МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
«Алматинский университет энергетики и связи»

С.В. Коньшин, Г.Д. Демидова

ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

Учебник

Алматы 2014

УДК 621.396(075.8)
ББК 32.884.1я73
К65Технологии беспроводной связи: Учебник / С.В. Коньшин; Г.Д. Демидова
Алматы: АУЭС, 2014 171 с.

ISBN 978-601-7327-62-0

На базе существующего многообразия учебно-методической литературы и интернет - ресурсов по технологиям связи. В представленном учебнике обобщены, систематизированы и представлены сведения о современных технологиях беспроводной связи с учетом потребностей студентов в изучении конкретных технологий, используемых в отрасли телекоммуникаций Казахстана.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по специальностям «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», «Информационные системы», «Космическая техника и технологии». Некоторые главы учебника могут быть полезны студентам других специальностей при изучении отдельных технологий беспроводной связи.
Табл.5 , Ил.49 , Библиогр. - 39 назв.

УДК 621.396(075.8)
ББК 32.884.1я73

Рецензенты: КазНТУ, д-р техн. наук, профессор Джурунтаев Д.З.
КОУ, канд. техн. наук, доцент Хасенова Г.И.
АУЭС, канд. техн. наук, доцент Артюхин В.В.
АУЭС, канд. техн. наук, доцент Ибраева Л.К.

Учебник рекомендован к изданию Ученым Советом Алматинского университета энергетики и связи (Протокол № 9 от 29.06.2012г.) и Республиканским учебно-методическим советом (Протокол №2 от 16.10.2012г.) по специальностям энергетики, радиотехники, электроники, телекоммуникаций с грифом МОН РК.

ISBN 978-601-7327-62-0

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2014 г.

Содержание

Введение 5
Глава 1
Общие сведения о сетях подвижной связи 6
1.1 Исторический очерк развития сетевых технологий 6
1.2 Назначение и классификация систем беспроводной связи 8
1.3 Стандартизиция в области телекоммуникаций 11
Глава 2
Сотовые сети беспроводной связи 13
2.1 Элементы сетей сотовой связи 13
2.2 Аутентификация и идентификация 18
2.3 Системы сотовой связи стандарта GSM 22
2.4 Сотовая связь с кодовым разделением каналов (стандарты CDMA) 23
Глава 3
Сети транкинговой связи 34
3.1 Основные положения 34
3.2 Достоинства и недостатки транкинговых систем радиосвязи 37
3.3 Классификация транкинговых систем радиосвязи 39
3.4 Архитектура транкинговых систем связи 44
3.5 Сети транкинговых связи стандарта TETRA 50
Глава 4
Сети спутниковой связи 56
4.1 Основные принципы построения спутниковых систем связи 56
4.2 Классификация спутниковых систем связи Параметры и виды орбит 58
4.3 Системы спутниковой связи Inmarsat 63
4.4 Системы спутниковой связи Globalstar 63
4.5 Системы спутниковой связи Thuraya 66
Глава 5
Методы многостанционного доступа 68
5.1 Методы многостанционного доступа и разнесения сигналов 68
5.2 Многостанционный доступ на основе кодового разделения каналов (МДКРК): системы с прямым расширением спектра и перестройкой рабочей частоты 75
Глава 6
Оптические системы 82
6.1 Принципы построения оптических систем связи 82
6.2 Классификация оптических систем связи 84
6.3 Особенности построения оптических систем связи 86
6.4 Атмосферная лазерная связь 91
Глава 7
Технические концепции построения систем построения БС 94
7.1 Распространение радиоволн при подвижной связи 94

7.2 Основы усиления антенн для подвижных объектов 102
7.3 Характеристики распространения радиоволн 104
7.4 Модель радиосигналов с замираниями, обусловленными многолучевым распространением 114
Глава 8
Системы с расширением спектра 118
8.1 Преимущества расширения спектра 118
8.2 Основные концепции систем с расширенным спектром 119
8.3 Псевдослучайные последовательности 124
8.4 Характеристики системы с прямым расширением спектра 131
Глава 9
Системы с расширением спектра путем перестройки рабочей частоты 136
9.1 Системы с медленной перестройкой рабочей частоты 136
9.2 Система с быстрой перестройкой частоты 137
9.3 Характеристики систем с перестройкой рабочей частоты при воздействии помех 138
9.4 Временное рассеяние: устойчивость систем с перестройкой рабочей частоты к воздействию помех из-за многолучевости 140
9.5 Сравнение МДКРК систем с прямым расширением спектра и перестройкой рабочей частоты 142
9.6 Синхронизация систем с расширенным спектром 144
Глава 10
Беспроводные локальные сети 153
Тестовые задания 159
Список сокращений 166
Заключение 169
Список литературы 170

Введение

Дисциплина «Технологии беспроводной связи» является предметом цикла базовых дисциплин. Цель курса – обучить студентов принципам организации и технологиям беспроводной связи, показать методы разделения каналов; научить методам разнесения сигналов с использованием оптической и радиосвязи, техническим концепциям построения систем беспроводной связи; рассмотреть системы с расширением спектра, а также принципы построения беспроводных локальных сетей.

Первая глава посвящена вопросам истории развития систем беспроводной связи.

В главе 2 широко освещаются вопросы сотовых систем связи, которые нашли широкое распространение в подавляющем большинстве регионов нашей страны. Особое внимание уделяется технологиям процесса установления соединения, обеспечивающим идентификацию подлинности абонента, определения его местоположения и организации роуминга в различных стандартах.

В следующих главах (3,4) рассматриваются вопросы, связанные с процессом расширения сетей связи на основе транкинговых и спутниковых систем связи, описание их стандартов. Приводится состав оборудования, рассмотрены способы формирования рабочей зоны системы, а также структура одноканальной и многоканальной транкинговых сетей. Изложена классификация и принципы построения перспективных сетей спутниковой связи, позволяющей организовывать персональную связь в удаленных и труднодоступных районах.

В главе 5 рассматриваются методы многостанционного доступа и разнесения сигналов.

В главе 6 приводится классификация и принципы построения оптических систем связи, а также беспроводная атмосферная лазерная связь.

Последующие главы (7, 8, 9 и 10) рассматриваются как знакомство с вопросами проектирования и построения, стандартизации и сертификации систем беспроводной связи, а также с вопросами развития и конвергенции мобильных и информационных сетей на базе последних достижений в области связи.

В учебнике приведены контрольные вопросы, тестовые задания для закрепления материала.

Авторы выражают надежду, что данный учебник поможет читателю сориентироваться в этой интенсивно развивающейся области связи.

Книга предназначена для студентов и для широкого круга читателей, для всех, кто интересуется современными технологиями беспроводной связи.

ГЛАВА 1

1 Общие сведения о сетях подвижной связи

1.1 Исторический очерк развития сетевых технологий

Связь – одна из наиболее динамично развивающихся отраслей инфраструктуры современного общества [1].

Беспроводные сети передачи информации, как следует из названия, базируются на совокупности двух групп технологий – беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. В настоящее время беспроводная связь позволяет реализовать полный спектр информационных услуг: передачу телефонных сообщений, обмен данными, подключение к глобальным информационным сетям, получение и передачу видеоизображений, телевидение и т.д.

Классификация систем беспроводной связи включает огромное, постоянно увеличивающееся, количество видов, отличающихся назначением и характеристиками. Которые обеспечивают удовлетворение всех нужд человечества.

Бесспорное преимущество беспроводной связи в отсутствии проводов между входящим в сеть абонентским оборудованием и коммутатором. Будущее человечества представляется без проводных линий, а средства беспроводных коммутаций позволят в соответствии с развиваемыми проектами сэкономить значительное количество тепла, электроэнергии и обеспечат нахождение человека в удобном информационном пространстве. В реализации таких проектов важную роль играют технологии Bluetooth, ZigBee, Wi - Fi, WiMAX, DECT и др.

Беспроводные технологии зарождались в 19 веке. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. ученый Никола Тесла продемонстрировал передачу низкочастотных сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому что Тесла интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал Александр Степанович Попов, а 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А.С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А.С. Попов передал на расстояние 250 м первую в мире радиограмму, состоящую из двух слов: «Генрих Герц».

В 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний Г. Маркони: он установил связь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу - появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивается еще более быстрыми темпами.

С 20-х годов прошлого века началось коммерческое радиовещание (с применением амплитудной модуляции). С 1933 г., когда Э. Армстронг изобрел частотную модуляцию - началось ЧМ радиовещание.

В 1946 г. компании Bell system и AT&T приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS). Для полудуплексной связи использовалось 6 каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов сократили до трёх. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

В 1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый спутник связи «Молния - 1» СССР. Началась эра спутниковой связи.

В 1967 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту и создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 60-е годы прошлого столетия и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети. Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). Большой работой в этой области являлась диссертация Л. Клейнрока «Информационный поток в больших коммутационных сетях».

В 1964 г. опубликована работа П. Варана «О распределенных коммутациях». В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. Также была создана первая нелокальная компьютерная сеть.

В 1962 г. А. Харкевичем впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи, предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. Знаковыми для сетевых технологий стали 1967-1968 г.: была разработана первая локальная вычислительная сеть с пакетной коммутацией. Сеть работала с пиковой скоростью – до 768 кбит/с. Был представлен начальный план сети ARPANET. Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET – прообраз грядущего интернета. В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) ALOHA. Её разработал и построил Н. Абрамсон. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET.

Эта работа заложила основу будущих беспроводных локальных вычислительных сетей. В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&гT начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. кв.км. За каждым событием в области беспроводных технологий стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. Все беспроводные технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеоинформации.

Основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров, развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем). Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации связано с их достоинствами:

1) гибкость архитектуры, возможность динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;

2) высокая скорость передачи информации (1-10 Мбит/с и выше);

3) быстрота проектирования и развертывания;

4) высокая степень защиты от несанкционированного доступа;

5) отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного и медного кабелей.

1.2 Назначение и классификация систем беспроводной связи

Современная жизнь характеризуется повышенной деловой активностью населения. Бурное развитие современных технологий обусловлено совершенствованием средств и параметров связи. Необходимость обладания информацией в определенное время, увеличение объема этой информации и уменьшение сроков ее доставки до адресата, возможность ее оперативной передачи и приема делает связь неотъемлемым атрибутом действительности [2]. Системы беспроводной связи созданы с целью максимального удовлетворения на современном мировом уровне потребностей их абонентов в услугах связи. Критериев классификации можно разрабатывать достаточно много, они не могут укладываться в четкие границы определенного класса, да и по мере развития устоявшиеся системы могут устаревать. Поэтому далее приводятся наиболее популярные на наш взгляд способы ранжирования беспроводных систем.

Классифицируются системы беспроводной связи по следующим признакам:

а) по способу обработки первичной информации:

1) аналоговые;
2) цифровые;

б) по назначению:

1) сотовые;
2) пикосотовые (бесшнуровые телефонные);
3) транкинговые;
4) спутниковые;
5) оптические;
6) пейджинговые;

в) по методам многостанционного доступа:

1) с частотным разделением каналов FDMA;
2) с временным разделением каналов TDMA;
3) с кодовым разделением каналов CDMA;
4) комбинированные;

г) по способу организации канала связи:

1) симплексные;
2) дуплексные;
3) полудуплексные;

д) по ширине полосы передачи:

1) на узкополосные;
2) на широкополосные;
3) сверхширокополосные;

е) по локализации абонентов:

1) подвижные;
2) фиксированные;

ж) по географической протяженности:

1) персональные;
2) локальные;
3) региональные (городские);
4) глобальные;

и) по виду передаваемой информации:

1) на системы передачи речи;
2) видеоинформации;
3) передачи данных.

Основными требованиями, предъявляемыми абонентами и операторами к профессиональным системам беспроводной связи, являются:

- обеспечение связи в заданной зоне обслуживания независимо от местоположения абонентов;
- возможность взаимодействия отдельных групп абонентов и организация циркулярной связи;
- оперативность управления связью, в том числе на различных уровнях;

- обеспечение связи через центры управления;
- возможность приоритетного установления каналов связи;
- низкие энергетические затраты беспроводной станции;
- конфиденциальность переговоров [3].

Мобильные компьютеры — это небольшие, обычно портативные устройства, которые используются на расстоянии от офисного настольного компьютера. Они представляют наиболее быстрорастущий сегмент компьютерной индустрии. Все они оснащены как минимум, беспроводной инфракрасной связью. Имеются компьютеры еще меньших размеров и более мобильные, нежели компьютеры класса laptop (наколенные). Ноутбуки, субноутбуки, ручные (palmtops) и карманные (handholds) компьютеры, планшеты и персональные цифровые секретари (personal digital assistants), которые объединяют функции органайзера, пейджера и сотового телефона, — все это пользующиеся популярностью, модернизированные компьютеры.

Аналитики прогнозируют громадный рост рынка новых мобильных персональных устройств, называющихся PDA, коммуникаторов или смартфонов, поскольку они спроектированы для удобного пользования. Мобильные компьютеры зачастую работают, когда человек стоит или идет. Пользователь может держать компьютер в одной руке, как можно держать папку, блокнот или сотовый телефон, и работать другой рукой. С компьютерами класса laptop это невозможно. Чтобы быть удобными и удовлетворять требованиям работающих с ними, мобильные компьютеры должны быть меньше, легче, прочнее и проще в работе. Часто пользователям в равной мере будет необходим передвижной и гибкий доступ к удаленным базам данных и центральным ЭВМ с помощью беспроводных сетей, обычно в форме подвижных радиосетей, соединенных с национальными и международными коммутируемыми телефонными сетями общего пользования.

Чтобы сделать мобильные компьютеры удобными, имеется целый ряд компьютерных и смешанных (компьютер — подвижная связь) технологий:

- перьевой ввод и распознавание речи может привести к замене клавиатуры и сделать компьютеры более удобными и функциональными;
- радиосвязь позволяет пользователям обмениваться информацией в пределах комнаты, здания, города, страны или со всем миром;
- малогабаритные, более современные микропроцессоры с расширенной компактной памятью для хранения больших объемов информации и современные цифровые системы радиосвязи могут обрабатывать и передавать данные более эффективно;
- новые технологии производства элементов питания и эффективность программного обеспечения для управления позволяют компьютерам и смартфонам работать на одной зарядке батарей более длительные периоды времени.

1.3 Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов изготовителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных производителей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии [3].

Главной организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный телекоммуникационный союз (ITU -International Telecommunications Union) работающий под эгидой ООН. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU) вошли два сектора: Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR-International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB-International Frequency Registration Board). Сектор телекоммуникаций Международного телекоммуникационного союза ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT- Consultative Committee fo International Telephone and Telegraph). Исследовательский сектор ITU-D, был создан и организован в 1989 году (Telecommunication Development Bureau-TDB). Надо отметить, что именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов.

Современная структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций: тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых. Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC - стандарты в области электроники и электротехники, ISO - все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например, ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике – IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Институт IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение.

Сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами – ISO, ITU, IEEE.

Совместить практически все технологии в одном терминале позволил новый стандарт (Universal Mobile Telecommunications System), который

реализуется сейчас в рамках подвижных телекоммуникационных радиосистем третьего и четвертого поколения. Возможность переключения с одного диапазона на другой, перехода со стандарта на стандарт или со спутникового канала на сотовый позволяет абоненту выбрать тот вид услуг, который в наибольшей степени ему подходит. Поэтому терминалы UMTS являются многорежимными, работающими в сетях нескольких стандартов.

Контрольные вопросы:

1) Достоинства беспроводных сетей передачи.

2) Какие действующие международные стандарты Вы знаете в области телекоммуникаций?

3) Перечислите основные требования, предъявляемые абонентами, к профессиональным системам беспроводной связи.

4) Как возможно поделить все системы беспроводной связи по способу организации канала связи?

5) Какие виды технологий беспроводной связи Вы знаете?

ГЛАВА 2

2 Сотовые сети беспроводной связи

2.1 Элементы сетей сотовой связи

С развитием техники системы радиотелефонной связи совершенствовались: уменьшались габариты устройств, осваивались новые частотные диапазоны, улучшалось базовое и коммутационное оборудование.

В середине 40-х годов исследовательский цент Bell Labs американской компании AT&T предложил идею разбиения обслуживаемой территории на небольшие участки – соты (cell – ячейка, сота). Каждая сота должна была обслуживаться передатчиком с ограниченным радиусом действия и фиксированной частотой. Это позволило без взаимных помех использовать ту же самую частоту повторно в другой ячейке (соте). Но прошло 30 лет прежде, чем такой принцип организации связи был реализован на аппаратном уровне [4].

Всю обслуживаемую территорию можно разделить на соты двумя способами:

1) основанном на измерении статистических характеристик распространения сигналов в системе связи;

2) основанном на измерении или расчете параметров распространения сигналов для конкретного района.

При реализации первого способа всю обслуживаемую территорию делят на одинаковые по форме соты, а затем с помощью законов статистической радиофизики определяют их размеры и расстояния до других зон, в пределах которых выполняются условия взаимного влияния.

Для оптимального (т.е. без перекрытия или пропусков) разделения территории на соты могут быть использованы только три геометрические фигуры: треугольник, квадрат и шестиугольник. Наиболее подходящим является шестиугольник, так как если антенну с круговой диаграммой направленности установить в его центре, то будет обеспечен доступ почти ко всей соте.

При использовании первого способа интервал между сотами, в которых используются одинаковые рабочие каналы, обычно получается больше требуемого для обеспечения допустимого уровня взаимных помех.

Более приемлем второй способ разделения на зоны обслуживания. В этом случае тщательно измеряют или рассчитывают параметры систем для минимального количества базовых станций, обеспечивающих качество, удовлетворительное обслуживание абонентов на всей территории, определяют оптимальное место расположения базовых станции с учетом рельефа местности, возможность использования направленных антенн, пассивных

ретрансляторов и смежных центральных станций в момент пиковой нагрузки и т.д.

Принципы построения цифровых сотовых систем позволили применить при организации сотовых сетей новые более эффективные модели повторного использования частот, чем в аналоговых сетях. В результате без увеличения общей полосы частот системы связи, значительно возросло число каналов на соту.

Группа сот с различным набором частот называется кластером.

Определяющим параметром кластера является размерность – количество используемых в соседних сотах частот. Размерность кластера равна семи (см. рисунок 2.1).

Базовые станции, на которых допускается повторное использование выделенного набора частот, удалены друг от друга на расстояние D, называемое защитным интервалом.

Смежные базовые станции, использующие различные частотные каналы, образуют группу из C станций. Если каждой базовой станции выделяется набор из m каналов с шириной полосы каждого F_k, то общая ширина полосы F_c , занимаемая данной системой сотовой связи, составит:

$$F_c = F_k \times m \times C; \qquad (2.1)$$

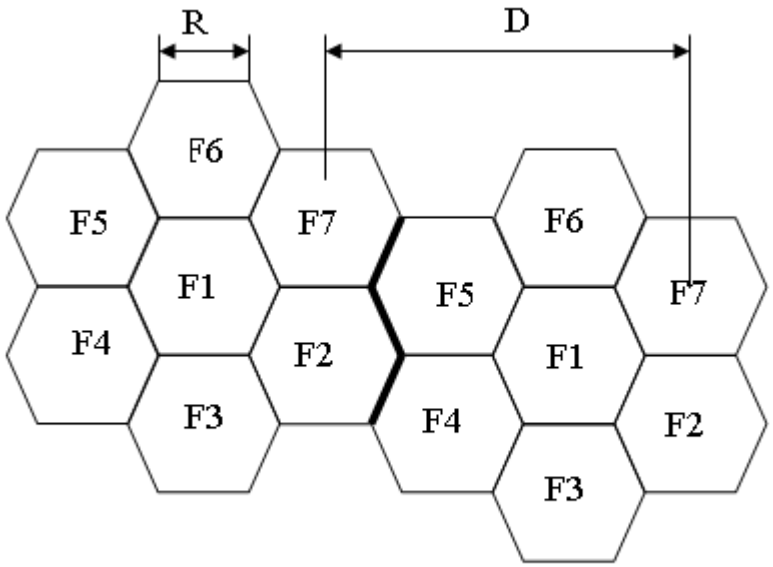
$$m = \frac{1 \times Fc}{C \times Fk} \quad . \qquad (2.2)$$

Таким образом, величина C определяет минимальное возможное количество каналов систем, и поэтому ее называют частотным параметром системы, или коэффициентом повторения частот. Коэффициент C не зависит от количества используемых каналов и увеличивается по мере уменьшения радиуса ячейки.

Таким образом, при использовании сот меньших размеров можно увеличить повторяемость частот. Наилучшее соотношение между C и D обеспечивается в шестиугольной соте.

Размер соты R определяет защитный интервал D между сотами, в которых одни и те же частоты могут быть использованы повторно. Значение D зависит также от допустимого уровня помех и условий распространения радиоволн. Размер R определяется также количеством абонентов N, способных вести переговоры на всей территории обслуживания. Следовательно, уменьшение этого размера позволит не только повысить эффективность использования выделенной полосы частот и увеличить абонентскую емкость системы, но и уменьшить мощность передатчика и чувствительность приемников БС и ПС.

Параметр $q = \frac{D}{R}$ называется коэффициентом уменьшения соканальных помех или коэффициентом соканального повторения.



(R – размет соты; D – защитный интервал)

Рисунок 2.1– Модель повторного использования частот для семи сот

Эффективным способом снижения уровня соканальных помех, то есть помех по совпадающим частотным каналам, может быть использование секторных антенн. В секторе направленной антенны сигнал излучается в одну сторону, а уровень излучения в противоположном направлении сокращается до минимума. Секторизация сот позволяет более часто применять частоты в сотах при одновременном снижении помех.

Следующий шаг развития сотовых систем подвижной связи после введения цифровой технологии – переход к микросотовой структуре сетей. При радиусе сот несколько сотен метров их емкость может быть увеличена в 5-10 раз по сравнению с макросотами. Кроме того, возможно применение абонентских радиостанций существующих стандартов цифровых ССС наряду с портативными маломощными абонентскими радиостанциями, служащими основой для создания систем персональной связи (PCS).

Микросотовая структура СПС органически сочетается с макросотами. Микросоты строятся на основе БС небольшой мощности, обслуживающие участки улиц, помещения в зданиях. Микросотовая структура может рассматриваться как развитие оборудования макросотовой БС с управлением одним контроллером и взаимными соединением при помощи линий со скоростью передачи 64 кбит/с. Микросоты берут на себя нагрузку от медленно перемещающихся абонентов, например, пешеходов и неподвижных автомобилей.

Принципы построения создаваемых микросотовых сетей подвижной связи отличаются от существующих для макросотовых сетей. К таким отличиям относится отсутствие частотного планирования и «эстафетная передача» (handover).

Первое отличие связано с тем, что в условиях микросот трудно спрогнозировать условия распространения радиоволн и дать оценку уровня соканальных помех. Поэтому практически невозможно применить принципы частотного планирования в микросотах. Фиксированное распределение каналов приводит к низкой эффективности использования спектра частот. По данным причинам в микросотовых сетях связи действует процедура автоматического адаптивного распределения каналов (АРК) связи, реализованная в европейском стандарте DECT на цифровые системы беспроводных телефонов общего пользования.

Что касается второго отличия, то в микросотовых сетях в процессе обычного телефонного соединения число переключений между БС возрастает, и для обеспечения непрерывности связи необходимы новые быстродействующие алгоритмы переключения (handover).

В существующих цифровых ССПС применяют алгоритмы принудительного переключения, относящиеся к классу распределенных алгоритмов, которые работают значительно быстрее, чем централизованные алгоритмы аналоговых ССПС. В микросотовой структуре нет необходимости загружать сеть измерением уровня радиосигнала для принятия решения о переключении. Функции измерения переданы подвижной станции, которая передает его результаты на БС. ЦК подвижной связи не задействуется до тех пор, пока не будет выполнено фактическое переключение.

Впервые микросотовая структура сетей связи была реализована в системах беспроводных телефонов.

Микросотовая структура используется при реализации сетей в рамках концепции персональной связи (PCN), которые в Европе создаются на основе стандарта DCS-1800, предусматривающем соответствие радиоинтерфейса стандарту GSM. В структуру сетей вводятся пикосоты с радиусом действия 10-60 м, предназначенные для обслуживания абонентов в городских районах с большой плотностью населения и в закрытых зонах (подземные гаражи, вокзалы и т. д.). Применение пикосот – еще один шаг к повышению емкости ССПС.

Системы сотовой связи строятся в виде совокупности ячеек (сот), покрывающих обслуживаемую территорию. В центре каждой ячейки находится базовая станция (БС), обслуживающая все подвижные станции (ПС) в пределах своей ячейки. При перемещении абонента из одной ячейки в другую происходит передача его обслуживания от одной БС к другой. Все БС соединены с центром коммутации (ЦК) подвижной связи по выделенным проводным или радиорелейным каналам связи. С центра коммутации имеется выход на СТОП. Упрощенная схема состава сети сотовой подвижной связи приведена на рисунке 2.2.

Система сотовой связи может включать более одного ЦК, что может быть обусловлено эволюцией развития сети или ограниченностью емкости коммутационной системы. Один из нескольких ЦК условно можно назвать головным, шлюзовым или транзитным.

В простейшем случае система содержит один ЦК, при котором имеется домашний регистр, и она обслуживает относительно небольшую замкнутую территорию, с которой не граничат территории, обслуживаемые другими системами. Если система обслуживает большую территорию, то она может содержать два и более ЦК, из которых только при «головном» имеется домашний регистр, но обслуживаемая системой территория по-прежнему не граничит с территориями других систем. В обоих этих случаях при перемещении абонента между ячейками одной системы происходит передача обслуживания, а при перемещении на территорию другой системы – роуминг. Если система граничит с другой ССС, то при перемещении абонента из одной системы в другую имеет место межсистемная передача обслуживания.

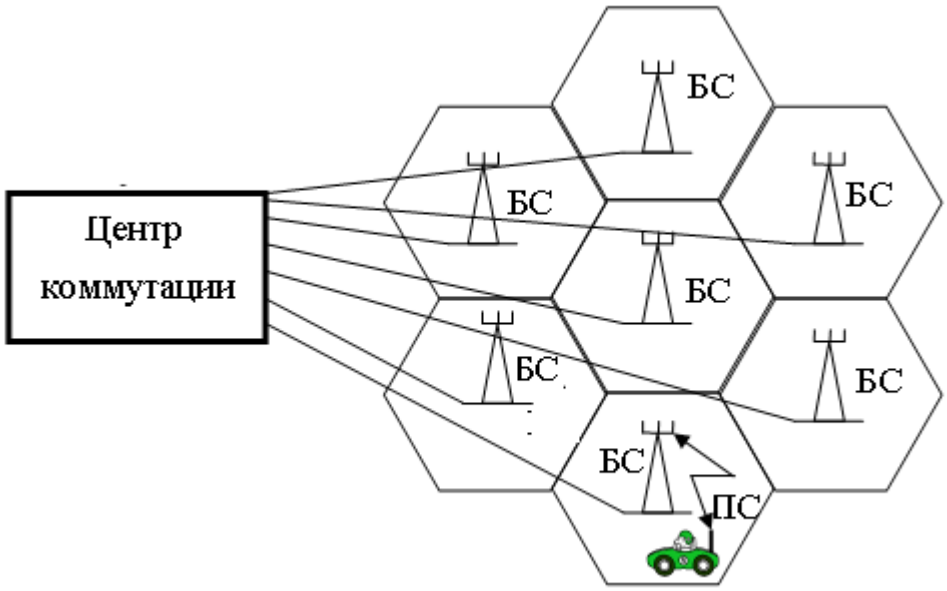


Рисунок 2.2- Состав сети сотовой подвижной связи

В состав подвижной станции (ПС) входят: блок управления; приемопередающий блок; антенный блок.

Контроллер БС (компьютер) обеспечивает управление работой станции, а также контроль работоспособности всех входящих в нее блоков и узлов.

Для обеспечения надежности многие узлы и блоки БС резервируются (дублируются), в состав станции включаются автономные источники бесперебойного питания (аккумуляторы).

Центр коммутации – это автоматическая телефонная станция ССС, обеспечивающая все функции управления сетью. ЦК осуществляет постоянное слежение за ПС, организует их эстафетную передачу, в процессе которой достигается непрерывность связи при перемещении ПС из соты в соту и переключение рабочих каналов в соте при появлении помех или неисправностей. На ЦК замыкаются потоки информации со всех БС, и через него осуществляется выход на другие сети связи – станционную телефонную сеть, сети междугородной связи, спутниковой связи, другие сотовые сети. В состав ЦК входит несколько процессоров (контроллеров).

2.2 Аутентификация и идентификация

Радиотелефон в ожидании – приемное устройство постоянно сканирует либо все каналы, либо только управляющие. Для вызова абонента всеми БС сотовой системы связи по КУ передается сигнал вызова. Мобильный телефон вызываемого абонента при получении этого сигнала отвечает по одному из свободных КУ. БС, принявшие ответный сигнал, передают информацию о его параметрах в ЦК, который переключает разговор на ту БС, где зафиксирован максимальный уровень сигнала радиотелефона вызываемого абонента.

При наборе номера радиотелефон занимает один из свободных каналов, уровень сигнала БС в котором в данный момент максимален. По мере удаления абонента от БС или при ухудшении условий распространения радиоволн, или из-за влияния помех, или при возникновении неисправностей коммутационного оборудования уровень сигнала уменьшается, ухудшается качество связи.

Улучшение качества разговора достигается путем автоматического переключения абонента на другой канал связи. Специальная процедура передача управления вызовом или эстафета передачи (handover или handoff), позволяет переключить разговор на свободный канал другой БС, в зоне действия которой оказался в это время абонент. Для контроля таких ситуаций БС снабжена специальным приемником, периодически измеряющим уровень сигнала мобильного телефона разговаривающего абонента и сравнивающим его с допустимым пределом. Если уровень сигнала меньше этого предела, то информация об этом автоматически передается в ЦК по служебному каналу связи. ЦК выдает команду об измерении уровня сигнала радиотелефона абонента на ближайшие к нему БС. После получения информации от БС об уровне этого сигнала ЦК переключает радиотелефон на ту из них, где уровень сигнала оказался наибольшим.

При превышении потока заявок количества свободных каналов как временная мера используется эстафета передачи внутри соты. При этом происходит поочередное переключение каналов в пределах одной и той же БС для обеспечения связью всех абонентов.

Одна из важных услуг сотовой связи – роуминг, позволяющий использовать радиотелефон при поездке в другой город, страну и пр.

В работе ПС в пределах одной ячейки выделяется четыре этапа, соответственно четыре режима работы: включение и инициализация, режим ожидания, режим установления связи (вызова), режим ведения связи (телефонного разговора).

Включается ПС (замыкается цепь питания), производится инициализация – начальный запуск, т.е. происходит настройка ПС на работу в составе системы по сигналам, регулярно подаваемым БС по КУ, после чего ПС переходит в режим ожидания. Конкретное содержание этапа инициализации зависит от используемого стандарта сотовой связи.

В режиме ожидания ПС отслеживает:

- изменения информации системы, эти изменения могут быть связаны как с изменением режима работы системы, так и с перемещением самой ПС;
- команды системы, например, - команду подтвердить свою работоспособность;
- получение вызова со стороны системы;
- инициализацию вызова со стороны собственного абонента.

ПС может периодически (раз в 10 – 15 минут) подтверждать свою работоспособность, передавая соответствующие сигналы на БС (подтверждение «регистрации» или уточнение местоположения). В ЦК для каждой из включенных ПС фиксируется ячейка, в которой она «зарегистрирована», что облегчает процедуру вызова мобильного аппарата. Если ПС не подтверждает свою работоспособность в течение определенного промежутка времени, ЦК считает ее выключенной, и поступающий на ее номер вызов не передается.

Процедура установления связи заключается в том, что вызов номера, поступивший от МА, ЦК направляет на БС той ячейки, в которой «зарегистрирован» ПС, или на несколько БС в окрестностях этой ячейки с учетом возможного перемещения абонента за время, прошедшее с момента последней «регистрации», а БС передает его по соответствующим каналам вызова. ПС, находящаяся в режиме ожидания, получает вызов и отвечает на него через свою БС, передавая одновременно данные, необходимые для проведения процедуры аутентификации. При положительном результате аутентификации назначается КТ (канал трафика). ПС сообщается номер соответствующего частотного канала, настраивается на выделенный канал и совместно с БС выполняет необходимые действия по подготовке сеанса связи. На этом этапе ПС настраивается на заданный номер слота в кадре, уточняет задержку во времени, подстраивает уровень излучаемой мощности и т. п. Выбор временной задержки производится с целью временного согласования слотов в кадре (на прием в БС) при организации связи с ПС, находящимися на разных дальностях от БС. При этом временная задержка передаваемой ПС пачки регулируется командами БС.

Затем БС выдает сообщение о подаче сигнала вызова (звонка), которое подтверждается ПС, и вызывающий абонент отвечает на вызов (снимает трубку), ПС выдает запрос на завершение соединения. С завершением соединения начинается собственно сеанс связи – абоненты ведут разговор.

В процессе разговора ПС производит обработку передаваемых и принимаемых сигналов речи, а также передаваемых вместе с речью сигналов управления. По окончании разговора происходит обмен служебными сообщениями между ПС и БС (запрос или команда на отключение с подтверждением), после чего передатчик ПС выключается, и станция переходит в режим ожидания.

Аутентификация – процедура подтверждения подлинности (действительности, законности, наличие прав на пользование услугами

сотовой связи) абонента ССС. Каждый подвижный абонент на время пользования системой связи получает стандартный номер подлинности абонента (SIM-карту), который содержит:

- международный идентификационный номер подвижного абонента (IMSI);
- свой индивидуальный ключ аутентификации (Ki);
- алгоритм аутентификации (А3).

С помощью заложенной в SIM информации в результате взаимного обмена данными между ПС и ССС осуществляется полный цикл аутентификации и разрешается доступ абонента к сети.

Процедура проверки сетью подлинности абонента реализуется следующим образом.

Сеть передает случайный номер (RAND) на подвижную станцию. Подвижная станция определяет значение отклика (SRES), используя RAND, Ki и А3:

$$SRES = Ki\ [RAND].$$

ПС посылает вычисленное значение SRES в сеть, которая сверяет значение принятого SRES со значением SRES, вычисленным сетью. При совпадении обеих значений ПС может осуществлять передачу сообщений. В противном случае связь прерывается, и индикатор подвижной станции должен показать, что опознавание не состоялось.

По причине секретности вычисление SRES происходит в рамках SIM. Несекретная информация не подвергается обработке в модуле SIM.

Процедура аутентификации показана на рисунке 2.3.

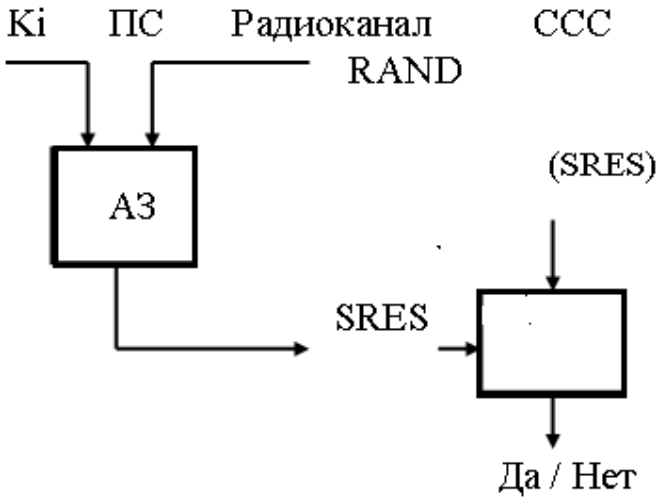


Рисунок 2.3 – Схема процедуры аутентификации

Идентификация – процедура отождествления ПС, т. е. процедура установления принадлежности к одной из групп, обладающих определенными

признаками. Эта процедура используется для выявления утерянных, украденных или неисправных аппаратов.

В аналоговых ССС первого поколения при аутентификации ПС передавала свой идентификатор (электронный серийный номер – Electronic Serial Number, ESN), и если он отыскивался среди зарегистрированных в домашнем регистре, то процедура аутентификации считалась успешно выполненной.

Идея процедуры аутентификации в цифровой ССС заключается в шифровании некоторых паролей-идентификаторов с использованием квазислучайных чисел, периодически передаваемых на ПС и ЦК, и индивидуального для каждой ПС алгоритма шифрования.

Такое шифрование, с использованием одних и тех же исходных данных и алгоритмов, производится как на ПС, так и в ЦК (или в центре аутентификации), и аутентификация считается закончившейся успешно, если оба результата совпадают.

Секретность передачи данных

Механизм защиты заключается в том, что все конфиденциальные сообщения должны передаваться в режиме защиты информации. Алгоритм формирования ключей шифрования (A8) хранится в модуле SIM. После приема случайного номера RAND ПС вычисляет, кроме отклика SRES, также и ключ шифрования (K_c), используя RAND, K_i и алгоритм A8 (см. рисунок 2.4):

$$K_c = K_i [RAND].$$

Ключ шифрования не передается по радиоканалу. Как подвижная станция, так и сеть вычисляют ключ шифрования, который используется другими подвижными объектами. По причине секретности вычисление Кс происходит в SIM.

