспечивают необходимый уровень контроля частотного спектра полезных нагрузок космических аппаратов. Однако идентификация помех в спутниковых сетях, причиной которых являются некорректно работающие передатчики земных станций, при использовании рассмотренных систем не представляется возможным.

Для измерения мощности несущих обратных каналов спутниковой сети, организованных по технологии, например, многостанционного доступа с разделением сигналов по времени (МДВР) необходимо проводить временное стробирование. Номинальная мощность канала при технологии МДВР таким образом, может определена в период времени, ограниченного тайм-слотом для данного канала.

Рассмотрим автоматизированную систему контроля параметров спутниковых сигналов при многостанционном доступе с временным разделением каналов.

Данная система включает следующие функциональные блоки: анализатор цифрового потока, контроллер МДВР, автоматизированное рабочее место (АРМ) станции мониторинга МДВР, анализатор спектра, коммутатор. После интеграции данной системы в главную систему мониторинга, данная система может быть названа: «система мониторинга МДВР».

Блок-схема автоматизированной системы контроля параметров спутниковых сигналов при многостанционном доступе с временным разделением каналов представлена на рис. 3.1.

Анализ выполнения условий реализации системы.

В системе выполняются следующие операции:

- единичные измерения тайм-слота ЗС и проведение экспресс-анализа спектра сигналов;
- выполнение серии измерений в нескольких тайм-слотах и проведение расширенного анализа сигналов;
- установление соответствия принятых сигналов идентификационным номерам земных станций спутниковой сети.

Экспресс-анализ выполняется на основе измерений, выполненных в режиме реального времени и принятых расчетных данных о задержках сигнала в наземном и спутниковом сегменте.

Расширенный анализ выполняется следующим образом.

Соответствие между сигналами, принятыми по наземному каналу связи и спутниковой линии связи осуществляется с применением корреляционного анализа.



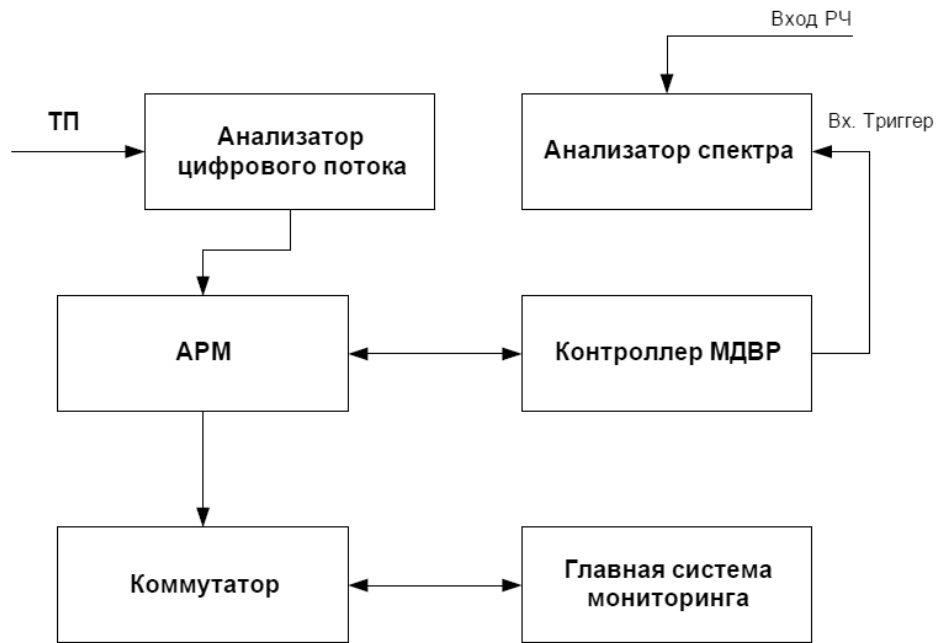


Рис. 3.1 - Блок-схема автоматизированной системы контроля параметров спутниковых сигналов при многостанционном доступе с временным разделением каналов

В качестве объекта анализа принимается система количественных признаков  $X$ ,  $Y$ , где в результате  $n$  независимых измерений получены пары чисел:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n).$$

Количественный признак  $X$  включает множество чисел  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , количественный признак  $Y$  включает множество чисел  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ .

В рассматриваемом случае числа множества  $X$  – это интервалы  $x_i$  между временными метками начала тайм-слотов ЗССС, принятых по наземному каналу связи; числа множества  $Y$  – интервалы  $y_i$  между передними фронтами ВЧ-сигналов, принятых через спутниковую линию связи.

Репрезентативность количества  $n$  выборок значений  $x_i, y_i$  для выполнения анализа определяется временем задержки приема сигнала спутникового канала относительно сигнала, принятого по наземному каналу связи.

Величина оценки  $r$  коэффициента корреляции определяется по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

где  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ;  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ ;  $n$  – объем выборок.

Значение  $r$  коэффициента корреляции выполняется для каждой серии измерений спектра в пределах времени задержки спутниковой линии  $T_{зсл}$ . Соответствие между сигналами, принятыми по наземному каналу связи и спутниковой линии связи устанавливается для серии измерений с наибольшим значением коэффициента корреляции.

На рис. 3.2 приведены типовые варианты радиоконтроля орбитальной группировки КА связи на геостационарной орбите. При этом возможен вариант, при котором одна орбитальная группировка КА будет контролироваться несколькими средств радиоконтроля (СрРК), в том числе различной ведомственной принадлежности по несогласованным показателям эффективности.



Рис. 3.2 – Варианты радиоконтроля орбитальной группировки КА связи

Нахождение КА связи в зоне радиоконтроля СрРК не гарантирует получение информации о всех каналах спутниковой связи данного КА. Например, при взаимном расположении абонентов спутниковой связи и СрРК, представленном на рис. 3.3, контроль канала передачи информации от КА к абоненту № 1 возможен по боковому лепестку диаграммы направленности КА связи, а контроль канала абонента №2 невозможен.

Это объясняется тем, что ширина главного лепестка диаграммы направленности при передаче информации по каналу «космос-Земля» составляет десятые доли градуса, что не позволяет контролировать радиоканалы абонентов, находящихся на достаточном удалении от станций радиоконтроля (порядка 1000-1500 км).

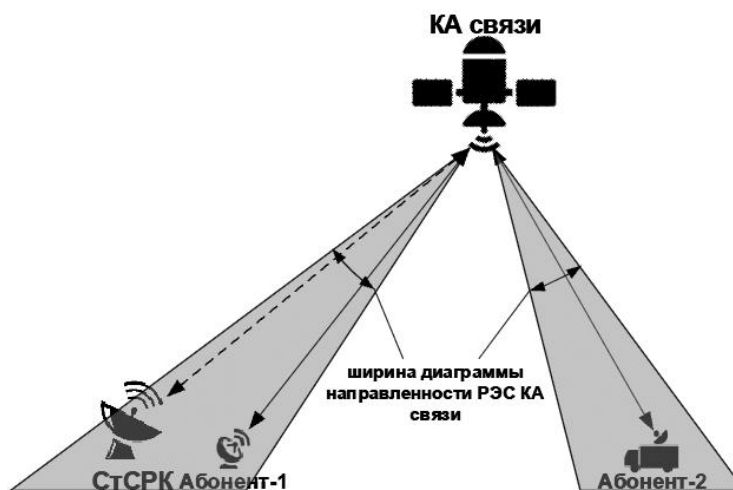


Рис. 3.3 – Радиоконтроль абонентов спутниковой системы связи

В связи с этим представляется целесообразным использование двух и более территориально разнесенных средств на один КА связи для увеличения количества контролируемых каналов. Однако существующие подходы к планированию задействования СрРК предполагают использование комбинаторно - эвристических

методов, гарантирующих получение локально оптимальных решений, а также не учитывают возможность дублирования контролируемых каналов при различных назначениях. В связи с этим возникает необходимость поиска альтернативных методов планирования применения СрРК, обеспечивающих максимально полное использование имеющегося технического ресурса средств контроля радиочастотной обстановки в интересах повышения результативности всей системы спутникового радиоконтроля.

#### *Контроль траекторий движения КА*

Контроль траекторий движения КА производится с помощью измерительных систем, которые предназначены для получения первичной навигационной информации с целью определения в результате дальнейшей обработки параметров траектории КА и прогнозирования его положения. Навигационная информация получается в наземных измерительных пунктах в топоцентрической системе координат в виде расстояния до КА, углов на КА, радиальной и угловой скоростей. Соответствующая совокупность данных привязывается к моменту измерения в системе единого времени, а затем пересчитывается к геоцентрической инерциальной системе координат. По минимально необходимой или избыточной выборке таких совокупностей рассчитываются параметры траектории.

Процесс определения навигационной величины заключается в следующем. Измеряется параметр сигнала, связанный с навигационной величиной, на заданном интервале времени, усредняется на интервале измерения, относится к середине временного интервала и привязывается к шкале единого времени. В дальнейшей обработке такой отсчет используется в качестве единичного. При такой процедуре вводится ещё одна характеристика измерения: надёжность, определяемая как вероятность потери одного из измерений на участке первичного временного усреднения, например за счёт уменьшения уровня сигнала.

Основными параметрами входного сигнала, из которых извлекается информация в измерительных системах, являются частота, время и фаза. Поскольку производить измерения во многих случаях приходится при малых отношениях сигнал/шум, то приходится говорить об обработке пороговых сигналов и потенциальной точности измерения. Потенциальная точность измерения определяется только соотношением мощностей сигнала и шума на входе измерителя. Для обеспечения минимального искажения измеряемого параметра существует оптимальный измеритель. Однако, на практике обычно используются квазиоптимальные измерители, которые реализуются в схемном отношении проще, а ухудшение дают небольшое.

Известно, что все измерители делятся на следящие и неследящие. Причём они могут быть аналоговыми и цифровыми. Встречаются и измерители, содержащие одновременно и аналоговую и цифровую части. Тогда в их составе присутствует звено преобразования аналог-цифра и наоборот.

Функциональная схема неследящего измерителя представлена на рис. 3.4.

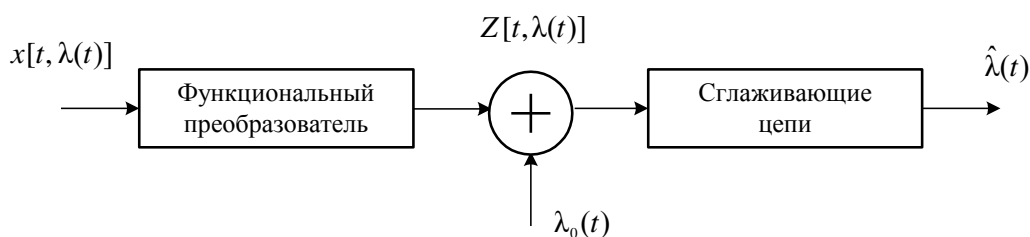


Рис. 3.4 - Схема неследящего измерителя

Здесь функциональный преобразователь (блок оценки) — нелинейный элемент, преобразующий входной сигнал в напряжение, пропорциональное в среднем измеренному параметру.

Функциональная схема следящего измерителя представлена на рис 3.5.

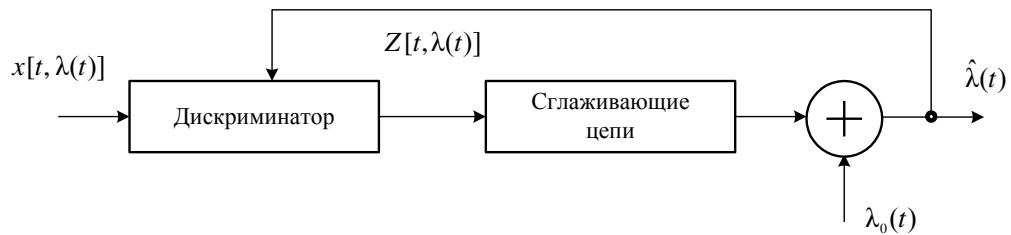


Рис. 3.5 - Схема следящего измерителя

Обозначения на схеме следующие:  $\lambda_0(t)$  — программные значения параметра (программные изменения в полёте);  $\tilde{\lambda}(t)$  — оценка параметра;  $\varepsilon(t) = \lambda_0(t) - \tilde{\lambda}(t)$  — сигнал рассогласования измеряемого параметра.

Дискриминатор — существенно нелинейный относительно измеряемого параметра элемент. Сглаживающие цепи устраняет зависимость от времени путем усреднения.

Не следящие измерители, обычно, проще выполняются. В них отсутствует режим захвата, и нет срыва слежения. Следящие измерители лучше устраняют динамические ошибки. Их точность не зависит от абсолютной величины параметра, т.к. работают они по разности заданного и измеренного значений параметра.

## 2.4 Тема: «Математические модели сигналов и помех»

### Шумы и помехи

В системах передачи информации неизбежно присутствуют помехи, искажающие принимаемый сигнал, что снижает достоверность приема. Помехи могут возникать из-за:

- теплового шума аппаратных средств,
- посторонних излучений, в т. ч. естественного характера, часть спектра которых попадает в полосу пропускания приемных устройств,
- замирания сигнала, вызванного многолучевым распространением при тропосферном рассеянии, а также распространением в пределах городской застройки.

### Аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ)

Во многих случаях, особенно в спутниковой связи, тепловой шум является самым распространенным источником помех, поэтому влияние шума на характеристики передачи, прежде всего на помехоустойчивость систем передачи информации, было исследовано достаточно глубоко. Основной причиной АБГШ является тепловое движение электронов во всех элементах и узлах приемного тракта - антенно-фидерных элементах, малошумящем усилителе и первом понижающем преобразователе частоты. Полезный сигнал, проходя тракт, суммируется со случайной составляющей, что отражено первым символом в аббревиатуре АБГШ (от англ. addition - добавление).

Плотность вероятности случайного процесса с нормальным распределением описывается выражением:

$$P(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(n - M[n])^2}{2\sigma^2}\right].$$

Графическое представление  $P(n)$  приведено на рис. 4.1. Здесь  $n$ -случайный сигнал со средним значением (математическим ожиданием)  $M[n]$ ;  $\sigma^2 = D$  - дисперсия (мощность) случайного процесса  $n(t)$ . Если  $M[n] = 0$ , то говорят, что процесс центрирован и плотность вероятностей симметрична относительно нуля (рис. 4.1).

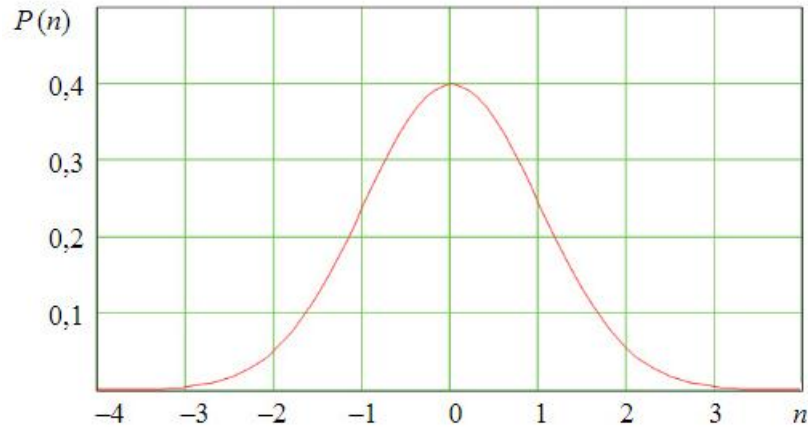


Рис. 4.1 - График нормальной плотности вероятностей случайного процесса с нулевым средним значением и дисперсией  $D = 1$

Распределение мгновенных значений шумового напряжения по нормальному закону отражено в аббревиатуре АБГШ «гауссовский». Модель белого шума по аналогии с белым светом предполагает, что все спектральные компоненты одинаково интенсивны с равной мощностью на единицу полосы частот в диапазоне до очень высоких частот. Поэтому считается, что спектральная плотность мощности теплового шума (Вт/Гц) равномерна для всех частот:

$$G(f) = \frac{N_0}{2}, \quad (4.1)$$

где  $G(f)$  - двухсторонняя спектральная плотность мощности. Здесь  $N_0 = kT_0$  - односторонняя спектральная плотность мощности шума ( $k$  - постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град (Вт с);  $T_0$  - температура в градусах Кельвина).

Автокорреляционная функция (АКФ) АБГШ  $R(\tau)$  определяется обратным преобразованием Фурье от  $G(f)$  и представляет собой  $\delta$ -функцию (рис. 4.2):

$$R(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau), \quad (4.2)$$

где  $\delta(x)$  - дельта-функция (функция Дирака).  $\delta(x) = \begin{cases} \infty & \text{для } x = 0 \\ 0 & \text{для } x \neq 0 \end{cases}$ ;  $N_0$  - спектральная плотность мощности источника шума.

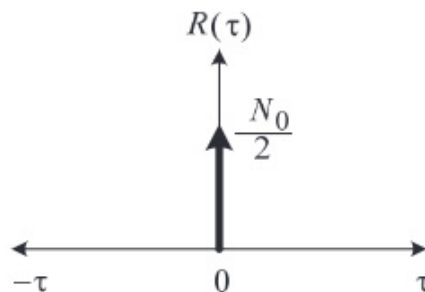


Рис. 4.2 - Автокорреляционная функция АБГШ

В частном случае АБГШ  $\delta(\tau)$  определяет автокорреляционную функцию выборок шума, из которой следует, что для  $R(\tau) = 0$  для всех  $\tau \neq 0$  любые выборки АБГШ не коррелированы.  $R(\tau=0) = D$  - дисперсии шума, Вт.

Автокорреляционная функция АБГШ есть математическое ожидание произведения двух любых отсчетов процесса  $n(t)$ :

$$R[n(\tau)] = M[n(t_1)n(t_2)] = \overline{n(t_1)n(t_2)} = \frac{N}{2} \delta(t_1 - t_2).$$

Здесь черта над произведением обозначает операцию усреднения. Дельта-функция обладает замечательным свойством, которое называют «фильтрующим свойством  $\delta$ -функции» и которое широко используется при анализе прохождения АБГШ через различные цепи. Оно состоит в следующем:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t_1) \delta(t_1 - t_2) dt_2 = x(t_1). \quad (4.3)$$

Мощность АБГШ бесконечна, поскольку бесконечна ширина полосы частот. В формуле (4.3) по определению  $\delta$ -функции  $\delta(\tau = 0) = \infty$ , что также доказывает, что дисперсия (мощность) АБГШ бесконечна. При уменьшении ширины полосы пропускания внеполосные составляющие шума отфильтровываются. Поэтому мощность отфильтрованного шума  $P_u$  (Вт) зависит от ширины полосы тракта  $\Delta F$ :

$$P_u = kT_0 \Delta F.$$

Известно много источников шума, например, обычный активный резистор  $R$  (Ом) является генератором шума ( $B^2$ ):

$$U_u^2 = 4kT_0 R \Delta F. \quad (4.4)$$

Произведение  $kT_0$  характеризует интенсивность теплового движения электронов в проводнике, от которой зависят флуктуации напряжения шума. При расчетах обычно полагают, что аппаратура находится при комнатной температуре  $+20^\circ\text{C}$ . Тогда в формуле (4.4) следует подставлять значение  $T_0 = 273 + 20 = 293 \sim 300$  К. Естественно, при работе аппаратуры в открытом космосе в условиях тени относительно Солнца следует использовать значение  $T_0 = 0$  К.

Одним из важнейших показателей любой радиосистемы является отношение мощности сигнала к мощности шума: с/ш. В англоязычной литературе этот параметр называют  $SNR$  (signal to noise ratio.  $S/N$  или  $SNR$ ). Отношение с/ш определяет помехоустойчивость системы, поскольку от него зависит вероятность ошибки. В цифровых радиотехнических системах передачи информации этот показатель есть отношение энергии элемента сигнала (бита), к спектральной плотности мощности шума:

$$c / ш = \frac{E_c}{N_0} \left( \frac{Дж}{Вт / Гц} \right) = \frac{P_c T}{P_u / \Delta F} \left( \frac{Вт \cdot с}{Вт / Гц} \right).$$

Здесь  $P_c$ ,  $T$  - мощность сигнала и его длительность;  $P_u$  - мощность источника шума;  $\Delta F$  - ширина полосы пропускания тракта или, как говорят, шумовая полоса.

Кратко охарактеризуем помехи, которые могут возникнуть в системах передачи информации.

Сосредоточенные по спектру, или гармонические, помехи представляют собой узкополосный модулированный сигнал. Причинами возникновения таких помех являются снижение переходного затухания между цепями кабеля, влияние радиостанций и т. п.

Импульсные помехи – это помехи, сосредоточенные по времени. Они представляют собой последовательность импульсов, имеющих случайные амплитуды и следующих друг за другом через случайные интервалы времени, причем вызванные ими переходные процессы не перекрываются во времени. Причины появления этих помех: коммутационные шумы, наводки с высоковольтных линий, грозовые разряды и т. п. Нормирование импульсных помех в канале тональной частоты (ТЧ) производится путем ограничения времени превышения ими заданных порогов анализа.

Флуктуационная помеха характеризуется широким спектром и поэтому с ней труднее всего бороться. Однако в проводных каналах связи мощность флуктуационных

помех достаточно мала и они при малой удельной скорости передачи информации практически не влияют на коэффициент ошибок.

Мультипликативные помехи обусловлены случайными изменениями параметров канала связи. В частности, эти помехи проявляются в изменении уровня сигнала на выходе демодулятора. Различают плавные и скачкообразные изменения уровня. Причиной плавных изменений уровня могут быть колебания затухания линии связи, вызванные, например, изменением состояния погоды, а в радиоканалах - замирания. Причиной скачкообразных изменений уровня могут быть плохие контакты в аппаратуре, несовершенство эксплуатации аппаратуры связи, технологии измерений и др. Снижение уровня более чем на 17,4 дБ ниже номинального называется перерывом. При перерыве уровень падает ниже порога чувствительности приемника и прием сигналов фактически прекращается. Перерывы длительностью меньше 300 мс принято называть кратковременными, больше 300 мс - длительными.

Фильтрация мультипликативной помехи в классе линейных фильтров невозможна. Поэтому была разработана гомоморфная фильтрация. Входной сигнал, искаженный помехой в силу операций перемножения или свертки, подвергается логарифмированию. В результате этого формируется сумма логарифмов сигнала и помехи и логарифм помехи может быть отфильтрован линейными средствами.

Пусть, например, сигнал на входе приемника  $f(t)$  (или устройства обработки принятого сигнала) представляет собой произведение информационного сигнала  $s(t)=\sin(\omega t)$  с некоторой весовой функцией  $y(t)$   $f(t)=s(t)\cdot y(t)$ . Под весовой функцией может пониматься, в частности, импульсная характеристика антенны. Понятно, что входной сигнал явно отличается от исходного, что не позволяет извлечь из него необходимый информационный параметр. В результате логарифмирования (натуральный логарифм принят только для определенности) получим  $F(t)=\ln s(t)+\ln y(t)$ .

Поскольку весовая функция известна, то известен и ее логарифм:  $Y(t)=\ln y(t)$ . Исходный сигнал легко получить путем вычисления  $s(t)=\exp[F(t)-Y(t)]$ . Рассмотренная процедура в полной мере применима к комплексным сигналам.

Импульсные помехи и перерывы являются основной причиной появления ошибок при передаче дискретных сообщений по проводным каналам связи.

К искажениям формы сигнала на выходе непрерывного канала приводят также сдвиг его спектральных составляющих по частоте, фазовые скачки и фазовое дрожание (джиттер) несущего колебания. В результате частотного сдвига, фазовых скачков и фазового дрожания и появляется паразитная угловая модуляция сигнала.

Помехи и шумы в цифровом канале связи приводят к искажению цифрового потока данных. Однако наблюдать эти искажения трудно, поскольку последовательность битов носит явно случайный характер и синхронизация для визуального наблюдения весьма затруднена. Для решения визуализации искажений цифрового потока был разработан удобный метод получивший название «глазковой диаграммы» или «глаз-диаграммы». На вход канала вертикальной развертки подается исследуемый цифровой поток, а на вход горизонтальной развертки – импульсы, следующие с частотой либо равной, либо кратной частоте следования битов. На экране осциллографа наблюдается результат наложения импульсных сигналов (рис. 4.3). По ней можно легко определить зону уровней сигнала, в пределах которой следует принимать решение о значении сигнала (1 или 0). Хорошо виден и может быть измерен джиттер в области переходов 1-0 и обратно.

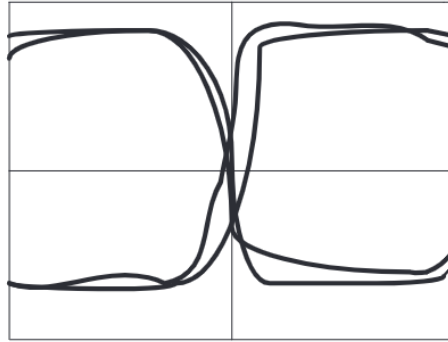


Рис. 4.3 - Глаз-диаграмма цифрового потока

Если импульсы формируются путем глубокого усиления-ограничения, то плоская часть импульсов не искажена шумом; в области смены значения бита наблюдаются множественные переходы. Завал плоской части, как и конечное время нарастания (или спада) напряжения, объясняется влиянием амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) тракта. Влияние фазочастотной характеристики (ФЧХ) тракта сказывается на изменении формы импульса.

*Межсимвольные помехи*

Недостаточная широкополосность тракта приводит к межсимвольным искажениям (рис. 4.4). Передача каждого отдельного символа сопровождается переходными процессами. На рис. 4.4а в качестве примера приведена последовательность 1, -1, 1; на рис. 4.4б показаны отклики тракта (без предыстории) на первый бит (кривая 1), на второй бит (кривая 2) и третий бит (кривая 3). Как известно, реакция линейной цепи на произвольное воздействие определяется сверткой импульсной характеристики цепи на воздействие. Отклик цепи сопровождается колебательным последствием, продолжительность которого определяется шириной полосы пропускания цепи. На рис. 4.4в приведена сумма откликов цепи на последовательность импульсных сигналов, взятых в качестве примера. Обработка суммарного сигнала пороговыми устройствами на превышение пороговых уровней  $\pm U_{пор}$  приводит к формированию выходной последовательности, показанной на рис. 4.4а пунктиром. Коэффициент передачи для бóльшей наглядности принят меньше 1. Как видно, межсимвольные искажения могут существенно изменить параметры передаваемой последовательности, приводя к ошибкам передачи.

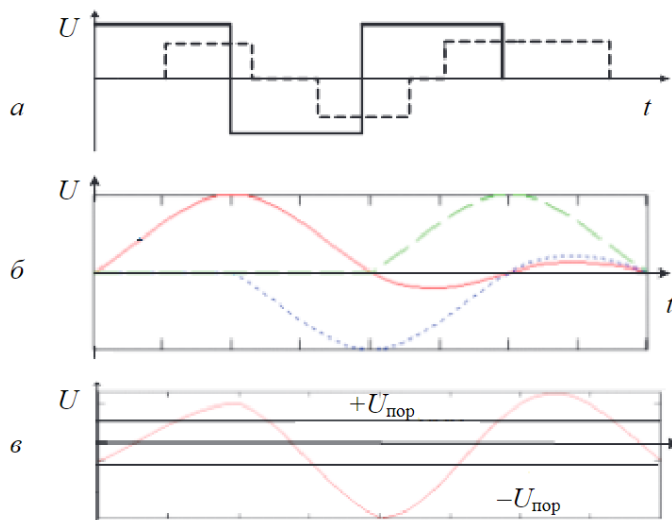


Рис. 4.4 - Образование межсимвольных искажений



На рис. 4.5 приведена зависимость допустимого отношения сигнал/шум  $q$  от произведения ширины полосы частот тракта  $\Delta\omega$  на длительность импульсов  $T$  для вероятности ошибки, не превышающей  $P = 10^{-6}$ . В расчетах принято, что приемник содержал 6-полюсный фильтр Баттерворта. Принимались сигналы ФТ2 и ФТ4 при когерентной демодуляции. Как видно, при достаточно узкополосном тракте необходимо значительное увеличение отношения сигнал/шум для достижения установленного значения вероятности ошибки. Борьба с влиянием межсимвольной помехи состоит в формировании спектра передаваемого сигнала (внесение предискажений), а также в компенсации откликов от сопутствующих предыдущих посылок.

Причиной межсимвольных искажений также является многолучевое распространение.

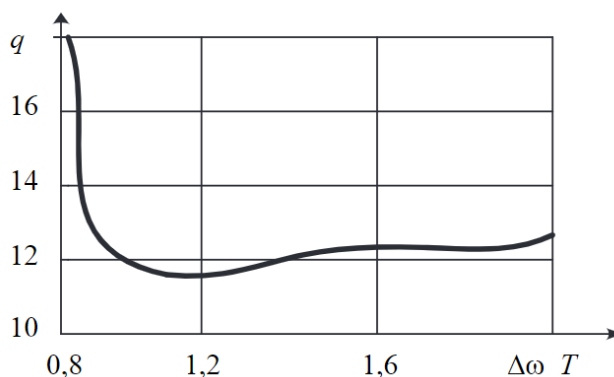


Рис. 4.5 - Вероятность ошибки, вызванной межсимвольной помехой

*Мультипликативная помеха* (от английского multiply-умножать) обычно является следствием многолучевости при радиосвязи в условиях, когда электрические свойства атмосферы или рельеф подстилающей поверхности случайным образом изменяются в пространстве и во времени (распространение радиоволн в городе или в неоднородной атмосфере).

Общий подход к описанию мультипликативной помехи заключается в том, что линия с многолучевостью представляется как линейный фильтр сослучайно изменяющимися параметрами

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(t, \omega) S_x(\omega) \exp(i\omega t) d\omega, \quad (4.5)$$

где  $S_x(\omega)$  – спектр сигнала  $x(t)$ ,  $H(t, \omega)$  – передаточная функция этого фильтра, которая является комплексной случайной функцией двух переменных (для обычного фильтра с постоянными параметрами она зависит лишь от  $\omega$ ).

Наиболее важные числовые характеристики статистически однородной передаточной функции – это ширина  $\Delta t_n$  её временной ковариационной функции

$$R(\Delta t) = M [H(t, \omega) H^*(t + \Delta t, \omega)], \quad (4.6)$$

и ширина  $\Delta\omega_n$  её частотной ковариационной функции

$$R(\Delta\omega) = M [H(t, \omega) H^*(t, \omega + \Delta\omega)]. \quad (4.7)$$

Практически для всех реальных каналов  $H(t, \omega)$  медленно изменяется по  $t$  и  $\omega$  ( $\Delta t_n$  имеет порядок долей секунды,  $\Delta f_n = \Delta\omega_n / 2\pi$  имеет порядок десятков килогерц и даже более), и в итоге

$$\Delta t_i \cdot \Delta f_i \gg 1. \quad (4.8)$$

Благодаря последнему свойству удается наблюдать почти в чистом виде мультипликативные помехи двух типов.

Если входной сигнал узкополосный в том смысле, что его спектр  $S_x(\omega)$  сосредоточен в узкой полосе частот  $\Delta\omega \ll \Delta\omega_n$ , можно приближенно считать, что передаточная функция канала практически постоянна в полосе частот  $\Delta\omega$ , то есть  $H(t, \omega) \approx H(t, \omega_0)$ , где  $\omega_0$  – центральная частота спектра. Тогда из (4.5) имеем

$$y(t) \approx H(t, \omega_0)x(t), \quad (4.9)$$

поскольку  $x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) \exp(i\omega t) d\omega$ .

Отсюда видно, что помеха проявляется как случайные изменения во времени коэффициента передачи, и это приводит к случайным медленным флуктуациям амплитуды и фазы сигнала. Если при этом длительность элементов (импульсов, например), из которых состоит сигнал, меньше чем  $\Delta t_n$ , то форма импульсов практически не меняется. Тем не менее, форма спектра выходного сигнала  $S_y(\omega)$  случайным образом отличается от  $S_x(\omega)$ , при этом спектр в среднем несколько расширяется (величина расширения спектра имеет порядок  $1/\Delta t_i$ ).