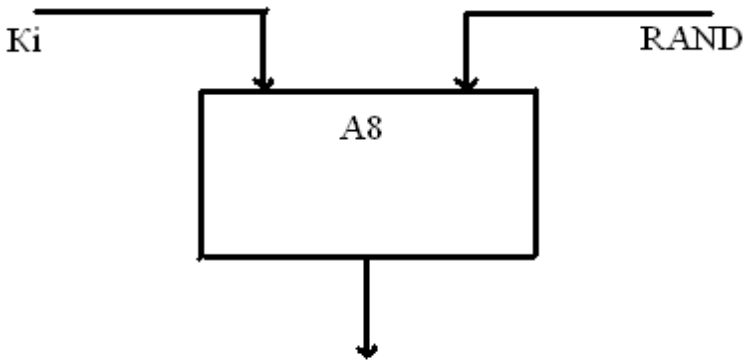


Рисунок 2.4 – Схема вычисления ключа шифрования

Кроме случайного числа RAND, ССС посылает ПС числовую последовательность ключа шифрования. Это число связано с действительным значением Кс и позволяет избежать формирования неправильного ключа. Число хранится в ПС и содержится в каждом первом сообщении, передаваемом в сеть. Некоторые сети принимают решение о наличии числовой последовательности действующего ключа шифрования в случае, если необходимо приступить к опознаванию или если выполняется предварительное опознавание, используя правильный ключ шифрования:

- установка режима шифрования;
- обеспечение секретности абонента;
- обеспечение секретности в процедуре корректировки местоположения;
- передача обслуживания.

2.3 Системы сотовой связи стандарта GSM

Стандарт GSM (Global System for Mobile Communication) является европейским цифровым стандартом сотовой подвижной связи, разработанным под эгидой Европейского института стандартизации электросвязи — ETSI. В настоящее время сети сотовой связи стандарта GSM функционируют во всех странах мира. Ему принадлежит около 70% абонентской базы (более чем в 130 странах). В системах стандарта GSM имеются интерфейсы трех видов: для соединения с внешними сетями; между различным оборудованием сетей GSM; между сетью GSM и внешним оборудованием. Они полностью соответствуют требованиям рекомендаций ETSI/GSM 03.02 [5].

В стандарте GSM 900 для передачи информации прямого канала используется полоса 935...960 МГц, а обратного — 890...915 МГц, т.е. дуплексный разнос по частоте составляет 45 МГц. Один f-частотный канал занимает полосу 200 кГц. Всего в полной полосе частот GSM , с учетом защитных полос, размещается 124 частотных канала. Каждый частотный канал используется для организации 8 цифровых каналов. Каждый цифровой канал представляет собой отдельный физический канал. Используя временное уплотнение, на базе 124 радиоканалов можно получить 992 (124x8) физических каналов.

Центральная частота канала (в МГц) связана с его номером N соотношениями:

- обратный канал: $f = 890{,}200 + 0{,}200\,N$, $1 < N < 124$;
- прямой канал: $f = 935{,}200 + 0{,}200\,N$, $1 < N < 124$.

Одна из особенностей формирования сигналов в стандарте GSM - использование медленных скачков по частоте в процессе сеанса связи. Главное назначение таких скачков (SFH - Slow Frequency Hopping) - обеспечение частотного разнесения в радиоканалах, функционирующих в условиях многолучевого распространения радиоволн. SFH используется во всех подвижных сетях, что повышает эффективность кодирования и

перемежения при медленном движении абонентских станций. Принцип формирования медленных скачков по частоте состоит в том, что сообщение, передаваемое в выделенном абоненту временном интервале TDMA кадра (577 мкс), в каждом последующем кадре передается (принимается) на новой фиксированной частоте. В соответствии со структурой кадров время для перестройки частоты составляет около 1 мс.

В процессе скачков по частоте постоянно сохраняется дуплексный разнос 45 МГц между каналами приема и передачи. Всем активным абонентам, находящимся в одной соте, ставятся в соответствие ортогональные формирующие последовательности, что исключает взаимные помехи при приеме сообщений абонентами в соте. Параметры последовательности переключения частот (частотно-временная матрица и начальная частота) назначаются каждой подвижной станцией в процессе установления канала. Ортогональность последовательностей переключения частот в соте обеспечивается начальным частотным сдвигом одной и той же (по алгоритму формирования) последовательности. В смежных сотах используются различные формирующие последовательности.

В стандарте GSM используется гауссовская манипуляция с минимальным сдвигом (Gaussian Minimum Shift Keying — GMSK). По сути, это MSK–модуляция. Термин «гауссовская» в названии метода модуляции соответствует дополнительной фильтрации модулирующей битовой последовательности относительно узкополосных гауссовских фильтров, именно эта дополнительная фильтрация отличает метод GMSK от метода MSK. Ширина полосы B фильтра по уровню 3 дБ выбирается равной B = 0,3F, где F–частота битовой модулирующей последовательности. В стандарте GMSK F=270,833 кГц, полоса гауссовского фильтра B=81,3 кГц. Введение гауссовского фильтра приводит к сужению главного лепестка и снижению боковых лепестков спектра на выходе модулятора, чем обеспечивается допустимый уровень помех по соседним частотным каналам.

2.4 Сотовая связь с кодовым разделением каналов (стандарты CDMA)

В настоящее время метод многостанционного доступа с кодовым разделением каналов реализован в нескольких стандартах. Эти стандарты значительно отличаются друг от друга по способу кодирования в каналах и методу расширения спектра.

Под сетями сотовой связи стандарта cdmaOne обычно подразумевают сети стандарта с кодовым разделением каналов –IS-95A и IS-95B.

Сеть IS-95 A предоставляет абонентам голосовые услуги и услуги передачи данных, основанные на канальной коммутации со скоростью передачи данных до 64 кбит/с. Стандарт IS-95B позволяет повысить скорость передачи данных до 115 кбит/с за счет пакетной коммутации. Основным преимуществом стандартов IS-95A и IS-95B является совместимость

радиоинтерфейса со стандартом CDMA 2000 1X. Это выделяет определенные особенности в эволюции стандартов. Так, мобильный терминал стандарта IS-95 может работать в сетях CDMA 2000 1X. Это возможно благодаря унификации использования частотного ресурса, так как ширина несущей для всех стандартов одинакова и составляет примерно 1,25 МГц. Сети стандарта cdma 2000 представляют собой сети стандарта IMT-2000 с радиоинтерфейсом IMT-MC, который, в свою очередь, подразделяется на две фазы — cdma 2000 1X и cdma 2000 3X. Переход от cdma 2000 1X к cdma 2000 3X включает cdma 2000 1X EV-DO и cdma 2000 1X EV-DV Эволюция сетей стандарта CDMA показана на рисунках 2.5 и 2.6.

Рисунок 2.5 – Эволюция от стандарта IS-95A к стандартам третьего поколения

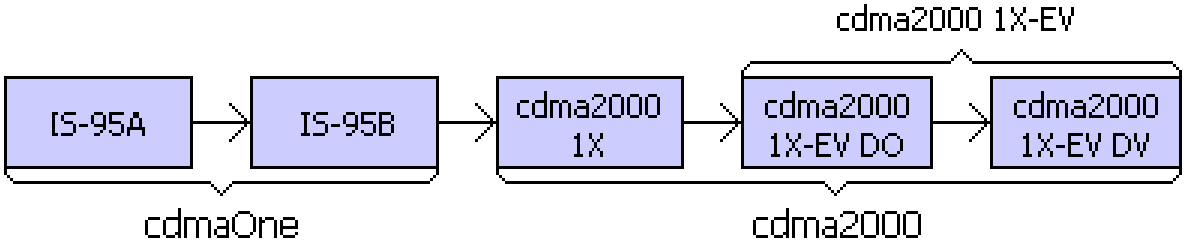


Рисунок 2.6– Эволюция стандарта CDMA

Сети сотовой связи стандарта cdmaOne

Система связи cdmaOne работает в диапазонах частот 824-849 МГц (обратный канал) и 869-894 МГц (прямой канал) с дуплексным разносом 45 МГц. Общая полоса частот, занимаемая в эфире –1,25 МГц [6].

Передача речи и данных по стандарту IS-95 осуществляется кадрами длительностью 20 мс. При этом скорость передачи в пределах сеанса связи может изменяться от 1,2 до 9,6 кбит/с, но в течение одного кадра она остается неизменной. Если количество ошибок в кадре превышает допустимую норму, то искаженный кадр удаляется.

В стандарте CDMA передаваемую информацию кодируют, и код превращают в шумоподобный широкополосный сигнал (ШШС) так, что его можно выделить снова, только располагая кодом на приемной стороне. Одновременно в широкой полосе частот можно передавать и принимать множество сигналов, не мешающих друг другу.

Широкополосной называется система, которая передает сигнал, занимающий очень широкую полосу частот, значительно превосходящую ту минимальную ширину полосы частот, которая фактически требуется для

передачи информации. В широкополосной системе исходный модулирующий сигнал (например, сигнал телефонного канала) с полосой всего несколько килогерц распределяют в полосе частот, ширина которой может быть несколько мегагерц. Это осуществляется путем двойной модуляции несущей передаваемым информационным сигналом и широкополосным кодирующим сигналом. Основной характеристикой широкополосного сигнала является его база B, определяемая как произведение ширины спектра сигнала F на его период T. В результате перемножения сигнала источника псевдослучайного шума с информационным сигналом энергия последнего распределяется в широкой полосе частот, т.е. его спектр расширяется (см. рисунок 2.7).

Информация может быть введена в широкополосный сигнал (ШПС) несколькими способами. Наиболее известный способ заключается в наложении информации на широкополосную модулирующую кодовую последовательность перед модуляцией несущей для получения ШПС.

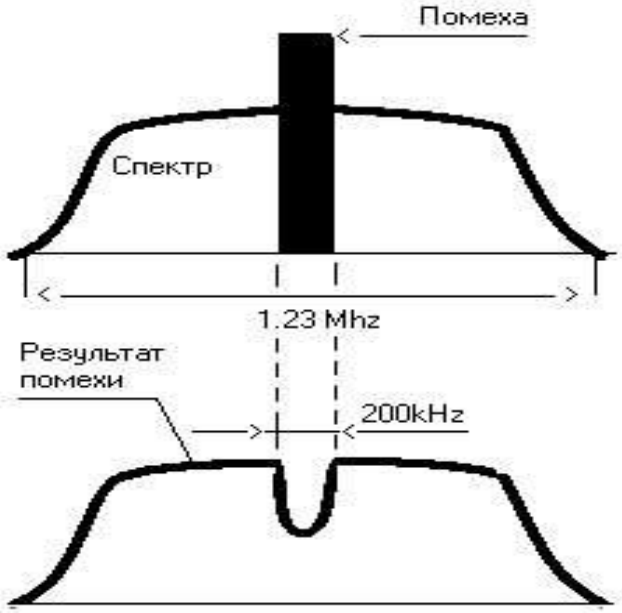


Рисунок 2.7 – Спектр шумоподобного сигнала

Узкополосный сигнал умножается на псевдослучайную последовательность (ПСП) с периодом T, состоящую из N бит. В этом случае база ШПС численно равна количеству элементов ПСП. Этот способ пригоден для любой широкополосной системы, в которой для расширения спектра высокочастотного сигнала применяется цифровая последовательность.

Сущность широкополосной связи состоит в расширении полосы частот сигнала, передаче ШПС и выделении из него полезного сигнала путем преобразования спектра принятого ШПС в первоначальный спектр информационного сигнала.

Перемножение принятого сигнала и сигнала такого же источника псевдослучайного шума (ПСП), который использовался в передатчике,

сжимает спектр полезного сигнала и одновременно расширяет спектр фонового шума и других источников интерференционных помех. Результирующий выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе приемника есть функция отношения ширины полос широкополосного и базового сигналов: чем больше расширение спектра, тем больше выигрыш. Во временной области - это функция отношения скорости передачи цифрового потока в радиоканале к скорости передачи базового информационного сигнала. Для стандарта IS-95 данное отношение составляет 128 раз, или 21 дБ. Это позволяет системе работать при уровне интерференционных помех, превышающих уровень полезного сигнала на 18 дБ, так как обработка сигнала на выходе приемника требует превышения уровня сигнала над уровнем помех всего на 3 дБ. В реальных условиях уровень помех значительно меньше. Кроме того, расширение спектра сигнала (до 1,23 МГц) можно рассматривать как применение методов частотного разнесения приема. Сигнал при распространении в радиотракте подвергается замираниям вследствие многолучевого характера распространения. В частотной области это явление можно представить как воздействие режекторного фильтра с изменяющейся шириной полосы режекции (обычно не более чем на 300 кГц).

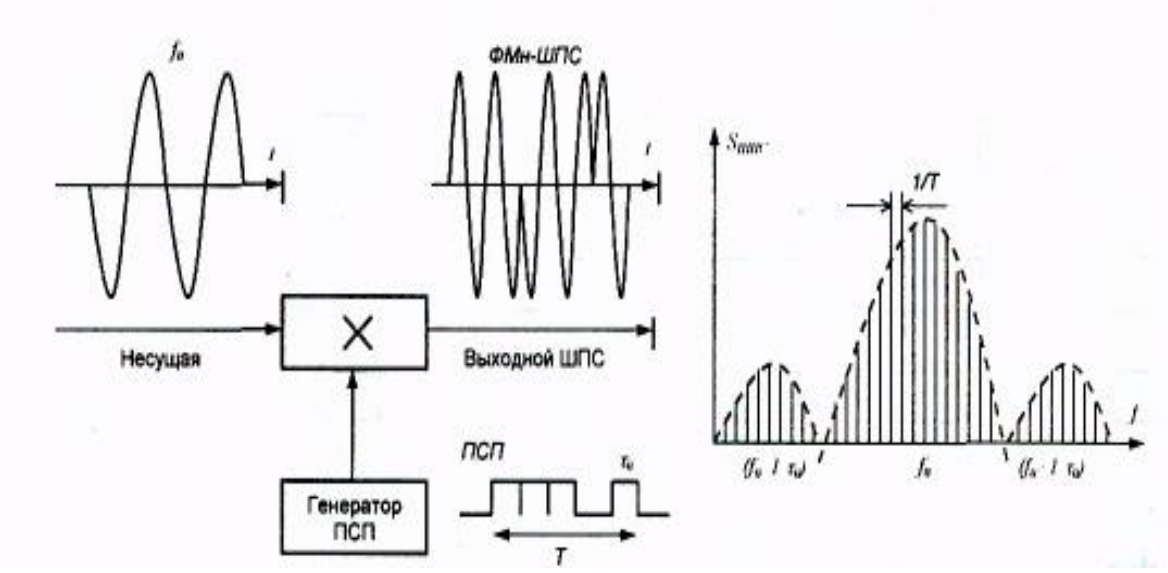


Рисунок 2.8– Схема расширения спектра частот цифровых сообщений

В стандарте CDMA для кодового разделения каналов используются ортогональные коды Уолша. Кодирование по Уолшу применяется в прямом канале (от базовой станции к абонентскому терминалу) для разделения пользователей. В системах, использующих стандарт IS-95, все АС работают одновременно в одной полосе частот. Согласованные фильтры приемников БС квазиоптимальны в условиях взаимной интерференции между абонентами одной соты и весьма чувствительны к эффекту «далеко-близко». Для максимизации абонентской емкости системы необходимо, чтобы терминалы всех абонентов излучали сигнал такой мощности, которая обеспечила бы

одинаковый уровень принимаемых БС сигналов. Чем точнее управление мощностью, тем больше абонентская емкость системы.

В технических решениях компании Qualcomm расширение спектра обеспечивается за счет модуляции сигнала псевдослучайной последовательностью с частотой следования дискретов 1,23 МГц. Более точно эта частота составляет 1,2288 МГц, причем 1228,8 = 9,6х128, так что при частоте информационной битовой последовательности 9,6 кбит/с длительности одного бита соответствует 128 дискретов псевдослучайной модулирующей последовательности. Полоса сигнала с расширенным спектром по уровню 3 дБ составляет 1,23 МГц, причем при помощи цифрового фильтра формируется спектр, близкий к прямоугольному.

Для модуляции сигнала используется виды функций: «короткая» и «длинная» ПСП и функции Уолша порядков от 0 до 63. Все они являются общими для базовых и мобильных станций, однако реализуют разные функции. В прямом канале модуляция сигнала функциями Уолша (бинарная фазовая манипуляция) используется для различения разных физических каналов данной БС; модуляция «длинной» ПСП (бинарная фазовая манипуляция) - с целью шифрования сообщений; модуляция «короткой» ПСП (квадратурная фазовая манипуляция двумя ПСП одинакового периода) - для расширения полосы и различения сигналов разных БС.

Различение сигналов разных станций обеспечивается тем, что все БС используют одну и ту же пару коротких ПСП, но со сдвигом на 64 дискрета между разными станциями, т.е. всего в сети 511 кодов, при этом все физические каналы одной БС имеют одну и ту же фазу последовательности.

На БС формируется 4 типа каналов: канал пилот-сигнала (PI), синхроканал (SYNC), вызывной канал (PCH) и канал трафика (TCH).

Сигналы разных каналов взаимно ортогональны, что гарантирует отсутствие взаимных помех между ними на одной БС. Внутрисистемные помехи, в основном, возникают от передатчиков других БС, работающих на той же частоте, но с иным циклическим сдвигом.

Излучение пилот-сигнала происходит непрерывно. Для его передачи используют функцию Уолша нулевого порядка. Пилот-сигнал –это сигнал несущей, который используется ПС для выбора рабочей ячейки (по наиболее мощному сигналу), а также в качестве опорного для синхронного детектирования сигналов информационных каналов. Обычно на пилот-сигнале излучается около 20% общей мощности, что позволяет подвижной станции обеспечить точность выделения несущей частоты и осуществить когерентный прием сигналов.

В синхроканале (SYNC) входной поток со скоростью 1,2 кбит/с перекодируется в поток, передаваемый со скоростью 4,8 кбит/с. Синхросообщение содержит технологическую информацию, необходимую для установления начальной синхронизации на мобильной станции (МС): данные о точном системном времени, о скорости передачи в канале PCH, о параметрах короткого и длинного кода. Скорость передачи в синхроканале

ниже, чем в вызывном (РСН) или канале трафика (ТСН), благодаря чему повышается надежность его работы. По завершении процедуры синхронизации МС настраивается на канал вызова РСН и постоянно его контролирует.

При передаче сигнала от БС используется сверточное кодирование со скоростью R=l/2 и кодовым ограничением К=9. Для борьбы с замираниями в стандарте IS-95 предусмотрено поблочное перемежение символов, позволяющее декоррелировать пакеты ошибок. Скорость передачи по каналу ТСН может изменяться от 1,2 до 9,6 кбит/с, что позволяет гибко адаптировать трафик к условиям распространения радиоволн. Для приема сигналов используется RAKE-приемник, имеющий несколько каналов для их параллельной обработки.

В IS-95 допускается использование нескольких типов речевых кодеков: CELP (8 кбит/с), QCELP (13 кбит/с) или EVRC (8 кбит/с). Типовые значения оценки качества по шкале MOS для алгоритма CELP составляют 3,7 балла (9600 бит/с) и 3,0 балла (4800 бит/с). Вносимая алгоритмом CELP задержка не превышает 30 мс. Качество передачи речи в вокодере QCELP (Qualcomm CELP) очень близко к качеству передачи по проводным линиям (4,02 балла).

В обратном канале (от подвижной станции к базовой) модуляция сигнала короткой ПСП используется только для расширения спектра, причем все подвижные станции используют одну и ту же пару последовательностей с одинаковым (нулевым) смещением. Модуляция сигнала длинной ПСП, кроме шифрования сообщений, несет информацию о подвижной станции (ПС) в виде ее закодированного индивидуального номера и обеспечивает различение сигналов от разных ПС одной ячейки за счет индивидуального для каждой станции сдвига последовательности.

В МС предусмотрено два типа информационного обмена: доступ (АСН) и трафик (ТСН). Пилот-сигнала в обратном канале нет, поэтому синхронное детектирование не используется, БС осуществляют некогерентную обработку сигналов, а помехоустойчивость обеспечивается, в основном, за счет пространственного разнесения.

В кодеках МС тоже применяются ортогональные коды Уолша, но не для уплотнения каналов (как на БС), а для повышения помехоустойчивости. С этой целью входной поток данных со скоростью 28,8 кбит/с разбивается на пакеты по 6 бит, и каждому из них однозначно ставится в соответствие одна из 64 последовательностей Уолша. В итоге скорость кодированного потока на входе модулятора возрастает до 307,2 кбит/с. Это кодирование одинаково для всех физических каналов, а на приемном конце используются 64 параллельных канала, каждый из которых настроен на свою функцию Уолша, и эти каналы распознают (декодируют) принятые 6-битовые символы.

В обратном канале, как и в прямом, для защиты от ошибок используется сверточное кодирование с длиной ограничения 9, но со скоростью 1/3 (т.е. с вдвое большей избыточностью–это мера компенсации отсутствия синхронного детектирования) и перемежение на интервале 20 мс. В

результате кодирования скорость в информационном канале увеличивается до 28,8 кбит/с. Принцип работы системы сотовой связи стандарта CDMA основывается на кодировании информационного сигнала по Уолшу, затем смешивается с несущей, спектр которой предварительно расширяется перемножением с сигналом источника псевдослучайного шума. Каждому информационному сигналу назначается свой код Уолша, затем они объединяются в передатчике, пропускаются через фильтр, и общий шумоподобный сигнал излучается передающей антенной.

На вход приемника поступают полезный сигнал, фоновый шум, помехи от БС соседних ячеек и от ПС других абонентов. После ВЧ-фильтрации сигнал поступает на коррелятор, где происходит сжатие спектра и выделение полезного сигнала в цифровом фильтре с помощью заданного кода Уолша. Спектр помех расширяется, и они появляются на выходе коррелятора в виде шума. На практике в ПС используются несколько корреляторов для приема сигналов с различным временем распространения в радиотракте или сигналов, передаваемых различными БС.

Число абонентов в системе CDMA зависит от уровня взаимных помех. Согласованные фильтры БС весьма чувствительны к эффекту «ближний-дальний» (far-near problem), когда МС, расположенная вблизи базовой, работает на большой мощности, создавая недопустимо высокий уровень помех при приеме других, «дальних» сигналов, что приводит к снижению пропускной способности системы в целом. Эта проблема существует у всех системах мобильной связи, однако наибольшие искажения сигнала возникают именно в CDMA-системах, работающих в общей полосе частот, в которых используются ортогональные шумоподобные сигналы. Если бы в этих системах отсутствовала регулировка мощности, то они существенно уступали бы по характеристикам сотовым сетям на базе TDMA. Поэтому ключевой проблемой в CDMA-системах можно считать индивидуальное управление мощностью каждой станции. Эффективная работа системы с кодовым доступом возможна лишь при условии выравнивания сигнала от различных абонентов на входе базовой станции. Причем чем выше точность выравнивания, тем больше зона покрытия системы. Следует отметить, что прямой канал менее подвержен искажениям сигнала за счет внутрисистемных помех и многолучевых замираний, так как на БС всегда существует запас по мощности. Поэтому основные проблемы возникают при регулировке мощности в обратном канале –от абонента к БС.

Чем выше точность управления мощностью, тем ниже уровень взаимных помех. В стандарте IS-95 регулировка мощности МС осуществляется в динамическом диапазоне 84 дБ с шагом 1 дБ, т.е. с точностью ±0,5 дБ. Интервал между соседними измерениями равен 1,25 мс. Биты управления мощностью передаются по каналу трафика со скоростью 800 бит/с, Раздельная обработка многолучевых сигналов с последующим их сложением обеспечивает требуемое отношение сигнал/шум в 6-7 дБ. Применение нескольких параллельно работающих каналов при раздельной

обработке лучей позволяет осуществить «мягкий» режим переключения при переходе абонента из одной соты в другую.

Абонентская емкость ячейки системы CDMA оптимизируется использованием алгоритма регулировки, который ограничивает мощность, излучаемую каждым АТ, до необходимого уровня для получения приемлемой вероятности ошибки. В системе предусматриваются три механизма регулировки мощности: в прямом канале - разомкнутая петля; в прямом канале - замкнутая петля; в обратном канале (ОК) - внешняя петля регулирования.

Процесс регулирования мощности передающих устройств в ОК (от абонента к БС) заключается в следующем. Каждая ПС непрерывно передает информацию об уровне ошибок в принимаемом сигнале. На основании этой информации БС распределяет излучаемую мощность между абонентами таким образом, чтобы в каждом случае обеспечить приемлемое качество речи. Абоненты, на пути к которым радиосигнал испытывает большее затухание, получают возможность излучать сигнал большей мощности. Основная цель регулировки мощности в ОК - оптимизация площади соты.

В процессе регулирования мощности в прямом канале (от БС к абоненту) возможны два варианта регулирования: по открытому циклу (разомкнутая петля) и по замкнутому циклу (замкнутая петля). При открытом цикле ПС после включения ищет сигнал БС. После синхронизации ПС по этому сигналу производится замер его мощности и вычисляется мощность передаваемого сигнала, необходимая для обеспечения соединения с БС. Вычисления основываются на том, что сумма уровней предполагаемой мощности излучаемого сигнала и мощности принятого сигнала должна быть постоянна и равна−73 дБ. Этот процесс повторяется каждые 20 мс, но он все же не обеспечивает желаемой точности регулировки мощности, так как прямой и обратный каналы работают в разных частотных диапазонах (разнос частот 45 МГц) и, следовательно, имеют различные уровни затухания при распространении и по-разному подвержены воздействию помех.

При замкнутом цикле возможно точно отрегулировать мощность передаваемого сигнала. БС постоянно оценивает вероятность ошибки в каждом принимаемом сигнале. Если она превышает программно заданный порог, то БС дает команду соответствующей ПС увеличить мощность излучения. Регулировка осуществляется с шагом 1 дБ. Этот процесс повторяется каждые 1,25 мс. Цель такого процесса регулирования заключается в том, чтобы каждая ПС излучала сигнал минимальной мощности, достаточный для обеспечения приемлемого качества речи. За счет того, что все ПС излучают сигналы необходимой для нормальной работы мощности, и не более, их взаимное влияние минимизируется, и абонентская емкость системы возрастает. ПС должны обеспечивать регулирование выходной мощности в широком динамическом диапазоне −до 85 дБ.

При процедуре мягкой эстафетной передачи (переходе абонента из зоны обслуживания одной БС в зону другой) схема регулирования мощности

несколько иная. ПС принимает одновременно несколько команд управления мощностью от разных БС (обычно двух) и сравнивает их между собой. Если все команды указывают на необходимость увеличения мощности, то ПС последовательно увеличивает свою мощность с шагом 1 дБ.

Основные характеристики стандарта CDMA фирмы Qualcomm приведены в таблице 2.1.

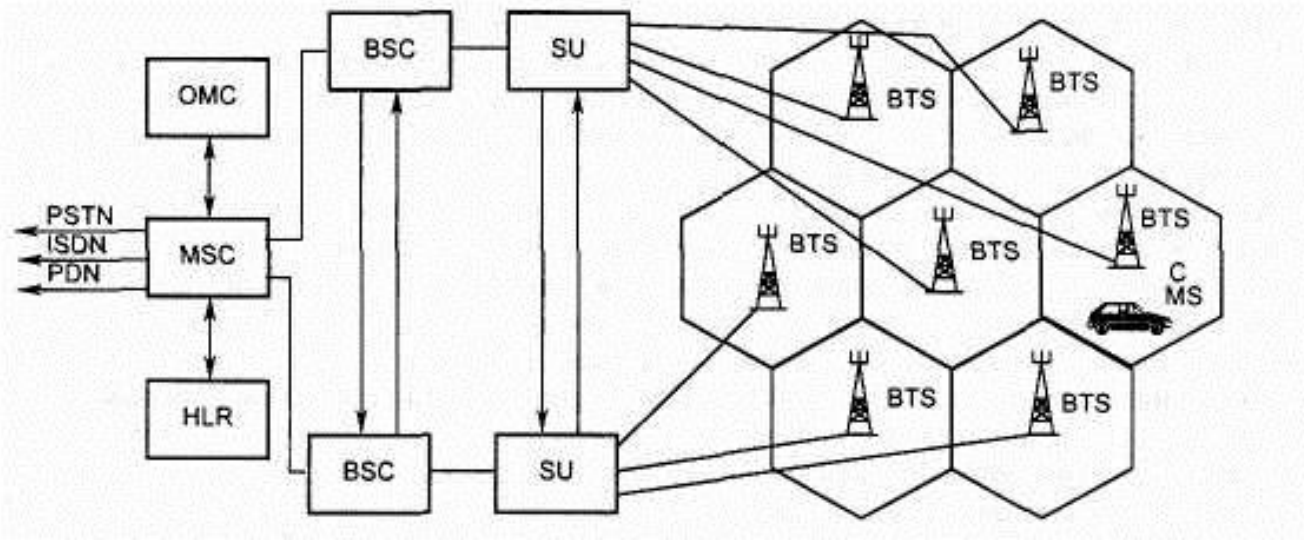
Система CDMA фирмы Qualcomm рассчитана на работу в диапазоне 800 МГц. Система построена по методу прямого расширения спектра частот на основе 64 видов последовательностей, сформированных по закону функций Уолша. Для преобразования аналогового речевого сигнала в цифровой используется алгоритм CELP со скоростью преобразования 8000 бит/с (9600 бит/с в канале). Возможны режимы работы на скоростях 4800, 2400 и 1200 бит/с. В каналах системы CDMA применяется сверточное кодирование со скоростью 1/2 (в прямом канале) и 1/3 (в обратном канале), декодер Витерби с мягким решением и перемежение передаваемых сообщений. Общая полоса частот канала связи составляет 1,25 МГц.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики стандарта CDMA

Характеристика	Значение
Диапазон частот передачи MS, МГц	824,040-848,860
Диапазон частот передачи BTS, МГц	869,040-893,970
Относительная нестабильность несущей частоты BTS	$\pm 5 \times 10^{-8}$
Относительная нестабильность несущей частоты MS	$\pm 2{,}5 \times 10^{-6}$
Вид модуляции несущей частоты	QPSK (BTS), O-QPSK (MS)
Ширина спектра излучаемого сигнала, МГц: - по уровню -3 дБ; - по уровню - 40 дБ.	 1,25 1,50
Тактовая частота ПСП, МГц	1,2288
Число каналов BTS на одной несущей	1 пилот-канал, 1 канал сигнализации, 7 каналов персонального вызова, 55 каналов связи
Число каналов MS	1 канал доступа, 1 канал связи
Скорость передачи данных, бит/с: - в канале синхронизации - в канале персонального вызова и доступа; - в каналах связи.	 1200 9600, 4800 9600,4800,2400, 1200

Состав оборудования сетей стандарта CDMA во многом сходен с составом оборудования сетей стандарта GSM и включает в себя MS и BS, цифровые коммутаторы, центр управления и обслуживания, различные дополнительные системы и устройства.

Функциональное сопряжение элементов системы осуществляется с помощью ряда интерфейсов. Конфигурация сотовой сети стандарта CDMA представлена на рисунке 2.9.



MS –подвижная станция.
BTS– базовая станция.
SU –устройство выбора кадра.
MSC –центр коммутации подвижной связи.
BSC –контроллер базовой станции.
OMC –центр управления и обслуживания.
DB –база данных.
PSTN –телефонная сеть общего пользования.
ISDN –цифровая сеть с интеграцией служб.
PDN – сеть пакетной коммутации.

Рисунок 2.9 – Конфигурация сети стандарта CDMA

Одно из важных требований, предъявляемых к системам, является - гибкость технологии и возможность ее постепенного развития, предоставление услуг пакетной передачи. Для этого контроллер БС необходимо дооснастить маршрутизатором. В спецификациях стандарта предусмотрено качественное улучшение характеристик обслуживания за счет снижения потерь при переходе абонента от одной БС к другой, а также повышение точности контроля мощности до 0,25 дБ, организация каналов приоритетного доступа и другие усовершенствования.

Контрольные вопросы:

1) Опишите общие принципы функционирования сетей сотовой связи.

2) Какие стандарты сотовых систем связи действуют в Казахстане?

3) Расскажите о конфигурации сети и характеристиках стандарта CDMA.

4) Расшифруйте термины: «кластер», «аутентификация», «идентификация, «защитный интервал».

5) Почему оптимальным разделением территории на соты является «шестиугольник»?

ГЛАВА 3

3 Сети транкинговой связи

3.1 Основные положения

Транкинговые системы связи прочно заняли свое место в общей структуре средств профессиональной связи.

Транкинг – это одна из концепций в системах мобильной радиосвязи. Под термином «транкинг» понимается метод равного доступа абонентов к выделенным каналам с автоматическим их распределением между абонентами. Термин «транкинг» происходит от английского Trunking, что можно перевести как «объединение в пучок» [7].

Во всем мире основными клиентами данной услуги выступают государственные и муниципальные структуры, заинтересованные в оперативном управлении теми или иными объектами в реальном масштабе времени. В зависимости от назначения транкинговые системы можно разделить на две категории:

- коммерческие (общего пользования) – RAMR;
- специального применения (профессиональные) – PMR.

Коммерческие системы PARM отличаются постоянной высокой пропускной способностью на территориях, где имеется платежеспособный спрос на услуги подвижной радиосвязи. Другая особенность этих систем в необходимости сопряжения с телефонной сетью общего пользования для большого числа абонентов, причем абонентские радиостанции должны обеспечивать дуплексный режим.

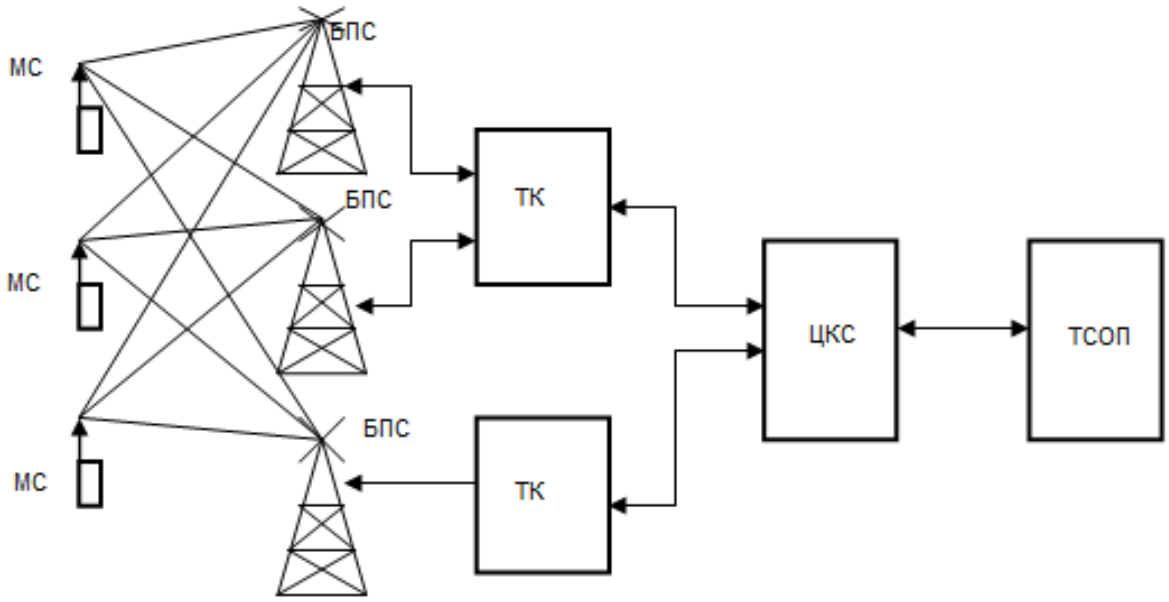
Профессиональные системы PMR должны удовлетворять требованиям по обеспечению в особые периоды (аварийная ситуация, мероприятие сил общественной безопасности, крупная технологическая операция и т. д.) одновременной работы большого числа абонентов. Современные транкинговые системы обеспечивают групповую, индивидуальную радиосвязь с различными приоритетами, аварийный и циркулярный вызовы, как для всей системы, так и для отдельных ее частей, криптографическое преобразование голосовых сообщений и передачу данных. Время установления связи в транкинговых сетях связи составляет, менее 0.3 с что на порядок меньше, чем в сотовых системах.

В настоящее время в мире производится целый ряд транкинговых систем: от самых простых аналоговых (Smar Trunk, LTR, ESAS) до цифровых (TETRA) [8].

Алгоритм установления связи в большинстве транкинговых систем одинаковый. Во время набора номера радиостанция занимает один из свободных каналов, где уровень сигнала базовой станции в данный момент максимален. По мере удаления абонента от базовой станции или в связи с ухудшением условий распространения радиоволн уровень

сигнала уменьшается, что ведет к ухудшению качества связи. Улучшение качества связи достигается путем автоматического переключения абонента на другой канал. Это происходит следующим образом. Специальная процедура, называемая передачей управления вызовом или эстафетной передачей, позволяет переключить разговор на свободный канал другой базовой станции, в зоне действия которой оказался в это время абонент. Аналогичные действия предпринимаются при снижении качества связи из-за влияния помех или при возникновении неисправностей коммутационного оборудования. Если уровень сигнала меньше этого предела, то информация об этом автоматически передается в центр коммутации по служебному каналу связи. После получения информации от базовых станций об уровне этого сигнала центр коммутации переключает радиостанцию на ту из них, где уровень сигнала оказался наибольшим. Это происходит так быстро, что абонент совершенно не замечает этих переключений [9].