Такой тип помехи классифицируется как временные селективные замирания (фединг). Флуктуации уровня сигнала приводят к тому, что качество связи случайно изменяется во времени, а в отдельные периоды, при наиболее глубоких замираниях, связь может нарушаться полностью.

Наличие помехи второго типа можно обнаружить, если одновременно передавать два узкополосных сигнала, имеющие центральные частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Их замирания будут дружными (почти синхронными во времени), если  $\omega_1 - \omega_2 \ll \Delta\omega_n$ . В противном случае, при большом разнесении по частоте  $\omega_1 - \omega_2 > \Delta\omega_n$ , замирания сигналов практически независимы.

Помеха второго типа преобладает в случае, когда длительность сигнала  $\Delta t \ll \Delta t_n$ , и поэтому можно приближенно считать  $H(t, \omega) \approx H(t_0, \omega)$ , где  $t_0$  – момент времени, соответствующий центру этого сигнала (импульса). Тогда из (4.5) получаем

$$S_y(\omega) \approx H(t_0, \omega) S_x(\omega), \quad (4.10)$$

т.е. многолучевой канал воздействует на передаваемый сигнал как фильтр с постоянной во времени, но случайной частотной характеристикой.

Сравнив выражения (4.9) и (4.10), мы можем считать помеху второго типа как частотные селективные замирания. Более того, приведенную выше характеристику помехи первого типа можно перенести на помеху второго типа, поменяв местами переменные  $t$  и  $\omega$ , т.е. сам сигнал  $y(t)$  и его спектр  $S_y(\omega)$ . Случайные искажения спектра сигнала приводят к тому, что импульсы в процессе передачи случайным образом искажаются, растягиваются (рассеиваются) во времени тем больше, чем больше отношение  $\Delta\omega/\Delta\omega_n$ , при этом средняя величина рассеяния во времени имеет порядок  $1/\Delta f_i$ .

Понятно, что помехоустойчивость приема сигнала, форма которого случайна, ниже по сравнению с ситуацией, когда форма ожидаемого сигнала известна заранее. Более того, рассеяние во времени приводит к наложению соседних импульсов друг на друга и к их дополнительным искажениям. Такое явление известно как межимпульсная или межсимвольная интерференция.

Если  $\Delta t \ll \Delta t_n$  и  $\Delta\omega \ll \Delta\omega_n$ , то форма сигнала не искажается

$$y(t) \approx H(t_0, \omega_0)x(t), \quad (4.11)$$

хотя при этом модуль и аргумент постоянного коэффициента передачи  $H(t_0, \omega_0)$  являются случайными величинами. В итоге это определяет случайность амплитуды и фазы принимаемого сигнала  $y(t)$ . Если же  $\Delta t > \Delta t_n$  и  $\Delta\omega > \Delta\omega_n$ , то существенно совместное влияние мультипликативной помехи обоих типов.

Более того, многолучевость приводит ещё и к появлению пространственных селективных замираний, т.е. к случайным искажениям в пространстве амплитуд и фаз

волн в пункте приема. В итоге флуктуации сигналов, принимаемых двумя разнесенными в пространстве антеннами, становятся всё менее зависимыми при увеличении разнесения. Для большинства каналов при разнесении антенн на расстояние в  $(10...100) \lambda$  эти флуктуации становятся практически независимыми.

Наличие любой помехи (аддитивной или мультипликативной) приводит к тому, что принимаемый сигнал  $y(t)$  практически всегда отличается по форме от переданного сигнала  $x(t)$ .

### Методы аналитического и геометрического представления сигналов и помех

Любой сигнал (с помехой или без нее) – это функция времени  $U(t)$ , характеризующая изменение напряжения или тока в некоторой точке тракта передачи.

Узкополосный сигнал, у которого ширина спектра намного меньше несущей частоты  $\omega_0$ , более удобно представить в виде

$$U(t) = A(t) \cos \theta(t) = A(t) \cos [\omega_0 t + \Delta\varphi(t)], \quad (4.12)$$

где функции  $A(t) > 0$  и  $\varphi(t)$  в явном виде задают законы амплитудной и фазовой модуляции соответственно. Зачастую ещё более удобна запись такого сигнала в виде суммы двух колебаний

$$U(t) = C(t) \cos \omega_0 t + S(t) \sin \omega_0 t, \quad (4.13)$$

где  $C(t) = A(t) \cos \varphi(t)$  и  $S(t) = -A(t) \sin \varphi(t)$  – квадратурные составляющие сигнала.

И, наконец, для действительного узкополосного сигнала широко используется представление в виде “аналитического сигнала”

$$\dot{u}(t) = A(t) \exp[i\omega_0 t + i\varphi(t)] = \dot{U}(t) \exp(i\omega_0 t), \quad (4.14)$$

т.е. комплексной функции, у которой реальная часть совпадает с (4.12)

$$U(t) = \operatorname{Re}[\dot{u}(t)]. \quad (4.15)$$

Функция  $U(t)$  может быть названа комплексной огибающей высокочастотного сигнала  $U(t)$  и определяется следующим образом

$$\dot{U}(t) = A(t) \exp[i\varphi(t)] = A(t) \cos \varphi(t) + iA(t) \sin \varphi(t) = C(t) - iS(t). \quad (4.16)$$

Основное достоинство приведенных способов описания узкополосного сигнала  $U(t)$  проистекает из того, что функции  $A(t)$ ,  $\varphi(t)$ ,  $C(t)$ ,  $S(t)$ ,  $U(t)$  – это медленноменяющиеся функции, т.е. каждая из них относительно мало изменяется на интервале времени  $T = 2\pi/\omega_0$ , равном периоду несущей частоты.

Легко убедиться в этом преимуществе, если воспользоваться векторным представлением сигнала  $U(t)$ , т.е. отображать его в виде вектора на плоскости в декартовой системе координат  $xOy$  так, что в любой момент времени длина вектора равна  $A(t)$ , а угол с осью  $Ox$  равен  $\theta(t)$ . Поскольку полная фаза сигнала  $\theta(t)$  растет довольно быстро, вектор будет совершать в среднем  $f_0$  оборотов в секунду. Использование понятия аналитического сигнала (или квадратурных составляющих) позволяет применить то же представление к комплексной величине  $\dot{U}(t)$ . В итоге скорость вращения вектора окажется значительно меньше, позволяя более детально проследить динамику развития колебаний. В этой ситуации направления двух осей координат символизируют колебания одной и той же частоты  $f_0$ , но сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ .

Другая возможность для создания довольно наглядного образа сигнала – это использование геометрического представления сигнала. Такая возможность вытекает из естественной или искусственно созданной дискретности сигнала  $U(t)$  во времени и может применяться к сигналам с любой шириной спектра. Например, цифровой сигнал (последовательность символов цифр)  $S_1, S_2, \dots, S_n$  можно формально считать элементами вектора

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (4.17)$$

или координатами точки в  $n$ -мерном пространстве.

После квантования по времени непрерывного сигнала  $U(t)$  с шагом  $\Delta t$  на интервале  $0 < t < T$  также получаем последовательность чисел-отсчетов  $u_1, u_2, \dots, u_n$

$$U(t) \rightarrow \mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n) = (u_1, u_2, \dots, u_n) \sqrt{\Delta t}, \quad (4.18)$$

которую аналогично можно считать элементами вектора  $\mathbf{U}$ . Переход к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ ,  $n \rightarrow \infty$  позволяет не учитывать ошибки квантования по времени (ввиду возможности использования такого перехода каждый элемент вектора  $\mathbf{u}$  сразу умножили на постоянную величину  $\sqrt{\Delta t}$ ).

Посмотрим, какие свойства сигналов отображают основные геометрические понятия.

1) Норма (длина) вектора  $\mathbf{U}$  в евклидовом пространстве равна

$$|\mathbf{U}| = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2}. \quad (4.19)$$

Если исходный сигнал  $U(t)$  был непрерывным, то перейдем к пределу и получим

$$|\mathbf{U}| = \sqrt{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{j=1}^n u_j^2 \cdot \Delta t} = \sqrt{\int_0^T U(t)^2 dt} = \sqrt{E_u}, \quad (4.20)$$

где  $E_u$  – энергия сигнала (по умолчанию принимается, что входное сопротивление цепи  $R_{вх} = 1$  Ом). Возможные значения  $0 \leq |\mathbf{U}| < \infty$ . Обратим внимание на этот факт: длина вектора, соответствующего сигналу, зависит не от напряжения, тока или мощности, а от энергии этого сигнала. Это обстоятельство определяет для цифровых сигналов способ введения такого важного понятия, как отношение сигнал/шум.

Если сигнал (4.17) – это последовательность двоичных символов (нулей и единиц), то удобнее использовать  $n$ -мерное пространство Хэмминга. В нем длина вектора численно равна его весу  $|\mathbf{S}| = W(\mathbf{S})$ , т.е. определяется как количество единиц в этом векторе. Возможные значения  $|\mathbf{S}| = 0; 1; 2; \dots; n$  – это целые числа.

2) Расстояние между двумя непрерывными сигналами  $U(t)$  и  $V(t)$ , т.е. расстояние между точками, отображающими эти сигналы в евклидовом пространстве,

$$d(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sqrt{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{j=1}^n (u_j - v_j)^2 \Delta t} = \sqrt{\int_0^T [U(t) - V(t)]^2 dt}, \quad (4.21)$$

также может принимать любые неотрицательные значения  $0 \leq d < \infty$ .

Расстояние между двумя двоичными последовательностями  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{C}$  – это расстояние Хэмминга

$$d(\mathbf{S}, \mathbf{C}) = W(\mathbf{S} \oplus \mathbf{C}) = \sum_{j=1}^n (S_j \oplus C_j), \quad (4.22)$$

где  $\oplus$  – знак суммирования по модулю 2 ( $0 \oplus 0 = 0$ ,  $0 \oplus 1 = 1 \oplus 0 = 1$ ,  $1 \oplus 1 = 0$ ). Другими словами, расстояние между двумя комбинациями численно равно количеству символов, в которых они отличаются одна от другой. Возможные значения расстояния Хэмминга  $d = 0; 1; 2; \dots; n$ .

3) Скалярное произведение двух векторов  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{V}$ , отображающих непрерывные сигналы, равно

$$(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \sum_{j=1}^n u_j v_j \Delta t \right) = \int_0^T U(t) V(t) dt. \quad (4.23)$$

Эти два сигнала считаются ортогональными, если  $(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = 0$ .

4) Линейная независимость системы  $N$  функций  $U_1(t), U_2(t), \dots, U_N(t)$ , как и системы, состоящей из  $N$  векторов, заключается в том, что никакая из этих функций не может быть представлена в виде взвешенной суммы остальных функций, например

$$U_1(t) \neq \sum_{j=2}^N K_j U_j(t), \quad (4.24)$$

при любых значениях коэффициентов  $K_j$ .

Для системы, состоящей из  $N$  двоичных  $n$ -разрядных комбинаций, определение линейной независимости аналогично, но при этом предполагается поэлементное суммирование комбинаций по mod 2, а весовые коэффициенты – двоичные цифры.

## 2.5 Тема: «Обнаружение и измерение параметров радиосигналов КА»

### Характеристики спутниковых каналов связи

Основным документом, регламентирующим использование частот каналов связи, является Регламент радиосвязи с Таблицей распределения полос частот между службами и техническими ограничениями, необходимыми при совместном использовании частот различными службами. Названная Таблица распределения частот Регламента радиосвязи содержит полосы частот для использования службами радиосвязи в пределах 9 кГц...275 ГГц. Таблица состоит из трех столбцов, каждый из которых соответствует одному из трех Районов. В таблице оговорены полосы частот, выделенные для служб космической радиосвязи. Ниже приводятся полосы частот, распределенные согласно Регламенту радиосвязи, между различными спутниковыми службами.

Для службы межспутниковой радиосвязи, обеспечивающей связь между ИСЗ связи, выделены полосы частот, ГГц: 22,55...23,55; 32...33; 54,25...58,2; 59...64; 116...134; 170...182; 185...190.

Полосы частот для различных спутниковых служб приведены в таблицах 5.1-5.3.

При выборе рабочих частот для радиолиний спутниковой связи (РЛСС) необходимо учитывать:

- условия прохождения радиоволн различных диапазонов через земную атмосферу;
- распределение интенсивности радиоизлучений внешних источников помех (атмосферы, Земли, космоса и т. д.) по диапазону;
- электромагнитную совместимость РЛСС с другими радиотехническими средствами;
- наличие освоенных промышленностью комплектующих для создания технических средств в данном диапазоне частот.

Нижняя частота выбранного диапазона должна быть выше максимально применимых (МПЧ) для прохождения через ионосферу при касательном распространении радиоволн относительно поверхности Земли.

Под МПЧ понимается наибольшая частота, которая еще может отразиться от ионосферы.

Радиосигналы на частотах выше МПЧ свободно проходят сквозь ионосферу и проникают далее в космическое пространство. Практически величина МПЧ не превышает частоту 100 МГц.

Еще одним важным фактором, влияющим на выбор нижней границы диапазона для РЛСС, является уровень мощности шумов внешних источников. Сигналы на входах приемников РЛСС из-за большой протяженности линии связи претерпевают большое затухание порядка  $10^{20}$  и более, имеют малую мощность, поэтому в качестве входных каскадов приемников используются малозумящие усилители (МШУ), для которых внешние шумы становятся сравнимы или превышают собственные шумы.

Таблица 5.1 - Полосы частот фиксированной спутниковой службы, ГГц

Космос — Земля	Земля — Космос
2,5...2,69 (Район 2); 2,5...2,535 (Район 3)	2,655...2,690 (Районы 2 и 3)
3,4...4,2; 4,5...4,8; 7,25...7,75	5,725...7,075 (Район 1); 5,85...7,075 (Районы 2 и 3); 7,9...8,4
—	10,7...11,7 (Район 1 только для фидерных линий к радиовещательным спутникам, работающим в полосе около 12 ГГц)
10,7...11,7; 11,7...12,2 (Район 2); 12,2...12,5 (Район 3); 12,5...12,75 (Районы 1 и 3)	12,5...12,75 (Район 1); 12,7...12,75 (Район 2); 12,75...13,25; 13,75...14,5
—	14,5...14,8 (только для фидерных линий к радиовещательным спутникам, работающим в полосе около 12 ГГц для стран Европы)
—	17,3...18,1 (только для фидерных линий к радиовещательным спутникам, работающим в полосе около 12 ГГц)
17,7...21,2; 37,5...40,5	24,75...25,25 (Районы 2 и 3); 27...27,5 (Районы 2 и 3); 27,5...31; 42,5...43,5; 49,2...50,2
—	47,2...49,2 (только для фидерных линий к радиовещательным спутникам, работающим в полосе 40,5...42,5 ГГц)
81...84; 102...105; 149...164; 231...241	50,4...51,4; 71,0...75,5; 92...95; 202...217; 265...275
<p>Если Район не указан, это значит, что полоса выделена для фиксированной спутниковой службы на всемирной основе. Все полосы частот распределены фиксированной спутниковой службе на совмещенной основе с другими службами; полос, распределенных на исключительной основе, нет.</p>	

Таблица 5.2 - Полосы частот радиовещательной спутниковой службы, ГГц

Частота	Район	Примечание
0,62...0,79	1, 2, 3	Могут быть использованы для систем спутникового телевизионного вещания с частотной модуляцией при условии согласия заинтересованных администраций. Эти системы не должны создавать плотность потока мощности у поверхности Земли на территории других стран большую $-120$ дБВт/м <sup>2</sup> для углов прихода менее 20°
1,452...1,492	1, 2, 3	Использование полосы ограничено системами звукового цифрового вещания
2,52...2,67	1, 2, 3	Использование полосы для спутниковой вещательной службы ограничено национальными или региональными системами коллективного приема при условии предварительного согласования с администрациями. В ряде стран, включая Россию, полоса 2535...2655 МГц также распределена для звукового спутникового вещания
11,7...12,5	1	Должны использоваться в соответствии с планом, принятым ВАКР 1977 г.
11,7...12,2	3	То же
12,2...12,7	2	Должна работать в соответствии с планом, выработанным на Региональной конференции 1981 г. с учетом изменений, принятых на ВАКР-ОРБ 1985 г.
12,5...12,75	4	Ограничена системами коллективного приема с плотностью потока мощности у поверхности Земли $-111$ дБВт/м <sup>2</sup>
22,5...23	2, 3	Использование разрешено при условии предварительного согласования с заинтересованными администрациями
40,5...42,5; 84...86	1, 2, 3	

Таблица 5.3 - Полосы частот подвижной спутниковой службы, ГГц\*

Частота	Направление <sup>1</sup>	Частота	Направление <sup>1</sup>
0,137...0,137825	Космос — Земля <sup>2</sup>	1,970...1,980 <sup>8</sup>	Земля — Космос
0,148...0,1499	Земля — Космос <sup>2</sup>	1,980...2,010 <sup>8</sup>	Земля — Космос
0,1499...0,15005	Земля — Космос	2,160...2,170 <sup>8</sup>	Космос — Земля
0,235...0,322 <sup>3</sup>	—	2,170...2,200 <sup>8</sup>	Космос — Земля
0,3354...0,3999 <sup>4</sup>	—	2,4835...2,520 <sup>8</sup>	Космос — Земля
0,40015...0,401 <sup>2</sup>	Космос — Земля	2,670...2,690 <sup>8</sup>	Земля — Космос
0,406...0,4061 <sup>5</sup>	Земля — Космос	7,250...7,375	Космос — Земля
1,525...1,530	Космос — Земля	7,900...8,025	Земля — Космос
1,530...1,533	Космос — Земля	19,7...20,1 <sup>9</sup>	Космос — Земля
1,533...1,544	Космос — Земля	20,1...21,2	Космос — Земля
1,544...1,545	Космос — Земля	29,5...30 <sup>9</sup>	Земля — Космос
1,545...1,555	Космос — Земля	30...31	Земля — Космос
1,555...1,559	Космос — Земля	39,5...40,5	Космос — Земля
1,610...1,6265 <sup>6</sup>	Земля — Космос	43,5...47	—
1,6265...1,6315	Земля — Космос	66...71	—
1,6315...1,6345	Земля — Космос	71...74	Земля — Космос
1,6345...1,6455	Земля — Космос	81...84	Космос — Земля
1,6455...1,6465	Земля — Космос	95...100	—
1,6465...1,6565 <sup>7</sup>	Земля — Космос	134...142	—
1,6565...1,6605	Земля — Космос	190...200	—
		252...265	—

<sup>1</sup> Не указанное направление означает возможность использования полосы частот для обеих линий.

<sup>2</sup> Использование полос 137...138, 148...149,9, 149,9...150,05 и 400,15...401 МГц ограничено негеостационарными спутниковыми системами на условиях координации. Полоса 137,825...138 МГц распределена на вторичной основе.

<sup>3</sup> При условии предварительного согласования с заинтересованными администрациями.

<sup>4</sup> Полосы 312...315 МГц (Земля — Космос) и 387...390 МГц (Космос — Земля) могут также использоваться негеостационарными системами.

<sup>5</sup> Для радиомаяков, определяющих место бедствия, при использовании мощности не более 5 Вт.

В технической литературе широко используются буквенные литеры диапазонов частот, взятые из радиолокации (табл. 5.4). В таблице в порядке возрастания приведены основные диапазоны частот, используемых в настоящее время спутниковыми системами связи и вещания. Точное разбиение диапазонов частот по литерам выдерживается не всегда строго.

Таблица 5.4

Буквенные литеры диапазонов частот	L	S	C	X	Ku	Ka
Диапазоны частот спутниковой связи, ГГц	0,24...0,4; 1,5/1,6	1,9/2,1; 1,6/2,5	4/6	7/8	11/14	20/30

Диапазон частот 0,24...0,4 ГГц используется для мобильных систем связи военного назначения, в первую очередь для военно-морского флота и военно-воздушных сил.

В диапазоне частот 1,5/1,6 ГГц выделена полоса частот шириной 29 МГц для создания спутниковых систем связи с мобильными объектами: морскими и воздушными судами, автомобилями, для персональной связи. Наиболее крупной системой этого



диапазона частот является глобальная международная (с участием России) спутниковая система связи INMARSAT на базе геостационарных КА.

В диапазонах частот 1,9/2,1; 1,6/2,5 ГГц выделены полосы частот шириной порядка 30 МГц для низко- и среднеорбитальных систем мобильной и персональной связи.

Диапазон частот 4/6 ГГц выделен для создания глобальных и региональных сетей связи со стационарными наземными станциями на базе геостационарных КА. Несмотря на выделенную полосу частот шириной 800 МГц, этот диапазон в настоящее время перегружен, и новые системы связи фиксированной спутниковой службы создаются в более высокочастотных диапазонах.

Диапазон частот 7/8 ГГц с полосой 500 МГц используется для военных систем связи со стационарными и мобильными терминалами.

Диапазон частот 11/14 ГГц с полосой 800 МГц выделен для использования в сетях связи со стационарными станциями. В этом же диапазоне частот возможно также создание на вторичной основе сетей связи с мобильными терминалами, за исключением самолетов.

В этом диапазоне частот создаются в основном национальные либо региональные системы связи. К настоящему времени этот диапазон близок к насыщению.

Диапазон частот 12 ГГц используется линией связи «Космос — Земля» в полосе 800 МГц, выделенной для геостационарных систем непосредственного теле- и радиовещания на стационарные персональные приемники.

Диапазон частот 20/30 ГГц с полосой 2,5 ГГц выделен для создания геостационарных и негеостационарных систем связи со всеми стационарными и мобильными терминалами, кроме самолетов.

### **Прием и обработка информации в системах радиоконтроля спутниковой связи**

*Модель функционирования системы радиоконтроля спутниковой связи.* При решении специальных задач по организации радиоконтроля спутниковой связи необходимо обеспечить его требуемую надежность при приемлемых материальных затратах.

В общем виде функционирование системы радиоконтроля спутниковой связи при ретрансляции информации через КА представлено на рис. 5.1.

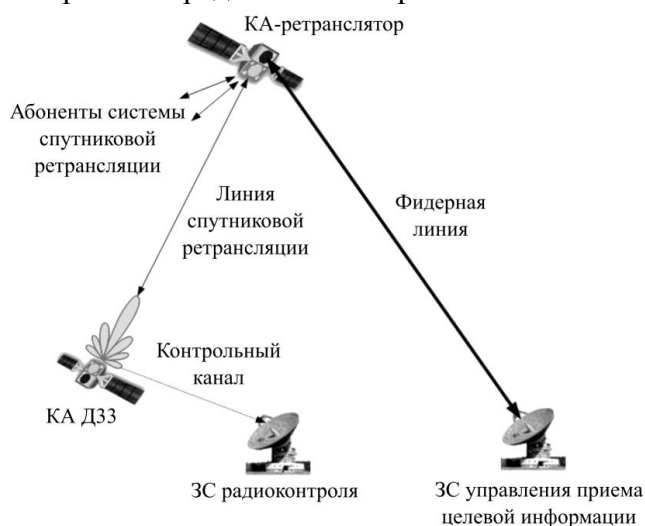


Рис. 5.1 - Функционирование системы радиоконтроля спутниковой связи

С математических позиций функционирование подобной системы целесообразно оценивать в виде взаимодействия двух разных систем с противоположными целями.

Цель системы спутниковой связи – обеспечение требуемого качества информации, излучаемой от КА на ЗС управления и приема целевой информации через КА-ретранслятор. Цель средств радиоконтроля – обнаружение сигналов спутниковой связи.

В системах радиосвязи качество передачи информации на практике оценивается вероятностью неправильного приема (ошибкой) кодовой комбинации (или элементарной посылки), которая зависит от набора параметров:

$$P_0 = f(q_{\text{вх.с.с}}, \mathbf{W}),$$

где  $q_{\text{вх.с.с}}$  – отношение мощности принимаемого сигнала к мощности шумов на входе приемной системы ЗС;  $\mathbf{W}$  – вектор параметров принимаемого сигнала спутниковой связи с учетом параметров модуляции (демодуляции) и кодирования (декодирования).

Для системы радиоконтроля основная задача – обнаружение сигналов контролируемого объекта, эффективность решения которой зависит от вероятности обнаружения радиосигнала, являющейся функцией от набора параметров:

$$P_{\text{обн}} = f(P_{\text{л.т.}}, q_{\text{вх.ПК}}, M_s),$$

где  $P_{\text{л.т.}}$  – вероятность ложной тревоги, которая при решении задачи энергетического обнаружения радиосигнала определяет порог обнаружения;  $q_{\text{вх.ПК}}$  – отношение мощности принимаемого полезного радиосигнала к мощности шумов, приведенные ко входу приемной системы радиоконтроля (ПК) ( $q_{\text{вх.с.с}} = \frac{P_{\text{с.вх.ПК}}}{P_{\text{ш.пр.ПК}}}$ );  $M_s$  – параметр, определяющий

модель обнаруживаемого радиосигнала на входе обнаружителя (со случайной амплитудой и начальной фазой или только со случайной начальной фазой).

Один из параметров, влияющих на эффективность решения задач приема связного радиосигнала и радиоконтроля, – отношение мощности радиосигнала на приеме к мощности шумов по входу приемной системы:

$$q_{\text{вх.с.с}} = \frac{P_{\text{с.вх.}}}{P_{\text{ш.пр.}}},$$

где  $P_{\text{с.вх.}}$  – мощность принимаемого радиосигнала на входе приемной системы;  $P_{\text{ш.пр.}}$  – мощность шумов на входе приемной системы.

В общем случае мощность радиосигнала на входе приемной системы является функцией от ряда факторов:

$$P_{\text{с.вх.}} = f\{E(\alpha, \beta), G_{\text{пр}}, L_{\Sigma}\},$$

где  $E(\alpha, \beta)$  – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность связного радиосигнала КА в направлении  $(\alpha, \beta)$  на ЗС радиоконтроля (эквивалентная изотропно-излучаемая мощность боковых лепестков);  $G_{\text{пр}}$  – коэффициент усиления приемной антенны станции радиоконтроля;  $L_{\Sigma}$  – итоговые потери радиосигнала на участке КА – ЗС радиоконтроля.

Мощность шумов на входе приемной системы в общем случае определяется по формуле

$$P_{\text{ш.пр.}} = k_B T_{\Sigma\text{ш}} \Delta F_{\text{пр}},$$

где  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/(Гц·град) – постоянная Больцмана;  $T_{\Sigma\text{ш}}$  – итоговая шумовая температура приемной системы ЗС радиоконтроля, К;  $\Delta F_{\text{пр}}$  – полоса пропускания приемной системы ЗС радиоконтроля, Гц.

Главная задача создания системы радиосвязи заключается в выборе параметров связного радиосигнала и методов обработки радиосигнала, определении параметров передающего и приемного трактов, обеспечивающих требуемое качество передачи целевой информации не хуже заданного ( $P_o \leq P_{o,\text{пр}}$ ). Очевидно, что, с одной стороны, при эксплуатации КА для выполнения данного условия мощность связного радиосигнала по входу приемной системы должна быть наибольшей. С другой стороны, с учетом возможного ведения радиоконтроля сигналов спутниковой связи со стороны зарубежных стран для обеспечения скрытности радиолиний мощность связного радиосигнала выбирается минимально необходимой.

Результаты анализа существующих методов разрешения подобного рода противоречий показывают, что применительно к рассматриваемой ситуации решение задачи возможно с использованием методов пространственной избирательности и цифровой обработки сигналов.

### **Функционирование средств радиоконтроля при применении в каналах спутников-ретрансляторов методов пространственной избирательности.**

Косвенным показателем эффективности функционирования системы радиоконтроля спутниковой связи является отношение мощности связного радиосигнала к мощности шумов на входе систем приема ЗС радиоконтроля и КА-ретранслятора в процессе обнаружения радиосигнала.

Нахождение отношения мощности полезного радиосигнала к мощности естественных шумов на входе приемной системы ЗС радиоконтроля и КА-ретранслятора проводится с использованием расчетов энергетического бюджета радиолиний при ведении радиоконтроля на направлении от КА к ЗС радиоконтроля; при обеспечении радиосвязи в направлении от КА к КА-ретранслятору. Расчеты энергетического бюджета радиолиний проводятся на основе уравнения радиосвязи. Отношение мощности связного радиосигнала к мощности естественных шумов по входу приемной системы ЗС управления и приема целевой информации (см. рис. 5.1) или КА-ретранслятора вычисляется по формуле

$$\left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{вх.ЗС(КА)} = \frac{P_{пер.КА ДЗЗ} G_{пер.КА ДЗЗ} \eta_{пер.КА ДЗЗ} G_{пр.ЗС(КА)} \eta_{пр.ЗС(КА)}}{L_{\Sigma} k_B T_{\Sigma ш.ЗС(КА)} \Delta F_{пр.ЗС(КА)}},$$

где  $P_{пер.КА ДЗЗ}$  – выходная мощность передатчика КА, Вт;

$G_{пер.КА ДЗЗ}$  – коэффициент усиления передающей антенны КА, раз;

$\eta_{пер.КА ДЗЗ}$  – коэффициент передачи по мощности волноводного (фидерного) тракта передающей системы КА, раз;

$G_{пр.ЗС(КА)}$  – коэффициент усиления соответственно приемной антенны ЗС управления и приема целевой информации или КА-ретранслятора, раз;

$\eta_{пр.ЗС(КА)}$  – коэффициент передачи по мощности волноводного (фидерного) тракта системы приема соответственно ЗС управления и приема целевой информации или КА-ретранслятора, раз;

$L_{\Sigma}$  – результирующие потери на линии распространения радиосигнала от КА до КА-ретранслятора или от КА до ЗС управления и приема целевой информации, раз;

$T_{\Sigma ш.ЗС(КА)}$  – суммарная шумовая температура системы приема соответственно ЗС управления и приема целевой информации или КА-ретранслятора, К;

$\Delta F_{пр.ЗС(КА)}$  – полоса пропускания системы приема соответственно ЗС управления и приема целевой информации или КА-ретранслятора, Гц.

Представленное аналитическое выражение получено для радиолиний спутниковой связи и радиоконтроля с учетом выполнения следующих условий:

- полоса пропускания системы приема информации полностью согласована со спектром принимаемого радиосигнала;
- передающая и приемная антенные системы наведены по направлению друг к другу по критерию максимума принимаемого радиосигнала;
- имеет место совпадение поляризаций передающей и приемной антенн.

Как правило, на практике средства радиоконтроля располагаются за пределами зоны обслуживания главного (центрального) лепестка ДН передающей антенны контролируемого средства радиосвязи. В таком случае прием связного радиосигнала средствами радиоконтроля возможен по боковым лепесткам ДН передающей антенны

источника радиосигнала, что по факту приводит к его ослаблению относительно усиления в главном (центральном) лепестке.

Отношение мощности связанного радиосигнала к мощности шумов по входу приемной системы ЗС радиоконтроля (см. рис. 5.1) вычисляется по формуле

$$\left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{PK} = \frac{P_{пер.КА ДЗЗ} G_{б.л-з.лКА ДЗЗ} \eta_{пер.КА ДЗЗ} G_{пр.ПК} \eta_{пр.ПК} k_{пол}}{L_{\Sigma} k_B T_{\Sigma ш.ПК} \Delta F_{пр.ПК}},$$

где  $G_{б.л-з.лКА ДЗЗ}$  – коэффициент усиления по боковым и задним лепесткам ДН передающей антенны КА в направлении ЗС радиоконтроля, раз;

$G_{пр.ПК}$  – коэффициент усиления приемной антенны ЗС радиоконтроля, раз;

$\eta_{пр.ПК}$  – коэффициент передачи по мощности фидерного (волноводного) тракта приемной системы ЗС радиоконтроля, раз;

$k_{пол}$  – коэффициент, учитывающий различие поляризаций антенн на передачу и на прием, раз;

$L_{\Sigma}$  – результирующие потери на линии распространения радиосигнала от КА до ЗС радиоконтроля, раз;

$T_{\Sigma ш.ПК}$  – суммарная шумовая температура приемной системы ЗС радиоконтроля, К;

$\Delta F_{пр.ПК}$  – полоса пропускания приемной системы ЗС радиоконтроля, Гц.