Профессиональные системы предназначены для корпоративных групп абонентов: бригад скорой помощи, МЧС, пожарных, ФБС, милиции и т.д. Системы подвижной связи со свободным и равным доступом мобильных станций к общему частотному диапазону позволяют абонентам работать на любом переговорном канале сети.



МС – мобильная станция;
БПС – базовая приемопередающая станция;
ТК – телефонный канал;
ЦКС – центр коммутации связи;
ТСОП – телефонная сеть общего пользования.

Рисунок 3.1 - Упрощенная структура транкинговой системы мобильной связи

Использование централизованного принципа организации связи с отдельным каналом управления определяет необходимость обмена сообщениями через вынесенные приемопередающие (базовые) станции. Этот недостаток устранен в общеевропейском стандарте транкинговой связи «TETRA», где предусматривается режим прямой связи абонентов без участия центра. Для этого в мобильные станции встроены специальные микропроцессоры, позволяющие им сканировать запрограммированные частоты сети, передавать при каждом выходе в эфир собственный код, код входа в систему и номер вызываемого абонента.

Общей тенденцией развития профессиональных систем подвижной радиосвязи является переход от аналоговых стандартов к единым международным цифровым стандартам, обеспечивающим конфиденциальность и повышение качества связи, более эффективное использование частотного диапазона, роуминг для всех абонентов и возможность передачи данных с высокой скоростью.

Системы подвижной связи обеспечивают своих абонентов качественной связью не только в пределах какой-либо отдельно взятой территории (город, область и пр.), но и в глобальном масштабе (страна, континент). Такой режим работы называется роумингом (от англ. roam – скитаться, блуждать). Для организации роуминга необходимо, чтобы системы использовали один и тот же стандарт или имели специальное оборудование, позволяющее абонентам систем разных стандартов связываться друг с другом [10].

По принципу организации различают три вида роуминга:

- ручной – простой обмен одного средства связи на другое;
- полуавтоматический, когда абоненту необходимо сначала зарегистрироваться у местного оператора;
- автоматический; предоставляющий абоненту возможность выйти на связь «в любое время и в любом месте».

Первая цифровая транкинговая система EDACS (Enhanced Digital Access Communication System) была разработана и внедрена в скандинавских странах для обслуживания полиции.

Переход к цифровым методам передачи позволит обеспечить:

- одновременную передачу речевых сообщений и данных в формате стандартных цифровых сигналов;
- совместную передачу информационных сообщений и сигналов управления без взаимного мешающего влияния;
- интеграцию (при достаточно низком уровне затрат) существующих сетей радиосвязи с вновь разрабатываемыми;
- стабильно высокий уровень разборчивости передаваемых речевых сообщений в условиях всего диапазона дальности связи;
- надежную и технически несложную защиту передаваемых сообщений от подслушивания;
- непрерывный контроль качества функционирования каналов связи.

3.2 Достоинства и недостатки транкинговых систем радиосвязи

Современные системы транкинговой связи предназначены для построения локальных и многозоновых сетей, предоставляющих различные виды услуг при высоком качестве связи. В частности, поддерживаются речевая связь между абонентами и группами абонентов, доступ к ведомственным телефонным сетям общего пользования и сетям передачи данных (телеметрия, аварийная сигнализация, цифровые данные) [11].

Транкинговая радиосвязь имеет много преимуществ по сравнению с другими видами мобильной связи, особенно в системах производственно-технологической и корпоративной безопасности. Специалисты называют более десятка *преимуществ транкинговых систем* перед другими видами подвижной связи:

- мгновенное соединение;
- минимальная вероятность занятой линии (канала);
- соответствие стандарту «Military»;
- возможность организации группового или индивидуального вызова;
- администрирование с расстановкой приоритетов;
- предоставление радиотелефонной связи с выходом в городскую телефонную сеть;
- передача факсов и переадресация звонков;
- непрерывная связь в режиме обычной радиостанции;
- быстрота развертывания систем;
- организация независимых выделенных сетей связи;
- защита от прослушивания;
- эффективное использование радиоспектра;
- надежность системы;
- централизованное управление системой.

Групповые вызовы используются для одновременного установления сеанса связи между всеми пользователями, входящими в эту группу. Это самый быстрый и экономный способ связи при управлении бригадой и транспортом. Групповой вызов осуществляется в зоне действия всей транкинговой системы радиосвязи, независимо от того, какую территорию охвата она имеет.

Администрирование с расстановкой приоритетов позволяет обеспечить регулируемый доступ к сети общего пользования с выходом в городскую телефонную сеть, причем руководитель может ограничить это право по своему усмотрению (возможен запрет на осуществление любым пользователем международных, междугородних звонков или вовсе запрет на выход в городскую или внутреннюю телефонную сеть).

Радиостанциям может быть обеспечен доступ к телефонной сети общего пользования, а также реализованы ряд сервисных функций таких, как динамическое переформирование состава групп, автоматический роуминг,

переадресация поступающих вызовов, цифровой пейджинг, голосовая почта и другие.

Для защиты передаваемой информации от несанкционированного перехвата в транкинговой связи предусмотрена защита на двух уровнях. Первый – сама технология организации сеанса – каналы связи назначаются случайным образом. Сообщения передаются по одному из множества каналов, который в данный момент оказывается свободным. Это затрудняет процесс перехвата, так как нужно контролировать широкополосный диапазон частот либо успеть переключиться на нужный канал. Уровень защищенности системы может быть еще более повышен цифровым кодированием звуковых каналов [12].

Второй уровень - использование специальной аппаратуры (скремблеров) для закрытия самого канала связи. Скремблер – это дополнительная плата, которая вставлена в радиостанцию для шифрования передаваемых и дешифрации принимаемых сообщений.

Радиоспектр – очень ограниченный ресурс, который требует экономичного и эффективного использования. Эффективность использования радиоспектра зависит от двух основных факторов:

- пользователи используют совместно все каналы системы, нет пользователей, назначенных для работы на определенном канале;

- каналы никогда не остаются свободными, если есть экстренная потребность в связи – центральный контроллер немедленно выделяет свободный канал по запросу.

Транкинговая система связи имеет высокую надежность. Предположим, что в обычной радиосистеме канал выходит из строя. Все пользователи этого канала не могут получить связь, пока не переключат на другой канал. Подобная ситуация никогда не возникает в системах транкинговой радиосвязи. В случае если один из или несколько ретрансляторов выходит из строя центральный контроллер регистрирует сбой и не назначает их для связи до тех пор, пока они не будут восстановлены. Так как каналы назначаются в случае необходимости, и нет групп пользователей, зависящих от конкретного канала, выход из строя ретранслятора практически не будет замечен для пользователями.

Централизованное управление системой основано на том, что центральный контроллер, мобильные и переносные радиостанции оснащены микропроцессами. Это позволяет очень четко контролировать работу всей системы в целом, обслуживать большее число пользователей без использования дополнительных каналов. Наличие центрального контроллера позволяет управлять системой централизованно, с одного места.

Увеличение числа абонентов транкинговых систем является показателем бизнеса.

Недостатки транкинговых систем связи:

- наличие мелких систем, не связанных друг с другом;

- проблема выбора частотного диапазона;

- проблема «двойников»;
- проблема роуминга.

3.3 Классификация транкинговых систем радиосвязи

Различные системы транкинговой связи в чем-то похожи, а в чем-то отличаются друг от друга. Транкинговые системы можно классифицировать по нескольким группам признаков [13].

Практически все существующие транкинговые системы связи можно разделить по следующим параметрам:

- способ передачи голосовых сообщений;
- организация доступа к системе;
- способ предоставления (удержания) канала;
- конфигурация сети;
- способ организации радиоканала;
- назначение;
- количество абонентов;
- применяемые протоколы.

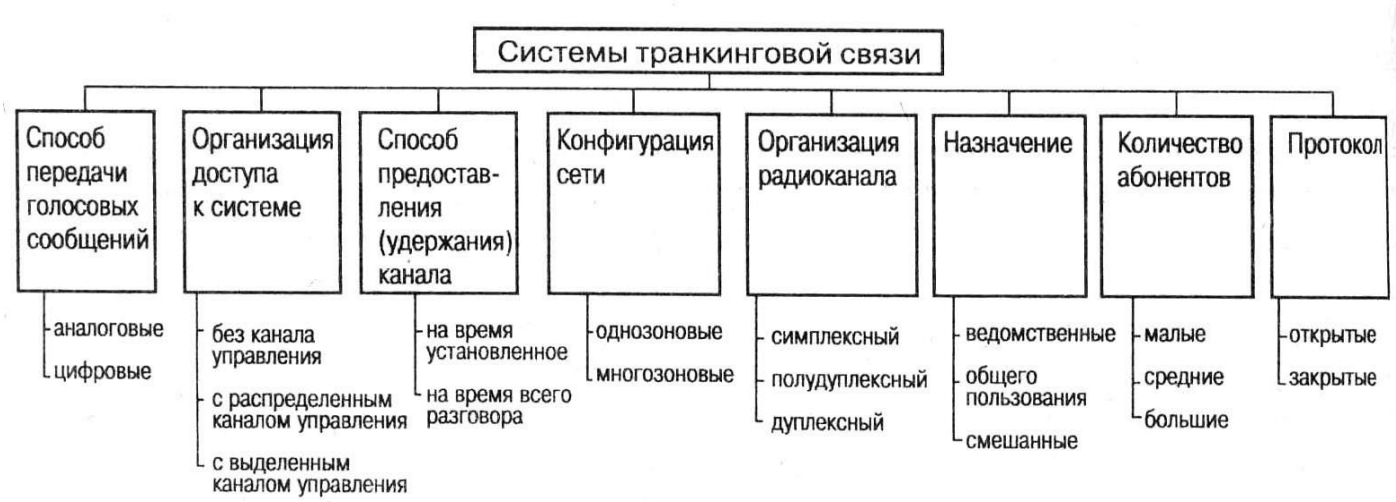


Рисунок 3.2 - Классификация транкинговых систем связи

Метод передачи речевой информации

По методу передачи речевой информации транкинговые системы подразделяются на аналоговые и цифровые. Передача речи в радиоканале аналоговых систем осуществляется с использованием частотной модуляции, а шаг сетки частот обычно составляет 12,5 кГц или 25 кГц.

Для передачи речи в цифровых системах используются различные типы вокодеров, преобразующих аналоговый речевой сигнал в цифровой поток со скоростью не более 4,8 кбит/с.

Количество зон

В зависимости от количества базовых станций и общей архитектуры различают однозоновые и многозоновые системы. Первые располагают лишь одной базовой станцией, вторые - несколькими БС с возможностью роуминга.

Метод объединения базовых станций в многозоновых системах

Базовые станции в транкинговых системах могут объединяться с помощью единого коммутатора (системы с централизованной коммутацией), а также соединяться друг с другом непосредственно или через сети общего пользования (системы с распределенной коммутацией).

Тип многостанционного доступа

В подавляющем большинстве транкинговых систем, включая и цифровые системы, используется многостанционный доступ с частотным разделением (МДЧР). Для систем МДЧР справедливо соотношение: «одна несущая - один канал».

В однозоновых системах стандарта TETRA используется многостанционный доступ с временным уплотнением (МДВР). В то же время в многозоновых системах стандарта TETRA используется комбинация МДЧР и МДВР.

Способ поиска и назначения канала

По способу поиска и назначения канала различают системы с децентрализованным и централизованным управлением.

В системах с децентрализованным управлением процедуру поиска свободного канала выполняют абонентские радиостанции. В этих системах ретрансляторы базовой станции обычно не связаны друг с другом и работают независимо. Особенностью систем с децентрализованным управлением является относительно большое время установления соединения между абонентами, растущее с увеличением числа ретрансляторов. Такая зависимость вызвана тем, что абонентские радиостанции вынуждены непрерывно последовательно сканировать каналы в поисках вызывного сигнала (последний может поступить от любого ретранслятора) или свободного канала (если абонент сам посылает вызов). Наиболее характерными представителями данного класса являются системы протокола SmarTrunk.

В системах с централизованным управлением поиск и назначение свободного канала производится на базовой станции. Для обеспечения нормального функционирования таких систем организуются каналы двух типов: рабочие (Traffic Channels) и канал управления (Control Channel). Все запросы на предоставление связи направляются по каналу управления. По

этому же каналу базовая станция извещает абонентские устройства о назначении рабочего канала, отклонении запроса, либо о постановке запроса в очередь.

Тип канала управления

Во всех транкинговых системах каналы управления являются цифровыми. Различают системы без канала управления, с выделенным частотным каналом управления и системы с распределенным каналом управления. В системах второго типа передача данных в канале управления производится со скоростью до 9,6 кбит/с, а для разрешения конфликтов используются протоколы типа ALOHA.

Выделенный канал управления имеют все транкинговые системы протокола MPT1327, системы фирмы Motorola (Startsite, Smartnet, Smartzone), система EDACS фирмы Ericsson и некоторые другие.

В системах с распределенным каналом управления информация о состоянии системы и поступающих вызовах распределена между низкоскоростными субканалами передачи данных, совмещенными со всеми рабочими каналами. Таким образом, в каждом частотном канале системы передается не только речь, но и данные канала управления. Для организации такого парциального канала в аналоговых системах обычно используется субтональный диапазон частот (О – 300) Гц. Наиболее характерными представителями данного класса являются системы протокола LTR.

Транкинговые системы без канала управления.

В таких системах радиостанция при вызове сама ищет незанятый канал и занимает его. Радиостанции данной системы просты и дешевы. В этих системах возможна полная независимость каналов БС друг от друга, поскольку их объединение в общую ТСР(Транкинговая система радиосвязи) происходит на уровне абонентской радиостанции. Однако таким радиостанциям присущ ряд принципиальных недостатков. С ростом количества каналов быстро возрастает длительность установления соединения в такой системе. Реально к этому добавляется еще и длительность поиска свободного канала вызывающей радиостанции. Кроме того, затруднительна реализация многих современных требований, в числе которых многозоновость, гибкая и надежная система приоритетов, постановка на очередь при занятости системы или вызываемого абонента и т. д. Таким образом, данный вид радиостанций идеально подходит в качестве небольшой (1-8 каналов, до 200 абонентов) однозоновой системы связи, к которой предъявляются минимальные требования.

Транкинговые системы с распределенным каналом.

В этих транкинговых системах этого вида управляющая информация передается непрерывно по всем каналам, в том числе и по занятым. Это

достигается использованием для ее передачи частот ниже 300 Гц. Каждый канал является управляющим для радиостанций, закрепленных за ним. В дежурном режиме радиостанция прослушивает свой управляющий канал. В этом канале БС непрерывно передает номер свободного канала, который радиостанция может использовать для передачи. Если же на каком-либо канале начинается передача, адресованная одной из радиостанций, то информация об этом передается на управляющем канале, в результате чего эта радиостанция переключается на канал, где происходит вызов. Эти радиостанции обладают рядом достоинств с ТСР с управляющим каналом, не требуя в то же время выделения частот для него. В системе LTR установление соединения происходит настолько быстро, что оно осуществляется каждый раз при включении передатчика станции, т.е. в паузах разговора канал не занят.

Однако при выходе из строя какого-либо канала в системе LTR происходит отказ всех радиостанций, для которых он является управляющим. Кроме того, ТСР скорость передачи управляющей информации крайне ограничена. Это затрудняет реализацию многих требований, предъявляемых к современным ТСР, в том числе и многозоновости. Передача информации на частотах ниже 300 Гц одновременно с речью делает такие системы весьма критичными к точности регулировки. Все это привело к тому, что ТСР с распределенным управляющим каналом в настоящее время не разрабатываются. Исключением составляет лишь ESAS, в котором используется данный принцип ради совместимости с LTR.

Транкинговые системы с выделенным управляющим каналом.

Для аналоговых систем речь идет о частотном канале, для цифровых систем - о временном разделении канала – о временном сплоте. В таких каналах радиостанция непрерывно прослушивает управляющий канал ближайшей к ней БС. При поступлении вызова БС передает информацию об этом по управляющему каналу, вызываемая радиостанция подтверждает прием вызова, после чего БС выделяет один из разговорных каналов для соединения и информирует об этом по управляющему каналу все участвующие в соединении радиостанции. После этого они переключаются на указанный канал и остаются на нем до окончания соединения. В то время, когда управляющий канал свободен, радиостанции могут передавать туда свои запросы на установление соединения. Некоторые типы вызовов (например, передача коротких пакетов данных между радиостанциями) могут осуществляться без занятия разговорного канала. ТСР с выделенным управляющим каналом в наибольшей степени отвечает современным требованиям. В них легко реализуется многозоновость (радиостанция выбирает БС с лучше всего принимаемым управляющим каналом) и другие функции. Среди них - постановка вызовов на очередь при занятости системы или вызываемого абонента. Это, в свою очередь, приводит такие ТСР из класса систем с отказом при занятости в класс систем с ожиданием. Тем

самым не только повышается комфортность работы пользователя, но и, главное, увеличивается пропускная способность системы. В системах с отказом при занятости для обеспечения приемлемого качества сервиса в любой момент времени должен простаивать хотя бы один канал, чтобы абонент мог произвести вызов. В системе с ожиданием загружены могут быть все каналы. При этом вызывающему абоненту придется немного подождать в очереди.

Однако выделение отдельного управляющего канала имеет свои недостатки. Во-первых, это худшее использование частотного ресурса. В большинстве систем этот недостаток смягчается возможностью перевода управляющего канала в разговорный режим при перегрузке системы. Во-вторых, выделенный управляющий канал является уязвимым местом ТСР- при отсутствии специальных мер отказ оборудования БС для этого канала означает отказ всей БС. К тому же результату приводит и появление помехи на частоте приемника управляющего канала БС. По этой причине при разработке ТСР с выделенным управляющим каналом автоматическому контролю за работой оборудования БС уделяется особое внимание. При обнаружении отказа или длительной помехи на частоте приема БС делает управляющим другой, исправный канал.

Выделенный управляющий канал предусматривается большинством современных стандартов на ТСР - как на закрытых, так и открытых (MPT1327), а также для радиостанций с перспективным стандартом TETRA.

Способ удержания канала

Транкинговые системы позволяют абонентам удерживать канал связи на протяжении всего разговора или только на время передачи. Первый способ, называемый также транкингом сообщений (Message Trunking), наиболее традиционен для систем связи, и обязательно используется во всех случаях применения дуплексной связи или соединения с СТОП.

Второй способ, предусматривающий удержание канала только на время передачи, называется транкингом передач (Transmission Trunking). Он может быть реализован только при использовании полудуплексных радиостанций. В последних передатчик включается только на время произнесения абонентом фраз разговора. В паузах между окончанием фраз одного абонента и началом ответных фраз другого передатчики обоих радиостанций выключены. Некоторые транкинговые системы эффективно используют такие паузы, освобождая рабочий канал немедленно после окончания работы передатчика абонентской радиостанции. Для ответной реплики назначение рабочего канала будет произведено заново, при этом реплики одного и того же разговора будут, скорее всего, передаваться по разным каналам.

Платой за некоторое повышение эффективности использования системы в целом при применении транкинга передач служит снижение комфортности переговоров, особенно в часы высокой нагрузки. Рабочие каналы для

продолжения начатого разговора в такие периоды будут предоставляться с задержкой, достигающей нескольких секунд, что приведет к фрагментарности и раздробленности разговора.

Организация канала

Симплекс – радиосвязь, в которой используется одна частота как для приема, так и для передачи.

Дуплекс - радиосвязь осуществляется одновременно на двух частотах. На одной - прием, а на другой - передача.

Полудуплекс - радиосвязь осуществляется с использованием двух частот: приемной и передающей, но, по сравнению с дуплексом, не одновременно, а поочередно. Сигнал принимается на одной частоте, а передается на другой. В один момент времени абонент может находиться либо в режиме «прием», либо - «передача».

3.4 Архитектура транкинговых систем связи

Транкинговыми системами называются радиально-зоновые системы наземной подвижной радиосвязи, осуществляющие автоматическое распределение каналов связи ретрансляторов между абонентами. Это достаточно общее определение, но оно содержит совокупность признаков, объединяющих все транкинговые системы, от простейших SmarTrunk до современных TETRA [14].

Однозоновые системы

Основные архитектурные принципы транкинговых систем легко просматриваются на обобщенной структурной схеме однозоновой транкинговой системы, представленной на рисунке 3.3. Инфраструктура транкинговой системы представлена базовой станцией (БС), в состав которой, помимо радиочастотного оборудования (ретрансляторы, устройство объединения радиосигналов, антенны), входят также коммутатор, устройство управления и интерфейсы различных внешних сетей.

Ретранслятор Ретранслятор (РТ) - набор приемопередающего оборудования, обслуживающего одну пару несущих частот. До последнего времени в подавляющем большинстве ТСС одна пара несущих означала один канал трафика (КТ). В настоящее время с появлением систем стандарта TETRA и системы EDACS ProtoCALL, предусматривающих временное уплотнение, один РТ может обеспечить два или четыре КТ.

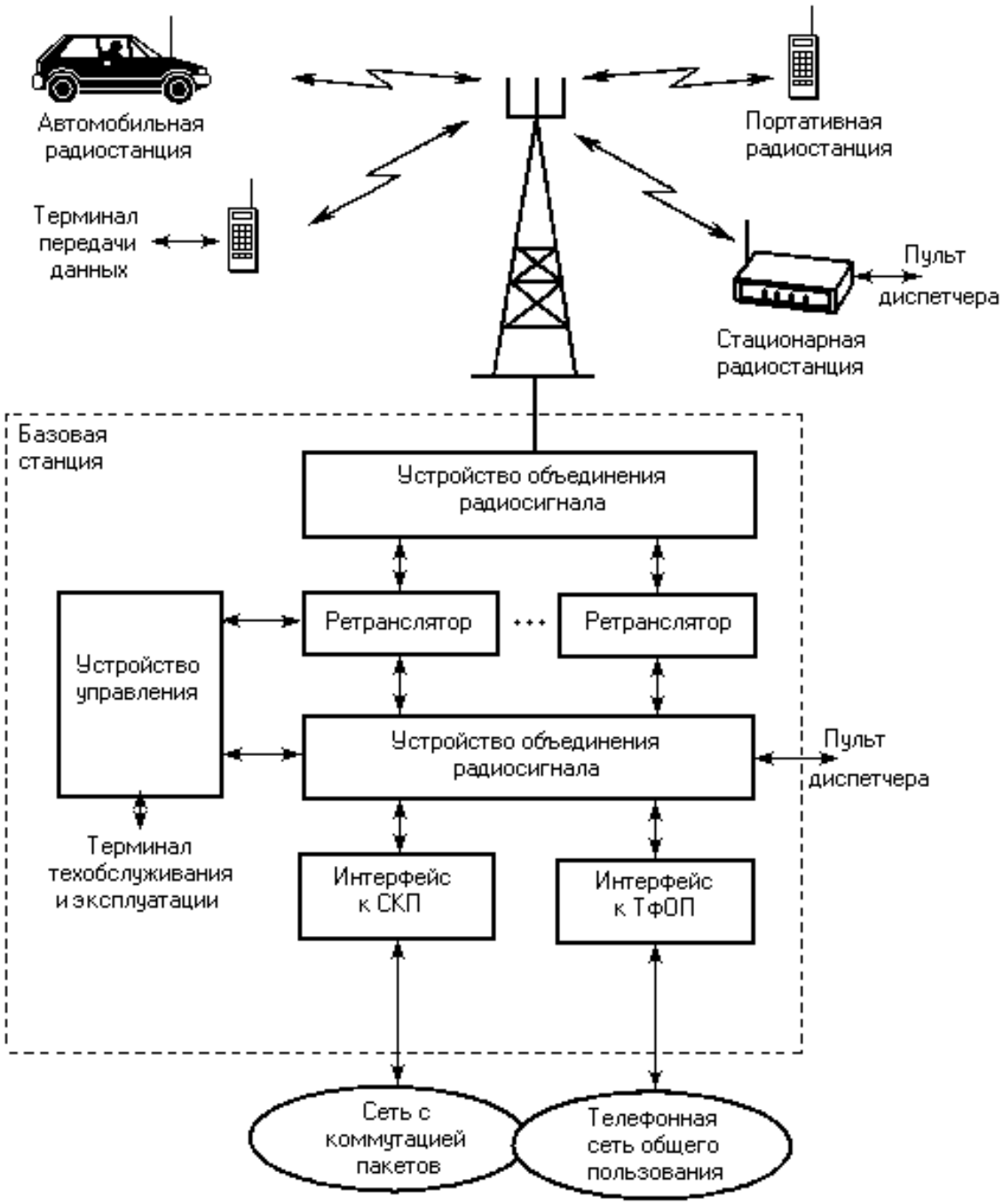


Рисунок 3.3 - Структурная схема однозоновой транкинговой системы

Антенны Важнейший принцип построения транкинговых систем заключается в том, чтобы создавать зоны радиопокрытия настолько большими, насколько это возможно. Поэтому антенны базовой станции, как правило, размещаются на высоких мачтах или сооружениях и имеют круговую диаграмму направленности. Разумеется, при расположении базовой станции на краю зоны применяются направленные антенны. Базовая станция может располагать как единой приемопередающей антенной, так и раздельными антеннами для приема и передачи. В некоторых случаях на

одной мачте могут размещаться несколько приемных антенн для борьбы с замираниями, вызванные многолучевым распространением.

Устройство объединения радиосигналов позволяет использовать одно и то же антенное оборудование для одновременной работы приемников и передатчиков на нескольких частотных каналах. Ретрансляторы транкинговых систем работают только в дуплексном режиме, причем разнос частот приема и передачи (дуплексный разнос) в зависимости от рабочего диапазона составляет от 3 МГц до 45 МГц.

Коммутатор в однозоновой транкинговой системе обслуживает весь ее трафик, включая соединение подвижных абонентов с телефонной сетью общего пользования (ТСОП), и все вызовы, связанные с передачей данных.

Устройство управления обеспечивает взаимодействие всех узлов базовой станции. Оно также обрабатывает вызовы, осуществляет аутентификацию вызывающих абонентов (проверку «свой-чужой»), ведение очередей вызовов и внесение записей в базы данных повременной оплаты. В некоторых системах управляющее устройство регулирует максимально допустимую продолжительность соединения с телефонной сетью. Как правило, используются два варианта регулирования: уменьшение продолжительности соединений в заранее заданные часы наибольшей нагрузки или адаптивное изменение продолжительности соединения в зависимости от текущей нагрузки.

Интерфейс ТСОП реализуется в транкинговых системах различными способами. В недорогих системах (например, SmarTrunk) подключение может производиться по двухпроводным коммутируемым линиям. Более современные ТСС имеют в составе интерфейса к ТСОП аппаратуру прямого набора номера DID (Direct Inward Dialing), обеспечивающую доступ к абонентам транкинговой сети с использованием стандартной нумерации АТС. Ряд систем использует цифровое ИКМ-соединение с аппаратурой АТС.

Терминал технического обслуживания и эксплуатации (терминал ТОЭ) располагается, как правило, на базовой станции однозоновой сети. Терминал предназначен для контроля за состоянием системы, проведения диагностики неисправностей, учета тарификационной информации, внесения изменений в базу данных абонентов. Подавляющее большинство выпускаемых и разрабатываемых транкинговых систем имеют возможность удаленного подключения терминала ТОЭ через ТСОП или СКП.

Диспетчерский пульт Необязательными, но очень характерными элементами инфраструктуры транкинговой системы являются диспетчерские пульты. Дело в том, что транкинговые системы используются в первую очередь теми потребителями, чья работа не обходится без диспетчера. Это службы охраны правопорядка, скорая медицинская помощь, пожарная охрана, транспортные компании, муниципальные службы. Диспетчерские пульты могут включаться в систему по абонентским радиоканалам или подключаться по выделенным линиям непосредственно к коммутатору базовой станции.

Следует отметить, что в рамках одной транкинговой системы может быть организовано несколько независимых сетей связи, каждая из которых может иметь свой диспетчерский пульт. Пользователи каждой из таких сетей не будут замечать работы соседей и, что не менее важно, не смогут вмешиваться в работу других сетей.

Абонентское оборудование транкинговых систем включает в себя широкий набор устройств. Как правило, наиболее многочисленными являются полудуплексные радиостанции, т.к. именно они в наибольшей степени подходят для работы в замкнутых группах. В большинстве своем это радиостанции с ограниченным числом функций, не имеющие цифровой клавиатуры. Их пользователи, как правило, имеют возможность связываться лишь с абонентами внутри своей рабочей группы, а также посылать экстренные вызовы диспетчеру. Впрочем, этого вполне достаточно для большинства потребителей услуг связи транкинговых систем. Выпускаются и полудуплексные радиостанции с широким набором функций и цифровой клавиатурой, но они, будучи несколько дороже, предназначены для более узкого привилегированного круга абонентов.

В транкинговых системах, особенно рассчитанных на коммерческое использование, применяются также дуплексные радиостанции, скорее напоминающие сотовые телефоны, но обладающие значительно большей функциональностью по сравнению с последними. Дуплексные радиостанции транкинговых систем обеспечивают пользователям полноценное соединение с СТОП. Что же касается групповой работы в радиосети, то она производится в полудуплексном режиме. В корпоративных транкинговых сетях дуплексные радиостанции применяются в первую очередь для персонала высшего звена управления.

Как полудуплексные, так и дуплексные транкинговые радиостанции выпускаются не только в портативном, но и в автомобильном исполнении. Как правило, выходная мощность передатчиков автомобильных радиостанций в 3-5 раз выше, чем у портативных радиостанций.

Относительно новым классом устройств для транкинговых систем являются терминалы передачи данных. В аналоговых транкинговых системах терминалы передачи данных - это специализированные радиомодемы, поддерживающие соответствующий протокол радиоинтерфейса. Для цифровых систем более характерно встраивание интерфейса передачи данных в абонентские радиостанции различных классов. В состав автомобильного терминала передачи данных иногда включают и спутниковый навигационный приемник системы GPS (Global Positioning System), предназначенный для определения текущих координат и последующей передачи их диспетчеру на пульт.

В транкинговых системах используются также стационарные радиостанции, преимущественно для подключения диспетчерских пультов. Выходная мощность передатчиков стационарных радиостанций приблизительно такая же, как у автомобильных радиостанций.

Многозоновые системы

Ранние стандарты транкинговых систем не предусматривали каких-либо механизмов взаимодействия различных зон обслуживания. Между тем, требования потребителей значительно возросли, и хотя оборудование для однозоновых систем до сих пор производится и успешно продается, все вновь разрабатываемые транкинговые системы и стандарты являются многозоновыми.

Архитектура многозоновых транкинговых систем может строиться по двум различным принципам. В том случае, если определяющим фактором является стоимость оборудования, используется распределенная межзональная коммутация. Структура такой системы показана на рисунке 3.4.

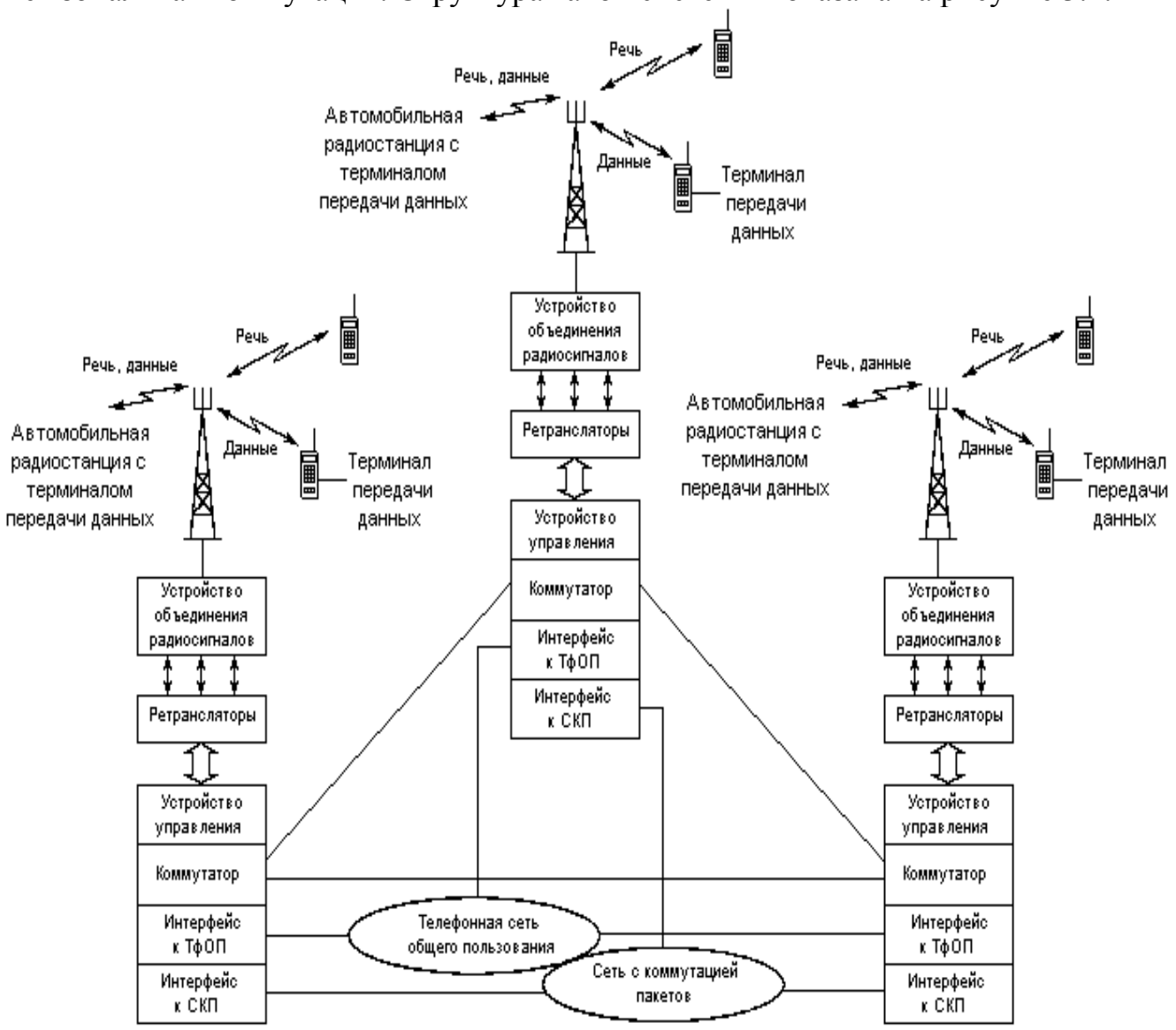


Рисунок 3.4 - Структурная схема транкинговой сети с распределенной межзональной коммутацией

Каждая базовая станция в такой системе имеет свое собственное подключение к ТСОП. Этого уже вполне достаточно для организации многозоновой системы - при необходимости вызова из одной зоны в другую он производится через интерфейс ТСОП, включая процедуру набора телефонного номера. Кроме того, базовые станции могут быть непосредственно соединены с помощью физических выделенных линий связи (чаще всего используются малоканальные радиорелейные линии).

Каждая БС в такой системе имеет свое собственное подключение к ТСОП. При необходимости вызова из одной зоны в другую он производится через интерфейс ТСОП, включая процедуру набора телефонного номера. Кроме того, БС могут быть непосредственно соединены с помощью физических выделенных линий связи.

Использование распределенной межзональной коммутации целесообразно лишь для систем с небольшим количеством зон и с невысокими требованиями к оперативности межзональных вызовов (особенно в случае соединения через коммутируемые каналы ТСОП). В системах с высоким качеством обслуживания используется архитектура с ЦК. Основной элемент этой схемы - межзональный коммутатор. Он обрабатывает все виды межзональных вызовов, т.е. весь межзональный трафик проходит через один коммутатор, соединенный с БС по выделенным линиям. Это обеспечивает быструю обработку вызовов, возможность подключения централизованных ДП. Информация о местонахождении абонентов системы с ЦК хранится в единственном месте, поэтому ее легче защитить. Кроме того, межзональный коммутатор осуществляет также функции централизованного интерфейса к СТОП и СКП, что позволяет при необходимости полностью контролировать как речевой трафик ТС, так и трафик всех приложений ПД, связанный с внешними СКП, например, Интернет. Таким образом, система с ЦК обладает более высокой управляемостью.

Выводы

Итак, можно выделить несколько важнейших архитектурных признаков, присущих транкинговым системам.

Во-первых, это ограниченная (а значит, недорогая) инфраструктура. В многозоновых транкинговых системах она более развита, но все равно не идет ни в какое сравнение с мощью инфраструктуры сотовых сетей.

Во-вторых, это большой пространственный охват зон обслуживания базовых станций, который объясняется необходимостью поддержания групповой работы на обширных территориях и требованиями минимизации стоимости системы. В сотовых сетях, где инвестиции в инфраструктуру быстро окупаются, а трафик постоянно растет, базовые станции размещаются все более плотно, а радиус зон покрытия (сот) уменьшается. При развертывании транкинговых систем все обстоит несколько иначе - объем финансирования, как правило, ограничен, и для достижения высокой

эффективности капиталовложений нужно обслужить с помощью одного комплекта оборудования базовой станции возможно более обширную территорию.

В-третьих, широкий набор абонентского оборудования позволяет транкинговым системам охватить практически весь спектр потребностей корпоративного потребителя в подвижной связи. Возможность обслуживания разнородных по функциональному назначению устройств в единой системе - это еще один путь к минимизации расходов.

В-четвертых, транкинговые системы позволяют на базе своих каналов организовать независимые выделенные сети связи (или, как принято говорить в последнее время, частные виртуальные сети). Это означает, что несколько организаций могут совместными усилиями развернуть единую систему вместо установки отдельных систем. При этом достигается ощутимая экономия радиочастотного ресурса, а также снижение стоимости инфраструктуры.

Все сказанное выше свидетельствует о прочности позиций транкинговых систем в корпоративном секторе рынка систем и средств подвижной связи.

3.5 Сети транкинговой связи стандарта TETRA

Система стандарта TETRA (трансевропейская система транкинговой связи) представляет собой совокупность спецификаций, разработанных ETSI и определяющих цифровую транкинговую систему связи (ТСС).

Стандарт TETRA базируется на технической идеологии GSM. Стандарт TETRA включает в себя две спецификации: TETRA Voice + Data (TETRA V+D) и TETRA Packet Data Optimized (TETRA PDO). TETRA V+D - это стандарт на интегрированную систему передачи речи и данных, TETRA PDO - стандарт, описывающий специальный вариант ТСС, ориентированный только на ПД [15].

Радиоинтерфейс стандарта TETRA предполагает работу в стандартной сетке частот с шагом 25 кГц. Дуплексный разнос для систем стандарта TETRA составляет 10 МГц. В радиоканале используется относительная фазовая модуляция типа $\pi/4$-DQPSK с постоянной огибающей. Таким образом, каждому символу модуляции соответствует передача двух бит информации. Для преобразования речи в стандарте TETRA V+D используется кодек с алгоритмом CELP. Скорость цифрового речевого потока на выходе кодека составляет 4,8 кбит/с. До поступления на вход модулятора к речевому потоку добавляется корректирующий код, после чего производится межблочное перемежение.

Полная пропускная способность одного канала в системе стандарта TETRA V+D составляет 7200 бит/с. Стандарт TETRA PDO обеспечивает ПД со скоростью 28,8 кбит/с. ПД может производиться по схемам «точка-точка» и «точка-многоточие». Кроме того, стандарт TETRA предусматривает поддержку протокола X.25 для пользовательских приложений. Наличие в

стандарте спецификаций на шлюз с ISDN и PDN обеспечивает возможность взаимодействия с внешними системами передачи данных.

Спецификация стандарта TETRA не накладывает ограничений на архитектуру сети связи. Благодаря модульному принципу построения, могут быть реализованы разнообразные конфигурации сетей с различной географической протяженностью.

Сети стандарта TETRA предполагают распределенную инфраструктуру управления и коммутации, обеспечивающую быструю передачу вызовов и сохранение локальной работоспособности системы при отказе ее отдельных элементов. Основными элементами сетей TETRA являются базовые и мобильные станции, устройства управления БС, контроллеры БС, диспетчерский пульт (ДП), терминалы технического обслуживания и эксплуатации (ТОЭ).

В стандарте TETRA предусматривается не только прямая связь между АТ, но и использование АТ в качестве ретрансляторов для расширения зоны обслуживания. Система стандарта TETRA может функционировать в следующих режимах: транкинговой связи с открытым каналом, непосредственной связи.

В режиме транкинговой связи обслуживаемая территория перекрывается зонами действия БС. Стандарт TETRA позволяет строить как системы с выделенным частотным каналом управления КУ, так и с распределенным. При работе сети связи с выделенным КУ приемопередающие станции предоставляют абонентам несколько частотных каналов, один из которых (КУ) специально предназначается для обмена служебной информацией. При работе сети с распределенным КУ служебная информация передается либо в специально выделенном временном канале (одном из 4-х каналов, организуемых на одной частоте), либо в контрольном кадре мульти-кадра (одном из 18).

Каналы передачи сообщений могут выделяться в соответствии со следующими способами:

1) Транкинг сообщений. Канал присваивается в начале сеанса связи и освобождается по его окончанию.

2) Транкинг передач. Канал присваивается только на время одной транзакции (периода передача/прием), после чего он освобождается. Для следующей транзакции может быть выделен новый канал.

3) Квазитранкинг передач. Канал так же, как и в транкинге передач освобождается после транзакции, однако, с некоторой задержкой, что позволяет снизить количество сигналов управления.

В режиме с открытым каналом группа пользователей имеет возможность устанавливать соединение «один пункт – много пунктов» без установочной процедуры. Любой абонент, присоединившись к группе, может в любой момент использовать этот канал. В этом режиме радиостанция (РС) работают в двухчастотном симплексе. В режиме непосредственной (прямой) связи между терминалами устанавливаются двух- и многоточечные

соединения по радиоканалам, не связанным с КУ сетью, без передачи сигналов через БС.

В системах стандарта TETRA мобильные станции могут работать в режиме «двойного наблюдения» (Dual Watch), при котором обеспечивается прием сообщений от абонентов, работающих как в режиме транкинговой, так и прямой связи. В системах стандарта TETRA поддерживаются передача речи и данных.

При этом речь и данные могут передаваться одновременно с одного терминала по различным логическим каналам. Для передачи речи используются службы речевой связи, обеспечивающие следующие режимы:

- речевая связь с индивидуальным вызовом абонентов (коммутируемое двухточечное соединение между двумя МА или между МА и стационарным терминалом для обеспечения прямой двухсторонней связи в режиме дуплекса или двух частотного симплекса);

- многосторонняя речевая связь, предполагающая групповой вызов абонентов (коммутируемые многопунктовые двунаправленные соединения между вызывающей стороной и несколькими вызываемыми абонентами при использовании симплексного режима связи);

- циркулярная связь с широковещательным вызовом (односторонняя передача речевой информации от вызывающей стороны нескольким вызываемым абонентам).

Все режимы речевой связи предусматривают возможность передачи как открытой речевой информации, так и речи, защищенной с помощью определенных алгоритмов шифрования.

В стандарте описываются следующие виды ПД:

- ПД с коммутацией цепей. Данный вид имеет режимы передачи, аналогичные речевому обмену (двухточечное и многоточечное соединение, широковещательная передача). Скорость обмена определяется числом временных интервалов, выделенных для связи, и классом защиты от ошибок;

- коммутируемые пакеты данных. Транслируются по виртуальным цепям или в виде датаграмм. В первом случае возможны только двухточечные соединения, во втором - многоточечные соединения и широковещательная передача;

- короткие сообщения (до 2048 бит). Передаются оперативно независимо от передачи речи и данных.

Транкинговая система связи предоставляет пользователям ряд дополнительных услуг:

- вызов, санкционированный диспетчером (режим, при котором вызовы поступают только с санкции диспетчера);

- приоритетный доступ (в случае перегруженности сети доступные ресурсы присваиваются в соответствии со схемой приоритетов);

- приоритетный вызов (присвоение вызовов в соответствии со схемой приоритетов);

- избирательное прослушивание (перехват поступающего вызова без влияния на работу других абонентов);

- дистанционное прослушивание (дистанционное включение АР на передачу для прослушивания обстановки у абонента);

- динамическая перегруппировка (динамическое создание, модификация и удаление групп пользователей);

- идентификация вызывающей стороны (возможность получения информации о персональном идентификаторе вызывающего абонента) и др.

Стандарт TETRA обеспечивает два уровня безопасности передаваемой информации: стандартный, использующий шифрование радиоинтерфейса (обеспечивается уровень защиты информации, аналогичный системе сотовой связи GSM); высокий, использующий сквозное шифрование (от источника до получателя). Средства защиты радиоинтерфейса стандарта TETRA включают механизмы аутентификации абонента и инфраструктуры, обеспечения конфиденциальности трафика за счет потока псевдоимен и специфицированного шифрования информации. Определенная дополнительная защита информации обеспечивается возможностью переключения информационных каналов и КУ в процессе ведения сеанса связи.

Функциональные схемы построения различных транкинговых систем связи стандарта TETRA представляются как совокупность элементов сети, соединенных определенными специфицированными интерфейсами. Сети стандарта TETRA содержат следующие основные элементы:

1) базовая приемопередающая станция (BTS) - обеспечивает связь в определенной зоне (ячейке). БС выполняет основные функции, связанные с передачей радиосигналов: сопряжение с мобильной станцией, шифрование линий связи, пространственно-разнесенный прием, управление выходной мощностью мобильных радиостанций, управление радиоканалами;

2) устройство управления БС (BCF) - элемент сети с возможностями коммутации, который управляет несколькими БС и обеспечивает доступ к внешним сетям ISDN, СТОП, PDN, PABX, а также используется для подключения ДП и терминалов ТОЭ;

3) контроллер БС (BSC) - элемент сети с большими, по сравнению с устройством BCF коммутационными возможностями, позволяющий обмениваться данными между несколькими BCF. Так же, как и BCF обеспечивает доступ к внешним сетям. BSC имеет гибкую модульную структуру, позволяющую использовать большое число интерфейсов разного типа. В сетях TETRA контроллеры БС могут выполнять функции сопряжения с другими сетями TETRA и управления централизованными БД;

4) диспетчерский пульт - устройство, подключаемое к контроллеру БС по проводной линии и обеспечивающее обмен информацией между оператором (диспетчером сети) и другими пользователями сети;

5) мобильная станция (MS) – радиостанция, используемая подвижными объектами;

6) стационарная радиостанция (FRS - Fixed Radio Station) - PC, используемая абонентом в определенном месте;

7) терминал ТОЭ - терминал, подключаемый к устройству управления (УУ) базовой станцией BCF и предназначенный для контроля за состоянием системы, проведения диагностики неисправностей, учета тарификационной информации и т.п. С помощью таких терминалов реализуется функция управления локальной сетью (LNM - Local Network Management).

При этом возможно централизованное управление сетью. Вариант построения такой сети показан на рисунке 3.5

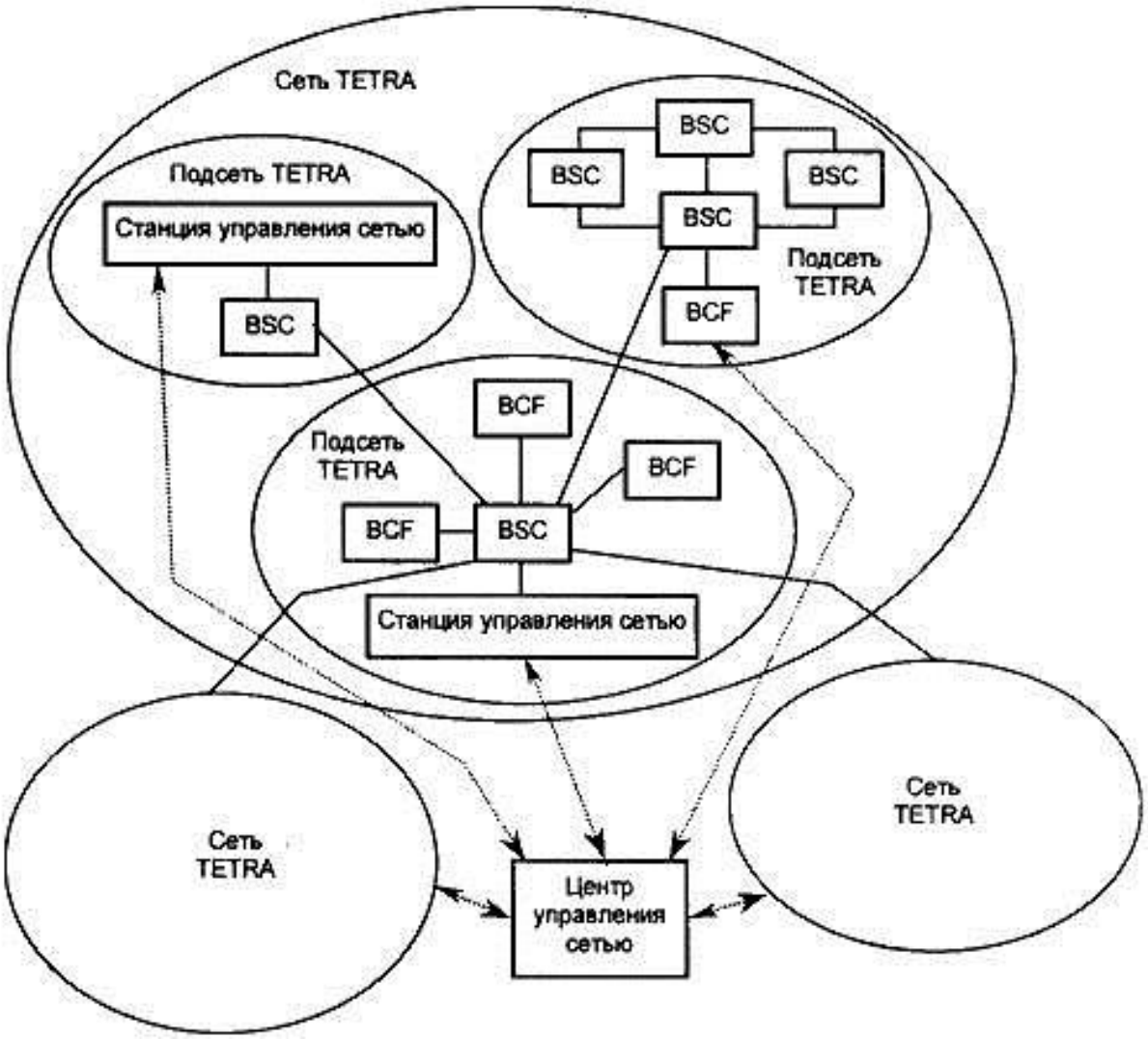


Рисунок 3.5– Структура сети TETRA

Благодаря модульному принципу разработки оборудования, ТСС стандарта TETRA могут быть реализованы с разными иерархическими уровнями и различной географической протяженностью (от локальных до национальных). Функции управления БД и коммутации распределяются по всей сети, что обеспечивает быструю передачу вызовов и сохранение ограниченной работоспособности сети, даже при потере связи с ее отдельными элементами.

На национальном или региональном уровне структура сети может быть реализована на основе сравнительно небольших подсетей TETRA, соединенных друг с другом с помощью межсистемного интерфейса ISI для создания обшей сети.

Каждая подсеть TETRA выполняет свои функции управления и коммутации, а также предоставляет возможность для централизованного управления сетью более высокого уровня. Структура подсети зависит от трафика, а также от требований к эффективности установления связи.

В транкинговой сети связи стандарта TETRA предусматриваются различные способы обеспечения отказоустойчивости, позволяющие в случае отказа отдельных элементов сети сохранять полную или частичную работоспособность, возможно, с ухудшением ряда параметров таких, как время установления соединения и т.д. Для сетей национального уровня, как правило, используется несколько альтернативных маршрутов соединения сетей регионального уровня путем соединения контроллеров БС. Кроме этого, для региональных сетей предусматривается взаимное копирование БД в контроллерах БС.

В системах стандарта TETRA V+D используется метод TDMA. На одной несущей частоте организуется четыре разговорных канала. Каждый кадр имеет длительность 56,67 мс и содержит четыре временных интервала. Последовательность из 18 кадров образует мультикадр длительностью 1,02 с. Один TDMA кадр в мультикадре является контрольным; 60 мультикадров образуют гиперкадр.

Каждый временной интервал в составе кадра содержит 510 бит, 432 из которых являются информационными (два блока по 216 бит). В начале временного интервала передается пакет радиоабоненту (PA) (управление излучаемой мощностью, 36 бит), за ним следует первый информационный блок (ИБ) (216 бит), далее - синхропоследовательность SYNC (36 бит) и второй ИБ. Соседние временные интервалы разделяются защитными интервалами (GP) длительностью 0,167 мс, что соответствует 6 битам.

Контрольные вопросы:

1) Целесообразность транкинговых систем, зачем нужен транкинг.

2) Перечислите преимущества и недостатки транкинговых систем связи.

3) Какие стандарты транкинговых систем Вы знаете?

4) Чем однозоновая транкинговая система отличается от многозоновой?

5) Какой из методов многостанционного доступа применяется в стандарте TETRA?

6) Отличие транкинговых систем «без канала управления» от систем с «выделенным каналом управления».

7) Что такое роуминг, какие виды роуминга Вы знаете?

ГЛАВА 4

4 Сети спутниковой связи

4.1 Основные принципы построения спутниковых систем связи

Системы персональной спутниковой связи обладают рядом преимуществ по сравнению с рассмотренными ранее системами подвижной связи. Данный вид связи не имеет ограничений по привязке к конкретной местности Земли, а также во многих регионах мира спрос на услуги связи может быть удовлетворен только с помощью спутниковых систем, например:

- при передаче информации в глобальном масштабе;
- в акваториях Мирового океана;
- в районах с малой плотностью населения;
- в местах разрывов наземной инфраструктуры.

В зависимости от вида предоставляемых услуг СС можно разделить на три основных класса: речевой (радиотелефонной) связи; пакетной передачи данных (ППД); определение местоположения (координат) потребителей [16].

При радиотелефонной связи в СС используют цифровую передачу сообщений, при этом обязательно должны выполняться международные стандарты. В таких системах задержка сигнала на трассе не должна превышать 0,3 с и переговоры абонентов не должны прерываться во время сеанса связи. Обслуживание абонентов должно быть непрерывным и происходить в реальном масштабе времени (РМВ). Для этого необходимо оснащать спутники высокоточной системой ориентации для удержания луча их антенны в заданном направлении; количество спутников в системе должно быть достаточным для обеспечения сплошного и непрерывного покрытия зоны обслуживания; для обеспечения достаточного количества каналов связи должны применяться многолучевые антенные системы. При этом требуется большое количество узловых (шлюзовых) станций (ШС) с дорогим коммутационным оборудованием.

Системы пакетной передачи данных (ППД) работают со скоростью от единиц до сотен килобайт в секунду. Жестких требований к оперативности доставки сообщений, как правило, не предъявляют. В таком режиме работает «электронная почта» (поступившая информация запоминается бортовым компьютером и доставляется корреспонденту в заранее определенное время суток).

Для определения местоположения абонента применяется стандартная навигационная аппаратура GPS (Global Positioning System – глобальная система определения), которая имеет очень высокую точность определения координат потребителя и специальная аппаратура, которая по сигналам спутников персональной связи и или ШС позволяет определить координаты потребителя, но с меньшей точностью.

В основу организации спутниковой связи заложена достаточно простая идея. На спутнике (сателлите) располагается активный ретранслятор СПСС. По заданной орбите спутник движется длительное время, получая электропитание от солнечных батарей, установленных на его платформах, или от малогабаритных ядерных электростанций.

На спутнике-ретрансляторе расположены специальная антенная система и приемопередающая аппаратура, осуществляющая прием, преобразование, обработку (например, усиление, изменение частоты несущей и пр.) и пе

редачу сигналов в направлении земных станций (ЗС) – станций радиосвязи, расположенных на земной поверхности и предназначенных для обеспечения собственной связи. Приведена структура систем спутниковой связи на рисунке 4.1.

Системы мобильной спутниковой связи классифицируют по двум признакам: типу используемых орбит и различию в зонах обслуживания и размещения ЗС.

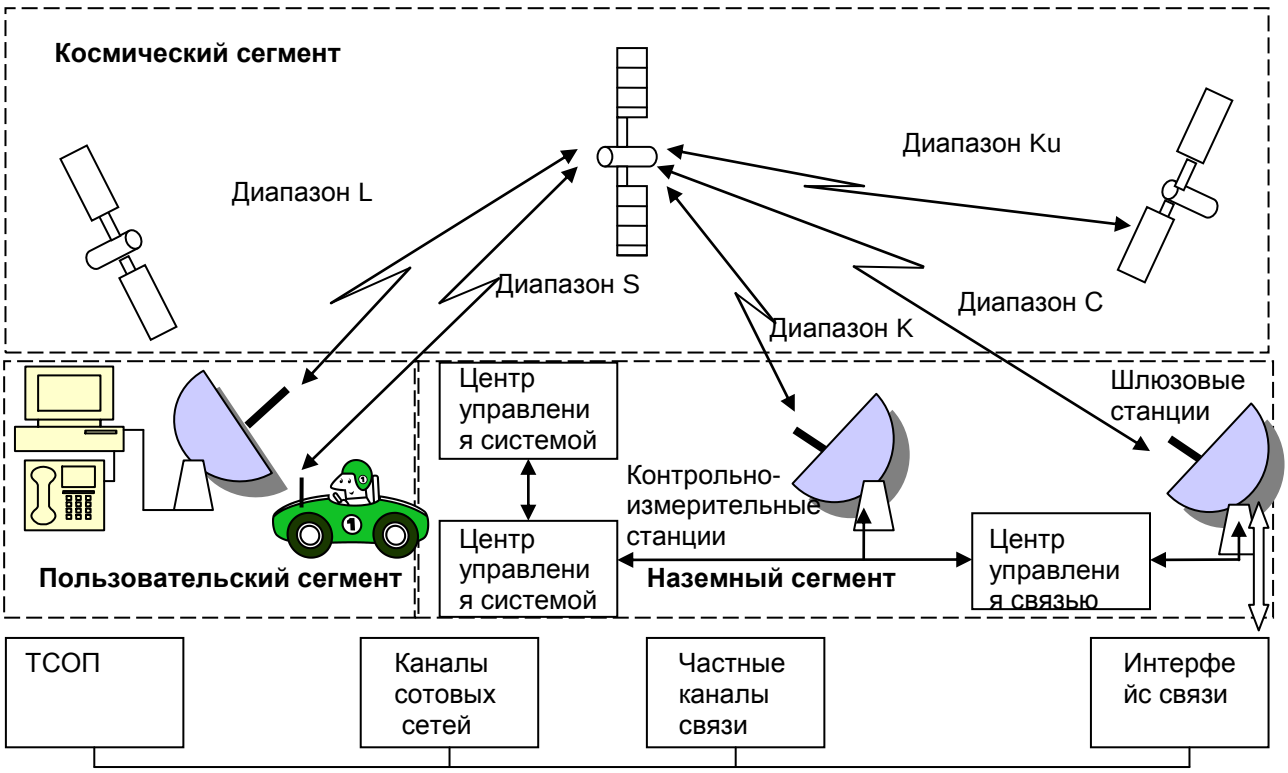


Рисунок 4.1 - Структура систем спутниковой связи

Многие важные свойства СС напрямую зависят от высоты и типа орбит КА. Высота орбит КА выбирается на основании анализа многих факторов, включая энергетические характеристики радиолиний, задержку при распространении радиоволн, близость к орбите радиоционных поясов

Ван Аллена, размеры и расположение обслуживаемых территорий. Кроме того, на высоту орбиты влияют способ организации связи и требования по обеспечению необходимого значения угла места КА. Технические вопросы, связанные с использованием частот и расположением СР на орбитах,

обеспечивающих отсутствие взаимных помех друг другу, решаются в рамках МККР (Международный консультативный комитет по радио) и МКРЧ (Международный комитет по регистрации частот). Для спутниковых систем выделены полосы частот, представленные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Полосы частот для спутникового диапазона.

Диапазон	C	S	C	Ku	Ka	K
Полоса частот, ГГц	1,452-1,500; 1,61-1,71	1,93-2,70	3,40-5,25; 5,725-7,075	10,70-12,75; 12,75-14,80	14,40-26,50; 27,00-50,20	84,00-86,00

4.2 Классификация спутниковых систем связи. Параметры и виды орбит

Конфигурация систем СС зависит от типа искусственного спутника Земли, вида связи и параметров земных станций. Для построения систем СС используются в основном три разновидности ИСЗ, показанные на рисунке 4.2, на высокой эллиптической орбите (ВЭО), геостационарной орбите (ГСО) и низковысотной орбите (НВО). Используются также спутники на средневысотной орбите (СВО). Каждый тип ИСЗ имеет свои преимущества и недостатки [17].

Примером ИСЗ с ВЭО могут служить спутники типа «Молния» с периодом обращения 12 часов, наклонением 63°, высотой апогея над северным полушарием 40 тысяч км, перигея – 500 км. Движение ИСЗ в области апогея замедляется, при этом длительность радиовидимости составляет 6…8 ч. Преимуществом данного типа ИСЗ является большой размер зоны обслуживания при охвате высокоширотных абонентов. Недостатком ВЭО является необходимость слежения антенн за медленно дрейфующим спутником и их переориентирования с заходящего спутника на восходящий, кроме того, достаточно сильно проявляется эффект Доплера.

Уникальной орбитой является ГСО – круговая орбита с периодом обращения ИСЗ 24 часа, лежащая в плоскости экватора, с высотой 35875 км от поверхности Земли. Орбита синхронна с вращением Земли, поэтому спутник оказывается неподвижным относительно земной поверхности.

Достоинства ГСО: зона обслуживания составляет около трети земной поверхности, трех спутников достаточно для почти глобальной связи, практически отсутствует эффект Доплера, антенны земных станций практически не требуют систем слежения. Однако в северных широтах спутник виден под малыми углами к горизонту и вовсе не виден в приполярных областях, из-за большой протяженности трассы эхо-сигналы,

возникающие при несогласованности в точках перехода от 4-х проводной цепи к 2-х проводной, могут создать серьезную помеху разговору (требуется применять эхо-заградители) .

Рисунок 4.2 – Виды орбит ИСЗ

«Низколеты» запускаются на круговые орбиты, плоскость которых наклонена к плоскости экватора (полярные и квазиполярные орбиты) с высотой порядка 200..2000 км над поверхностью Земли. Запуск легкого ИСЗ на низкую орбиту может быть осуществлен с помощью недорогих пусковых установок. Однако скорость перемещения ИСЗ относительно поверхности Земли достаточно велика, в результате длительность сеанса от восхода спутника до его захода не превышает несколько десятков минут.

Диапазоны рабочих частот систем СС регламентированы МСЭ-Р, различны для участков Земля-ИСЗ и ИСЗ-Земля и лежат в пределах 2..40 ГГц.

Для систем СС существуют некоторые особенности передачи сигналов:

- запаздывание сигналов – для геостационарной орбиты около 250 мс в одном направлении. Является одной из причин появления эхо-сигналов при телефонных переговорах;

- эффект Доплера – изменение частоты сигнала, принимаемого с движущегося источника. Для скоростей много меньших скорости света $v_r/c<<1$ изменение частоты составляет $f=f_0/(1\pm v_r/c)$. Наиболее сильно эффект Доплера проявляется для ИСЗ, использующих негеостационарные орбиты.

Характеристики ряда орбит приведены в таблице 4.2.

Т а б л и ц а 4.2- Характеристики орбит

Тип орбиты	ГСО(GEO)	СВО(MEO)	НВО(LEO)
Высота орбиты, км	36000	5000-15000	700- 1500
Количество космических аппаратов (КА) для непрерывного глобального охвата	3	8-12	48-66
Площадь зоны покрытия одного в % (ε=5°)	34	25-28	3-7
Время пребывания КА в зоне радиовидимости, час	непрерыво	1,5-2	0,2-0,25
Задержка при передаче речи, мс	> 500	80-130	20-70
Угол места на краю зоны обслуживания, °	5	25-30	10-15
Период обращения КА вокруг Земли, мин	1440	360	100

В зависимости от назначения системы СС и типа земных станций регламентом МСЭ различаются следующие службы:

- фиксированная спутниковая служба для связи между станциями, расположенными в определенных фиксированных пунктах, а также распределения телевизионных программ;
- подвижная спутниковая служба для связи между подвижными станциями, размещаемыми на транспортных средствах (самолетах, морских судах, автомобилях и пр.);
- радиовещательная спутниковая служба для непосредственной передачи радио- и телевизионных программ на терминалы, находящиеся у абонентов.

Фиксированная спутниковая служба (ФСС). На начальном этапе развития ФСС развивалась в направлении создания систем магистральной связи с применением крупных земных станций с диаметрами зеркала антенн порядка 12..30 м. В настоящее время функционирует около 50 систем ФСС. В качестве примеров можно отметить системы СС «Молния-3», «Радуга», «Горизонт» и международные системы Intelsat и Eutelsat. Развитие ФСС идет по направлениям увеличения срока службы ИСЗ, повышения точности удержания ИСЗ на орбите, разработки и совершенствования многолучевых антенн, а также возможности работы на антеннах земных станций малого диаметра (1,2..2,4 м) (системы VSAT).

Подвижная спутниковая служба (ПСС). В силу международного характера работы транспорта для его управления создаются международные системы глобальной спутниковой связи, например, система морской спутниковой связи Inmarsat, которая введена в действие в 1982 году. Функционально она содержит геостационарные спутники, расположенные над Атлантическим, Индийским и Тихим океанами; береговые станции, установленные на различных континентах, и разветвленную сеть судовых станций различных стандартов. В настоящее время системой Inmarsat пользуется около 15 тысяч судов. В рамках организации Inmarsat решается проблема создания системы авиационной спутниковой связи.

Успехи в космических технологиях последних лет, а также достижения в микроэлектронике, появление эффективных алгоритмов параметрического компандирования речевых сигналов, разработка лазерных линий межспутниковой связи вызвали большой интерес к использованию легких низколетящих ИСЗ для ПСС. Поддержание большой (десятки аппаратов) группировки ИСЗ на НВО для обеспечения непрерывности связи оказывается экономически целесообразно ввиду относительно малой стоимости вывода спутника на НВО и возможностью создания систем с малогабаритными абонентскими станциями, имеющими изотропные антенны.

Различают два типа СС с НВО. В наиболее простых из них пакеты информации передаются через ИСЗ-ретранслятор непосредственно или с задержкой на время пролета по трассе. Второй тип систем обеспечивает непрерывную связь. Зоны радиовидимости отдельных ИСЗ объединяются в единое информационное пространство.

Примером такой системы служит международный проект Iridium, возглавляемый фирмой Motorola. Система базируется на 66 легких (масса 689 кг) ИСЗ, равномерно размещенных на 6 полярных орбитах (по 11 ИСЗ на каждой орбите) высотой 780 км, плоскости которых разнесены на 30° , но совпадают по фазам движения. Каждый ИСЗ связан с четырьмя соседними. Ретранслятор работает на многолучевую антенну с числом лучей 48, что позволяет организовать в системе 2100 активных лучей одновременно, т.е. создать сотовую зону обслуживания на всей поверхности Земли.

В системе принят многостанционный доступ с частотно-временным разделением каналов, для межспутниковых линий и станций сопряжения предусматривается диапазон частот «К» 19..29 ГГц, для абонентских линий «Земля-ИСЗ» и «ИСЗ-Земля» – использование двух полос в диапазоне частот «L» 1610..1626,5 МГц. Система Iridium сможет охватить связью до 1,5 млн. абонентов. При нахождении абонента в зоне обслуживания системы сотовой связи он обслуживается данной системой. Когда абонент покидает зону обслуживания системы сотовой связи, автоматически происходит его переключение на обслуживание системой СС Iridium.

Радиовещательная спутниковая служба (РСС). РСС реализует одно из основных направлений развития телекоммуникаций – персонализацию, т.е. телевизионные программы принимаются непосредственно на индивидуальные

приемники абонентов. МСЭ утвердил международный план спутникового ТВ вещания в диапазоне 12 ГГц (НТВ-12). В планах зафиксированы точки стояния ИСЗ на ГСО, номера частотных каналов, параметры бортовой передающей аппаратуры. Для спутников стран СНГ выделены пять точек стояния: 23° , 44° , 74° , 110° и 140° восточной долготы. Следует отметить, что из-за исторически сложившегося развития технических средств, для непосредственного телевидения применяется также диапазон 11 ГГц, выделенный для ФСС [18].

К 1992 году для НТВ-12 в мире использовалось более 80 спутников, среди которых TV-SAT-1, TV-SAT-2, TDF-1, TDF-2, TELE-X и др.

Для широкого внедрения НТВ необходимы многопрограммные спутники с несколькими десятками программ с тем, чтобы с приобретением сравнительно дорогого приемного оборудования абонент (зритель) смог бы резко увеличить свой телевизионный выбор. В этой связи являются актуальными работы в области цифрового сжатия телевизионных изображений, позволяющего передавать в одном частотном стволе до 6..10 программ одновременно.

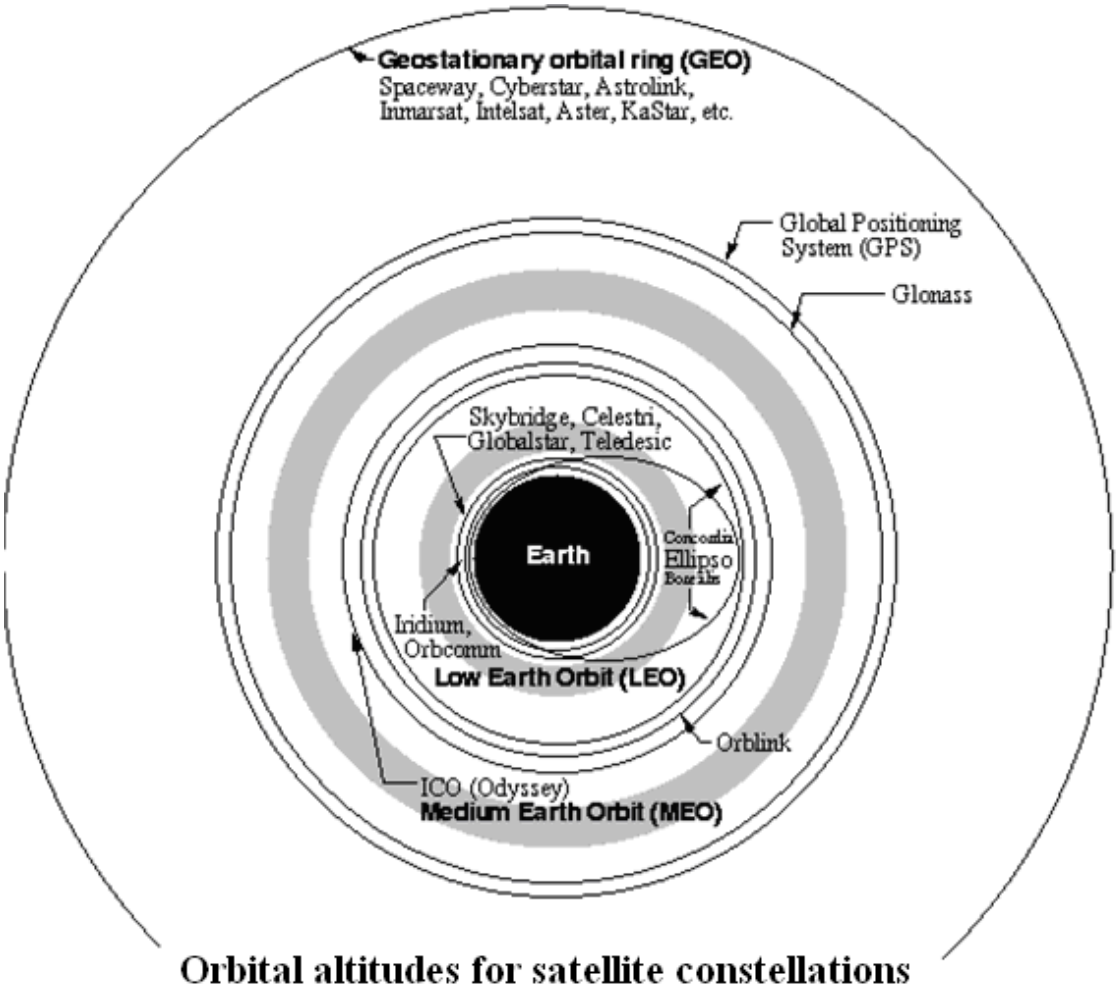


Рисунок 4.3 – Орбитальные высоты для спутниковых созвездий

На рисунке 4.3 приведены орбиты: ГО, СВО, НВО, а также орбиты ИСЗ спутниковых радионавигационных систем: GPS (6 круговых орбит высотой примерно 20 тысяч км, наклонением 55°, с периодом обращения 12 час 24-ти спутников) и ГЛОНАСС (3 круговых орбиты высотой 19100 км, наклонением 64,8°, с периодом обращения 11 час 15 мин 44 сек также 24 спутников).

Затемненным цветом на рисунке отмечены радиационные пояса Земли, здесь орбиты не располагаются, поскольку пояса неблагоприятно сказываются на работоспособности солнечных батарей ИСЗ.

4.3 Система спутниковой связи Inmarsat

Inmarsat - первая и проверенная временем система мобильной спутниковой связи (существует более 25 лет). Сейчас функционирует уже третье поколение системы. Четыре геостационарных спутника обеспечивают покрытие всего земного шара за исключением полюсов. Звонок с терминала Inmarsat попадает на спутник, который спускает его на наземную станцию (LES). LES отвечает за перенаправление звонков телефонных сетей общего пользования и Интернет. Если в каком-либо районе наблюдается повышенная активность абонентов, спутник выделяет несколько дополнительных лучей на работу с этим регионом [19].