Анализ приведенных формул показывает, что повышение скрытности линий спутниковой связи при обеспечении требуемого уровня эффективности функционирования системы связи возможно за счет увеличения коэффициента усиления передающей антенны при одновременном уменьшении уровня ее излучений по боковым и задним лепесткам; коэффициента усиления приемной антенны; ширины спектра связанного сигнала (полосы пропускания приемной системы).

Для реализации мер пространственной избирательности на практике как на приемной, так и на передающей стороне применяются антенные системы с узкой ДН, которые имеют большой коэффициент усиления и низкий уровень излучения в направлении боковых и задних лепестков. Выигрыш в скрытности линии спутниковой связи от принятия в этих системах узконаправленных антенн можно оценить с помощью энергетического показателя, описанного в работах.

Параметром, определяющим уровень боковых и задних лепестков ДН антенной системы, является направление (угол) прихода (излучения) сигнала  $\Theta$ . В качестве примера на рис. 5.2 представлена зависимость нормированной ДН антенной системы от угла относительно направления максимума для фиксированных значений частоты ( $f = 36,75$  ГГц) и диаметра антенны ( $D_A = 0,45$  м), соответствующих коэффициенту усиления антенны 42,27 дБ.

Отметим, что на практике перед началом радиоконтроля точное (истинное) местоположение источника связанного радиосигнала является априори неизвестным для средств радиоконтроля. В целях преодоления данной неопределенности в средствах радиоконтроля используются антенные системы с достаточно широкой ДН или узконаправленные антенные системы, при этом дополнительно проводится поиск радиосигналов по пространству. Таким образом, в первом случае мощность контролируемого радиосигнала уменьшается, во втором – возрастает за счет дополнительного времени поиска радиосигналов по пространству и времени проведения радиоконтроля. Как результат, в обоих случаях сокращается общая эффективность решения задачи радиоконтроля.

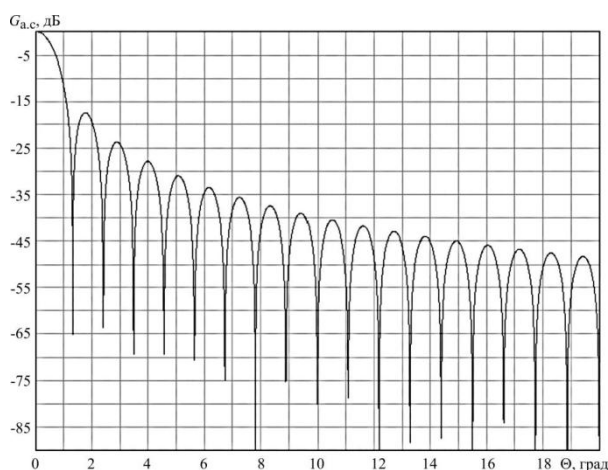


Рис. 5.2 - Зависимость нормированной ДН антенной системы  $G_{a.c.}$  от угла  $\Theta$  относительно направления максимума

### **Функционирование систем спутниковой связи с расширением спектра радиосигналов.**

Применение исключительно мер пространственной избирательности в большинстве случаев недостаточно для скрытного использования систем спутниковой связи от средств радиоконтроля зарубежных средств. Один из известных способов обеспечения заданных требований по вероятности ошибочного приема и уменьшения порогового отношения мощностей радиосигнала и шумов по входу демодуляторов – применение помехоустойчивых методов кодирования и декодирования информации (связных радиосигналов). Другой способ повышения эффективности скрытности – использование современных методов сигнальной обработки. Данные методы основаны на использовании в системах спутниковой связи сложных радиосигналов в сочетании с их оптимальной обработкой при приеме, что способствует увеличению отношения мощностей радиосигнала и естественных шумов по входу демодулятора радиосигналов приемного тракта КА-ретранслятора. В результате расширяется спектр излучаемого связного радиосигнала и существенно снижается отношение сигнал / шум в приемнике ЗС радиоконтроля.

Для реализации требований относительно скрытности функционирования систем спутниковой связи в полном объеме целесообразно параллельно использовать меры пространственной избирательности и современные методы оптимальной обработки радиосигналов. Сигнальная обработка основана на использовании сложных широкополосных радиосигналов, которые расширяют спектр информационного исходного сигнала. В качестве широкополосных радиосигналов, позволяющих обеспечить скрытную передачу информации, могут использоваться фазоманипулированные радиосигналы, модулированные расширяющей спектр кодовой последовательностью (фазоманипулированные – широкополосные радиосигналы); радиосигналы с программной (псевдослучайной) перестройкой рабочей частоты; комбинированные фазоманипулированные радиосигналы – широкополосные радиосигналы с программной (псевдослучайной) перестройкой рабочей частоты.

В современных системах спутниковой связи и ретрансляции информации в большинстве случаев используются сигналы на основе фазовой манипуляции (BPSK, QPSK, 8PSK и т. д.). Использование сигналов с другими видами модуляции (QAM, OFDM и т. д.) не повлияет на рассматриваемый подход к решению задачи радиоконтроля сигналов спутниковой связи, поэтому в настоящей статье они не рассматриваются.

С точки зрения обеспечения скрытной передачи данных самый предпочтительный вариант – применение радиосигналов вида фазоманипулированные – широкополосные. Данное обстоятельство объясняется тем, что расширение спектра методом программной

перестройки рабочей частоты сопровождается некогерентным приемом информации в отличие от метода прямого расширения спектра. На практике это приводит к энергетическим потерям порядка 3 дБ. При этом скрытность обнаружения широкополосных радиосигналов и радиосигналов с программной (псевдослучайной) перестройкой рабочей частоты одинаковая.

Приемы расширения спектра могут использоваться только для радиосигналов с ограниченной информационной скоростью, например для командной и телеметрической информации. Полоса частот целевой информации КА сопоставима с выделенной полосой канала связи и не может быть значительно расширена.

### **Обнаружение радиосигналов методами накопления.**

Как показывает практика применения средств радиомониторинга, обеспечить требуемое отношение сигнал / шум для эффективного обнаружения в разведываемых радиополосах спутниковой связи часто не представляется возможным. Отношение сигнал / шум не изменяется при линейном усилении. Методы оптимального приема информации в средствах радиоконтроля не применяются, поскольку требуется выполнение сразу двух условий. Для свертки принимаемого радиосигнала на приемной стороне необходимо иметь его копию и обеспечивать синхронизацию обнаруживаемого радиосигнала с копией полезного связного радиосигнала как по частоте, так и по времени. Детальный анализ существующих методов проведения радиоконтроля энергетически слабых радиосигналов подтверждает, что в данных условиях обеспечить требуемое отношение сигнал / шум для эффективного обнаружения возможно лишь за счет когерентного накопления обработанных радиосигналов.

Цель предварительной обработки – выявление признаков радиосигнала, которые не зависят от характера модулирующих последовательностей. К таким способам можно отнести спектральный анализ с последующим накоплением его результатов на интервале измерения; восстановление несущей; автокорреляционную обработку принятых радиосигналов. Первые два метода используются для обнаружения слабых радиосигналов с базой, близкой к единице. Последний эффективен для обнаружения радиосигналов с прямым расширением спектра с помощью фазоманипулированной псевдослучайной последовательности.

Одна из особенностей радиоконтроля КА – появление эффекта Доплера, связанного с движением КА относительно станции радиоконтроля. Обозначим через  $v_r$  ту компоненту скорости движения КА, которая совпадает с линией радиосвязи КА – ЗС радиоконтроля, и условимся считать величину  $v_r$  отрицательной в случае уменьшения расстояния между КА и ЗС радиоконтроля и положительной – при увеличении этого расстояния.

Как известно, при движении любого источника радиосигнала со скоростью  $\pm v_r$ , частота принимаемых колебаний  $f$  соотносится с частотой излучаемых колебаний  $f_0$ :

$$f = f_0 / (1 \pm v_r / c),$$

где  $c$  – скорость света.

Как правило, выполняется условие  $v_r / c \ll 1$ . Значит, при движении источника радиосигнала по направлению приемника имеет место  $f = f_0 / (1 \pm v_r / c)$ . Отсюда следует изменение частоты из-за появления эффекта Доплера:

$$\delta f_0 = f - f_0 = \pm f_0 v_r / c.$$

Так, при  $f_0 = 24$  ГГц (Ka-диапазон)  $\delta f_0 = \pm 560$  кГц,  $f_0 = 14$  ГГц (Ku-диапазон)  $\delta f_0 = \pm 330$  кГц. Это означает, что в идеальном приемнике радиоконтроля должно быть предусмотрено программное сопровождение КА не только по его положению, но и по доплеровскому сдвигу несущей частоты.

**Спектральный анализ.** Спектральный анализ основан на использовании спектроанализаторов радиосигналов, которые записывают данные в электронную память и анализируют их в частотной и временной областях. Для анализа сигнала, несущего цифровую модуляцию, требуются векторные измерения, обеспечивающие получение информации не только об амплитуде, но и о фазе. Векторный анализатор полностью преобразует в цифровую форму радиосигнал в пределах полосы пропускания прибора, чтобы извлечь из него информацию об амплитуде и фазе, необходимую для измерения параметров цифровой модуляции. Измерения, выполняемые анализатором спектра в реальном масштабе времени, реализованы с помощью приемов и алгоритмов цифровой обработки сигналов.

В режиме анализа спектра в реальном масштабе времени анализатор обеспечивает два синхронных представления захваченного сигнала: зависимость мощности от частоты и спектрограмму. Синхронный анализ в нескольких областях обеспечивает разнообразное масштабирование и тщательное изучение частей зарегистрированного радиоканала с помощью оптимальных средств анализа. Обнаружение радиосигналов методом накопления результатов спектрального анализа основано на том, что спектр реального радиосигнала не зависит от информационного содержания модулирующей последовательности при условии сохранения длительности элементарной посылки. При накоплении спектральных коэффициентов они складываются арифметически, а помехи – среднеквадратично. Данный способ прост в реализации за счет использования серийно выпускаемой измерительной аппаратуры. Недостатком является чувствительность к доплеровскому смещению несущей и спектра, что ограничивает время накопления спектральных коэффициентов.

**Восстановление несущей.** Другой путь предварительной обработки принятого радиосигнала с целью обеспечения его накопления – восстановление несущей, подавленной при фазовых манипуляциях BPSK и QPSK. Частным случаем использования алгоритмов восстановления несущей являются устройства символьной синхронизации. Устройства восстановления несущей можно схемотехнически разделить на две основные группы – замкнутые и разомкнутые.

Замкнутые устройства основаны на синхронизации генератора с входным модулированным радиосигналом. Замкнутые устройства точнее, однако более сложные и требуют большего времени на вхождение в синхронизм. Разомкнутые устройства представляют собой нелинейные преобразователи входного радиосигнала с последующей фильтрацией. Они генерируют радиосигнал несущей со скоростью поступления входного воздействия. В данном методе восстановления несущей без использования параметров модуляции используется нелинейная операция умножения частоты с целью создания гармоник несущей частоты с удаленной модуляцией, которые подвергаются полосовой фильтрации и делятся по частоте для восстановления несущей. Для последующей фильтрации от шумов могут использоваться как полосовые фильтры, так и фазовая автоподстройка частоты. Порядок модуляции соответствует порядку нелинейного элемента, необходимого для получения несущей гармоники. В случае использования QPSK на выходе нелинейного элемента четвертой степени формируется многокомпонентный радиосигнал (квазикогерентный), содержащий также немодулированную четвертую гармонику входного воздействия.

Устройства выделения несущей замкнутого типа основаны, как правило, на разных модификациях петли Костаса требуемого порядка. Петля Костаса – разновидность фазовой автоподстройки частоты, которая использует квадратурные когерентные радиосигналы для оценки фазовой ошибки в целях управления генератором контура. Восстановление несущей контуром Костаса может быть применимо для любой схемы демодуляции M-ичной PSK. Недостаток при ведении радиоконтроля – длительное время синхронизации петли фазовой автоподстройки частоты. Для ускорения захвата несущей

могут использоваться вспомогательные цепи частотной автоподстройки или свипирования.

Энергетический выигрыш при использовании нелинейных операций зависит как от начальных условий (соотношения сигнал / шум на входе перемножителей, априорной информации о частоте несущей, точности отслеживания доплеровского сдвига), так и от соотношения полос пропускания на входе и выходе или в петле фазовой автоподстройки частоты устройства. На практике энергетический выигрыш при использовании данного метода достигает 12 дБ.

Обнаружение радиосигнала методом автокорреляционной обработки. Принципы автокорреляционной обработки сигналов, структурная схема реализующего ее устройства, графические зависимости отношения мощности сигнала к мощности шумов на выходе устройств автокорреляционной обработки сигналов от относительной полосы частот приема, относительной расстройки по частоте, базы сигналов и времени обработки сигналов подробно рассмотрены в различных научных работах. В качестве мер повышения эффективности ведения радиоконтроля на практике применяются методы последовательного и параллельного поиска параметров устройств автокорреляционной обработки сигналов. Время, требуемое для обнаружения радиосигнала с применением устройств автокорреляционной обработки сигналов,  $T_{обн} \geq B/\Delta f_{пр}$ .

Таким образом, с математических позиций функционирование радиоконтроля спутниковых связей целесообразно оценивать в виде взаимодействия системы спутниковых связей и системы радиоконтроля, имеющих противоположные цели.

Прием связных радиосигналов с помощью наземных средств радиоконтроля осуществим лишь по боковым лепесткам ДН передающих антенн КА ДЗЗ, что означает его ослабление относительно значения коэффициента усиления в главной лепестке. В реальной обстановке ведение радиоконтроля КА осложняется следующими факторами: погрешностями определения траекторных характеристик КА; отсутствием точной информации об используемых в момент сеанса связи сигнально-кодовых конструкциях; наличием большого доплеровского смещения частоты и спектра связного радиосигнала; отсутствием информации о реальных уровнях боковых и задних лепестков КА.

Решение задачи возможно за счет максимального повышения эффективности антенной системы ЗС радиоконтроля и сигнальной обработки средствами ЗС радиоконтроля. Реально повысить эффективность антенны ЗС можно за счет увеличения ее апертуры либо с помощью пространственно-разнесенного приема. В первом случае усложняется система наведения и слежения за КА, а во втором – значительно увеличивается стоимость аппаратуры радиоконтроля. В соответствии с энергетическими расчетами бюджета радиолиний в разведываемых радиолиниях спутниковых связей обеспечить необходимое отношение сигнал / шум для эффективного обнаружения, как правило, невозможно. Суть сигнальной обработки заключается в создании предпосылок для когерентного накопления радиосигнала и некогерентного – шумов.

Обнаружение радиосигналов методом накопления результатов спектрального анализа основано на том, что спектр реального радиосигнала не зависит от информационного содержания модулирующей последовательности при условии сохранения длительности элементарной посылки. При накоплении спектральных коэффициентов они складываются арифметически, а помехи – среднеквадратично. Данный способ прост в реализации за счет использования серийно выпускаемой измерительной аппаратуры. Обнаружение радиосигналов на основе устройств автокорреляционной обработки сигналов реализуется с помощью методического подхода к свертке фазоманипулированного радиосигнала на удвоенной частоте вспомогательного гетеродина.



## Методика расчет энергетических характеристик космических радиолиний

В измерительных и информационных космических радиолиниях используются беззапросный и запросный режимы работы аппаратуры. Беззапросный режим предполагает прохождение сигнала от передающей части к приемной в одном направлении, в запросном режиме канал запроса, и канал ответа фактически представляют собой отдельные радиолинии, в которых также сигнал распространяется только в одну сторону. Это приводит к тому, что расчет энергетических характеристик всегда производится для радиолинии с прохождением сигнала в одну сторону.