В дополнение к стандартным телефонам система поддерживает оборудование, позволяющее отслеживать местонахождение абонентов. Терминалы стандарта Inmarsat-C применяются как для передачи текстовых сообщений, так и для мониторинга подвижных объектов (судов, автомобилей, самолетов). Система применяется для обеспечения безопасности мореплавания (ГМССБ) и для управления воздушным движением.

4.4 Система спутниковой связи Globalstar

Globalstar — это глобальная цифровая система персональной связи, основанная на использовании низкоорбитальных спутников. При разработке системы Globalstar был использован опыт создания сотовых систем связи с кодовым разделением каналов фирмы QUALCOMM, Inc. Набор услуг системы Globalstar включает передачу речи, данных, факсимильных сообщений, сигналов персонального радиовызова (пейджинговых сообщений) и определение координат подвижных объектов [20].

Система Globalstar включает три основных сегмента: космический (космические аппараты), наземный и пользовательский.

В соответствии с проектом космический сегмент состоит из 48 основных ИСЗ и 4 резервных, расположенных на 8 орбитах — по 6 основных ИСЗ на каждой. Орбиты – наклонные, круговые с наклонением к экватору — 52°, что сужает ширину зоны обслуживания системы в целом. Период обращения ИСЗ на орбите равен 113 мин. Высота орбит составляет 1414 км. Большая высота орбиты обусловливает, с одной стороны, большую зону

обслуживания каждого ИСЗ и больший срок службы КА (7,5 лет), с другой, — большее запаздывание и затухание сигнала, более дорогой вывод спутника на орбиту.

Космический сегмент построен так, чтобы обеспечить наилучшее обслуживание пользователей в средних широтах. Именно в средних широтах доступными являются не менее двух КА. Ширина всей зоны обслуживания ограничена 70 ° северной и южной широты. Поэтому в Антарктиде, на Северном полюсе, в некоторых районах Северного морского пути пользование системой Globalstar невозможно.

ИСЗ Globalstar представляет собой ретранслятор с преобразованием частот, осуществляющий прием сигналов в пределах зоны обслуживания, их преобразование и передачу на земную станцию. Все операции по обработке вызовов, их коммутации, преобразованию сигналов и разделению каналов производятся на Земле, где реализация данных функций обходится дешевле, аппаратура доступна для технического обслуживания и может быть со временем модернизирована.

Наземный сегмент системы спутниковой подвижной связи (ССПС) Globalstar состоит из земной станции сопряжения, центров управления и контроля орбитальной группировкой (Satellite Operations Control Center) и наземными средствами (Ground Operations Control Center). Центр управления и контроля орбитальной группировки на основе телеметрической информации контролирует текущее состояние ИСЗ и параметры их орбит, при необходимости выдает соответствующие команды. Центр управления и контроля наземных средств отвечает за планирование и распределение ресурсов системы, контроль за ее функционированием. Центры расположены на территории США, и связаны между собой и с другими земными станциями системы с помощью специальной сети передачи данных GDN (Globalstar Data Network).

При установлении связи мобильный терминал Globalstar сначала проверяет возможность работы в наземной сотовой сети связи и лишь при невозможности устанавливает соединение через спутник. Сигнал с абонентского терминала (телефонного аппарата пользователя) передается через спутник на ближайшую земную станцию сопряжения, которая соединяет его с требуемым абонентом обычной телефонной сети, сотовой сети или с абонентом системы Globalstar. Принцип действия системы показан на рисунке 4.4. При этом максимальная задержка сигнала не должна превышать 150 мс, а время установления соединения — 5 с. Мировой роуминг позволит дозвониться до абонента по одному и тому же номеру, вне зависимости от его географического местоположения.

В системе Globalstar используются шумоподобные сигналы (ШПС) и комбинация методов мпогостанционного доступа с кодовым (CDMA) и частотным разделением каналов (FDMA). Это позволяет решить ряд проблем и, в первую очередь, проблему многократного использования частот и повышения пропускной способности. В отличие от узкополосных сигналов,

предъявляющих жесткие требования к уровню развязки между лучами многолучевой антенны, ШПС сигналы позволяют существенно снизить требования к развязке между лучами. В результате можно использовать одни и же частоты в разных лучах. Одновременно могут быть снижены требования к электромагнитной совместимости с другими системами, работающими в том же диапазоне частот на первичной основе. Другое преимущество ШПС сигналов состоит в возможности борьбы с помехами в виде отраженных сигналов путем их сложения с основным сигналом в многоканальном приемнике Globalstar.

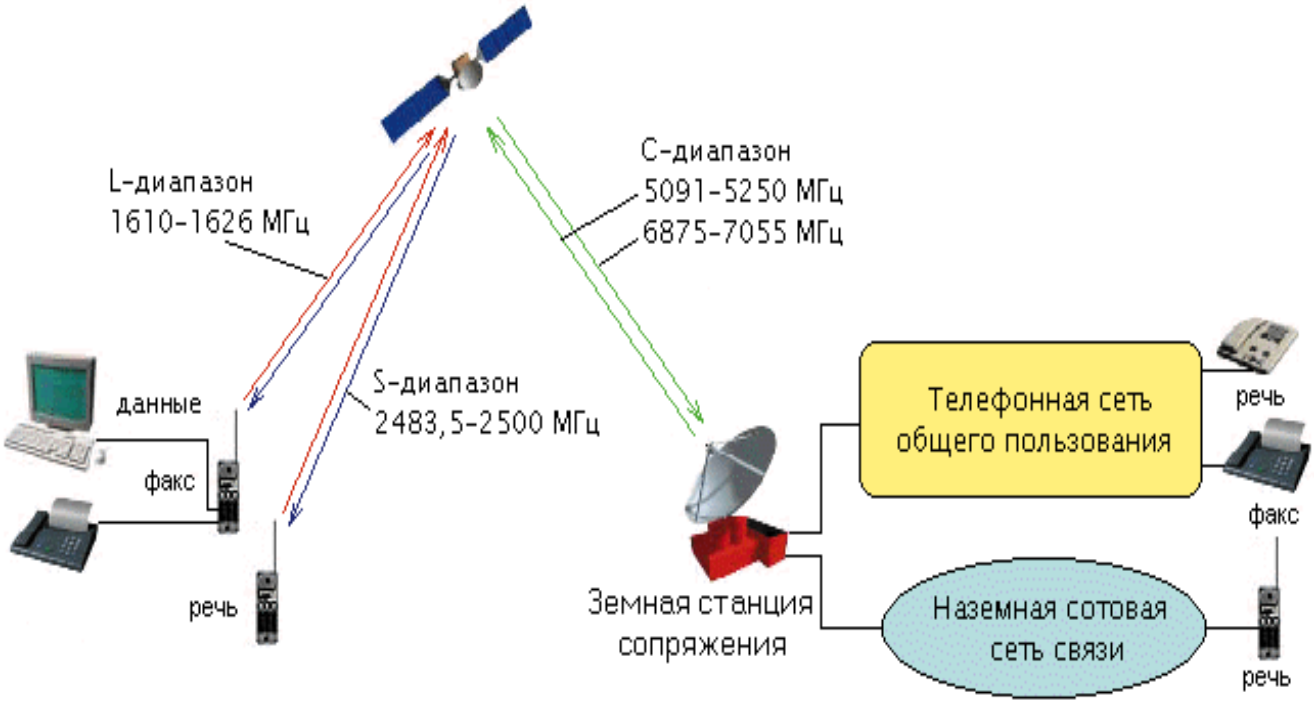


Рисунок 4.4 – Система связи Globalstar

За счет МДКР, учета речевой активности и применения многолучевой антенны обеспечивается повторное использование частот, в результате чего каждый ИСЗ способен к одновременной ретрансляции около двух тысяч телефонных каналов.

Суммарная ширина полосы частот, отведенная для связи, равна 16,5 МГц в L- и S-диапазонах. В этой полосе размещаются 13 частотных каналов. Ширина полосы каждого канала равна 1,25 МГц.

Внутри каждого из частотных каналов разделение производится по форме сигналов, т.е. по номеру последовательности Уолша. Всего для связи используется 127 CDMA-каналов (последовательностей Уолша).

В системе используются следующие каналы:

- канал пилот-сигнала. Скорость передачи -1,2 мбит/с. Вид модуляции – QPSK;

- синхроканал. По каналу синхронизации передается поток данных со скоростью 1200 бит/с. В нем содержится следующая информация: текущее

время, код идентификации СС, эфемериды КА, расписание каналов пейджинга;

- канал персонального вызова. По каналу передается технологическая информация, необходимая для установления соединения (частота, код идентификации пользователя, номер вызываемого абонента);

- прямой информационный канал. Канал предназначен для передачи информационных сообщений абонентам сети Globalstar. Все абоненты системы используют одну и ту же последовательность, но с различным (уникальным для каждого пользователя) временным сдвигом;

- канал доступа. Канал предназначен для передачи запросных пакетов длительностью 60 мс. Скорость передачи в канале доступа - 4,8 кбит/с.

4.5 Система спутниковой связи Thuraya

Европейский институт стандартизации электросвязи (ETSI) и американская Ассоциация телекоммуникационной промышленности (TIA) совместно разработали два набора спецификаций радиоинтерфейсов для региональных систем мобильной связи на базе геостационарных спутников (Geostationary Mobile Satellite Systems, GMSS). Оба эти набора основаны на стандарте GSM [21].

Эти наборы спецификаций получили названия Geo Mobile Radio-1 (GMR-1) и Geo Mobile Radio-2 (GMR-2). В созданных на основе этих спецификаций системы используют малогабаритные двухрежимные (GSM/GMR) терминалы, позволяющие осуществить роуминг между наземными GSM-сетями и спутниковыми сетями, исходя из предпочтений пользователя или географического покрытия спутниковых сетей.

Радиоинтерфейс GMR-1 разработан для спутниковой системы Thuraya, а радиоинтерфейс GMR-2 - для работы Азиатской сотовой системы (Asia Cellular System, ACeS) и спутника Garuda 1.

Сильное сходство протоколов верхнего уровня систем GMR с наземными системами GSM позволяет интегрировать в новые системы стандартные услуги GSM с максимальным использованием таких элементов сетевой инфраструктуры GSM, как центры коммутации мобильной связи (MSC), регистры перемещения (VLR), центры обслуживания коротких сообщений (SMSC) и др. Стратегия развития GMR предусматривает также возможности эволюции к спутниковой системе UMTS.

В спецификации GMR-1 введен ряд методов повышения эффективности речевого канала через GSM, в том числе улучшенная модуляция и улучшенный речевой кодек с малой скоростью передачи. Стандарт GSM поддерживает 8 полноскоростных речевых каналов на каждые 200 кГц или 40 таких каналов на 1 МГц, а GMR-1 - 256 речевых каналов на 1 МГц.

Космический сегмент Thuraya-1 имеет отражатель L-диапазона - 250-300 узких лучей (spot beam), цифровую систему формирования лучей (которая

обеспечивает динамическое покрытие территории и его оптимизацию применительно к изменениям трафика) и большую мощность. Он обеспечивает возможность соединения двух мобильных терминалов через один спутник.

Единым точечным источником всех узких лучей является спутник мобильной связи, что позволяет синхронизировать все управляющие каналы. Это имеет очень большое значение для выбора и переключения узких лучей. Сигналы управления сотами GSM-сети имеют разные источники и асинхронны, что учитывается в конструкции и протоколе каналов управления GSM. Для ускорения и повышения точности выбора узких лучей, а также для некоторого повышения эффективности каналов управления в системе GMR-1 используется синхронизация каналов. Быстрота переключения каналов GMR-1 обеспечивается именно тем, что они всегда синхронны.

Поскольку архитектура протоколов GMR-1 тесно привязана к GSM, усовершенствования протоколов GSM могут использоваться в GMR-1. Важнейшим этапом эволюции GSM является включение в этот стандарт услуг пакетной коммутации на основе протоколов GPRS, EGPRS и протоколов 3-го поколения.

Система GMR-1 обеспечивает быстрое определение местоположения как собственными средствами, так и с использованием системы GPS. Возможности системы GPS сокращают время определения местоположения с 90 с до 5 с и меньше.

Контрольные вопросы:

1) Дать характеристику построения сетей спутниковых систем связи.

2) Чем отличаются между собой низкоорбитальные, среднеорбитальные и высокоорбитальные системы связи?

3) Какие диапазоны частот используются для спутниковых систем связи?

4) Какова основная причина потерь в системах спутниковой связи?

5) Какие системы спутниковой связи Вы знаете?

ГЛАВА 5

5 Методы многостанционного доступа

5.1 Методы многостанционного доступа и разнесения сигналов

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды [22].

Множественный доступ с пространственным разделением основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности данный метод получил широкое распространение. Характерный пример - системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDMA — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно скудных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением (Time Division Multiplexing — TDM).* В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема TDMA достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях, даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов E1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки х8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных - (32 х 8 бит)/125 мкс 18 кбит/с (т.е. 2048000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDMA - систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — *это мультиплексирование с кодовым разделением (Code Division Multiplexing - CDM).* Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDMA механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, WCDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDMA каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т.п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев, чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами сигналов (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют методом расширения спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т. е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения

реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне F одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей F. Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одновременной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет из себя метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм *мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing).* Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т.е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на N субпотоков, где N — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения. До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность его аппаратной реализации. Однако сегодня, с развитием полупроводниковой технологии, это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 a/g и DVB, а также является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDMA и FDMA, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDMA, FDMA/TDMA и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDMA (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDMA — это фиксированное распределение временных интервалов между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha***.** В ней при передаче данных мобильным устройством не используется какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 70-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18% загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей (Carrier Sense Multiple Access — CSMA).* Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т.е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое

устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В ρ-настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью ρ. Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью (1 — ρ), т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В l-настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 используется схожая схема: бесприоритетный множественный ступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY - NPMA).

Схема с цифровым детектированием (DSMA Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют *множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISM A).* Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посылает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени

задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу (Demand Assigned Multiple Access DAMA),* называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посылает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

Схема TDMA с резервированием отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на N интервалов, в каждом их которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют (N ·k) интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервировавшей канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересылать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

Схема с резервированием пакетов (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассылает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом он не зарезервировал временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

5.2 Многостанционный доступ на основе кодового разделения каналов (МДКРК): системы с прямым расширением спектра и перестройкой рабочей частоты

5.2.1 МДКРК: принципы функционирования.

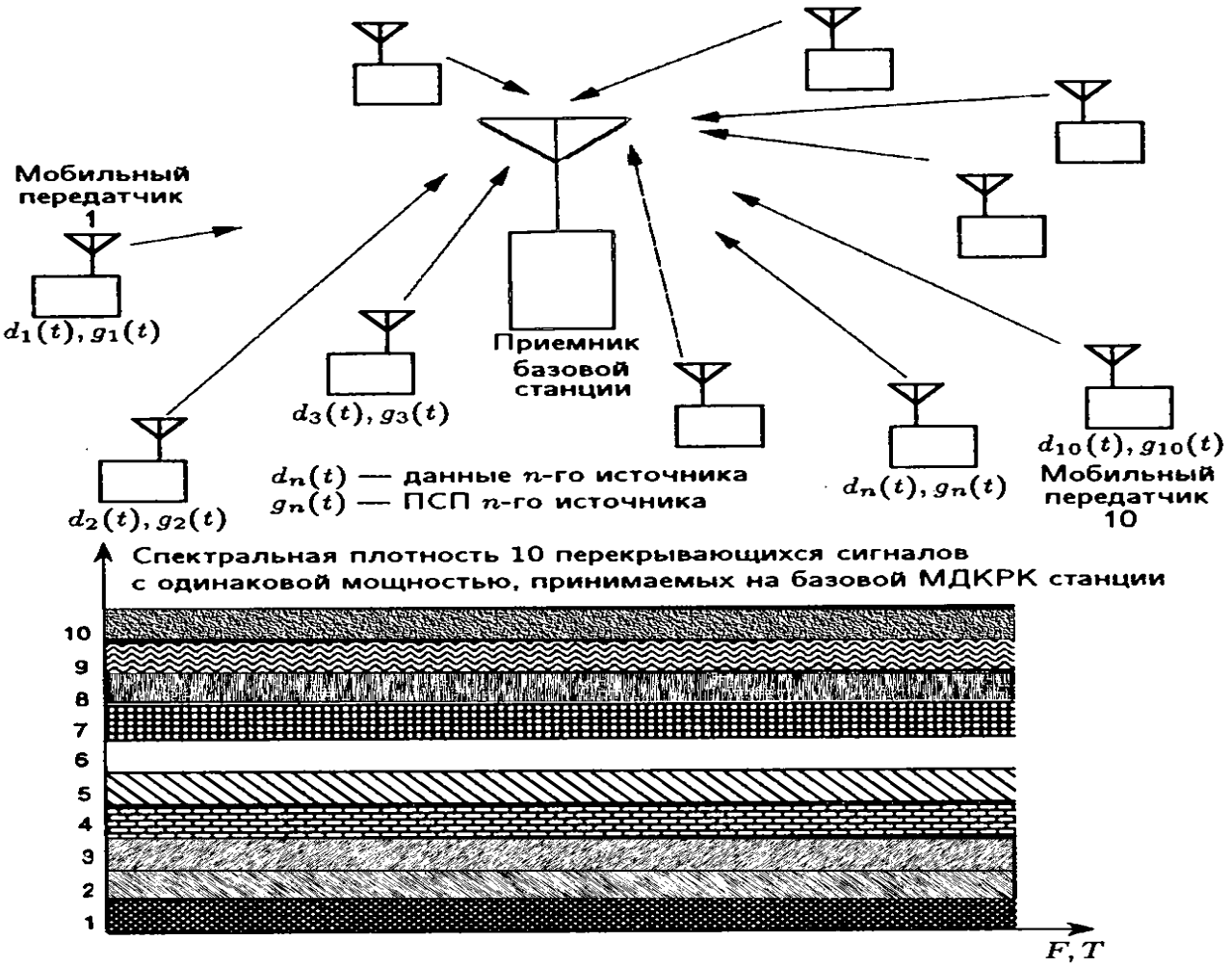


Рисунок 5.1 – Совместное использование спектра в МДКРК

Системы с многостанционным доступом на основе кодового разделения каналов представляют собой развитие систем с прямым расширением спектра с помощью псевдослучайных последовательностей и систем с расширением спектра путем перестройки рабочей частоты. В системе МДКРК каждому пользователю выделена отдельная, отличающаяся от других ПСП. Если эти ПСП взаимно некоррелированны, то в пределах одной соты К независимых абонентов могут передавать сообщения одновременно, занимая одну и ту же полосу радиочастот. В приемниках осуществляется корреляционная обработка сигналов (сжатие спектра), в результате чего происходит восстановление переданных сообщений $d_i(t) = 1,...K$. На рисунке 5.1 показана концепция совместного использования спектра в системе МДКРК с К = 10 несущих. Если предположить, что К = 10 мобильных передатчиков осуществляют передачу

одновременно, то на входе приемника базовой станции будут присутствовать 10 перекрывающихся во времени и по частоте сигналов [22].

То же самое можно сказать о приемнике мобильной станции. Если мощности всех принимаемых сигналов считать равными P_s и только один полезный сигнал интерферирует с остальными девятью МДКРК сигналами равной мощности, то отношение сигнал/помеха (C/I) на РЧ входе приемника будет равно 1/9 или (C/JT) = -9,54 дБ. Такое отрицательное значение отношения сигнал/помеха обусловлено внутрисистемной помехой, создаваемой девятью другими несущими с прямым расширением спектра, одновременно занимающими ту же самую полосу частот, что и несущая полезного сигнала. В результате корреляционной обработки (сжатие спектра) это отрицательное значение отношения несущая/помеха (C/I) в широкой полосе радиочастот преобразуется в положительное значение отношения сигнал/помеха (S/I) в узкой полосе модулирующих частот. Отношение сигнал/помеха в полосе модулирующих частот должно быть достаточно высоким, чтобы гарантировать достижение относительно низких значений P_e. Значение отношения сигнал/помеха (S/I) в полосе модулирующих частот выбирается на несколько децибелов выше по сравнению с отношением сигнал/шум (S/N).

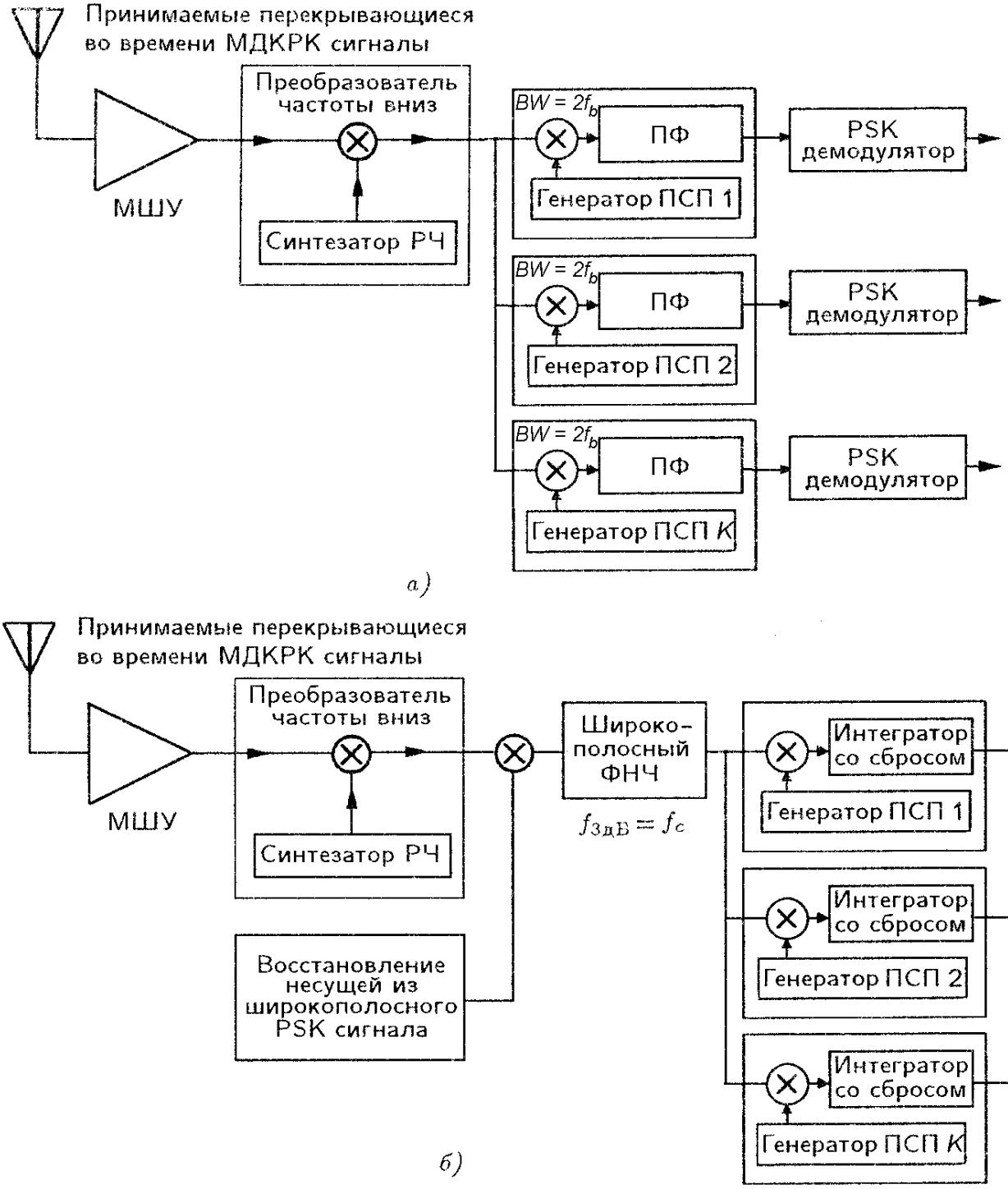
В течение одного и того же временного интервала одновременно К пользователей передают сигналы с прямым расширением спектра, занимающие одну и ту же полосу радиочастот с центральной частотой f_0 и имеющие случайные фазы φ_i , статистически независимые от фаз других пользователей. Каждый мобильный передатчик имеет уникальную ПСП расширения спектра $g_i(t)$. Если предположить наличие идеальной адаптивной регулировки мощности, на входе базовой станции присутствует К радиосигналов с равной мощностью P_s [24].

Каждый пользователь передает сообщение с примерно одинаковой скоростью, и f_b частота следования символов ПСП поддерживается примерно постоянной. На входе приемника базовой станции присутствует суммарный РЧ сигнал, определяемый выражением:

$$v(t) = \sum_{i=1}^{K} \sqrt{2P_s}\, g_i(t) d_i(t) \cos(\omega_0 t + \theta_i)\,. \tag{5.1}$$

В приемнике базовой станции необходимо осуществить сжатие спектра сигнала и демодулировать К независимых сигналов с прямым расширением спектра. Для этого используется К корреляторов, как показано на рисунке 5.2. По существу, МДКРК приемник, содержащий набор корреляторов и представленный на рисунке 5.2 а, является расширенной версией приемника. В этом варианте сжатие спектра осуществляется на промежуточной частоте

(ПЧ). Другой вариант приемника приведен на рисунке 5.2 б.



а - сначала осуществляется корреляционная обработка, а затем узкополосная демодуляция;

б - сначала осуществляется широкополосная демодуляция, а затем сжатие спектра сигнала.

Рисунок 5.2- Построение МДКРК приемников

Суммарный РЧ сигнал преобразуется по частоте вниз на удобную промежуточную частоту, равную, например, 70 МГц, и демодулируется одним общим когерентным широкополосным демодулятором. Полоса пропускания фильтра нижних частот этого демодулятора выбирается достаточно широкой и согласованной с частотой следования символов f_o.

Приведенные ниже уравнения справедливы для обоих вариантов реализации приемника, изображенных на рисунке 5.2. Сигнал на выходе демодулятора приемника, изображенного на рисунке 5.2 а, с учетом эффекта низкочастотной фильтрации интегратора, встроенного в PSK демодулятор, определяется следующими выражениями:

$$v' = \sum_{i=1}^{K} \sqrt{2P_s}\, g_1(t) g_i(t) d_i(t) \cos(\theta_i - \theta_1), \tag{5.2}$$

$$v' = \sqrt{P_s}\, d_1(t) + \sum_{i=1}^{K} \sqrt{2P_s}\, g_1(t) g_i(t) d_i(t) \cos(\theta_i - \theta_1). \tag{5.3}$$

Эти выражения аналогичны выражению , определяющему выходной сигнал приемника с прямым расширением спектра в полосе модулирующих частот, за исключением дополнительных (К — 1) составляющих помехи:

$$G_J(f) \approx (K-1)\frac{P_c}{4 f_0}, \quad |f| \le f_b. \tag{5.4}$$

Если суммарную мощность помехи принять равной

$$P_J = (K-1) P_s, \tag{5.5}$$

то вероятность ошибки P_e при воздействии «внутрисистемной помехи», создаваемой К-1 одновременно принимаемыми сигналами с равной мощностью, будет определяться выражением:

$$P_e = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{2 \frac{1}{K-1} \frac{f_0}{f_b}}\right), \tag{5.6}$$

где f_b – скорость передачи;

f_0 – частота следования символов.

Из приведенного результата следует, что для обеспечения заданного значения P_e при фиксированном количестве пользователей К необходимо тщательно согласовывать значения скорости передачи f_b и частоты следования символов ПСП f_0.

Что касается выражения (5.6), то необходимо отметить следующие допущения, которые были приняты при его выводе:

а) Принимаемые сигналы с прямым расширением спектра имеют равные мощности и формируются с помощью некоррелированных ПСП. Равные мощности предполагают идеальную адаптивную регулировку мощности.

б) Учитывалось влияние только внутрисистемной помехи и не учитывалось влияние теплового шума.

5.2.2 Проблемы помех, создаваемых близкорасположенными и удаленными пользователями в системах с прямым расширением спектра.

В системах с прямым расширением спектра все каналы передачи сообщений (каналы трафика) в пределах одной соты одновременно совместно используют одну и ту же полосу радиочастот, т.е. радиоканал. Соседние соты могут использовать либо те же самые, либо соседние частотные каналы. Некоторые из подвижных объектов могут располагаться близко к базовой станции, а - другие далеко от нее. Сильный сигнал, принимаемый базовой станцией от близкорасположенного подвижного объекта, будет маскировать слабый сигнал, принимаемый от удаленного подвижного объекта. Например, предположим, что все 10 подвижных объектов, изображенных на рисунке 5.1, передают сигналы с одной и той же РЧ мощностью P_s == +30 дБм, потери при распространении радиоволн от удаленного подвижного объекта № 10 составляют 95 дБ, а аналогичные потери от близкорасположенного объекта № 4 составляют лишь 35 дБ. В этом случае мощность принимаемого базовой станцией сигнала подвижного объекта № 4 будет равна $P_{пр}4$ = +30дБм — 35 дБ = -5 дБм, а мощность принимаемого сигнала удаленного подвижного объекта № 10 будет равна $P_{пр}10$= 30 дБм — 95 дБ = -65 дБм. Таким образом, мощность внутриполосной помехи, создаваемой близкорасположенным объектом, будет на 60 дБ превышать мощность принимаемого сигнала от удаленного подвижного объекта. Помеха этого вида представляет серьезную проблему при проектировании и применении МДКРК систем.

Выражение (5.4) устанавливает математическую зависимость между частотой следования символов f_o, скоростью передачи f_b и заданным значением P_e для К одновременно работающих пользователей. При выводе этого выражения предполагалось, что все сигналы, принимаемые на базовой станции, имеют одну и ту же мощность. Требование равенства мощностей, по существу, максимизирует емкость МДКРК систем.

5.2.3 Адаптивное управление мощностью в МДКРК системах с расширенным спектром.

Управление мощностью позволяет снизить уровень помехи «ближний-дальний». Идеальная схема управления мощностью обеспечивает равенство мощностей всех принимаемых базовой станцией сигналов подвижных объектов, расположенных в данной соте, независимо от перемещений, потерь при распространении радиоволн и расположении подвижного объекта.

Прямая линия в МДКРК системе — это линия связи между базовой станцией и приемником подвижного объекта. Обратная линия — это линия связи между подвижным объектом и приемником базовой станции. В случае разомкнутой петли управления передаваемой мощностью (ТхРС) передаются аналоговые или цифровые пилот-сигналы по прямой линии. Измеренный уровень принимаемого пилот-сигнала на подвижном объекте позволяет оценить потери при распространении радиоволн от передатчика базовой станции до приемника подвижного объекта. По результатам оценки потерь на

подвижном объекте формируется сигнал управления передаваемой мощности и устанавливается необходимая мощность передатчика. Эта процедура повторяется с необходимой скважностью, и благодаря этому достигается адаптивное управление с разомкнутой петлей. Здесь предполагается, что потери при распространении в прямой и обратной радиолиниях одинаковы. Однако регулирование с разомкнутой петлей не всегда может обеспечивать достаточную точность и качество. Лучшими характеристиками обладает схема с замкнутой петлей управления ТхРС (см. рисунок 5.3, 5.4,б).

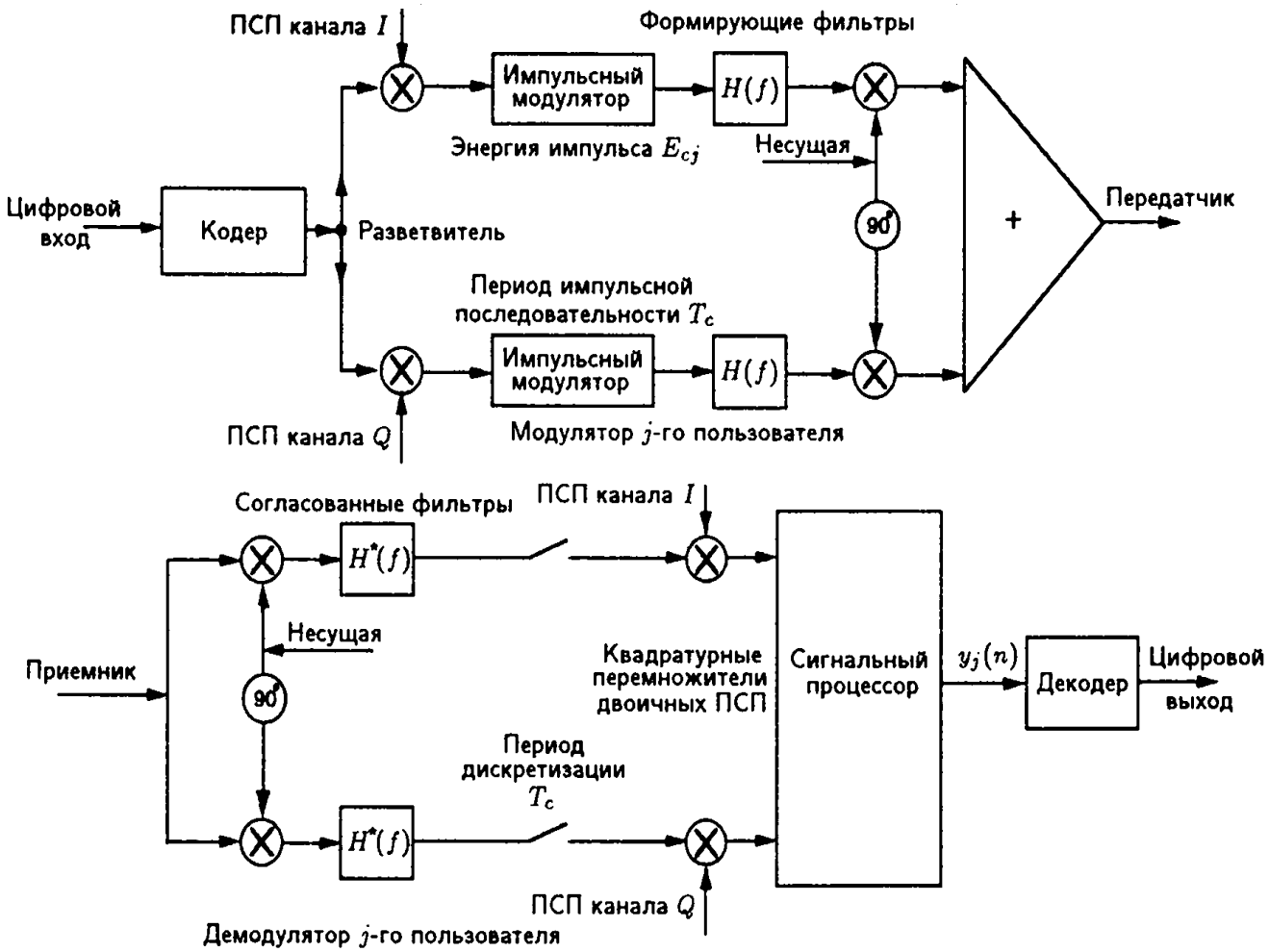


Рисунок 5.3- Структурная схема МДКРК системы по стандарту сотовой связи IS-95

Здесь адаптивное управление мощностью осуществляется в следующей последовательности:

а) в приемнике базовой станции производится (с помощью обратной радиолинии 1) оценка мощности РЧ, принимаемой со стороны подвижного объекта (см.рисунок 5.4);

б) со стороны базовой станции (по прямой линии 2) на подвижный объект передаются команды управления, обеспечивающие установку необходимого уровня передаваемой мощности подвижного объекта (см.рисунок 5.4).

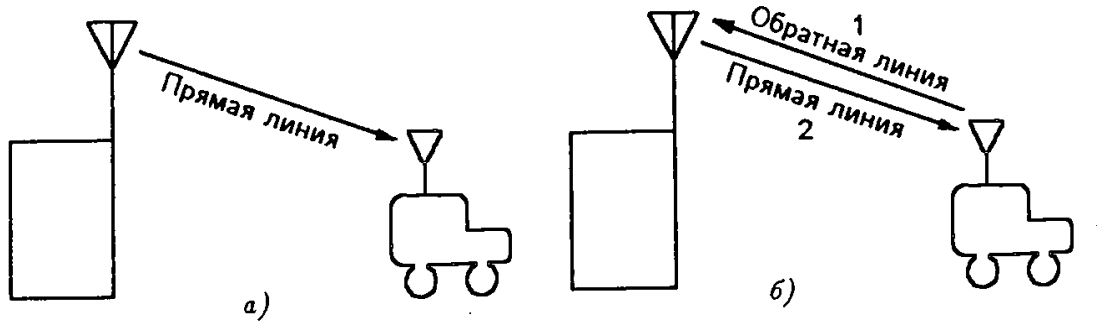


Рисунок 5.4-Управление передаваемой мощностью с помощью разомкнутой (а) и замкнутой (б) петлей

Реальная точность управления мощностью с помощью замкнутой ТхРС петли равна 1,5 дБ. В идеальном случае она должна быть равна 0 дБ. Это означает, что все переданные сигналы от различных подвижных объектов должны быть приняты с одинаковой мощностью, т.е. разность их уровней равна 0 дБ. Это позволяет разрешить проблему близкорасположенного и удаленного пользователей и оптимизировать (максимизировать) емкость сотовых МДКРК систем.