В космических радиолиниях независимо от того, в каком участке диапазона они работают, всегда присутствуют принятые антенной естественные шумы и собственные шумы приемных устройств. Эти шумы аддитивные по отношению к сигналу на входе приемника, имеют гауссовское распределение и практически равномерный спектр в пределах полосы пропускания приемника. При расчетах, учитывающих действие таких шумов, удобно использовать понятие энергетического потенциала.

Энергетическим потенциалом радиолинии  $Q = P_c / P_{\text{ш}}^1$  называется отношение средней мощности сигнала  $P_c$  к спектральной плотности шума  $P_{\text{ш}}^1$  (мощности шума в полосе 1 Гц), пересчитанное к входу приемника.

Кроме понятия энергетического потенциала используется также понятие энергетического отношения в радиолинии. Его значение  $Q_E$  равно отношению энергии сигнала  $E_c$  к спектральной плотности шума на входе приемника и связано с энергетическим потенциалом равенством

$$Q_E = E_c / P_{\text{ш}}^1 = P_c T / P_{\text{ш}}^1 = QT,$$

где  $T$  — время, в течение которого производится накопление сигнала.

Иногда (например, при расчете радиолокационных радиолиний) пользуются также понятием коэффициента различимости  $\kappa_p$ , равным отношению сигнала к полному шуму (по мощности).

Энергетический потенциал (энергетическое отношение, коэффициент различимости) определяет возможности космических радиолиний в части обеспечения точности измерений параметров движения, пропускной способности и вероятности ошибки при приеме информации.

При управлении КА преимущественное распространение получили радиолинии с непрерывным излучением. Это объясняется тем, что в них можно обеспечить больший по сравнению с импульсными радиолиниями энергетический потенциал (за счет эффективного использования средней мощности передающих устройств) при меньших потребляемой энергии, массе и габаритах передающих устройств. Кроме того, при непрерывном излучении легче совмещать передачу информации с высокоточными измерениями текущих навигационных параметров КА.

Плотность потока мощности электромагнитной волны в свободном пространстве на удалении  $R$  от источника сигнала с эквивалентной мощностью  $P_i G_i$  ( $P_i$  — мощность передатчика,  $G_i$  — коэффициент усиления передающей антенны) равна:

$$\Pi = \frac{1}{4\pi R^2} P_i G_i.$$

Мощность сигнала  $P$  на выходе приемной антенны, имеющей эффективную площадь  $S_{\text{пр}}$ , должна превышать чувствительность приемника  $P_{\text{пр}}$ , т.е. должно выполняться условие:

$$P_{\text{пр}} \leq P = \frac{P_i G_i S_{\text{пр}}}{4\pi R^2}. \quad (5.1)$$

Площадь антенны можно выразить через коэффициент усиления в соответствии с формулой:

$$G_{\text{пр}} = \frac{4\pi S_{\text{пр}}}{\lambda^2}. \quad (5.2)$$

Для наиболее часто используемых параболических антенн с диаметром зеркала  $d$  эффективная площадь равна:

$$S_{\text{пр}} = (\text{КИП})\pi d^2/4,$$

где КИП — коэффициент использования поверхности антенны, обычно равный 0,5–0,7.

Для параболических антенн (при главном лепестке не более  $30^\circ$ ) ширина диаграммы направленности в градусах по уровню половинной мощности равна:

$$\psi_{0,5} \sim 70 \lambda/d.$$

Для ориентировочных расчетов с учетом (5)  $\psi_{0,5}$  можно выразить через усиление и считать  $\psi_{0,5} \sim 200/\sqrt{G}$ .

С учетом (5) выражение (4) можно представить следующим образом:

$$P_{\text{пр}} \leq P = \frac{P_{\text{и}} G_{\text{и}} G_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2}, \quad (5.3)$$

$$P_{\text{пр}} \leq P = \frac{P_{\text{и}} S_{\text{и}} S_{\text{пр}}}{\lambda^2 R^2}. \quad (5.4)$$

Из приведенных выражений следует, что зависимости принятой мощности сигнала от длины волны будут различными в соответствии с тем, что является фиксированным: эффективные площади или усиления (ширина диаграммы направленности) антенн. Параболические, рупорные и многие другие антенны СВЧ относятся к классу антенн с фиксированной площадью (апертурой). Чем короче длина волны, тем выше их усиление. Полуволновый вибратор, штыревые и другие антенны дипольного типа, а также всенаправленные антенны имеют фиксированное усиление, которое не зависит от  $\lambda$ . Так, для идеальной всенаправленной антенны  $G = 1$ .

Наземные антенны обычно имеют фиксированную площадь, хотя в радиоконфлюксах ближнего космоса иногда используются и штыревые антенны. Бортовые антенны КА бывают с фиксированной площадью (остронаправленные) и с фиксированным усилением в заданном телесном углу. Например, в КА ближнего и среднего космоса широко применяются всенаправленные бортовые антенны. Они не требуют ориентации КА во время сеанса связи и могут использоваться в аварийных ситуациях. Фиксированное усиление в телесном углу, равном углу видимости  $\psi_{\text{вид}}$ , имеют антенны геостационарных ИСЗ, предназначенные для связи с низкоорбитальными ИСЗ.

Коэффициент усиления антенны с большой поверхностью может полностью не реализоваться при приеме сигнала, имеющего пространственные искажения амплитуды и фазы фронта волны. В этом случае говорят о потерях усиления антенны и вводят в формулу потери усиления  $\Delta G_{\text{пр}}$  и  $\Delta G_{\text{и}}$  со знаком минус.

Распространение радиоволны на космической радиолинии типа Земля— КА (или обратно) частично или полностью проходит не в свободном пространстве, а в атмосфере, которая приводит к появлению дополнительного ослабления сигнала. Дополнительное ослабление учитывается в приведенных формулах введением множителя  $F$ , который называется множителем ослабления. Множитель ослабления вводится как характеристика уменьшения напряженности поля, поэтому в записанных формулах необходимо добавить квадрат множителя:

$$P_{\text{пр}} \leq P = \frac{P_{\text{и}} G_{\text{и}} G_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} F^2.$$

Из последнего выражения исключается величина  $P$  и вместо неравенства рассматривается случай, когда сигнал в точке приема равен реальной чувствительности приемника:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{и}} G_{\text{и}} G_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} F^2. \quad (5.5)$$

Полученное выражение связывает энергетические характеристики радиолинии с протяженностью трассы. Очень часто оно представляется в форме, где входящие величины выражены в относительных единицах (децибелах). В таком случае уравнение записывается в следующем виде:

$$-P_{\text{пр}} (\partial B / Bm) + G_{\text{пр}} (\partial B) + P_{\text{и}} (\partial B / Bm) + G_{\text{и}} (\partial B) \geq 20 \lg \frac{4\pi R}{\lambda} - F(\partial B), \quad (5.6)$$

где  $20 \lg \frac{4\pi R}{\lambda}$  — основные потери, равные ослаблению плотности потока мощности сферической волны в свободном пространстве; сюда же включена зависимость от длины волны  $\lambda$ ;  $F(\text{дБ}) = 20 \lg F$  — множитель ослабления, учитывающий дополнительное ослабление сигнала на реальной трассе той же протяженности и выраженный в дБ.

Поскольку величина  $F$  по определению меньше единицы, то выраженная в децибелах она имеет отрицательное значение. В результате в соответствии с формулой основные потери энергии и дополнительные складываются.

Остановимся на основных особенностях введенных выше характеристик.

Реальная чувствительность приемников рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{пр}} = \kappa_{\text{р}} P_{\text{ш}} = q N k T \Delta f \kappa_{\text{р}}, \quad (5.7)$$

где  $P_{\text{ш}} = N k T \Delta f$  — мощность собственного шума приемника;  $T$  — температура окружающей среды;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\Delta f$  — полоса пропускания приемника;  $q$  — отношение внешних шумов к собственным (внутренним);  $\kappa_{\text{р}}$  — коэффициент различимости, равный отношению сигнала к полному шуму (по мощности).

Внешние шумы приемника определяются тепловыми шумами атмосферы и Земли, шумами Галактики, Солнца, Луны, других планет и радиозвезд. Для приемников КА в большинстве случаев основной вклад вносят шумы Земли, причем они значительно превышают собственные. Оценку шумов Земли и других источников можно выполнить по материалам.

Часто шумовые свойства (пороговая чувствительность) приемников оцениваются шумовой температурой  $T_{\text{ш}}$ :

$$P_{\text{ш}} = k T_{\text{ш}} \Delta f. \quad (5.8)$$

Здесь

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{ш.пр}} + T_{\text{ш.ф}} + (T_{\text{ш.а}} + T_{\text{а}}) \eta,$$

где  $T_{\text{ш.пр}}$  — собственные тепловые шумы приемника, которые можно определить через коэффициент шума приемника  $N$  следующим образом  $T_{\text{ш.пр}} = T_{\text{пр}} (N - 1)$ ;  $T_{\text{ш.ф}}$  — тепловые шумы антенно-фидерного тракта, которые при условии согласования его волнового сопротивления со входным сопротивлением приемника можно определить по термодинамической температуре фидера как  $T_{\text{ш.ф}} = T_{\text{ф}} (1 - \eta)$ ;  $T_{\text{ш.а}}$  — температура собственного теплового шума антенны;  $T_{\text{а}}$  — антенная температура от внешних источников шума;  $\eta$  — потери в фидере (коэффициент передачи тракта).

Температура собственного теплового шума антенны  $T_{ш.а}$  для наземных антенн обычно мала ( $\approx 1$  град  $K$ ) и ее не учитывают.

Антенная температура от внешних источников  $T_a$  оказывается величиной, оценка которой должна выполняться тщательно. Источниками внешних шумов являются: шумы космического происхождения (см. выше); шумы теплового излучения земной поверхности; шумы, вызываемые излучением газов и гидрометеоров.

### Множитель ослабления

Известно, что через ионосферу проходят с малым ослаблением радиосигналы частотой выше 100 МГц. Более низкие частоты отражаются, т.е. проходят с ослаблением 50, 100 и более дБ. Верхний предел определен как 10-20 ГГц, поскольку на больших частотах возрастают потери в тропосфере (поглощение газами, рассеяние частицами и т.д.). Поэтому для космических радиолиний выбран диапазон 0.1 – 10.0 ГГц.

Дополнительные потери  $F$  в указанном диапазоне состоят из

-потерь в тропосфере  $F_T, дБ$ .

-потерь в ионосфере  $F_{II}, дБ$ .

-потерь поляризационных  $F_{II}, дБ$ .

и определяются их суммой

$$F = F_T + F_{II} + F_{II}.$$

Потери в тропосфере  $F_T$  возникают за счет поглощения и рассеяния в кислороде и неконденсированных парах воды. В диапазоне сантиметровых волн рассеяние ничтожно мало и основное ослабление происходит из-за поглощения. Существует расчетная формула для оценки интегрального ослабления сигнала из-за поглощения во всей толще тропосферы (или части ее) в зависимости от длины волны и угла места радиолуча. Для расчета необходимы сведения о вертикальных профилях СВЧ спектров поглощения кислорода и паров воды, коэффициента преломления тропосферы и метеорологических параметров, характеризующих состояние тропосферы.

Формула, перечисленные характеристики и результаты расчетов ослабления содержатся во многих источниках.

Следует иметь в виду, что значительные временные (в течении года) и пространственные (в пределах земного шара) изменения метеоусловий приводит к большим изменениям интегральных потерь.

В тропосфере периодически возникают метеорологические образования в виде дождя, снега, грозы, тумана, облаков. Они являются еще одним источником ослабления. Наибольшее ослабление дает град, наиболее существенное - дождь и облака (по силе и по вероятности появления). Например, дождь интенсивностью  $5 \text{ мм/час}$  в слое 1 км дает ослабление менее 0.1 дБ,  $50 \text{ мм/час}$  - 1.5 дБ (длина волны 3 см). Средняя продолжительность дождя  $5 \text{ мм/час} - 100 \text{ час}$ ,  $50 \text{ мм/час} - 1 \text{ час}$ . Вероятность дождей  $1 - 5 \text{ мм/час} \approx 15\%$ ,  $50 \text{ мм/час} \approx 0.2\%$ . В слое облачности толщиной 1.0 км с водностью  $8 \text{ г/м}^2$  ослабление равно 1 - 2 дБ (длина волны 3 см), с водностью  $1 \text{ г/м}^2$  - около 0.2 дБ.

Потери в ионосфере  $F_{II}$  возникают вследствие отражения и поглощения сигнала. В указанном диапазоне основным являются потери от поглощения.

Поляризационные потери  $F_{II}$  происходят из-за вращения плоскости поляризации при распространении сигнала в ионосфере (эффект Фарадея). Величина потерь для совместно работающих совмещенных по линейной поляризации антенн можно рассчитать по формуле

$$F_{II} \approx 20 \log(\cos \varphi), \text{ дБ},$$

где  $\varphi$  – угол поворота плоскости поляризации, который зависит от частоты сигнала, интегральной электронной концентрации вдоль трассы, протяженности и ориентации трассы относительно магнитного поля Земли.

### **Расчетные задания бюджета спутникового радиоканала**

А. Рассчитать энергетический потенциал наземной станции при следующих условиях:

- протяженность радиолинии 500 – 50000 км,
- длина волны 1 – 100 см,
- усиление бортовой антенны 10 – 100,
- мощность бортового передатчика 1 – 1000 Вт,
- полоса радиосигнала 0,1 – 10,0 МГц.

Б. Рассчитать предельную дальность действия командной радиолинии, имеющий следующие энергетические характеристики:

- длина волны 1 – 100 см,
- мощность наземного передатчика 10 – 1000 Вт,
- коэффициент усиления наземной антенны 10 – 10000,
- чувствительность бортового приемника  $10^{-10}$  –  $10^{-15}$  Вт,
- усиление бортовой антенны 10 – 1000,
- дополнительные потери на трассе отсутствуют (присутствуют).

Примечание. Конкретные цифры в задании определяет преподаватель.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие диапазоны частот используются в настоящее время в современных спутниковых системах связи?
2. Что происходит с ослаблением сигнала на линии связи с ИСЗ с повышением рабочей частоты?
3. Как рассчитывается плотность потока мощности электромагнитной волны в свободном пространстве?
4. Что такое энергетический потенциал радиолинии?
5. Что нужно учитывать при выборе рабочих частот для радиолиний спутниковой связи?

## **2.6 Тема: «Контроль радиосигналов и помех»**

### **Оценка энергетических характеристик аппаратуры ретрансляции сигналов КА**

Цель радиоконтроля – установление факта передачи информации по линии спутниковой ретрансляции. Так как прием сигнала КА на аппаратуру ЗС радиоконтроля возможен только при его излучении по боковым лепесткам КА, то для расчета параметров ЗС радиоконтроля необходимы следующие исходные данные: баллистическая траектория движения КА; координаты ЗС РК; частотный диапазон линии ретрансляции; используемые сигнально-кодовые конструкции; скорость передачи информации; заданная надежность обнаружения; эквивалентная изотропно-излучаемая мощность боковых лепестков антенны ретрансляции КА. Согласно перечисленным данным определяются требования к добротности приемной антенны ЗС радиоконтроля и, следовательно, к ее геометрическим размерам.

Наиболее проблематичным является получение информации об эквивалентной изотропно-излучаемой мощности боковых лепестков. В технической литературе можно найти информацию по типовому уровню боковых лепестков в свободном пространстве,

однако при установке антенны на конкретный КА электродинамические характеристики антенн в задней полусфере существенно меняются.

Рассмотрим возможность вычисления и контроля оценок неизвестных параметров согласно алгоритму проведения вычислений.