Контрольные вопросы:

1) Назовите все методы разнесения и кратко опишите их.

2) Чем отличаются FDMA, TDMA, CDMA?

3) Раскрыть принципы функционирования многостанционнного доступа на основе кодового разделения каналов.

4) Назовите основные виды помех и кратко опишите их.

5) Расскажите о схемах PRMA, DSMA, CSDA.

ГЛАВА 6

6 Оптические системы

6.1 Принципы построения оптических систем связи

Оптический диапазон. Электромагнитные колебания оптического диапазона обладают малой длиной волны в сравнении с радиоволнами, поэтому для их измерения используются следующие единицы: микрометры (1 мкм = 10^{-6} м), нанометры (1 нм = 10^{-9} м). В настоящей главе используются в основном микрометры, при этом частота колебаний в герцах определяется формулой $\nu = 3 \cdot 10^{14} / \lambda$, где λ измеряется в микрометрах.

Оптическим диапазоном называется участок спектра электромагнитного излучения, соответствующий длинам волн 0,01…100 мкм и частотам $3 \cdot 10^{12} \ldots 3 \cdot 10^{16}$ Гц. Со стороны более коротких волн он примыкает к рентгеновскому диапазону, а со стороны более длинных – к радиодиапазону. Часто оптический диапазон делят на три поддиапазона: ультрафиолетовые волны 0,01…0,38 мкм, видимые волны 0,38…0,74 мкм и инфракрасные волны 0,74…100 мкм [25].

Считается, что для целей связи перспективны волны длиной 0,3…30 мкм. Однако в настоящее время используется ничтожная доля оптического диапазона, соответствующая узким полосам в основном вблизи следующих длин волн: 0,53 мкм, 0,63 мкм, 0,8…0,9 мкм,1,06 мкм, 1,3…1,5 мкм и 10,6 мкм. Объясняется это, во-первых, высокими техническими параметрами (мощностью излучения, КПД, полосой частот модуляции, сроком службы и др.) источников света (лазеров, светодиодов), а во-вторых – наличием соответствующих полос пропускания («окон прозрачности») у используемых сред, в которых распространяется оптическое излучение (атмосфера, кварцевое стекло и др.).

Достоинства и недостатки оптического диапазона с точки зрения связи. В оптическом диапазоне принципиально возможно создание ОСС с громадной пропускной способностью, что обусловлено чрезвычайно высокой частотой оптической несущей. Так, на волне 1 мкм относительной полосе частот всего в 1% соответствует полоса передаваемых частот $3 \cdot 10^{12}$ Гц, равная полосе частот всего радиодиапазона, начинающегося с длины волны 0,1 мм. Практическая реализация этой возможности связана с созданием соответствующих устройств модуляции и демодуляции света. В настоящее время достигнута полоса около 10^9 Гц.

Другим важным достоинством является возможность создания малогабаритных оптических антенн с огромным коэффициентом усиления. Это объясняется тем, что в случае когерентного излучения коэффициент усиления обратно пропорционален квадрату длины волны. Поэтому оптическая антенна с апертурой диаметром всего 10 см на волне 1 мкм позволяет достичь коэффициента усиления около 107 дБ. Для получения

такого усиления в радиодиапазоне на волне 3 см потребовалась бы антенна диаметром около 3 км. Это достоинство оптического диапазона играет первостепенную роль при связи в космическом пространстве на большие расстояния.

В оптическом диапазоне принципиально возможно осуществить передачу сигналов в полосе частот до нескольких гигагерц по волоконным световодам без промежуточной ретрансляции на расстояние до нескольких сотен километров.

В оптическом диапазоне гораздо проще, чем в радиодиапазоне, решается проблема электромагнитной совместимости средств передачи информации ввиду острой направленности оптических антенн, слабой «заселенности» диапазона и большей его ширины.

Существенным достоинством является также возможность миниатюризации всех элементов ОСС, включая антенны.

Наряду с этим ОСС свойственны серьезные недостатки. Так, отмеченная выше возможность реализации большого усиления антенн приводит к серьезной проблеме их наведения на корреспондента и сопровождения в процессе связи, что обусловлено чрезвычайно малой шириной диаграммы направленности (при диаметре апертуры 10 см и длине волны 1 мкм она может иметь значение около 3", при этом точность наведения и сопровождения должна быть не хуже 1"). В случае движущихся объектов, как, например, при связи в космическом пространстве, обеспечение требуемой точности вызывает значительные трудности. В настоящее время достигнуты точности порядка 3 … 5".

Другая проблема, с которой сталкиваются при связи в оптическом диапазоне, – обеспечение высокой надежности на линиях, трассы которых частично или полностью проходят в атмосфере Земли ввиду сильного роста потерь света за счет осадков и загрязнений атмосферы. Так, например, в густом тумане погонное затухание может достичь 100 дБ/ км. Фактически этот фактор существенно ограничивает использование ОСС для связи в атмосфере и связь с космическими объектами через атмосферу.

Серьезным недостатком является трудность практической реализации гетеродинного приема в оптике, обусловленная сильной чувствительностью к флуктуациям направления прихода сигнальной световой волны и нарушениям её пространственной когерентности за счет случайных неоднородностей среды. По этим причинам указанный вид приема в настоящее время почти не применяется. В радиодиапазоне положение обратное: применяется почти исключительно гетеродинный прием.

Наконец, необходимо отметить, что серьезные трудности вызывает реализация в оптике фазовых методов передачи ввиду недостаточной узкополосности и частотной стабильности используемого оптического излучения.

6.2 Классификация оптических систем связи

Оптическая связь, как, впрочем, и радиосвязь, может быть разделена на наземную, космическую и наземно-космическую. Под наземной понимается связь между пунктами, расположенными на поверхности Земли. Наземно-космическая связь – это связь между пунктами, расположенными на Земле и в космическом пространстве, т.е. между земной станцией и космическим летательным аппаратом (спутником, кораблем, станцией). Космическая оптическая связь осуществляется между пунктами, расположенными в космическом пространстве. Она может осуществляться между ИСЗ, космическими кораблями, станциями и т.п.

Наземная связь может осуществляться с помощью ОСС следующих типов: атмосферные ОСС (см.рисунок 6.1,а), световодные ОСС (см.рисунок 6.1, б) и спутниковые ОСС (см.рисунок 6.1, в). Первый тип ОСС характерен тем, что средой распространения света является атмосфера. Эти системы не получили широкого распространения ввиду сильной подверженности связи действию атмосферных осадков и загрязнений. Они используются обычно для подвижной служебной одноканальной телефонной связи на небольшие расстояния (0,1…1 км) на крупных стройках, горных выработках и т.п.

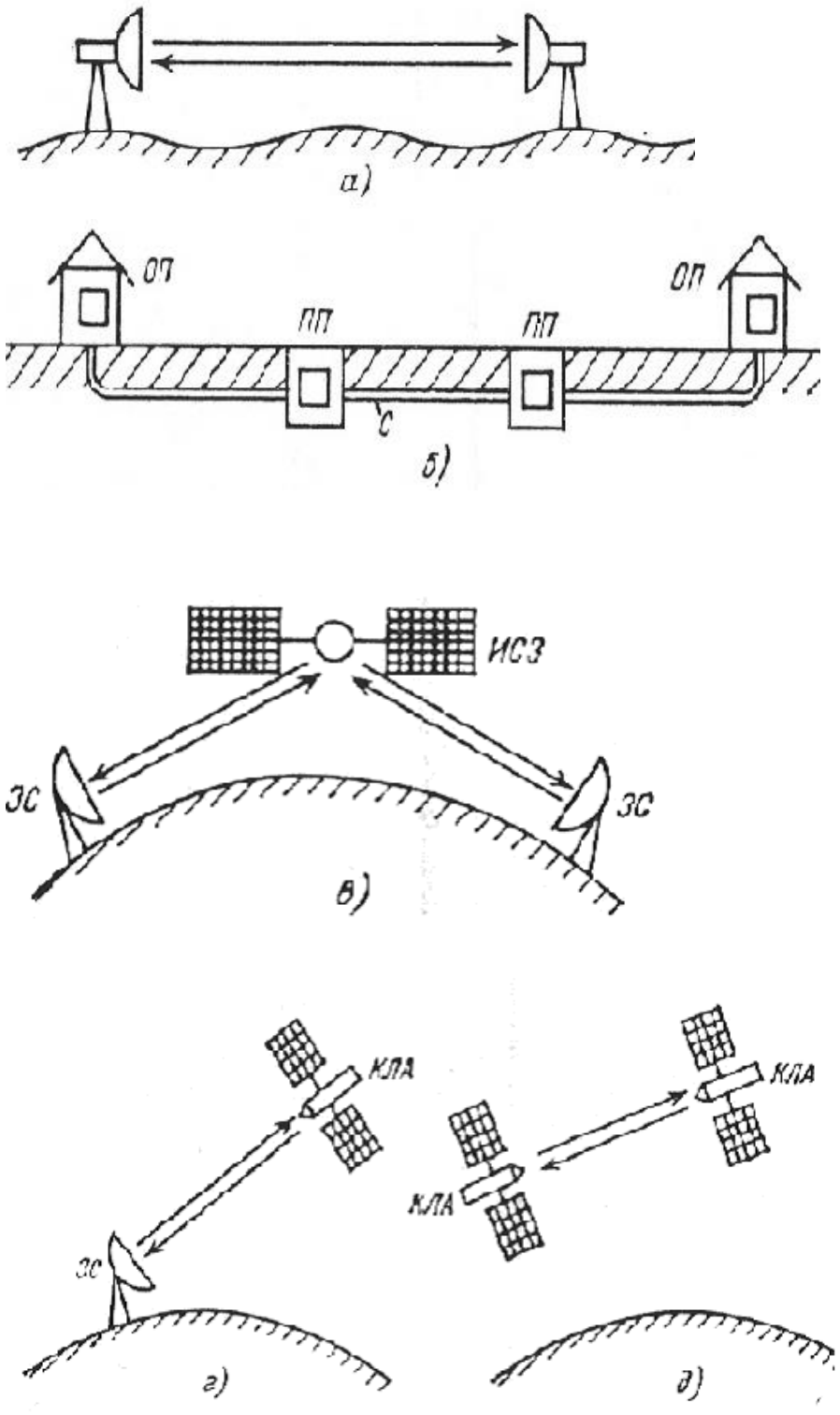
В световодных ОСС средой распространения света является «закрытая среда» направляющей системы.

Несмотря на ряд важных достоинств (малые погонные потери, отсутствие дисперсионных искажений передаваемых сигналов, защищенность от влияния осадков и др.), лучевидные ОСС не получили распространения ввиду трудностей прокладки лучевода и поддержания нормальных условий передачи света. В связи с этим в настоящее время основным типом световодных ОСС являются волоконно-оптические, в которых в качестве направляющей системы используется волоконно-оптический световод, представляющий собой обычно тонкую нить кварцевого стекла диаметром около 0,1 мм. Таким образом, в волоконных ОСС средой распространения света является кварцевое стекло.

В спутниковых ОСС, обеспечивающих наземную связь (см. рисунок 6.1, в), и в наземно-космических ОСС (см. рисунок 6.1, г) распространение света происходит частично в атмосфере Земли, что существенно снижает надежность связи между ЗС и космическим летательным аппаратом (КЛА). Поэтому системы этого типа не получили пока распространения. Для уменьшения влияния атмосферы предполагается в дальнейшем размещать земные станции высоко в горах, выше уровня облачности, что сопряжено с трудностями эксплуатации таких станций.

В космических ОСС (см. рисунок 6.1, д) свет распространяется как в свободном пространстве, что позволяет достичь чрезвычайно высокого качества передачи. ОСС этого типа интенсивно развиваются и весьма перспективны благодаря громадному энергетическому выигрышу оптических антенн и компактности оборудования. Главная трудность на пути развития

этих систем – обеспечение чрезвычайно высокой точности ориентирования оптических антенн (единицы угловых секунд).



а – атмосферная, б – световодная, в – спутниковая, г – наземно-космическая, д – космическая; ОП – оконечный пункт, ПП – промежуточный пункт, ЗС – земная станция, КЛА – космический летательный аппарат

Рисунок 6.1- Типы оптических систем связи

6.3 Особенности построения оптических систем связи

Атмосферные ОСС Отмечалось, что этот вид ОСС не получил распространения в качестве средства коммерческой связи вследствие сильного влияния атмосферных осадков на надежность. В густом тумане затухание света столь значительно, что связь практически невозможна даже на расстоянии в сотни метров. Другим фактором, ухудшающим надежность, является турбулентность атмосферы, приводящая к случайным флуктуациям амплитуды, фазы, поляризации и направления распространения световой волны. Трудность осуществления высоконадежной ОСС в атмосфере на большие расстояния была подтверждена многочисленными экспериментальными исследованиями. Атмосферная оптическая связь считается перспективной и может использоваться для оперативной связи на крупных стройках, горных выработках, с подвижными объектами, в обстановке сложной с точки зрения электромагнитной совместимости: в морских и речных портах, железнодорожных узлах и т. п. [28]. Обычно она является одноканальной и в отсутствие сильных атмосферных осадков может осуществляться на расстояниях порядка 1 км.

Основными требованиями к аппаратуре таких систем связи являются компактность, простота вхождения в связь и ее поддержание, малые масса и энергопотребление, низкая стоимость. Поэтому в аппаратуре чаще всего применяются приемопередающие линзовые антенны с апертурой меньше 10 см, более дешевые, чем зеркальные и имеющие большой угол поля зрения. Наведение антенн осуществляется вручную или моторным приводом с помощью оптического визира. Для удобства наведения иногда луч расширяют до нескольких градусов с помощью рассеивающей линзы, стоящей после лазера, или путем дефокусировки антенны.

В качестве источников света применяются маломощные газовые лазеры на смеси гелия и неона (λ = 0,63 мкм) или полупроводниковые лазеры на арсениде галлия (λ = 0,8 ... 0,9 мкм) с мощностью излучения в непрерывном режиме 2 ... 5 мВт. Гелий-неоновый лазер создает видимое излучение, что упрощает процесс наведения антенн и вхождения в связь. Полупроводниковый лазер излучает в инфракрасном диапазоне, но зато имеет более высокий КПД и меньшие габариты.

При необходимости связи на большие расстояния и при повышенных осадках целесообразен лазер на углекислом газе λ = 10,6 мкм, излучение которого ослабляется в атмосфере в наименьшей степени (см. рисунок 8.2).

В передатчиках атмосферных ОСС используется чаще всего непосредственная модуляция интенсивности света путем изменения тока накачки лазера. В случае газовых лазеров передача осуществляется обычно на поднесущей (20 ...50 кГц), модулированной по амплитуде или частоте первичным телефонным сигналом. Может также применяться модуляция света с помощью внешнего электрооптического модулятора. В случае

полупроводниковых лазеров в силу нелинейности их характеристик применяется частотно-импульсная модуляция (ЧИМ).

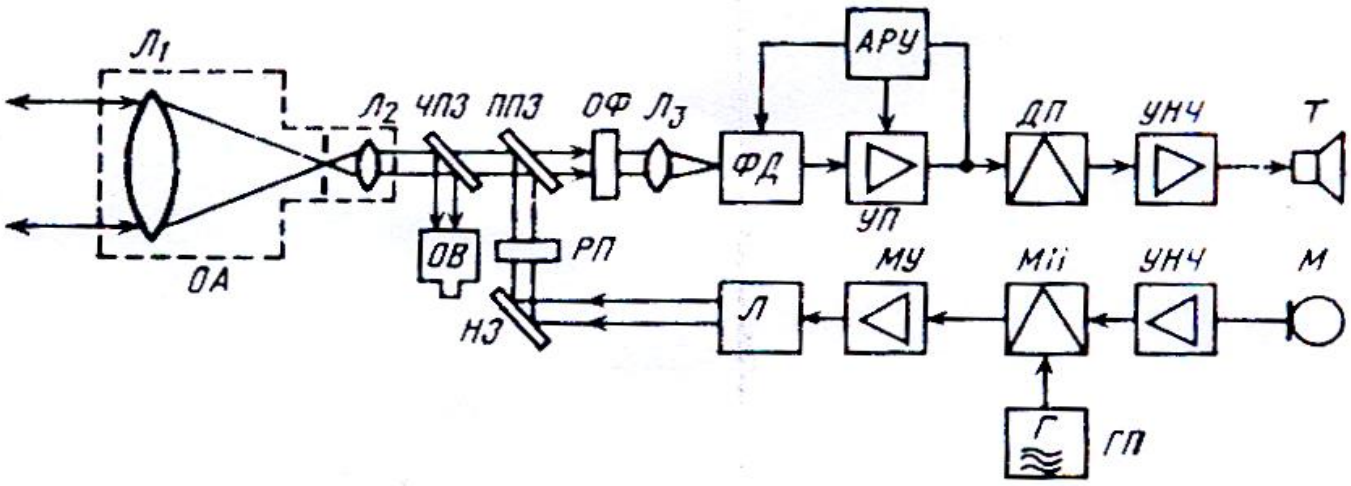


Рисунок 8.2 - Структурная схема приемопередающей аппаратуры атмосферной ООС для телефонной связи на поднесущей

В атмосферных ОСС используются оптические приемники прямого детектирования с ФЭУ или фотодиодом в качестве фотодетектора. Гетеродинные приемники не применяются, ввиду более высокой стоимости, необходимости второго лазера с системой АПЧ и снижения эффективности работы из-за флуктуации угла прихода сигнальной световой волны, обусловленных турбулентностью атмосферы.

Типичная структурная схема приемопередатчика атмосферной ОСС с совмещенной линзовой антенной и передачей на поднесущей. Первичный телефонный сигнал поступает на модулятор поднесущей (МП) (подмодулятор), на другой вход которого одновременно поступает сигнал от генератора поднесущей (ГП). Модулированная поднесущая усиливается в модуляционном усилителе (МУ) и поступает в лазер, обеспечивая управление током накачки. С помощью полупрозрачного зеркала (ППЗ) излучение вводится в оптическую антенну. Для расширения пучка служит элемент РП (расширитель пучка).

Принятый сигнал, пройдя через оптический фильтр (ОФ), ослабляющий внешние помехи (фон), поступает на фотодетектор ФД. Выделенный сигнал поднесущей усиливается избирательным усилителем поднесущей (УП) и демодулируется демодулятором поднесущей (ДП), с выхода которого первичный телефонный сигнал после усиления поступает в телефон. Автоматическая регулировка усиления (АРУ) охватывает не только усилитель поднесущей, а также в случае применения ФЭУ и фотодетектор (регулируется ток, протекающий через делитель напряжения).

При использовании полупроводникового лазера и ЧИМ схема остается прежней, но генератор поднесущей заменяется генератором импульсов,

следующих с частотой 8 кГц, а модулятор и демодулятор поднесущей модулятором и демодулятором ЧИМ.

Космические ОСС. Наибольший интерес в настоящее время представляют два случая: связь низко- и высоколетящих спутников с геостационарными и связь между геостационарными спутниками. При этом спутникам, которые движутся по орбитам, отличным от геостационарных, отводится обычно роль станций сбора информации, а геостационарным — накопления и передачи информации земным станциям. В связи с сильным влиянием атмосферы на распространение волн оптического диапазона на трассе Земля — ИСЗ предпочтительно осуществлять связь в радиодиапазоне. Однако не исключаются и оптические каналы связи.

В первом случае протяженность линии связи составляет около 40 000 км, а во втором может достигать 70 000 км. Перекрытие столь значительных дальностей требует использования достаточно мощных оптических передатчиков и чрезвычайно узконаправленных антенн. В связи с этим особенно остро встает проблема наведения антенн в процессе поиска и сопровождения.

Другой важной особенностью космической оптической связи является необходимость передачи цифровой информации с очень большой скоростью (до 1 Гбит/с и выше). Считается, что применение космических ОСС становится оправданным при скоростях передачи информации свыше 100 Мбит/с.

При связи между низколетящими и геостационарными спутниками возникает значительный сдвиг частоты света за счет эффекта Доплера, он достигает примерно ±700 МГц.

Наряду с этим связь в космосе открывает такие возможности, которых нет на Земле. Во-первых, благодаря отсутствию атмосферы возможно эффективное использование гетеродинных приемников. Во-вторых, при связи с высоколетящими спутниками освещенными Солнцем, а также при связи между геостационарными спутниками возможно использование Солнца в качестве источника оптической накачки лазеров передатчиков. В-третьих, в космическом пространстве благодаря отсутствию материальной среды свет распространяется с минимальным ослаблением, отсутствуют такие эффекты, как замирания, фазовые флуктуации, изменение направления распространения, изменение поляризации, дисперсия фазовой скорости и т. п., что значительно облегчает решение проблемы оптической связи.

В космических ОСС используются, как отмечалось, цифровые методы передачи информации с непосредственной модуляцией света по амплитуде, интенсивности либо поляризации. Возможно сочетание этих методов модуляции с целью увеличения скорости передачи в два раза.

При использовании амплитудной модуляции двоичные символы цифрового сигнала (нули и единицы) передаются обычно методом позиционно-импульсной модуляции (дискретной ФИМ) при котором каждому из них соответствует вполне определенное положение импульса внутри

тактового интервала. Если применяется поляризационная модуляция, то символам соответствуют два вида круговой поляризации: поляризация левого или правого вращения. В обоих случаях в каждом тактовом интервале передается только один бит информации. При сочетании этих двух видов модуляции в каждом тактовом интервале передается два бита информации, так как могут использоваться два разных положения импульса и два значения поляризации. Фактически это соответствует переходу от двоичного кода к коду с основанием четыре.

К аппаратуре космических ОСС предъявляются следующие основные требования: малые габаритные размеры и масса, высокая надежность, долговечность, невысокое энергопотребление, минимальное время вхождения в связь, передача цифровой информации с высокой скоростью и высокой достоверностью.

В связи с этими требованиями и требованиями по дальности связи в космических ОСС используются исключительно зеркальные антенны с асферическими зеркалами и апертурой большого размера (обычно 25 ... 35 см). При малых осевых размерах и массе они позволяют достичь чрезвычайно высокого коэффициента усиления. Однако дальнейшее увеличение размеров апертуры ограничивается чрезмерно высокими требованиями по точности наведения в процессе поиска и сопровождения. Уже при указанных выше размерах требуется точность не хуже ± 1 мкрад ≈ ± 0,2".

В качестве источников света используются твердотельные и газовые лазеры. Полупроводниковые лазеры не обеспечивают требуемой мощности излучения и имеют большую расходимость луча (низкую пространственную когерентность света на выходе).

Наиболее перспективным твердотельным лазером, удовлетворяющим перечисленным выше требованиям, считается лазер на алюмоиттриевом гранате с присадкой неодима (λ = 1,06 мкм без удвоения частоты и λ = 0,53 мкм — с удвоением), имеющий наиболее высокий КПД (1 — 2 %) среди твердотельных лазеров и обеспечивающий требуемую мощность излучения (единицы — десятки ватт и непрерывном режиме). Кроме того, лазер имеет небольшие габаритные размеры, большой срок службы и пригоден для накачки солнечным светом. Так как требуется осуществлять передачу информации с большой скоростью, то удобным оказывается режим синхронизации мод, при котором лазер генерирует периодическую последовательность импульсов. Экспериментально достигнута частота следования импульсов 0,5 ГГц. С помощью внешнего оптического модулятора эта последовательность модулируется по положению импульсов или по поляризации. При сочетании обоих видов модуляции скорость передачи информации составит 1 Гбит/с.

В силу относительно широкой полосы излучения и трудности высокоточной стабилизации частоты, твердотельные лазеры не могут использоваться в сочетании с гетеродинными приемниками. В аппаратуре космических ОСС с неодимовым лазером применяются приемники прямого

детектирования, в которых в качестве фотодетектора используется обычно ФЭУ. Важным достоинством приемника прямого детектирования является то, что он не чувствителен к сдвигу частоты сигнала за счет эффекта Доплера, который, как отмечалось, весьма значителен.

Из газовых лазеров наиболее подходящим для космических ОСС является лазер сверхвысокого давления на углекислом газе (λ = 10,6 мкм), имеющий небольшие габаритные размеры, высокий КПД (до 20 %), обеспечивающий требуемую мощность излучения и большой срок службы. При использовании более длинной волны света (10,6 мкм вместо 1,06 мкм или 0,53 мкм) существенно уменьшается коэффициент усиления антенны (при сохранении прежней апертуры), но зато приобретается преимущество — более слабая подверженность влиянию атмосферы при передаче по линии Земля — ИСЗ.

Модуляция света может в данном случае осуществляться как с помощью внешнего оптического модулятора, так и путем размещения управляющего элемента (например, электрооптического кристалла) внутри лазерного резонатора. При этом, как показали эксперименты, также достижима скорость передачи информации порядка 1 Гбит/с.

При использовании лазера на углекислом газе в аппаратуре космической ОСС может применяться приемник как прямого детектирования, так и гетеродинный. В обоих случаях в качестве фотодетектора применяется охлаждаемый фотодиод или фоторезистор из телурита кадмия ртути. Для охлаждения может использоваться микрокриогенное устройство на жидком азоте либо металлическая пластина, ориентированная на темную часть неба, защищенная от солнечного излучения.

Отметим преимущество использования гетеродинного приемника — эффективная фильтрация фонового излучения Солнца, Земли, планет, ярких звезд за счет пространственной и частотной избирательности. При использовании узкой диаграммы направленности антенны в режиме приема пространственная избирательность существенной роли не играет. Частотная же избирательность эквивалентна по действию использованию на входе оптического фильтра с полосой пропускания, равной полосе тракта промежуточной частоты гетеродинного приемника. Однако решающее значение во всех случаях имеет относительное ослабление шумов, обусловленных фоновым излучением при увеличении мощности излучения лазерного гетеродина. Благодаря этому гетеродинный приемник может успешно работать при прямом попадании солнечного излучения на его вход.

Большим недостатком является необходимость компенсации доплеровского сдвига частоты в гетеродинном приемнике. Ввиду значительных пределов изменения частоты, это приходится делать в два этапа в приемнике, что существенно усложняет его устройство.

Окончательный выбор типа лазера и типа оптического приемника должен производиться с учетом всех требований к космической ОСС и специфики ее использования совместно с другими средствами связи.

Наиболее сложной проблемой, возникающей при создании космических ОСС, является проблема автоматического установления связи между движущимися станциями, удаленными на десятки тысяч километров, и ее поддержания в течение длительного промежутка времени. Для этого в составе станций предусматривается комплекс специальных средств поиска, обнаружения и сопровождения.

Для выполнения этих операций в станции предусматривается грубое наведение антенны с помощью плоского зеркала в карданном подвесе, точное наведение с помощью систем зеркал, перемещаемых с помощью пьезоэлементов, на которые подаются управляющие напряжения, компенсация движения изображения передающей станции с помощью средств грубого и точного наведения и получение сигналов ошибок сопровождения (углового рассогласования), необходимых для работы следящей системы в режиме сопровождения.

Различают два основных способа получения сигналов углового рассогласования: в информационном канале (по информационному сигналу) и в отдельном канале наведения (по информационному сигналу или по сигналу лазерного маяка, работающего на другой длине волны света).

6.4 Атмосферная лазерная связь

Основная причина востребованности технологии беспроводной оптической связи заключается в огромном потенциале передавать большие объемы данных на высоких скоростях в инфракрасном диапазоне длин волн далеко за принятым диапазоном радиочастот (до 400 ГГц), существенно снижая таким образом административные издержки. Среди всемирно известных операторов и разработчиков телекоммуникационных сетей, принявших на вооружение беспроводную оптическую технологию - Sprint, Nextel, Verizon (в прошлом Bell Atlantic), Вымпелком, Motorola, Siemens [26].

Оптическая связь осуществляется путем передачи информации с помощью электромагнитных волн оптического диапазона. В 60-е годы XX века были созданы лазеры и появилась возможность построения широкополосных систем оптической связи. Первая атмосферная линии связи (АЛС) в Москве появилась в конце 60-х годов: была пущена телефонная линия между зданием МГУ на Ленинских горах и Зубовской площадью протяженностью более 5 км. Качество передаваемого сигнала полностью соответствовало нормам. В те же годы опыты с АЛС проводились в Ленинграде, Горьком, Тбилиси и Ереване. В целом, испытания были успешными, но на тот момент специалисты посчитали, что плохие погодные условия делают лазерную связь ненадёжной, и она была признана неперспективной. Использование сигналов с непрерывной (аналоговой) модуляцией, применявшейся в те годы, приводило к ненормированному затуханию оптического сигнала из-за влияния атмосферы.

Современное широкое распространение АЛС во многих странах мира началось в 1998 году, когда были созданы недорогие полупроводниковые лазеры мощностью в 100 мВт и более, а применение цифровой обработки сигнала позволило избежать ненормированного затухания сигнала и выполнять повторную передачу пакета информации при обнаружении ошибки.

Преимущества беспроводных линий связи очевидны: это экономичность (не требуется рыть траншеи для укладки кабеля и арендовать землю); низкие эксплуатационные расходы; высокая пропускная способность и качество цифровой связи; быстрое развертывание и изменение конфигурации сети; легкое преодоление препятствий - железных дорог, рек, гор и т.д. Беспроводная связь в радиодиапазоне ограничена перегруженностью и дефицитом частотного диапазона, недостаточной скрытностью, подверженностью помехам, в том числе и преднамеренным, и с соседних каналов, повышенным энергопотреблением. Кроме того, для радиосвязи необходимо длительное согласование и регистрация с назначением частот органами Госсвязьнадзора Республики Казахстан, арендная плата за канал, обязательная сертификация радиооборудования Государственной комиссией по радиочастотам. Применение лазерных средств снимает этот сложный вопрос. Это обусловлено тем, что, во-первых, частота излучения лазерных систем связи выходит за пределы диапазона, в котором необходимо согласование, во-вторых, отсутствием практических возможностей их обнаружения и идентификации как средств информационного обмена.

6.4.1 Основные свойства лазерных систем:

- практически абсолютная защищенность канала от несанкционированного доступа и, как следствие, высокий уровень помехоустойчивости и помехозащищенности за счет возможности концентрации всей энергии сигнала в углах от долей угловых минут (в лазерных космических системах связи) до десятков градусов (полнодоступные системы связи в помещениях);
- высокие информационные емкости каналов (до десятков Гбит/с);
- отсутствие ярко выраженных демаскирующих признаков (в основном, побочных электромагнитных излучений) и возможность дополнительной маскировки, позволяющей скрыть не только передаваемую информацию, но и сам факт информационного обмена.

Кроме того, многие специалисты отмечают биологическую безопасность этих систем, так как средняя плотность мощности излучения в лазерных системах различного назначения в несколько раз меньше облученности, создаваемой Солнцем, а также простоту принципов их построения и функционирования, относительно малую стоимость по сравнению с традиционными средствами передачи информации аналогичного назначения [27].

6.4.2 Выводы.

Итак, связь по лазерному лучу через атмосферу в настоящее время стала реальной. Она обеспечивает передачу большого количества информации с высокой надежностью на расстояниях до 5 км и наиболее просто и эффективно решает проблему «последней мили».

Системы АЛС могут использоваться не только на «последней миле» каналов связи, но также и в качестве вставок в волоконно-оптические линии на отдельных труднопроходимых участках; для связи в горных условиях, в аэропортах, между отдельными зданиями одной организации (органы управления, торговые центры, промышленные предприятия, университетские городки, больничные комплексы, стройплощадки и т. д.); при создании разнесенных в пространстве локальных компьютерных сетей; при организации связи между центрами коммутации и базовыми станциями сотовых сетей; для оперативной прокладки линии при ограниченном времени на монтаж.

В это же время возникла потребность в лазерной связи, так как стали стремительно развиваться информационные технологии. Резко увеличивается число абонентов, требующих предоставления таких телекоммуникационных услуг, как Интернет, IP-телефония, кабельное телевидение с большим числом каналов, компьютерные сети и т. д.

Поэтому в последнее время возрастает интерес к этому виду связи.

Контрольные вопросы:

1) Перечислите достоинства и недостатки оптического диапазона связи.
2) Как можно классифицировать оптические системы связи?
3) Какой спектр электромагнитного излучения считают оптическим?
4) Что Вы знаете об атмосферной лазерной связи?
5) Где применяется атмосферная лазерная связь?

ГЛАВА 7

7 Технические концепции построения систем БС

В этой главе описываются принципы и модели распространения радиоволн применительно к сотовым системам, персональным системам связи (PCS) и сухопутным подвижным системам радиосвязи общего пользования (PLMR). Для типичных сотовых и PCS систем непрямой видимости (NLOS) трасса случайного многолучевого распространения характеризуется тремя основными факторами — замираниями из-за многолучевости, экранированием и потерями на трассе. В главе обсуждаются причины и реальные значения доплеровского рассеяния (временных селективных замираний) и временного рассеяния (частотных селективных замираний). Описана физическая сущность нескольких математических моделей распространения и соответствующих средств моделирования (аппаратного и программного). Особо выделены основные инженерные концепции сотовых систем и принципы проектирования, учитывающие особенности распространения радиоволн и оптимизацию сети. Приведены конечные формулы для расчета максимальной протяженности зоны уверенного приема.

7.1 Распространение радиоволн при подвижной связи

Типовая модель сухопутной системы подвижной радиосвязи, например, PCS, или линии передачи сотовой системы, включает в себя высокоподнятую антенну (или несколько антенн) базовой станции и относительно короткий участок распространения по линии прямой видимости (LOS) [28].

Присутствуют также множество трасс с переотражением (т.е. непрямой видимости — NLOS) и одна или несколько подвижных антенн, установленных на автомобиле или (более общий случай) в приемопередатчике подвижной или носимой радиостанции. В большинстве случаев имеет место неполный участок распространения радиоволн в пределах прямой видимости между антенной базовой станции, или точкой доступа, и антеннами подвижных радиостанций из-за естественных и искусственных препятствий (см.рисунки 7.1 и 7.2). При таких условиях трасса радиопередачи может моделироваться как случайным образом изменяющаяся трасса распространения. В иллюстративном примере (см.рисунок 7.1) антенна базовой станции расположена на высоте 70 м, т.е. на крыше самого высокого здания. Прямая LOS трасса с распространением в свободном пространстве (does) пролегает между базовой антенной и первым зданием. Из-за его влияния на прямой трассе do вносится затухание. Расположенные в отдалении возвышенности отражают сигналы. Отраженные задержанные сигналы при приеме могут иметь мощность, сравнимую с мощностью ослабленных сигналов прямой трассы.

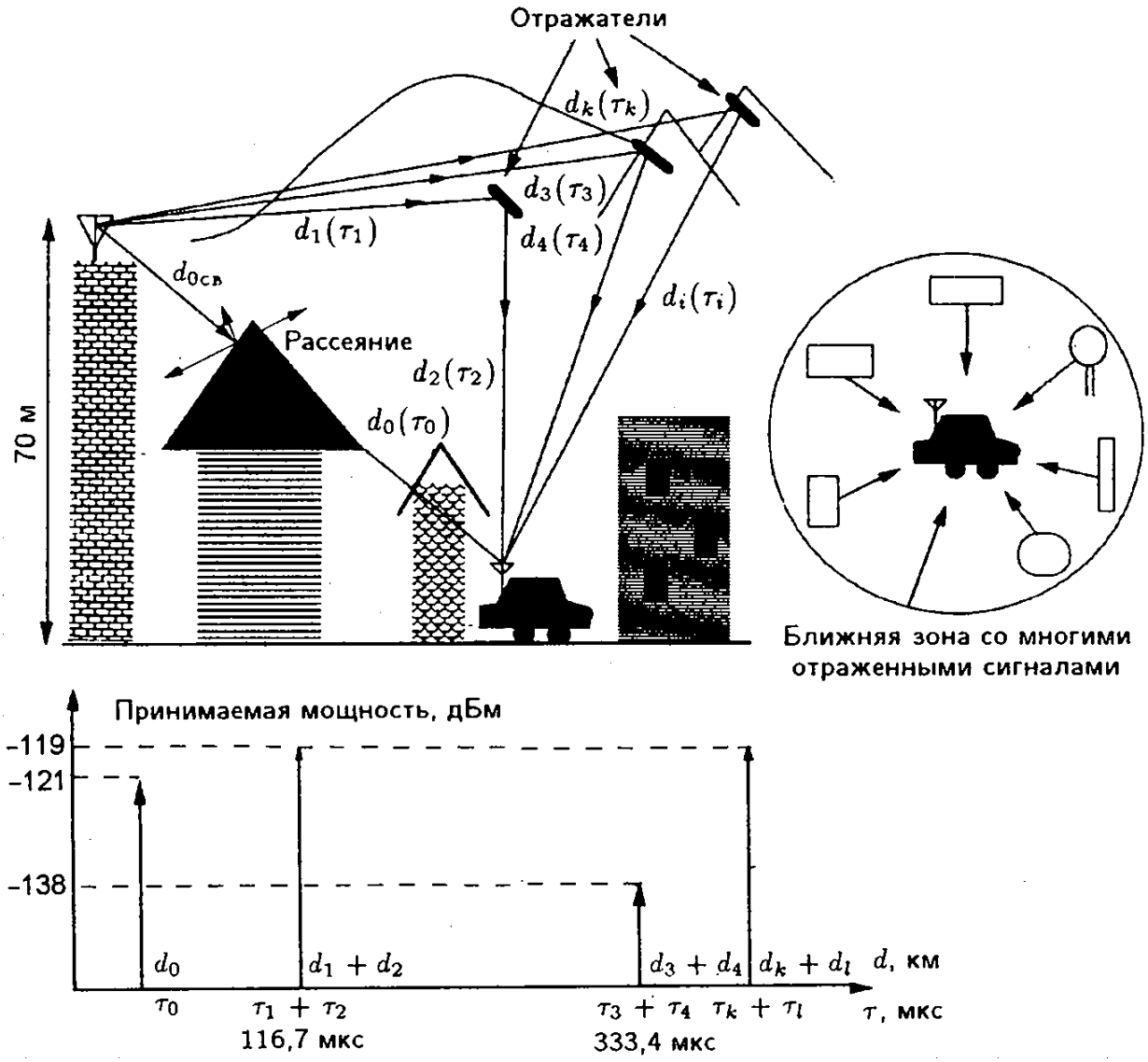


Рисунок 7.1- Среда распространения радиоволн для сухопутной подвижной системы радиосвязи прямой (LOS) и непрямой (NLOS) видимости

Во многих случаях может существовать более одного пути распространения радиоволн, и эта ситуация называется многолучевым распространением. Трасса распространения изменяется при перемещениях подвижного объекта, базового оборудования или движения окружающих предметов и среды. На рисунке 7.2 высота антенны базовой станции (точка доступа) примерно 3 м; высота антенны подвижной станции, расположенной на рабочем столе, около 1 м. Офисное помещение частично разделено перегородками. Центральная лаборатория, склад и производственная зона изолированы стенами и кое-где металлическими листами.