На первом шаге определяется минимально необходимая эквивалентная изотропно излучаемая мощность основного лепестка антенны КА для ретрансляции целевой информации с заданной скоростью. Вычислим в качестве модельного примера оценки характеристик приемной антенны ЗС радиоконтроля при ретрансляции целевой информации через спутник TDRS в Ku-диапазоне частот. Расчет в Ka-диапазоне проводится аналогично при наличии информации о технических характеристиках соответствующего транспондера КА-ретранслятора. Исходные данные из литературных источников для КА TDRS первого поколения: Ku-диапазон частот; апертура остронаправленной антенны 4,9 м; коэффициент усиления антенны на прием 54 дБ; ширина ДН 0,27 град; поляризация круговая. Добротность приемной системы КА-ретранслятора зависит от ориентации антенны. Если КА находится на фоне земной поверхности, добротность составит 24,4 дБ/К.

Существует множество методик и программ расчета спутниковых радиолиний. При одинаковых исходных данных все они дают близкие результаты с разной степенью детализации. В качестве инструмента для энергетических расчетов можно воспользоваться онлайн-калькуляторами ИКЦ «Северная Корона» (г. Санкт-Петербург, Россия). Принятые в расчете дополнительные исходные данные: скорость передачи информации 100 Мбит/с; сигнально-кодовая конструкция QPSK, FEC = 1/2, Eb/N0 = 1 дБ; частота 15 ГГц; наклонная дальность 40 000 км. Особое значение имеет уровень дополнительных потерь. Потери в атмосфере отсутствуют. Потери на рассогласование ДН антенн равны 1 дБ. Потери, связанные с накоплением шумов при ретрансляции для систем с параметрами TDRS, не превышают 1,5 дБ. Энергетический резерв в радиолинии с учетом погрешностей технической реализации модемов, нелинейности тракта и возможной деградации характеристик транспондеров составляет 3 дБ. Таким образом, дополнительные потери составляют 5,5 дБ.

Результаты энергетических расчетов эквивалентной изотропно-излучаемой мощности КА при ретрансляции информации через КА TDRS в Ku-диапазоне со скоростью 100 Мбит/с показывают, что минимальное значение эквивалентной изотропно-излучаемой мощности при выполнении перечисленных условий составляет 41,5 дБВт.

На втором шаге определяется эквивалентная изотропно-излучаемая мощность боковых лепестков в диапазоне возможных значений их относительного уровня (от –30 до –40 дБ). Полученное значение при относительном уровне боковых лепестков –30, –35 и –40 дБ соответственно составит: 41,5 дБВт – 30 дБ = 11,5 дБВт; 41,5 дБВт – 35 дБ = 6,5 дБВт; 41,5 дБВт – 40 дБ = 1,5 дБВт.

На третьем шаге выбирается способ обработки принятого сигнала. Так как КА перемещается относительно ЗС радиоконтроля с высокой скоростью, то в тракте ЗС следует предусмотреть программную компенсацию доплеровского смещения частоты.

При этом обнаружение сигнала может выполняться несколькими способами:

- простое измерение мощности сигнала и шума в полосе сигнала с порогом около 3 дБ;

- измерение спектра сигнала с арифметическим накоплением спектральных составляющих и среднеквадратическим сложением помеховой составляющей. Энергетический выигрыш по сравнению с измерением отношения сигнал / шум во многом зависит от условий приема и составляет от 3 до 6 дБ;

- восстановление несущей, при котором с помощью нелинейных преобразований восстанавливается подавленная несущая. Эффективность метода достигает 10 дБ, зависит от условий приема и падает с увеличением кратности модуляции;

– автокорреляционный прием, наиболее эффективный, но сложный в реализации и подходящий не ко всем классам сигналов.

На четвертом шаге рассчитываются добротность и геометрические размеры приемной антенны ЗС радиоконтроля. Так как ЗС контролирует спутниковую линию связи, то многие исходные данные при расчете добротности спутниковой линии и линии контрольного канала совпадают: частота 15 ГГц; скорость передачи информации 100 Мбит/с; сигнально-кодовая конструкция QPSK. Различаются следующие параметры: наклонная дальность до 3000 км; наличие потерь в околоземном пространстве; отсутствие потерь на накопление шумов ретрансляции; не подверженный демодуляции сигнал; большое значение доплеровского смещения частоты, зависящее от взаимного расположения траектории полета КА и координат ЗС, частоты передачи информации. Потери на рассогласование ДН антенн равны 1 дБ. Энергетический резерв в линии с учетом погрешностей технической реализации модемов, нелинейности тракта и возможной деградации характеристик транспондеров 1 дБ. Для распознавания сигнала на фоне шумов вводится дополнительное требование по превышению сигнала на 3 дБ.

Для примера расчета потерь в околоземном пространстве выберем место расположения ЗС радиоконтроля в районе г. Смоленска с координатами 55 град с. ш. и 32 град в. д. Высота над уровнем моря 250 м. Минимальное значение угла места 10 град. Надежность радиолинии равна 0,95. Для расчетов воспользуемся соответствующим калькулятором ИКЦ «Северная Корона». Суммарный уровень потерь на околоземном участке составляет 1,9 дБ. В раздел расчета «Доп. потери» должно быть введено 1 дБ + 1 дБ + 3 дБ + 1,9 дБ = 6,9 дБ.

Добротность антенной системы ЗС радиоконтроля при уровне боковых лепестков КА –30; –35; –40 дБ должна быть не менее 32,3; 37,3; 42,3 дБ/К соответственно при условии, что обнаружение сигнала происходит простым измерением мощности сигнала и шума с порогом около 3 дБ.

При расчете геометрических размеров антенны следует учитывать, что типичное значение суммарной шумовой температуры антенны в совокупности с малошумящим усилителем и фидерным трактом составляет 120 К, что соответствует 20,8 дБ/К. Тогда коэффициент усиления антенной системы  $K_{ус} = G/T + T$  для приема информации при уровнях боковых лепестков КА ДЗЗ –30; –35; –40 дБ должен быть не менее 53,1; 58,1; 63,1 дБ соответственно.

В таблице 6.1 представлены результаты расчетов геометрических размеров антенн ЗС при разных уровнях боковых лепестков и способах обработки сигналов на приеме. Принято, что по сравнению с простым обнаружением накопление спектральных коэффициентов дает энергетический выигрыш 4 дБ, а восстановление несущей – 7 дБ. Автокорреляционный прием не рассматривается ввиду сложности его реализации. Полученные результаты носят оценочный характер, так как остаются неизвестными истинные значения уровней боковых лепестков КА.

Таблица 6.1 - Результаты расчетов диаметров антенн ЗС (м) при разных уровнях боковых лепестков КА и способах обработки сигналов на приеме

Обработка сигнала	Уровень боковых лепестков КА ДЗЗ, дБ		
	-30	-35	-40
Измерение соотношения сигнал / шум	3,7	6,6	11,7
Спектральный анализ	2,4	4,2	7,4
Восстановление несущей	1,7	3	5,25

### **Моделирование процессов обнаружения сигнала методом восстановления несущей с последующей фильтрацией.**

Обнаружение сигналов путем восстановления несущей эффективно для случаев модуляции BPSK и QPSK. Эти виды модуляции наиболее часто используются для

ретрансляции целевой информации КА. Для уменьшения требований к техническим характеристикам наземной аппаратуры радиоконтроля необходимо снижать порог и время обнаружения сигнала. Один из возможных путей – использование следящего фильтра, установленного после цепей восстановления несущей. На рис. 6.1 представлена обобщенная схема обработки сигнала с восстановленной несущей. Следящий фильтр уменьшает шумовую составляющую в цепи измерения от сотен килогерц (доплеровский сдвиг) до сотен герц (эквивалентная ширина полосы пропускания фильтра).

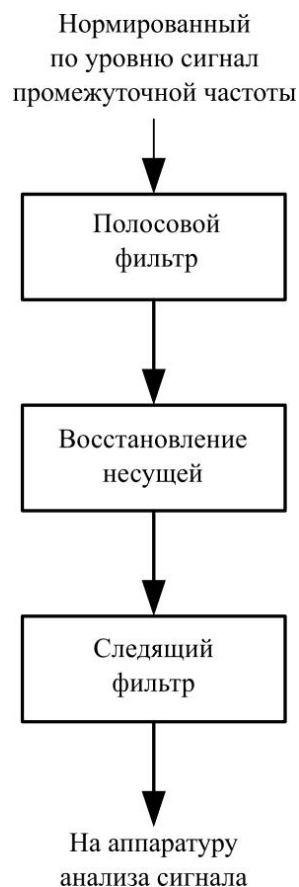


Рис. 6.1 - Обобщенная схема обработки сигнала с восстановленной несущей

Задача следящего фильтра – обнаружение и фильтрация сигнала во всей полосе возможных значений доплеровского сдвига частоты. Традиционно прием сигнала в доплеровском диапазоне частот решался тремя способами: последовательным и параллельным поиском, а также их комбинацией.

Последовательный поиск реализуется в объединенном устройстве частотной фазовой автоподстройки. При частотной автоподстройке осуществляется предварительный поиск сигнала путем сканирования по доплеровскому диапазону частот узкополосным фильтром. После обнаружения сигнала его частота определяется системой фазовой автоподстройки. Преимущество данного метода – точное с погрешностью до фазы определение частоты с последующим непрерывным сопровождением, недостаток – значительные временные издержки.

Параллельный поиск с начала развития космической радиоэлектроники реализуется путем разделения доплеровского диапазона на сопряженные частотные полосы и выявления сигнала в одной из этих полос. Преимущество параллельного поиска – минимальные временные затраты, недостаток – низкая точность определения частоты, устанавливаемая дискретностью разбиения доплеровского диапазона.

Измерение доплеровской частоты необходимо для решения задачи точного определения положения КА на орбите. Данное устройство позволяет вычислительными



методами выделять сигнал на фоне шумовой помехи, а также проводить измерение его частоты с минимальными временными затратами и частотными погрешностями. Принцип действия фильтра основан на применении двойного (прямого и обратного) ортогонального преобразования с обнулением после первого преобразования спектральных компонентов, амплитуда которых находится ниже заданного уровня.

На рис. 6.2 представлена структурная схема нелинейного следящего фильтра. Нормированная по уровню смесь сигнала и помехи поступает на фильтр с полосой пропускания, равной полному доплеровскому сдвигу на восстановленной частоте несущей (см. рис. 6.1). Вне зависимости от уровня входного сигнала АЦП использует всю разрядную сетку. Нормированная смесь сигнала и помехи подается на АЦП (см. рис. 6.2), а затем на блок, формирующий пакеты отсчетов с количеством элементов  $2k$  ( $k = 2, 3, \dots$ ).

Как правило, значение  $k$  выбирается больше 10. Следующий блок осуществляет прямое косинусное преобразование. Выходной поток действительных чисел, состоящий из спектральных коэффициентов, подвергается операции центрального клиппирования, при которой отсчеты с абсолютным значением меньше установленного порога заменяются нулями. Таким образом, смесь сигнала и помехи очищается от компонентов с низкой спектральной плотностью. Коэффициенты после клиппирования формируют мгновенный спектр сигнала единичного блока. Во взвешивающем сумматоре происходит накопление решений по  $N$  последовательно сформированным блокам. Физически это означает суммирование  $N$  парциальных коэффициентов на каждой из  $2k$  частотных позиций, причем большинство коэффициентов нулевые.

На рис. 6.3 представлен один из возможных вариантов реализации сумматора на базе стека. После обработки очередного блока его данные помещаются на первую позицию, остальные смещаются на одну позицию вправо, а последний блок исключается из расчета. Таким образом, осуществляется операция когерентного накопления частных (блоковых) решений.

Операция выделения максимума из значений спектральных коэффициентов является окончательным «жестким» решением, определяющим амплитуду сигнала маяка, порядковый номер коэффициента определяет его частоту. Эти параметры могут использоваться в блоках цифровой обработки сигналов и для управления синтезаторами. В ряде случаев цифровой нелинейный фильтр формирует обработанный аналоговый сигнал без принятия «жесткого» решения о его частоте. Тогда выходное колебание будет иметь определенное отношение сигнал/помеха ввиду остаточных спектральных компонентов шумовой помехи.

Технические характеристики блоков и узлов фильтра обусловлены требованиями к точности определения параметров несущей, в первую очередь частоты. При проектировании устройств цифровой обработки сигналов частота дискретизации выбирается выше теоретического предела и составляет после предварительной обработки 2,5–3 номинала ширины доплеровского спектра  $\Delta f$ . Пусть  $Y$  (Гц) – требуемая точность определения доплеровского сдвига,  $V$  (Гц) – скорость изменения несущей частоты. Тогда частота принятия решений о текущем значении доплеровского сдвига не может быть меньше  $V/Y$  (Гц). Следовательно, минимальная производительность цифровой обработки должна составить  $R = 3\Delta f(V/Y)$  отсчетов/с.

Соотношение размеров и количества блоков дискретного преобразования Фурье в одном цикле измерений определяется конкретными особенностями используемого процессора и требуемой точностью вычисления доплеровского сдвига. Разрешающая способность по частоте получается делением скорости дискретизации на число точек быстрого преобразования Фурье в блоке. С увеличением количества блоков и, соответственно, уменьшением их размерности уменьшается разрешающая способность, однако снижаются и требования к аппаратной части вычислителя. Современные системы синхронизации при приеме информационных сигналов требуют точности предварительного определения доплеровского сдвига до нескольких десятков герц.

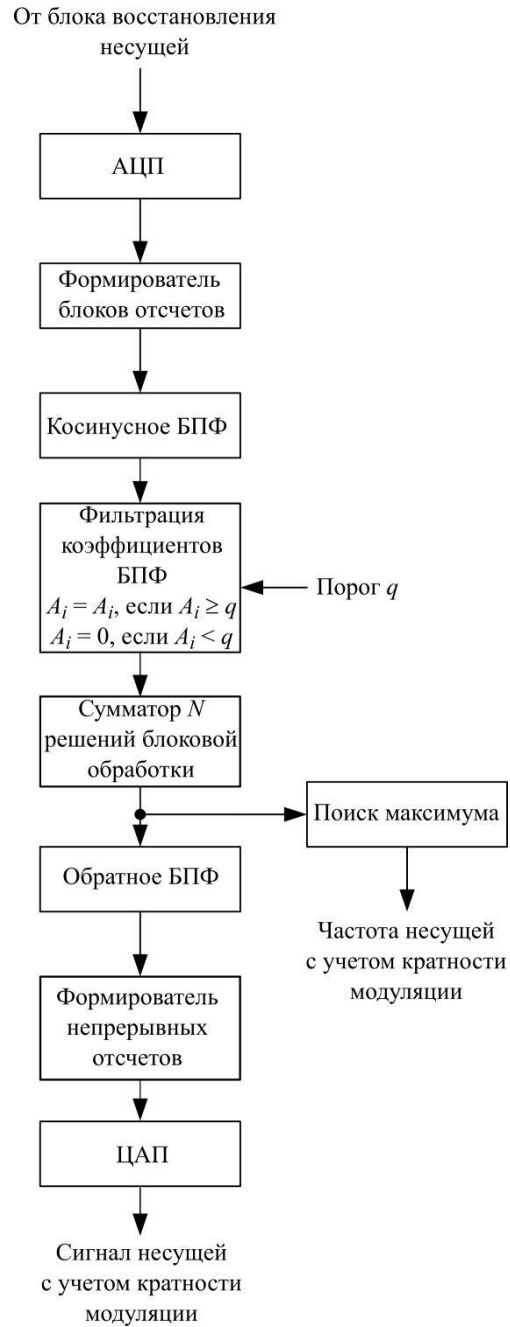


Рис. 6.2 - Структурная схема нелинейного следящего фильтра (АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БПФ – быстрое преобразование Фурье; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь)

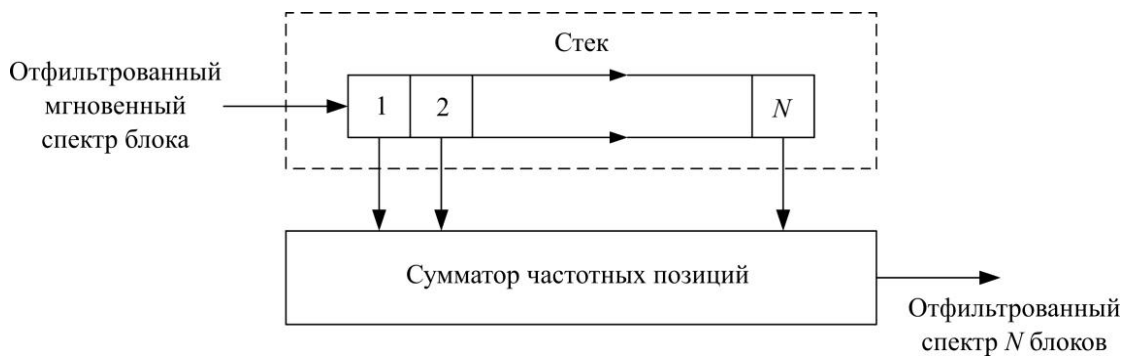


Рис. 6.3 - Вариант построения сумматора решений блоковой обработки

На рис. 6.4 представлена структурная схема имитационной модели фильтра с фиксированным порогом в среде Simulink. Для удобства моделирования в схему добавлены блоки нормализации уровня смеси сигнала и помехи, имитирующие работу автоматического регулятора усиления. Входной сигнал, представляющий собой смесь монохроматического колебания с шумовой помехой, генерируется блоками Sine Wave и Random Source, выходные уровни которых устанавливаются блоками Gain 1 и Gain 2 и индицируются цепями квадратичных вольтметров с индикаторами Display и Display 1. Входное и выходное значения отношения сигнал/помеха определяются как отношение мощностей сигнала и шума в доплеровской полосе частот.