Даже малейшее, самое медленное перемещение приводит к изменению во времени условий многолучевого распространения и, как следствие, к изменению параметров принимаемого сигнала. Предположим, например, что

абонент сотовой системы находится в автомобиле на стоянке вблизи оживленной скоростной автострады.

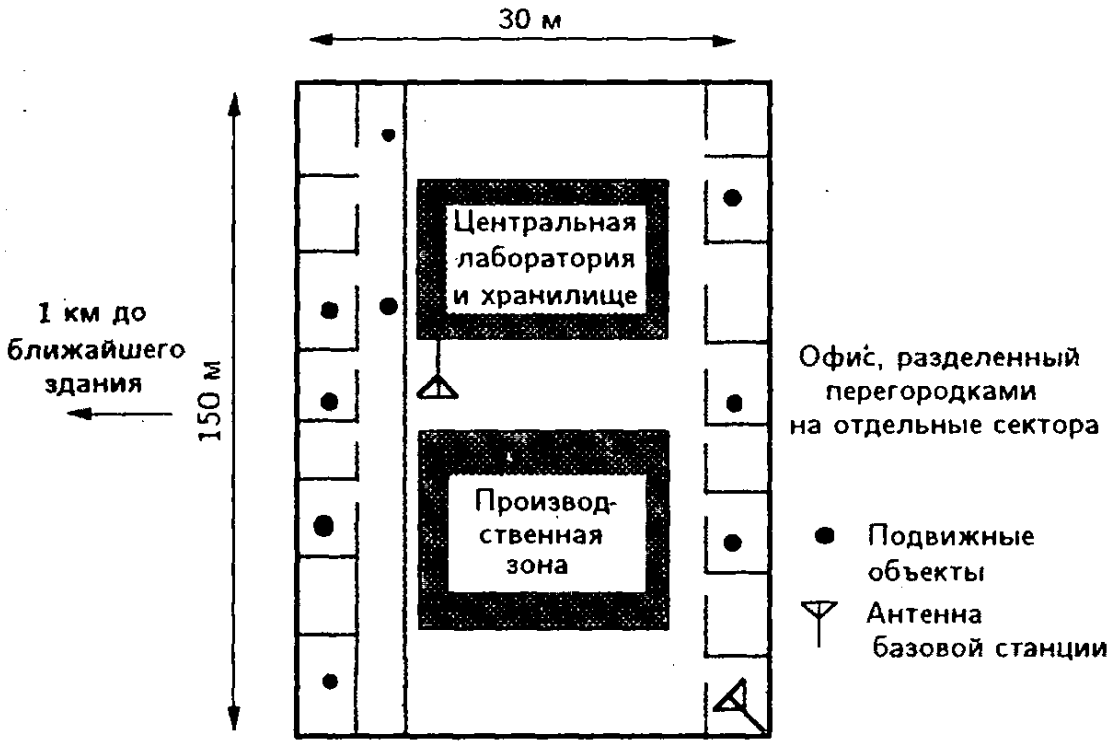


Рисунок 7.2 - Среда распространения внутри помещения для микроячейки с радиусом покрытия r=1км или наноячейки с покрытием 1м≤r≤50м

Хотя абонент относительно неподвижен, часть окружающей среды движется со скоростью 100 км/час. Автомобили на автостраде становятся «отражателями» радиосигналов. Если во время передачи или приема этот абонент также движется (например, со скоростью 100 км/час), то параметры случайным образом отраженных сигналов изменяются с большей скоростью. Скорость изменения уровня сигнала часто описывается доплеровским рассеянием.

Распространение радиоволн в подобных условиях характеризуется тремя, частично самостоятельными эффектами, известными как замирания из-за многолучевости распространения, затенение (или экранирование) и потери при распространении. Замирания из-за многолучевости описываются через замирания огибающей (не зависящие от частоты изменения амплитуды), доплеровское рассеяние (селективный во времени, или меняющийся во времени, случайный фазовый шум) и временное рассеяние (изменяющиеся во времени длины трасс распространения отраженных сигналов вызывают временные изменения самих сигналов). Временное рассеяние приводит к появлению частотно-селективных замираний. Указанные явления поясняются на рисунке 7.3 и рассматриваются далее.

Рисунок 7.3 - Явления замираний из-за многолучевости, затенения и потерь при распространении

7.1.1 Замирания огибающей.

Чтобы проиллюстрировать основные свойства замираний огибающей, обратимся к рисунку 7.4. Предполагается, что базовая станция передает сигнал $S_т(t)$ с ФМ и постоянной огибающей:

$$s_T(t) = Ae^{j[\omega t + \psi_s(t)]}, \qquad (7.1)$$

где A — константа;

ω — угловая радиочастота (РЧ);

$\psi_s(t)$ — модулирующий фазу или частоту сигнал-переносчик информации, известный так же, как сигнал полосы модулирующих частот.

Изменяющуюся во времени «среду распространения» p(t) можно представить как:

$$p(t) = r(t)e^{j\psi_r(t)}, \qquad (7.2)$$

где $r(t)$ —изменяющаяся во времени огибающая;

$\psi_r(t)$ — изменяющаяся во времени случайная фаза среды распространения.

Огибающая случайной среды распространения $r(t)$ может быть разделена на долговременную, или усредненную, составляющую замираний $m(t)$ и кратковременную составляющую, обусловленную быстрыми замираниями из-за многолучевости $r_0(t)$, что отражено формулой:

$$r(t) = m(t)r_0(t), \tag{7.3}$$

где $r_0(t)$ - имеет среднее значение, равное 1.

Рисунок 7.4 - Явление замираний – иллюстрация меняющейся во времени огибающей в канале с замираниями

Если и базовая станция, и подвижные объекты неподвижны, но окружающая среда перемещается (а это практически всегда так, поскольку даже малейшее и самое медленное перемещение приводит к изменяющимся во времени отражениям в системе NLOS), тогда можно воспользоваться

выражением (7.3), где время t — случайная переменная. Если подвижный объект движется со скоростью v, м/с или км/ч, то длина трассы распространения между базовой станцией и подвижным объектом равна

$$x=vt. \tag{7.4}$$

В этом случае мы можем записать выражение (7.3) как

$$r(x)=m(x)r_0(x). \tag{7.5}$$

Переданный сигнал $S_T(t)$ с постоянной огибающей умножается на меняющуюся во времени случайную «передаточную функцию» среды распространения $p(t)$. Таким образом, мы имеем мультипликативную модель замираний. Заметим, что мы используем аддитивные модели, например, модель аддитивного белого гауссова шума для стационарных каналов, которые встречаются в системах геостационарных спутников или в коаксиальных кабельных системах.

Когда приемник, передатчик или окружающая среда даже незначительно перемещаются, эффективное перемещение превышает несколько сотых длины волны. Например, в системах радиосвязи диапазона 2 ГГц длина волны

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3\cdot 10^8 \, м/с}{2\cdot 10^9 \, Гц} = 15 \quad \text{см.}$$

Таким образом, если приемник перемещается лишь на расстояние 1,5 см, он смещается на 1,5 / 15 = 0,1 длины волны. Перемещение на расстояние большее, чем несколько сотых длин волны, может вести к флюктуациям огибающей. Эту ситуацию иллюстрирует рисунок 7.4.

Огибающая принятого флюктуирующего сигнала имеет релеевское распределение, когда число падающих плоских волн со случайным направлением прихода достаточно велико и среди них отсутствует заведомо доминирующая составляющая трассы прямой видимости (LOS). Релеевское распределение является наиболее часто используемой функцией распределения для каналов сухопутных систем подвижной связи, включая наружные (вне помещений) сухопутные подвижные и внутренние (внутри зданий) применения радиосвязи. Множество экспериментальных результатов показывают, что релеевское распределение является достаточно точной математической моделью. Замирания 20 дБ или более глубокие по сравнению со среднеквадратическим значением огибающей сигнала случаются примерно в течение 1% времени; замирания 30 дБ или более - в течение 0,1% времени; 40 дБ или более - только в 0,01% времени. Вероятность появления, длительность и степень замирания огибающей оказывают значительное

влияние на характеристики как цифровых, так и аналоговых систем подвижной радиосвязи.

7.1.2 Доплеровское рассеяние: случайные изменения фазы и время когерентности.

Ранее было показано, что изменениям огибающей во времени вследствие случайных замираний сопутствуют случайные изменения фазы. Эти фазовые изменения вызывают появление шума из-за случайной частотной модуляции (ЧМ). Ширина спектра шума случайной ЧМ в полосе модулирующих частот равна приблизительно удвоенному максимальному доплеровскому рассеянию, или удвоенной максимальной доплеровской частоте.

Максимальная доплеровская частота

$$f_d = v / \lambda \tag{7.6}$$

и

$$\lambda = c / f \quad . \tag{7.7}$$

Таким образом,

$$f_d = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{c / f} = \frac{vf}{c} \qquad , \tag{7.8}$$

где c=3·10^8 м/с— скорость распространения света;

v — скорость перемещения подвижного объекта с учетом скорости перемещения окружающей среды, м/с;

λ — длина волны радиосигнала, м;

f — радиочастота, Гц.

Доплеровское рассеяние определяется как ширина спектра принятой несущей, когда через канал с многолучевым распространением передается единственная синусоидальная несущая. Если несущая передается на частоте f_o, то из-за доплеровского рассеяния f_d мы принимаем «размазанный» спектр сигнала со спектральными компонентами между частотами $f_o - f_d$ и $f_o + f_d$. Этот эффект, известный как селективные во времени замирания, можно интерпретировать как эффект временной декорреляции канала со случайными замираниями из-за многолучевого распространения радиоволн.

Время когерентности $C_т$ обычно определяется как интервал времени, в пределах которого коэффициент корреляции значений огибающей не менее 0,9. Этот параметр обратно пропорционален максимальной доплеровской частоте и определяется:

$$C_T = \frac{1}{f_d} \quad . \tag{7.9}$$

7.1.3 Временное рассеяние: физическая причина и общее представление.

Физическую причину временного рассеяния τ иллюстрирует рисунок 7.1. Сигнал на трассе распространения в пределах прямой видимости (LOS) d_o, имеющий время распространения τ_o, сильно ослаблен высокими зданиями. Предположим, что мощность ослабленного сигнала на трассе LOS равна 121 дБм. Подвижный объект принимает также переотраженные сигналы, проходящие трассу d_1+d_2, трассу $d_3 + d_4$, трассу $d_k + d_l$ и множество других трасс, не показанных на рисунке 7.1. Если предполагается, что мощность сигнала, принятого с трассы общей протяженностью d_1+d_2, равна —119 дБм, то имеем картину примерно равных сигналов с прямой трассы (трассы LOS с ослаблением) и с трассы LOS с переотражением. В этом иллюстративном примере, если d_1+d_2= 36 км и d_o = 1км, имеет место задержка на трассе, или временное рассеяние, равное

$$\tau = \frac{d_1 - d_2 - d_0}{c} = \frac{36км - 1км}{3 \cdot 10^8 м/с} = 116{,}7 \text{ мкс.}$$

К числу наиболее часто используемых технических характеристик реальных систем относятся среднеквадратическое значение временного рассеяния, а также максимальное значение временного рассеяния.

Эффект временного рассеяния проявляется в наличии частотно-селективных замираний. Этот эффект может приводить к сильным искажениям формы демодулированного сигнала и накладывать ограничения на такую характеристику высокоскоростных цифровых систем радиосвязи, как вероятность ошибок на бит (BER).

Ширина полосы когерентности $C_в$ —это разнос частот, в пределах которого коэффициент корреляции значений огибающей не менее 0,9. Этот параметр обратно пропорционален среднеквадратическому значению (*rms*) временного рассеяния и определяется как

$$C_B = \frac{1}{\tau_{rms}} \quad . \tag{7.10}$$

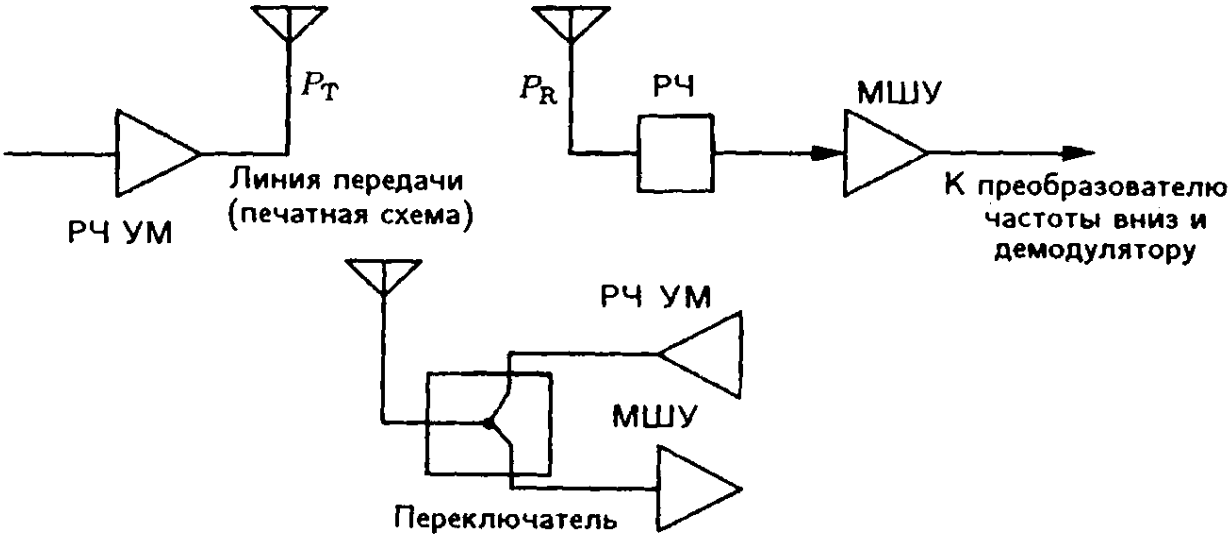
7.1.4 Затенение и потери при распространении.

Ранее показано, что замирания на трассе можно разделить на долго-временные, или усредненные, замирания и кратковременные, или быстрые, замирания из-за многолучевости. После того как быстрые замирания из-за многолучевости устраняются усреднением на интервале нескольких сотен длин волн, остается еще неселективное затенение. Причиной затенения являются в основном особенности рельефа местности вдоль трассы распространения радиосигналов сухопутных подвижных систем. Это явление вызывает медленные изменения средних значений параметров релеевских замираний. Хотя для затенения не имеется подходящей математической

модели, распределением, наилучшим образом соответствующим экспериментальным данным в типичном городском районе, признано лог-нормальное распределение с дисперсией от 5 до 12 дБ. Потери при распространении — это среднее значение лог-нормального затенения, которое называется также средним по зоне (area average).

7.2 Основы усиления антенн для подвижных объектов

Чтобы облегчить понимание сути расчетов энергетических потерь при распространении радиоволн на трассах прямой (LOS) и непрямой видимости (NLOS), мощности принятого сигнала и бюджета линии, представим основы



усиления всенаправленной и направленной антенн для подвижных объектов.
Рисунок 7.5 - Элементы приемопередатчика: передающий радиочастотный усилитель мощности (УМ), передающая антенна, приемная антенна, секция РЧ и малошумящий усилитель (МШУ); переключатель служит для обеспечения резервирования или режима разнесенного приема

Предположим, что передающий РЧ усилитель отдает $P_т$ Вт мощности изотропной передающей антенне, как показано на рисунках 7.5 и 7.6. Плотность излучаемой мощности ρ, Вт/м2, или исходящий поток электромагнитной энергии, измеренный на расстоянии r от антенны, определяется формулой:

$$\rho = \frac{P_T}{4\pi r^2} . \qquad (7.11)$$

Направленная антенна концентрирует излучаемую мощность в определенном направлении. Направленность такой антенны определяется, как

$$D = \frac{\text{Плотность мощности на расстоянии r в направлении максимального излучения}}{\text{Средняя плотность мощности на расстоянии r}}. \qquad (7.12)$$

Чтобы пользоваться таким определением направленности антенны, необходимо знать мощность, фактически излучаемую антенной. Эта мощность отличается от мощности в соответствующих точках передатчика и приемника из-за потерь в самой антенне.

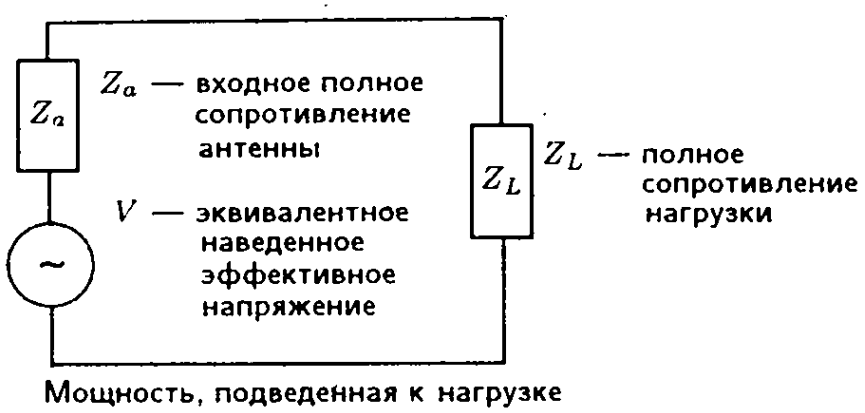


Рисунок 7.6 - Эквивалентная схема антенны

Приемная антенна с эффективной апертурой A и на расстоянии r от всенаправленной передающей антенны принимает мощность P_R, Вт, определяемую выражением:

$$P_R = \rho A = \frac{P_T A}{4\pi r^2}. \qquad (7.13)$$

Коэффициент усиления антенны G связан с апертурой антенны и длиной волны λ, м, радиосигнала

$$G = 4\pi A/\lambda^2, \qquad (7.14)$$

где

$$\lambda = c/f. \qquad (7.15)$$

У идеальных всенаправленных антенн $G = 1$; следовательно, из (7.14) имеем:

$$A=\lambda^2/4\pi. \quad (7.16)$$

7.3 Характеристики распространения радиоволн

7.3.1 Формула для потерь при распространении в свободном пространстве.

Из (7.11)-(7.16) можно получить формулу для расчета потерь передачи в свободном пространстве (или потерь при распространении) для всенаправленных передающей и приемной антенн с единичным коэффициентом усиления (G = 1), расположенных друг от друга на расстоянии r метров. Эта формула имеет вид

$$\frac{P_R}{P_T}=\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2=\left(\frac{c}{4\pi r f}\right)^2. \quad (7.17)$$

Для двух антенн, разнесенных друг от друга на r метров, с коэффициентом усиления передающей антенны

$$G_T=4\pi A/\lambda^2 \quad (7.18)$$

и коэффициентом усиления приемной антенны

$$G_R=4\pi A/\lambda^2, \quad (7.19)$$

формула для потерь при распространении в свободном пространстве принимает следующий вид:

$$\frac{P_R}{P_T}=G_T G_R\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2. \quad (7.20)$$

Из (7.20) получаем выражение для потерь при распространении (L_f, дБ):

$$L_f=10\lg\frac{P_R}{P_T}=10\lg G_T+10\lg G_R+10\lg\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2=$$

$$=10\lg G_T+10\lg G_R+20\lg\left(\frac{c/f}{4\pi r}\right), \quad (7.21)$$

$$L_f\left[\partial Б\right]=10\lg G_T+10\lg G_R-20\lg f-20\lg r+147.56\,\text{дБ}. \quad (7.22)$$

Для изотропных передающей и приемной антенн с коэффициентами усиления, равными 1 (т.е. для идеальных всенаправленных антенн), и при отсутствии препятствий в пределах прямой видимости (LOS) основные потери передачи рассчитываются по формуле:

$$L_в\,[\text{дБ}]=+27{,}56-20\lg f\,[\text{МГц}]-20\lg r\,[\text{м}]. \quad (7.23)$$

или по формуле:

$$L_{\text{В}}\ [\text{дБ}]=-32{,}44-20\lg f\ [\text{МГц}]-20\lg r\ [\text{км}]. \qquad (7.24)$$

Из этих соотношений для основных потерь при распространении в пределах прямой видимости (LOS) следует, что принимаемая мощность уменьшается (относительно переданной мощности) на 6 дБ при каждом удвоении расстояния и при каждом удвоении значения радиочастоты.

Из (7.11) видно, что единицей измерения излучаемой мощности является ватт на метр в квадрате (Вт/м2). Обычно переданная и принимаемая мощности выражаются в ваттах (Вт) или децибелах относительно 1 мВт (дБмВт или дБм), тогда как потери при распространении — в децибелах (дБ). Определим соотношения и коэффициенты пересчета для этих часто используемых единиц.

Предположим, что используется одно- или двухвибраторная приемная антенна. Наведенное напряжение V, В/м связано с напряженностью поля E следующим образом:

$$V = \frac{E\lambda}{\pi}\ . \qquad (7.25)$$

Максимальная мощность P_R, Вт/м^2, подводимая к полному сопротивлению нагрузки R_L, в системе с согласованным выходом равна

$$P_R = \frac{V^2}{4R_L}\ . \qquad (7.26)$$

Предполагается, что эквивалентное наведенное антенной напряжение равно V. Входное полное сопротивление антенны Z_a равно полному сопротивлению нагрузки Z_L, а R_L — активное сопротивление нагрузки Z_L, как показано на рисунке 7.6. Таким образом, принимаемая мощность может быть выражена в ваттах на метр в квадрате.

Из вышеприведенных выражений можно получить

$$P_R = \frac{V^2}{4R_L} = \frac{(E\lambda/\pi)^2}{4R_L} = \frac{E^2\lambda^2}{4\pi^2 R_L}\ . \qquad (7.27)$$

Определим мощность P_R, выраженную в децибелах относительно 1 Вт

$$P_R[\text{дБВт}] = 10\lg E^2\left[\text{В}^2\right] + 10\lg\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2[\text{дБ}] + 10\lg\frac{1}{4R_L}R_L\left[\frac{1}{\text{Ом}}\right].$$

Для стандартного сопротивления нагрузки R_L=50 Ом имеем$10 \lg[1/(4 \cdot R_L)] = -23$ дБ;
таким образом:

$$P_R \text{ [дБм]} = 10\lg E^2 \text{[мкВ}^2\text{]} - 10\lg(10^6)^2 + 10\lg(\lambda/\pi)^2 - 23 \text{ дБ}.$$

Формула для мощности P_R, выраженной в децибелах относительно мощности 1 мВт, имеет вид:

$$P_R \text{ [дБм]} = 10 \text{ Ig} E^2 \text{ [мкВ}^2\text{]} + 10 \text{ Ig } 1000 - 10 \lg(10^6)^2 + 10 \lg(\lambda/\pi)^2 - 23 \text{ дБ};$$

$$P_R \text{ [дБм]} = E\text{[дБм]} - 113\text{дБм} + 10 \lg(\lambda/\pi)^2 \quad . \qquad (7.28)$$

Или, переходя к радиочастоте f с помощью соотношения $\lambda = c/f$, получаем:

$$P_R\text{[дБм]} = E\text{[дБм]} - 113\text{дБм} + 10 \lg (3 \cdot 10^8/f\pi)^2 ;$$
$$P_R\text{[дБм]} = E\text{[дБм]} + 46{,}6 \text{ дБм} - 20 \lg f \text{ [Гц]};$$
$$P_R\text{[дБм]} = E\text{[дБм]} + 46{,}6 \text{ дБм} - 120 \text{ дБ} - 20\lg f \text{ [МГц]};$$

$$P_R\text{[дБм]} = \text{E[дБм]} - 73{,}4 - 20 \lg f. \qquad (7.29)$$

Пример: Найдем соотношение между измеренной напряженностью поля при приеме, выраженной в децибелах относительно 1 мкВ, и принимаемой мощностью, выраженной в децибелах относительно 1 мВт, для системы беспроводной связи, работающей на радиочастоте f = 1,9 ГГц.

Решение примера: Из формулы (37) имеем:

$$P_R \text{ [дБм]} = \text{E [дБм]} - 73{,}4 - 20 \text{ Ig f [МГц]} =$$
$$E \text{ [дБм]} - 73{,}4 - 65{,}57 = E \text{ [дБм]} - 139 \text{ дБ}. \qquad (7.30)$$

7.3.2 Потери при распространении для систем непрямой видимости (NLOS) и прямой видимости (LOS).

Большинство сухопутных сотовых систем подвижной связи и систем PCS работают в условиях распространения радиоволн при отсутствии прямой видимости (NLOS), как это показано на рисунках 7.1 и 7.2. Из (7.24) следует, что при работе в пределах прямой видимости (LOS) принимаемая мощность уменьшается по закону $1/r^2$ по мере увеличения расстояния r между антеннами. Другими словами, средние потери при распространении растут пропорционально степени n расстояния. Показатель степени n для систем

прямой видимости при отсутствии препятствий на трассе распространения радиоволн равен 2 ($n = 2$).

На основании экспериментальных данных была разработана и используется большинством инженеров достаточно общая модель для оценки потерь при распространении радиоволн при отсутствии прямой видимости. Эта модель описывается следующим выражением:

$$L(d) \sim L_B(d/d_o)^{-n} \qquad (7.31)$$

и показывает, что средние потери при распространении (L) возрастают пропорционально некоторой степени расстояния. В формуле символ ~ означает - пропорционально, а также использованы следующие обозначения:

n — показатель степени, $3{,}5 \le n \le 5$;

d — расстояние между передающей и приемной антеннами;

d_o — эталонное расстояние или длина отрезка трассы до первого препятствия (участок распространения в свободном пространстве);

L_B — потери при распространении на трассе LOS для d_o, м, (формулы (7.23) и (7.24));

L — суммарные потери (потери при распространении) комбинированной трассы, состоящей из участков NLOS и LOS.

Показатель степени n указывает, насколько быстро возрастают потери при распространении с увеличением расстояния.

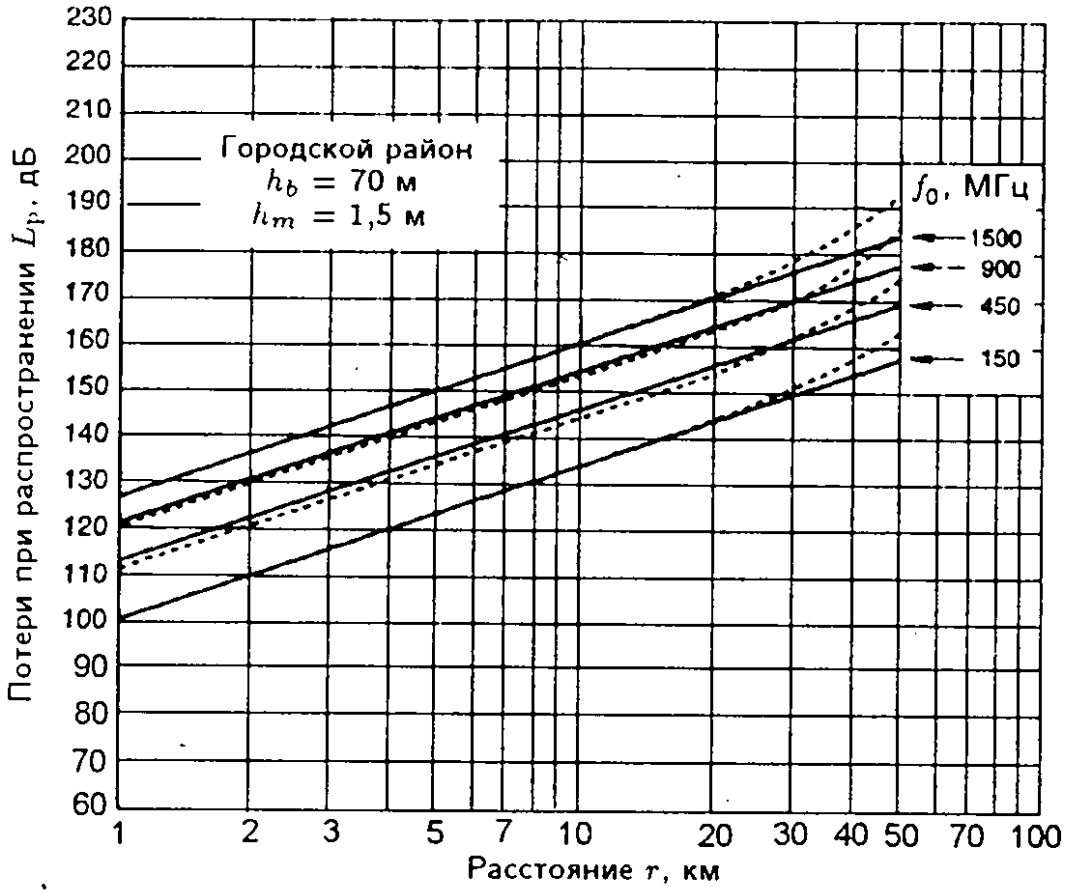
Эталонное расстояние d_o предполагает, что в пределах него, т.е. между антенной и точкой d_o, имеет место распространение радиосигнала (беспрепятственное) в свободном пространстве. На практике значения d_o (длины отрезка трассы, где имеет место распространение в свободном пространстве) внутри зданий обычно лежат в диапазоне 1...3 м.

Абсолютные средние потери при распространении $L(d)$, выраженные в децибелах, определяются как потери при распространении от передатчика до точки на эталонном расстоянии $L(d_o)$ плюс дополнительные потери при распространении, описываемые выражением (7.31). Таким образом,

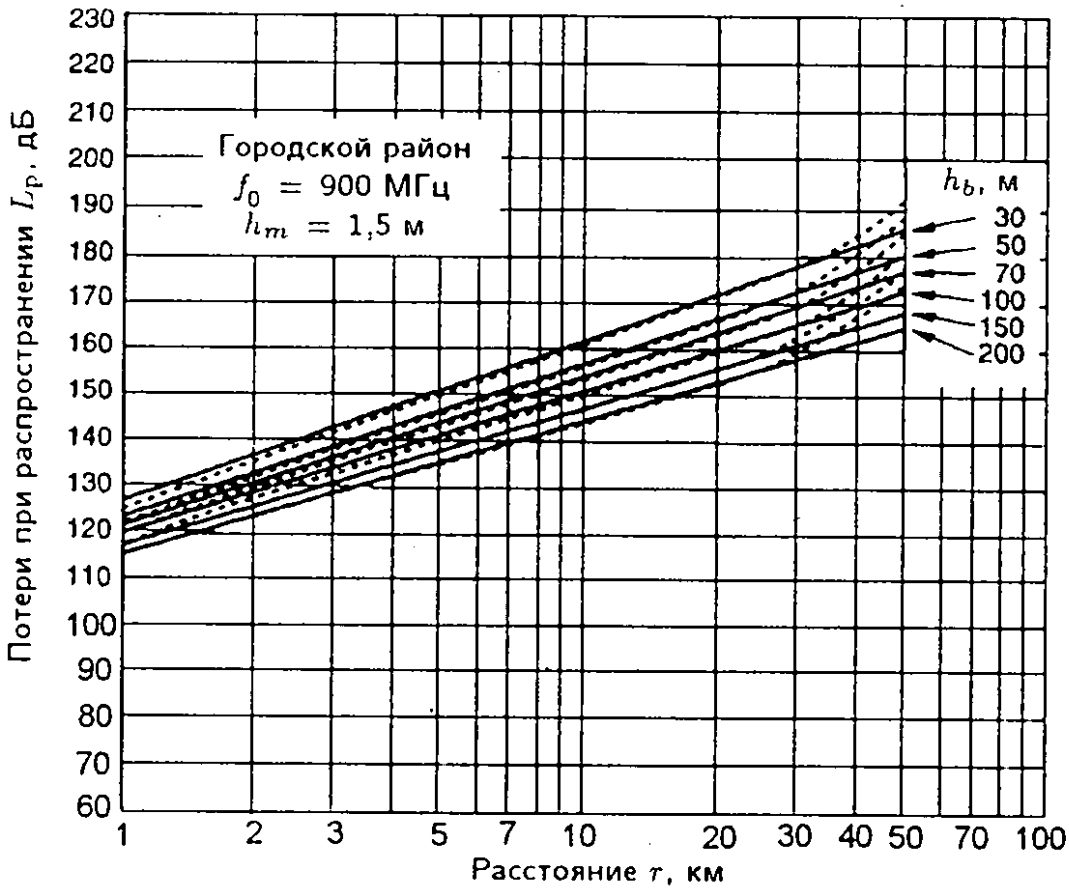
$$L(d)=L(d_o) - 10n \lg (d/d_o). \qquad (7.32)$$

Экспериментальные результаты (см.рисунок 7.7) показывают, что для типичных сотовых систем подвижной связи вне зданий при отсутствии прямой видимости (NLOS) $3{,}5 \le n \le 5$, а для связи внутри зданий $2 \le n \le 4$.

Рисунок 7.8 иллюстрирует дополнительные экспериментальные результаты, касающиеся средних потерь при распространении на частотах 900 и 1,75 ГГц.