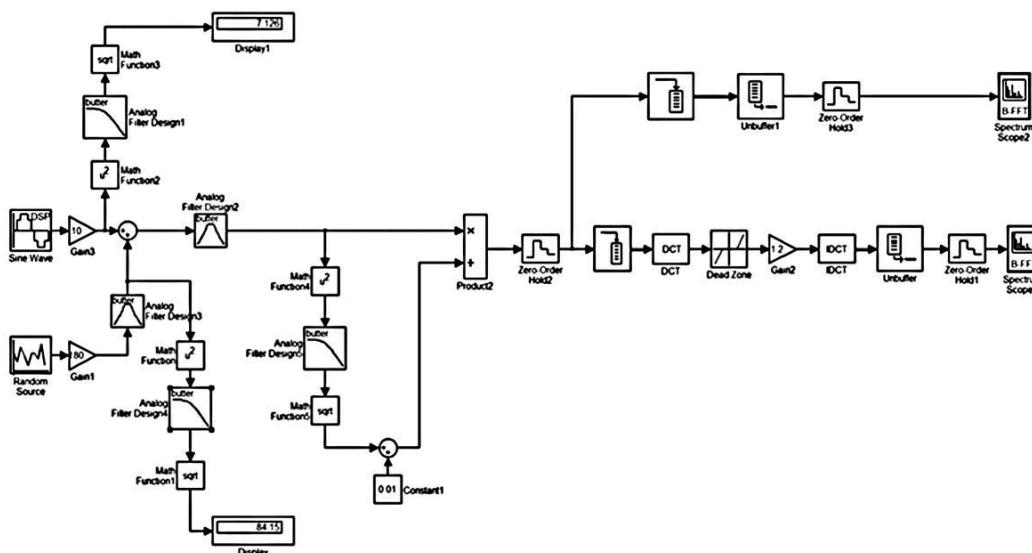


Рис. 6.4 - Имитационная модель нелинейного фильтра с фиксированным порогом

Моделирование работы фильтра по схеме на рис. 6.4 занимает много времени даже при использовании современной вычислительной техники. Для ускорения работы создано несколько упрощенных моделей, одна из которых приведена на рис. 6.5. Предполагается, что сигнал с шумом в доплеровской полосе промежуточной частоты предварительно нормирован по амплитуде системой автоматического регулятора усиления. Для лучшей визуализации спектра с учетом особенностей виртуальных приборов выбрана промежуточная частота 455 кГц, полоса – около 30 кГц. Порог центрального клиппирования задается в блоке Dead Zone, и его номинал оптимизирован для средних значений входного отношения сигнал / шум.

На рис. 6.6 представлена зависимость входного и выходного значений отношения сигнал / шум. В общем случае координаты конкретных точек графика зависят от размера блока данных, подвергнутых обработке, и конкретного значения порога. Нелинейность передаточной характеристики фильтра объясняется наличием операции центрального клиппирования. Нелинейный характер подтверждается спектрограммами сигналов, полученными при разном качестве входного сигнала (рис. 6.7).

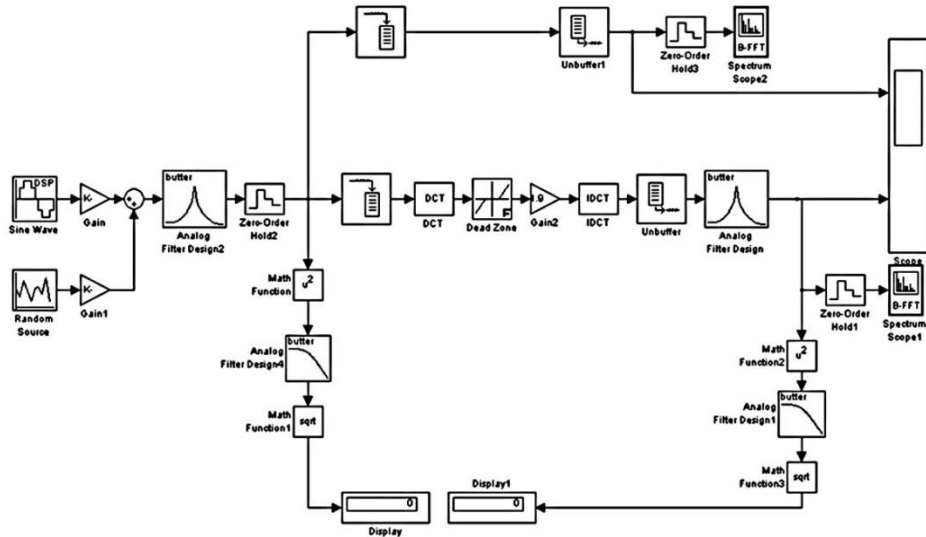


Рис. 6.5 - Упрощенная структурная схема модели фильтра на промежуточной частоте с фиксированным порогом

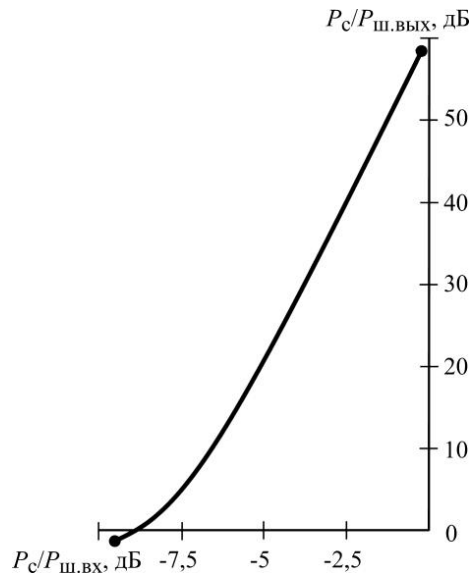


Рис. 6.5 - Зависимость выходного значения отношения сигнал / шум от входного

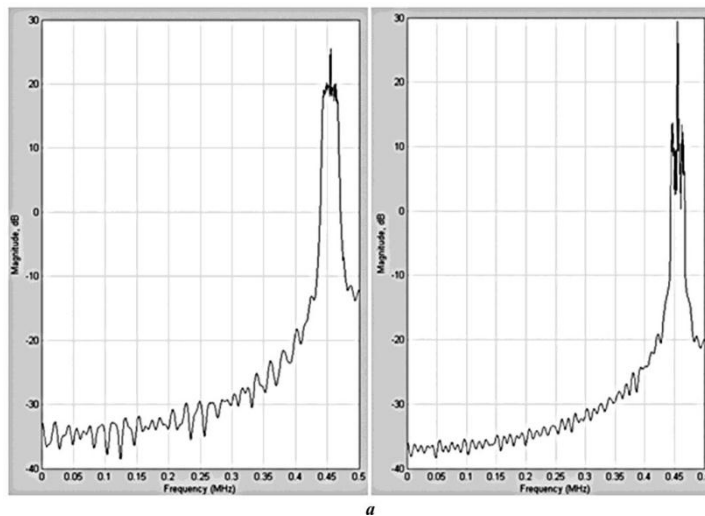


Рис. 6.6 - Спектр сигнала и шума в доплеровской полосе на входе (слева) и выходе (справа) фильтра:  
а – входное соотношение сигнал / шум  $-9$  дБ. Порог фиксированный

Результаты моделирования показывают значительное улучшение характеристик сигнала после его нелинейной фильтрации, что облегчает его обнаружение в ручном и автоматическом режимах.

## **2.7 Тема: «Обработка информации, автоматический сбор, сортировка и архивация данных в комплексе мониторинга КА»**

Полноценная работа службы предполагает наличие ряда компонент, функционирующих как со стороны приемника, так и со стороны центра обработки и хранения данных. Во-первых, система сбора данных в составе регистратора должна обеспечить сбор данных, а также их оперативную передачу в центр обработки и хранения данных. Кроме этого, необходимо организовать локальное хранение последних сообщений, что позволит не только предотвратить потери информации при нарушении работы канала связи, но и контролировать состояние приемника и процесс передачи данных. В задачи центра обработки и хранения данных, помимо непосредственного приема данных, входят организация хранения, создание архива, а также различные сервисы по распространению данных. Это может быть первичная обработка данных, поиск и отбор по запросам внутренних и внешних потребителей.

Как правило, при организации оперативного сбора данных используются стандартные высокоуровневые протоколы передачи данных и не зависящий от приемника формат представления данных.

Рассмотрим подробнее основные задачи и требования к сбору и хранению данных.

### **Основные задачи и требования к сбору и хранению данных**

К таким задачам программно-аппаратного комплекса, в рамках которого реализуется целый ряд автоматизированных блоков, обеспечивающих решение базовых задач, связанных с организацией работы по мониторингу КА в первую очередь следует отнести следующие.

- Сбор спутниковых данных различного уровня обработки из центров их приема и обработки. В том числе возможность онлайн получения информации из различных источников.
- Проведение потоковой обработки данных для формирования различных информационных продуктов в формате, обеспечивающим удобный и достаточно быстрый удаленный доступ к ним.
- Ведение архивов спутниковой информации и результатов их обработки, позволяющее эффективно организовывать доступ к данным для решения локальных и распределенных задач.
- Поддержка механизмов эффективного распределенного доступа к спутниковой информации и результатам ее обработки.
- Предоставление различных возможностей, позволяющих проводить обработку и анализ данных с использованием распределенных вычислительных ресурсов (в том числе web-инструментов).

При разработке программно-аппаратного комплекса к нему предъявлялись следующие основные требования:

- автоматизация всех операций получения, обработки и архивации спутниковых данных;
- возможность масштабирования системы при наращивании количества различных типов спутниковых данных и их объемов;
- максимальное использование специального ПО, а также свободно распространяемого ПО;

- организация вычислительных ресурсов комплекса на основе использования достаточно недорогих аппаратных решений, позволяющих проводить их поэтапную замену и наращивание;
- обеспечение возможности эффективного управления и контроля работоспособности работы комплекса.

Ниже кратко рассмотрим основные задачи подсистем комплекса (рис. 1), особенности их реализации, а также опишем особенности их взаимодействия (основные потоки данных).

Подсистема сбора данных предназначена для получения исходных спутниковых данных и информационных продуктов, получаемых на основе их обработки из различных источников, в качестве которых могут выступать центры распространения спутниковых данных, центры приема и обработки спутниковых данных, а также другие организации, предоставляющие доступ к находящимся у них спутниковым данным. Основным достоинством реализованной подсистемы является полная автоматизация процессов получения спутниковых данных. Должны быть разработаны подходы, позволяющие достаточно однотипным образом создавать автоматизированные процедуры получения информации из различных источников.

Подсистема архивации данных отвечает за архивацию поступающих в центр спутниковых данных и обеспечивает возможность проведения архивации данных различных уровней обработки. Технология построения архивов спутниковых данных позволяет унифицировать задачи архивации самых разных типов спутниковых данных, отличающихся как по пространственному разрешению и методике хранения, так и по набору описывающих их атрибутов. Основными функциональными особенностями системы являются:

- обеспечение достаточно быстрого поиска и выбора необходимой информации для представления в интерактивных интерфейсах работы с данными;
- обеспечение возможности автоматизированного выбора наборов данных для проведения их автоматизированной обработки;
- поддержку распределенного хранения данных, включая взаимодействие с внешними удаленными архивами данных.

Подсистема обработки данных предназначена для проведения полностью автоматизированной обработки спутниковых данных. Она обеспечивает потоковую оперативную обработку данных из различных источников, а также позволяет проводить их автоматизированную обработку при построении различных информационных продуктов. Для проведения обработки используется достаточно большой пул компьютеров, который может легко наращиваться или сокращаться в зависимости от текущих конкретных задач системы. При этом, с увеличением объемов обрабатываемой информации, количества реализуемых цепочек обработки спутниковых данных и числа задействованных компьютеров, наиболее остро встают вопросы управления и контроля. Используя специализированные методы, обеспечивается централизованное управление и распределенный контроль процессов обработки.

Подсистема обеспечения доступа к данным реализует три основных функциональных блока: спутниковый информационный сервис для доступа удаленных пользователей к информации, программные интерфейсы для доступа к данным из тематических информационных систем и программный шлюз, предоставляющий доступ к физически располагаемым во внешних архивах спутниковым данным. Ключевым преимуществом реализованных в центре решений является поддержка достаточно сложных инструментов для работы со спутниковыми данными на базе различных специализированных web-интерфейсов. Многие из таких инструментов анализа и обработки до недавнего времени были доступны только в специализированных локальных (настольных) и достаточно дорогостоящих комплексах анализа спутниковой информации.

Подсистема управления и контроля предназначена для обеспечения бесперебойного функционирования центра коллективного пользования и позволяет решать следующие основные задачи:

- управление автоматическим запуском всех процедур по работе с данными;
- диспетчеризация потоков данных;
- контроль за выполнением всех процедур по работе с данными;
- контроль за своевременным поступлением данных в архивы;
- контроль за состоянием компьютеров и их доступностью;
- документирование программных и аппаратных компонент системы;
- детектирование сбоев и ошибок в работе системы и сопровождение процесса их устранения.

Основной особенностью этой подсистемы является максимально автоматизированный контроль достаточно большого числа процессов, задействованных на разных этапах работы системы мониторинга, и реализация распределенных инструментов контроля и управления с помощью развитой системы вебинтерфейсов.

### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сомов А. М., Корнев С. Ф. Спутниковые системы связи: Учебное пособие для вузов / Под ред. А. М. Сомова. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012. – 244 с.
2. Чернявский Г.М., Бартенев В.А. Орбиты спутников связи. — М.: Связь, 1978.
3. Спутниковые сети связи: Учеб. пособие/В.Е. Камнев, В.В. Черкасов, Г.В. Чечин. — М.: Альпина Паблишер, 2004. — 536 с.
4. Регламент радиосвязи. — М.: Радио и связь, 1985.
5. Кантор Л.Я., Минашкин В.П., Тимофеев В.В. Спутниковое вещание. — М.: Радио и связь, 1981. — 232 с.
6. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. — М.: Связь, 1979.
8. Сомов А.М. Расчет антенн земных станций спутниковой связи. — М.: Горячая линия-Телеком, 2011.
9. Калинин А.И. Влияние дождя на ослабление радиоволн для ИСЗ // Электросвязь. 1976. № 5.
10. Современные технологии радиомониторинга в спутниковых системах связи и ретрансляции / А. В. Кузовников, Н. А. Тестоедов, В. Г. Сомов [и др.]. - М.: Радиотехника, 2015. - 216 с.