а)



б)

Рисунок 7.7 - Потери при распространении

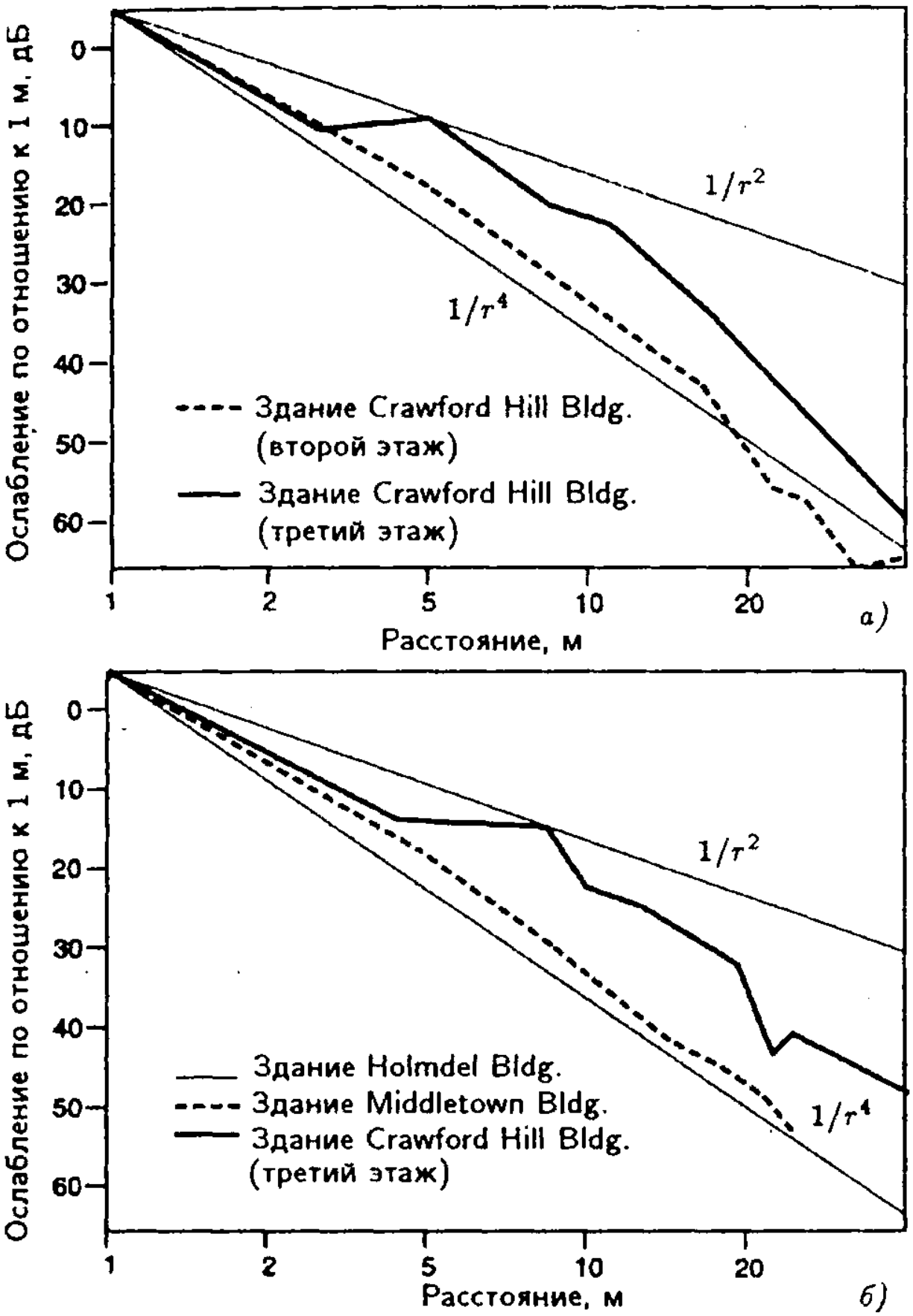


Рисунок 7.8 - Измерения ослабления из-за распространения на частотах 900 МГц (а) и 1,8 ГГц (б) для подвижной PCS в радиусе действия от 1 до 30 м

7.3.2.1 Максимальная зона обслуживания ($d_{\max}$)

Формула для дальности связи, или максимального расстояния, на котором может осуществляться обслуживание при распространении радиоволн в свободном пространстве в пределах прямой видимости, выводится из соотношения (7.19):

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 . \qquad (7.33)$$

В этом случае мы полагаем, что

$$P_R = Pr_{\min} .$$

Представляет собой минимальную мощность несущей, которая приводит к приемлемому, или «пороговому», значению вероятности ошибки на бит. Для речевой связи в качестве «приемлемой, или пороговой, характеристики» часто принимается BER = $3 \cdot 10^{-2}$ при передаче без кодирования и предварительной обработки. Из формулы (7.32) заключаем, что для систем радиосвязи прямой видимости (LOS):

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{P_T G_T G_R}{P_{R\min}}} \frac{\lambda}{4\pi} = \sqrt{\frac{P_T G_T G_R}{P_{R\min}}} \frac{c}{f} \frac{1}{4\pi} , \qquad (7.34)$$

где $d_{\max}$ выражено в метрах.

Для более общих условий распространения при отсутствии прямой видимости (NLOS) предположим, что имеется эталонное расстояние, или «тупиковая» дистанция, для которой характерно распространение в свободном пространстве между антенной передатчика и ближайшими препятствиями. Как показано на рисунке 7.1, радиоволны проходят начальный участок d_0 в условиях прямой видимости (LOS), а далее радиоволны рассеиваются и распространяются в условиях NLOS.

Максимальное расстояние, или дальность связи, для комбинированной LOS и NLOS радиотрассы получается из равенства:

$$P_R = P_T G_T G_R L_{TOT} , \qquad (7.35)$$

где L_{TOT} — потери при распространении для комбинированной трассы LOS и NLOS.

$$L_{TOT} = L_{d0} L_{NLOS} , \qquad (7.36)$$

причем $L_{ТОТ}$ имеет две составляющие потерь: на участке прямой видимости (Ld_0 или $Ld_{осв}$) и на участке NLOS (L_{NLOS}). Потери на участке прямой видимости обозначаются как Ld_0, чтобы указать на то, что радиоволны распространяются в условиях LOS только на расстояние d_o, остальная же часть расстояния d приходится на распространение в условиях NLOS. Обычно $d - d_o \approx d$, так как d_o много меньше, чем d. Из предыдущих формул имеем:

$$L_{TOT}(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2 \times \left(\frac{d_0}{d}\right)^n . \qquad (7.37)$$

Отметим, что эта формула практически совпадает с формулой (7.31). Здесь обозначения несколько изменены, чтобы получить более удобную формулу для дальности связи.

Выражение для дальности связи (максимального расстояния d_{max}) выводится следующим образом:

$$P_R = P_T G_T G_R L_d , \qquad (7.38)$$

$$L_d = L(d_0)L(NLOS) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2 \left(\frac{d_0}{d}\right)^n , \qquad (7.39)$$

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2 \left(\frac{d_0}{d}\right)^n , \qquad (7.40)$$

$$d^n = \left[\frac{P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2}{P_R}\right] d_0^n , \qquad (7.41)$$

$$d = \left[\frac{P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2}{P_R}\right]^{1/n} d_0 . \qquad (7.42)$$

7.3.2.2 Определение коэффициента усиления системы (G_S).

Коэффициент усиления системы является полезным показателем для оценки характеристик системы, так как объединяет много параметров, представляющих интерес для проектировщиков систем радиосвязи. В простейшей форме, применимой только к аппаратуре, коэффициент усиления

системы — это разность между выходной мощностью передатчика и пороговой чувствительностью приемника. Пороговая чувствительность приемника — это минимальная принимаемая мощность, необходимая для достижения приемлемого уровня характеристик таких, как максимальное значение вероятности ошибки на бит (BER). Коэффициент усиления системы должен превышать или, по крайней мере, быть равным сумме коэффициентов усиления и внешних по отношению к аппаратуре потерь. Математически это выражается следующим образом:

$$G_S = P_T - C_{\min} \geq F_M + |L_P| + |L_F| + |L_B| - G_T - G_R, \qquad (7.43)$$

где G_S — коэффициент усиления системы, дБ;

P_T — выходная мощность передатчика с учетом потерь в антенном ответвителе и других потерь антенного соединения, дБм;

$C_{\min} = Pr_{\min}$ — принимаемая мощность несущей, дБ для минимального значения показателя качества приема.

Обычно $C_{\min}$, дБм определяется для максимального значения BER. Для линий телефонной связи подвижных систем согласно нескольким стандартам в качестве порогового принимается BER = $3 \cdot 10^{-2}$. Для каналов передачи данных в таких системах в качестве порогового может быть BER = 10^{-6}. $C_{\min}$ называют также пороговой чувствительностью; $Pr_{\min} = C_{\min}$, как определено выше; L_p — потери при распространении между изотропными излучателями в пределах прямой или в свободном пространстве :

$$L_p = -92{,}4 - 20\lg d - 20\lg f, \qquad (7.44)$$

где d – длина трассы, км;

f - несущая частота, ГГц;

L_F - потери в антенном фидере;

L_B - потери за счет ответвления, т.е. полные потери фильтра и циркулятора, когда передатчики и приемники подсоединяются к одной линии;

G_T, G_R - коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника по отношению к изотропному излучателю (хотя коэффициент усиления антенны зависит от частоты, для простоты обычно имеются в виду значения, соответствующие центральной частоте диапазона, которые сообщаются в каталогах изготовителей);

F_M - запас на замирания на радиолинии в системе без разнесения, требуемый для обеспечения показателя надежности связи, дБ.

Выражение (7.44) аналогично (7.23) и (7.24), но здесь радиочастота определяется в гигагерцах.

7.3.2.3 Эмпирическая формула для потерь при распространении.

Для прогнозирования средних потерь при распространении используются эмпирические модели, основанные на всесторонних натурных

измерениях. Трасса пролегает от антенны базовой станции до антенны подвижного объекта. Экспериментальные кривые для потерь при распространении получаются измерением уровня мощности принятого сигнала (радиочастотной несущей) и вычитанием из мощности переданного сигнала. Например, если мы имеем всенаправленные антенны с коэффициентами усиления, равными 1, передаваемая мощность равна + 30 дБм и в некотором месте принимаемая мощность несущей P_R = - 105 дБм, тогда потери при распространении

$$L_p = P_T - P_R = +30 \text{ дБм} - (-105 \text{ дБм}) = 135 \text{ дБм}. \qquad (7.45)$$

Поскольку P_T и P_R выражены в одних и тех же единицах, то потери L_p могут быть выражены в децибелах.

Многочисленные измерения, выполненные Окомурой (Okomura), позволили получить эмпирическую формулу для средних потерь при распространении L_p, дБ, в случае изотропных (идеальных всенаправленных), имеющих коэффициенты усиления, равные 1, антенн базовой станции и подвижного объекта. Эта формула, известная так же, как метод прогнозирования Окомуры, имеет следующий вид:

$$Lp = \begin{cases} A+B\lg(r) & \text{для городской зоны,} \\ A+B\lg(r) - C & \text{для пригородной зоны,} \\ A+B\lg(r) - D & \text{для открытой местности,} \end{cases} \qquad (7.46)$$

где r – расстояние между антеннами базовой и подвижной станции, км.

Радиочастота несущей f_o, МГц, высота антенны базовой станции h_b, м, и высота антенны подвижной станции h_m, м; величины A, B, C и D выражаются соответственно следующим образом:

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 69.55 + 26.16 \cdot \log(f_0) - 13.82 \cdot \log(h_b) - a(h_m),$$
$$B = B(h_b) = 44.9 - 6.55 \cdot \log(h_b), \qquad (7.47)$$
$$C = C(f_0) = 2 \cdot \left[\log\left(\frac{f_0}{28}\right)\right]^2 + 5.4,$$
$$D = D(f_0) = 4.78 \cdot [\log(f_0)]^2 - 19.33 \cdot \log(f_0) + 40.94,$$

где $a(h_m)=[1,1\cdot\lg(f_0)-0,7]\cdot h_m-[1,56\cdot\lg(f_0)-0,8]$ – для средних и малых городов;

$a(h_m)=3,2[\lg(11,75\cdot h_m)]^2 - 4,97$ – для крупных городов.

Формулой (55) можно пользоваться, если выполняются следующие условия:

– fo: от 150 до 1500 МГц;

– h_b: от 30 до 200 м; возможно расширение диапазона (от 1,5 до 400 м);

– h_m: от 1 до 10 м;

– r: от 1 до 20 км; возможно расширение диапазона (от 2м до 80 км).

На рисунке 7.7 показаны потери при распространении *Lp*, дБ, в городской зоне, причем частота несущей fo и высота антенны базовой станции h_b являются переменными параметрами. Результаты, представленные сплошными линиями, получены с помощью эмпирической формулы, а пунктирными линиями — методом прогнозирования Окомуры. Эти числовые результаты показывают, что максимальная ошибка составляет только около 1 дБ в диапазоне расстояний от 1 до 20 км. Результаты экспериментальных измерений затухания при распространении радиоволн для PCS с небольшой зоной обслуживания (в диапазоне от 1 до 30 м), полученные на основе данных AT&T, иллюстрируются на рисунке 7.8. Сравнение экспериментальных данных с расчетами по (7.46) и (7.47) показывает, что эти формулы могут также использоваться для систем, работающих на расстоянии до 3 м.

7.4 Модель радиосигналов с замираниями, обусловленными многолучевым распространением

Ранее описаны основные понятия и дано физическое представление распространения радиоволн на трассах подвижной связи прямой и непрямой видимости. Здесь приводится математическая модель передачи немодулированной синусоидальной несущей по множеству случайных трасс распространения между стационарной базовой станцией и движущимся приемником. Такая теоретическая модель полезна для последующего анализа распределений огибающей замирающей несущей (уровня сигнала), частоты выбросов сигнала и длительности замираний. Эти параметры и их представления требуются при рассмотрении некоторых аспектов проектирования линий и систем связи (таких как выбор методов исправления ошибок и доступа). Например, длительность замираний и частота выбросов позволяют установить связь между вероятностью ошибки на бит (BER) и вероятностью ошибок в слове (WER).

В предположении, что скорость движения v подвижного объекта достаточно мала по сравнению с произведением центральной частоты несущей f_o на длину волны несущей λ, т.е. $v << f_o \cdot \lambda$, принимаемая замирающая несущая *c(t)* может быть представлена, как:

$$c(t) = \sum_{n=1}^{N} c_n(t) = \mathrm{Re}\left[\sum_{n=1}^{N} z_n(t) e^{j 2\pi f_0 t} \right], \qquad (7.48)$$

где $C_n(t)$ — элементарная волна;

Re[*] — действительная часть [·],

$z_n(t)$ — комплексная случайная функция, модулирующая $c(t)$, порождаемая случайными изменениями параметров трасс распространения из-за движения подвижного объекта.

При условии, что N достаточно велико и что все $|\ z_n(t)\ |$ равны, согласно центральной предельной теореме, функция может быть представлена как узкополосный гауссовский процесс:

$$c(t) = \mathrm{Re}\left[\bar{z}(t)e^{j2\pi f_0 t}\right], \qquad (7.49)$$

где $z(t)$ — комплексный стационарный гауссовский низкочастотный случайный процесс, обладающий следующими свойствами:

$$\begin{aligned} &\left\langle \bar{z}(t)\right\rangle = 0 \\ &\frac{1}{2}\left\langle \bar{z}(t)z^*(t-\tau)\right\rangle = \psi_z(\tau) \\ &\frac{1}{2}\left\langle z(t)z(t-\tau)\right\rangle = 0 \end{aligned} \quad . \qquad (7.50)$$

В выражении $\psi_z(\tau)$ — автокорреляционная функция $z(t)$, которая определяется выражением:

$$\psi_z(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} W_z(f)e^{j2\pi f\tau}df, \qquad (7.51)$$

где $W_z(f)$ — спектральная плотность процесса $z^*(t)$;

(•)* — комплексно-сопряженная величина.

В типичной рассматриваемой радиосистеме подвижный объект имеет антенну с всенаправленной диаграммой направленности в горизонтальной плоскости, а угол прихода каждой элементарной волны имеет равномерное распределение. Спектральная плотность задающей немодулированной несущей показана на рисунке 7.9.

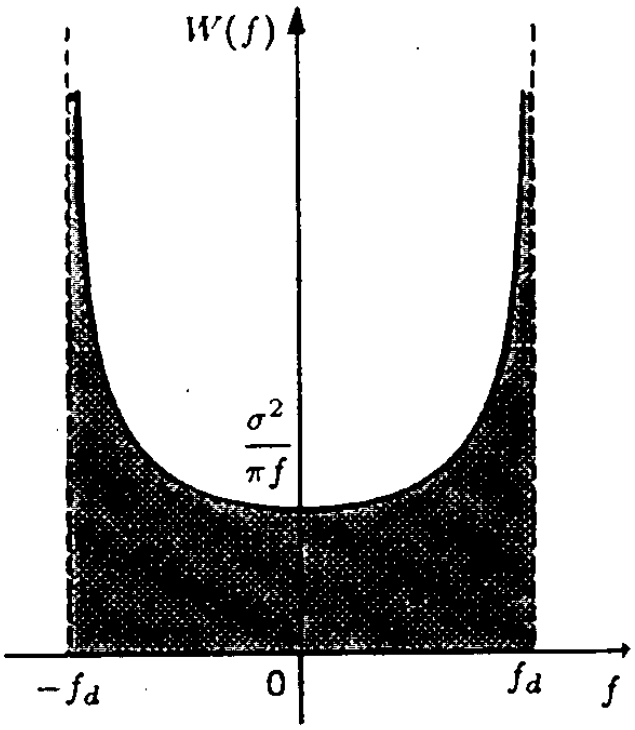


Рисунок 7.9 - Теоретическая спектральная плотность задающего синусоидального колебания (немодулированной несущей)

Таким образом, получаем выражение для $\psi_z(\tau)$:

$$\psi_Z(\tau) = \sigma^2 J_0(2\pi f_D \tau), \qquad (7.52)$$

где $J_0(\bullet)$ - функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$f_D = v/\lambda$ - максимальная доплеровская частота.

Для сухопутных систем подвижной радиосвязи имеют место несколько типов спектральной плотности замирающих сигналов, основу которых составляют полученные выше.

Из полученных соотношений следует, что замирания из-за многолучевости могут рассматриваться как мультипликативный комплексный стационарный гауссовский процесс, который характеризуется функциями $W_z(f)$ и $\psi_z(\tau)$. Это фундаментальное свойство используется при разработке имитаторов замираний при проектировании систем связи с подвижными объектами.

Контрольные вопросы:

1) Что такое «преломление», «замирание», «интерференция» электромагнитных волн?

2) В чем разница между дифракцией и рассеиванием?

3) В чем разница между быстрыми и медленными замираниями волн?

4) В чем разница между селективным и амплитудным замиранием?

5) Написать основные формулы потерь при распространении систем LOS и NLOS видимости.

ГЛАВА 8

8 Системы с расширением спектра

8.1 Преимущества расширения спектра

Термин «расширение спектра» был использован в многочисленных военных и коммерческих системах связи. В системах с расширенным спектром каждый сигнал-переносчик сообщений требует значительно более широкой полосы радиочастот по сравнению с обычным модулированным сигналом. Более широкая полоса частот позволяет получить некоторые полезные свойства и характеристики, которые трудно достичь другими средствами. Расширение спектра представляет собой метод формирования сигнала с расширенным спектром с помощью дополнительной ступени модуляции, обеспечивающей не только расширение спектра сигнала, но и ослабление его влияния на другие сигналы. Дополнительная модуляция никак не связана с передаваемым сообщением. Широкополосные системы находят применение благодаря следующим потенциальным преимуществам:

а) повышенной помехоустойчивости;

б) возможности обеспечения кодового разделения каналов для многостанционного доступа на его основе в системах, использующих технологию CDMA;

в) энергетической скрытности благодаря низкому уровню спектральной плотности;

г) высокой разрешающей способности при измерениях расстояния;

д) защищенности связи;

ж) способности противостоять воздействию преднамеренных помех;

и) повышенной пропускной способности и спектральной эффективности в некоторых сотовых системах персональной связи;

к) постепенному снижению качества связи при увеличении числа пользователей, одновременно занимающих один и тот же ВЧ канал;

л) низкой стоимости при реализации;

м) наличию современной элементной базы (интегральных микросхем).

В соответствии с архитектурой и используемыми видами модуляции системы с расширенным спектром могут быть разделены на следующие основные группы:

1) Системы с прямым расширением спектра на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП), включая системы МДКРК.

2) Системы с перестройкой рабочей частоты (с «прыгающей» частотой), включая системы МДКРК с медленной и быстрой перестройкой рабочей частоты.

3) Системы множественного доступа с расширенным спектром и контролем несущей (CSMA).

4) Системы с перестройкой временного положения сигналов.

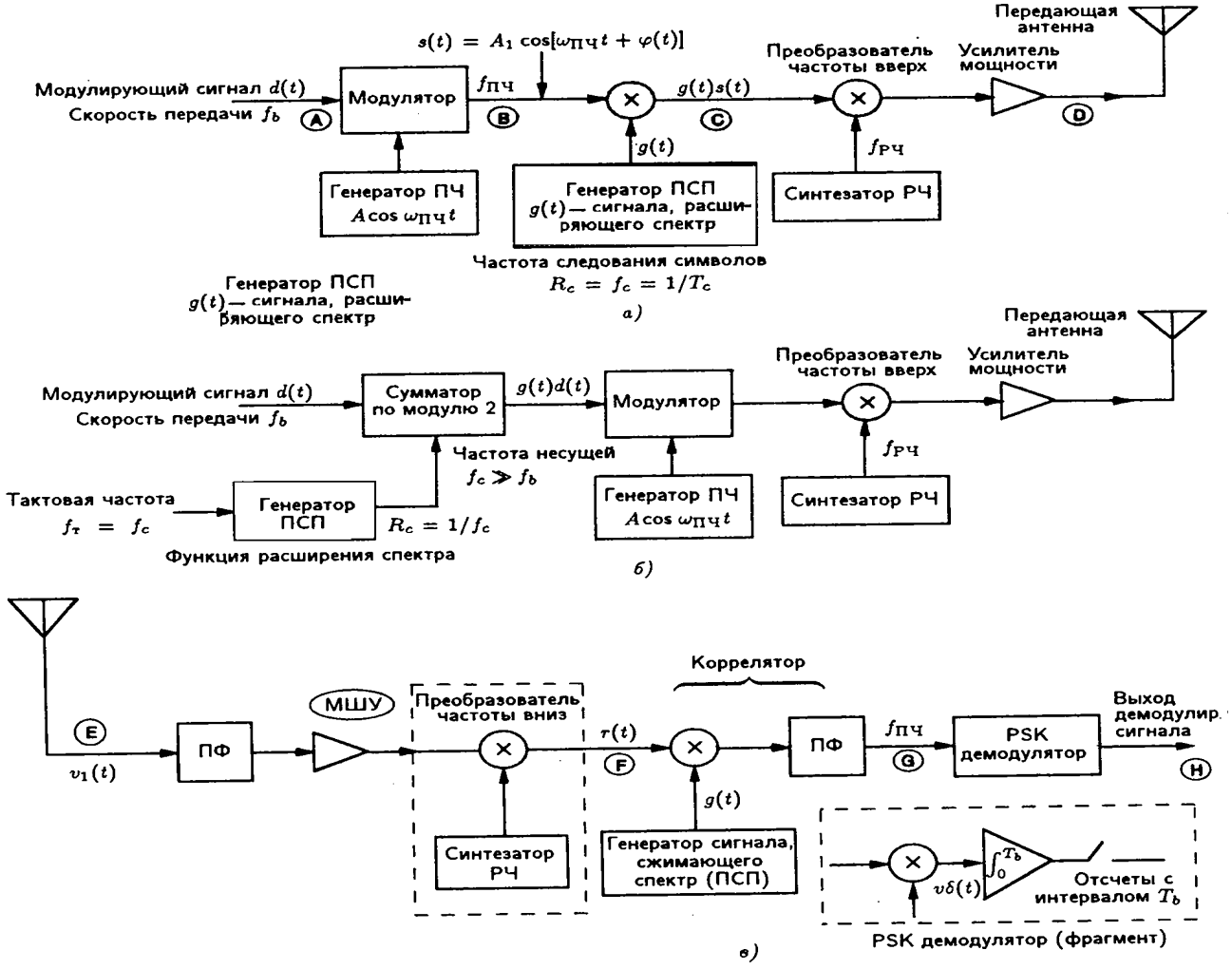
5) Системы с линейной частотной модуляцией сигналов (chip modulation).

6) Системы со смешанными методами расширения спектра.

В подвижных системах радиосвязи применяются методы прямого расширения спектра, перестройки рабочей частоты и расширения спектра с контролем несущей. Эти методы рассматриваются далее более подробно [29].

8.2 Основные концепции систем с расширенным спектром

8.2.1 Прямое расширение спектра с помощью псевдослучайных последовательностей.



а - передатчик сигналов с PSK и с последующим расширением спектра, б - передатчик с расширением спектра в полосе модулирующих частот, в – приемник.

Рисунок 8.1- Структурная схема системы с прямым расширением спектра

$$s(t) = \sqrt{2P_S}\, d(t) \cos \omega_{ПЧ} t\,, \qquad (8.1)$$

где *d(t)* — нефильтрованный двухуровневый сигнал, имеющий два состояния: +1 и -1;

$\omega_{пч}$ — промежуточная частота;

P_s — мощность сигнала.

В качестве сигнала расширения спектра g(t) используется сигнал псевдослучайной последовательности (ПСП) с частотой следования символов $f_o = 1/T_c$ [30].

В результате повторной модуляции формируется PSK сигнал с расширенным спектром

$$v(t) = g(t)s(t)\sqrt{2P_S}\, g(t)d(t)\cos \omega_0 t\ . \qquad (8.2)$$

Этот сигнал промежуточной частоты затем переносится вверх на необходимую частоту с помощью синтезатора радиочастоты (РЧ). Здесь ω_0 обозначает либо промежуточную $\omega_{пч}$, либо радиочастоту $\omega_{рч}$.

В пределах одной соты системы подвижной радиосвязи, как правило, есть несколько абонентов, одновременно пользующихся связью, причем каждый из них использует одну и ту же несущую частоту $f_{рч}$ и занимает одну и ту же полосу частот $B_{рч}$.

Процесс формирования сигналов с расширенным спектром в системах с многостанционным доступом происходит в два этапа: модуляция и расширение спектра (или вторичная модуляция посредством псевдослучайной последовательности). Вторичная модуляция осуществляется с помощью идеальной операции перемножения *g(t)s(t)*. При таком перемножении формируется амплитудно-модулированный двухполосный сигнал с подавленной несущей. Первый и второй модуляторы можно поменять местами без изменения потенциальных характеристик системы.

Сигнал *g(t)s(t)* с расширенным спектром преобразуется вверх до нужной радиочастоты. Хотя преобразование частоты вверх и вниз является для большинства систем практически необходимым процессом, все же этот этап не является определяющим. Поэтому в дальнейшем будем считать, что сигнал *g(t)s(t)* передается и принимается на промежуточной частоте, исключив из рассмотрения подсистемы преобразования частот вверх и вниз.

Таким образом, на вход приемника поступает сумма M независимых сигналов с расширенным спектром, занимающих одну и ту же полосу РЧ:

$$r(t) = \sum_{i=1}^{M} g_i(t)s_i(t) + I(t) + n(t)\,, \qquad (8.3)$$

где M — число одновременно передающих (активных) пользователей;

$g_i(t)$ — ПСП i-й пары передатчик-приемник;

$s_i(t)$ — модулированный сигнал;

I(t) — помеха (преднамеренная или собственная);

n(t) — АБГШ.

В приемнике пользователя, которому предназначено сообщение,

имеется синхронизированный во времени сигнал *gi(t)*, обеспечивающий сжатие спектра и представляющий точную копию сигнала ПСП соответствующего передатчика. Полученный после сжатия спектра узкополосный PSK сигнал демодулируется. Для изучения основ построения систем с расширенным спектром допустим, что используется двоичная фазовая модуляция.

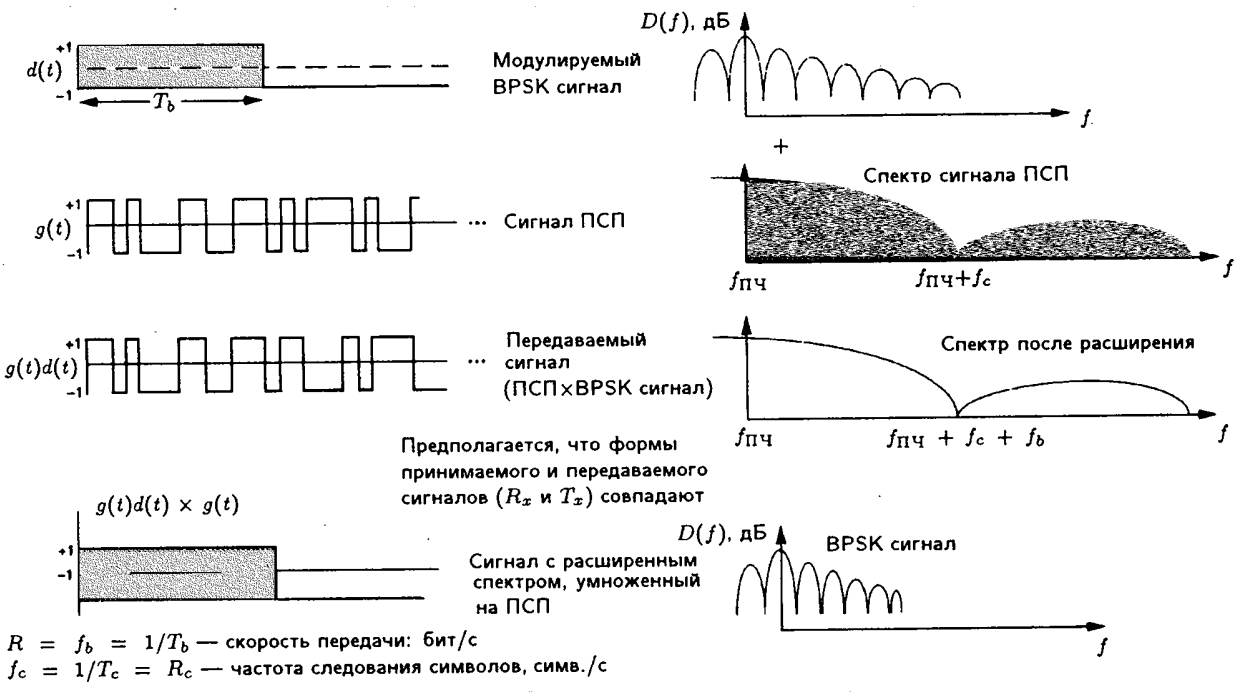


Рисунок 8.2 - Временные и спектральные диаграммы при расширении спектра

Если выбран ансамбль некоррелированных сигналов ПСП, то после операции сжатия спектра сохраняется лишь модулированный полезный сигнал. Все другие сигналы, являясь некоррелированными, сохраняют широкополосность и имеют ширину спектра, превышающую граничную полосу пропускания фильтра демодулятора. На рисунках 8.1 и 8.2 приведены упрощенные временные и спектральные диаграммы, качественно иллюстрирующие процессы расширения и сжатия спектра сигналов. В частности, в них отсутствует сигнал несущей.

Выигрыш при корреляционной обработке *G*p или просто выигрыш при обработке – это коэффициент, показывающий, во сколько раз отношение сигнал/шум *(S/N)* или отношение сигнал/помеха *(S/I*) на выходе увеличивается по сравнению с аналогичными величинами на входе. Например, если *(S/N)вх* или *(S/I)вх* в точке F на рисунке 8.1, в равно 5 дБ, а после сжатия спектра полезного сигнала с помощью согласованного с ним сигнала опорной ПСП отношение *(S/N)вых* в точке *G* оказывается равным 27 дБ, то выигрыш при обработке равен 22 дБ.

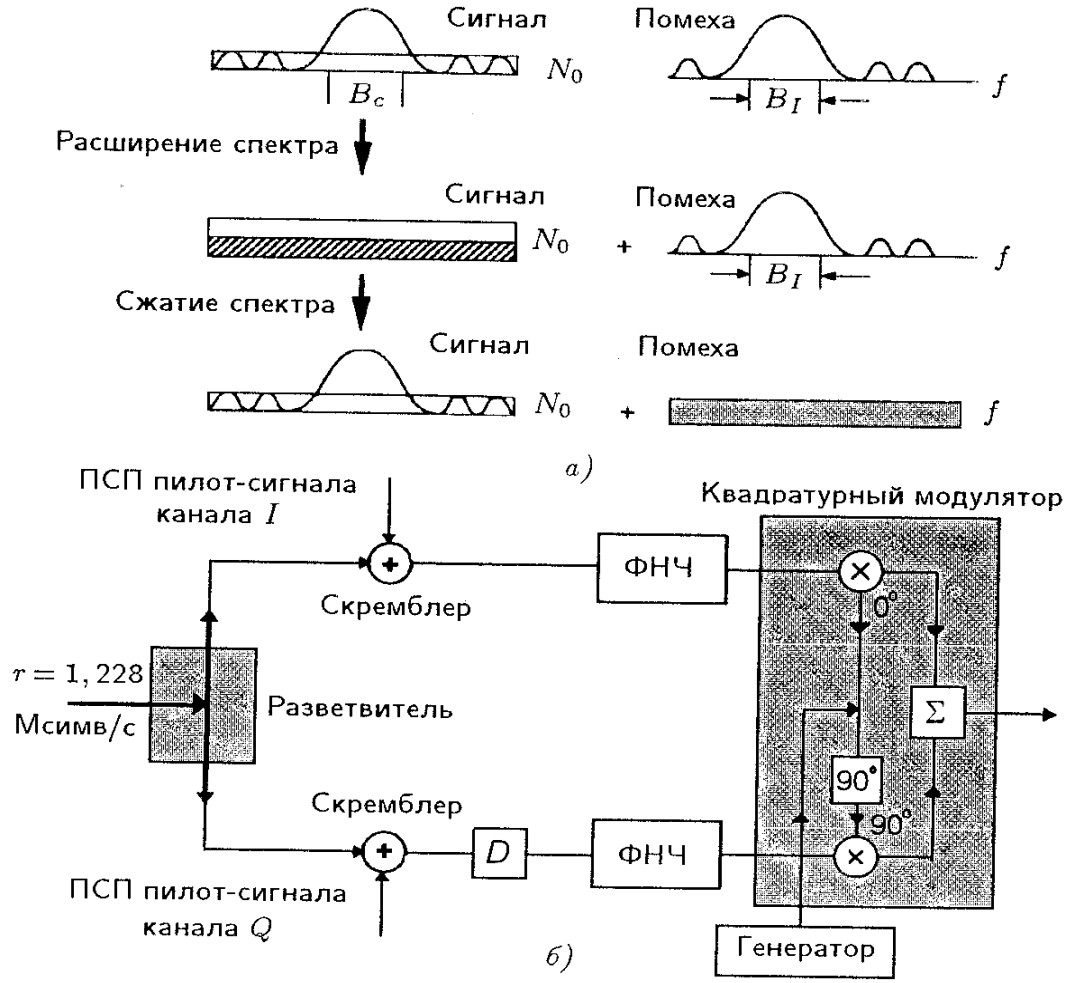


Рисунок 8.3 - Иллюстрация процесса расширения и сжатия спектра

Таким образом, выигрыш при обработке G_p может быть определен следующим образом:

$$G_p = (S/N)_{вых}/(S/N)_{вх}\,. \tag{8.4}$$

Имеющийся выигрыш при обработке часто оценивают с помощью соотношения

$$G_p = \frac{BW_{РЧ}}{BW_{МОД}} = \frac{BW_{РЧ}}{R_{ИНФ}} = \frac{BW_{РЧ}}{f_b}, \tag{8.5}$$

где $BW_{рч}$ — ширина РЧ полосы;

$BW_{мод}$ — ширина полосы модулирующего сигнала.

Ширина полосы модулирующего сигнала равна $R_{инф} = f_b$, т.е. скорости передачи модулирующего сигнала, если его спектральная эффективность равна 1 бит/(с·Гц).

Коэффициент помехозащищенности M_j учитывает требуемое значение отношения сигнал/шум $(S/N)_{вых}$ и возможные энергетические потери при реализации системы ($L_{сист}$) и определяется следующим образом:

$$M_j = G_p - [L_{сист} + (S/N)_0]. \tag{8.6}$$

Пример. Пусть в системе МДКРК с прямым расширением спектра скорость передачи данных f_b = 10 кбит/с, а частота следования двоичных символов ПСП, используемой для расширения спектра, равна f_o = 10 Мбит/с. Определим коэффициент помехозащищенности M_j, если необходимое отношение, сигнал/шум $(S/N)_{вых}$ на выходе при вероятности ошибки P_b = 10-6 равно 12 дБ.

Согласно (8.5) выигрыш при обработке

$$G_p = \frac{BW_{РЧ}}{R_{ИНФ}} = \frac{20\,\text{МГц}}{10\,\text{кбит/с}} = 2000 \text{ или } 33\,\text{дБ}.$$

Здесь ширина РЧ полосы определялась по первым нулям спектра BPSK сигнала, поэтому при частоте следования двоичных символов f_o = 10 Мбит/с она равна 20 МГц. Такое упрощенное определение ширины РЧ полосы часто используется при анализе простых систем с расширенным спектром. Если энергетические потери при реализации системы, обусловленные неидеальностью процессов формирования, слежения и демодуляции сигналов принять равным $L_{сист}$ = 2 дБ, то коэффициент помехозащищенности:

$$M_j = G_p - \left[L_{сист} + (S/N)_0\right] = 33\,\text{дБ} - \left[2\,\text{дБ} + 12\,\text{дБ}\right] = 19\,\text{дБ}.$$

8.2.2 Расширение спектра путем программной перестройки частоты.

Концепция систем с расширенным спектром путем программной перестройки рабочей частоты во многом схожа с концепцией систем с прямым расширением спектра. Структурные схемы передающей и приемной частей системы изображены на рисунке 8.4. Здесь генератор двоичной ПСП управляет синтезатором частот, с помощью которого осуществляется переход («перескок») с одной частоты на другую из множества доступных частот. Таким образом, здесь эффект расширения спектра достигается за счет псевдослучайной перестройки частоты несущей, значение которой выбирается из имеющихся частот f_1,..., f_N, где N может достигать значений несколько тысяч и более. Если скорость перестройки сообщений (скорость смены частот) превышает скорость передачи сообщений, то имеем систему с быстрой перестройкой частоты. Если скорость перестройки меньше скорости передачи сообщений, так что в интервале перестройки передается несколько битов, то имеем систему с медленной перестройкой частоты [31].

Если Δf — частотный интервал между соседними дискретными частотами и N — общее количество имеющихся частот, т.е. частотных каналов, то выигрыш при обработке в системе с перестройкой частоты:

$$G_p = \frac{BW_{РЧ}}{BW_{ИНФ}} = \frac{N\Delta f}{\Delta f} = N. \qquad (8.7)$$

В наиболее часто используемых методах расширения спектра (с прямым расширением или с перестройкой частоты) необходимо иметь ПСП, с

помощью которых решаются задачи расширения/сжатия спектра и синхронизация. Различные виды ПСП и их свойства рассматриваются далее.

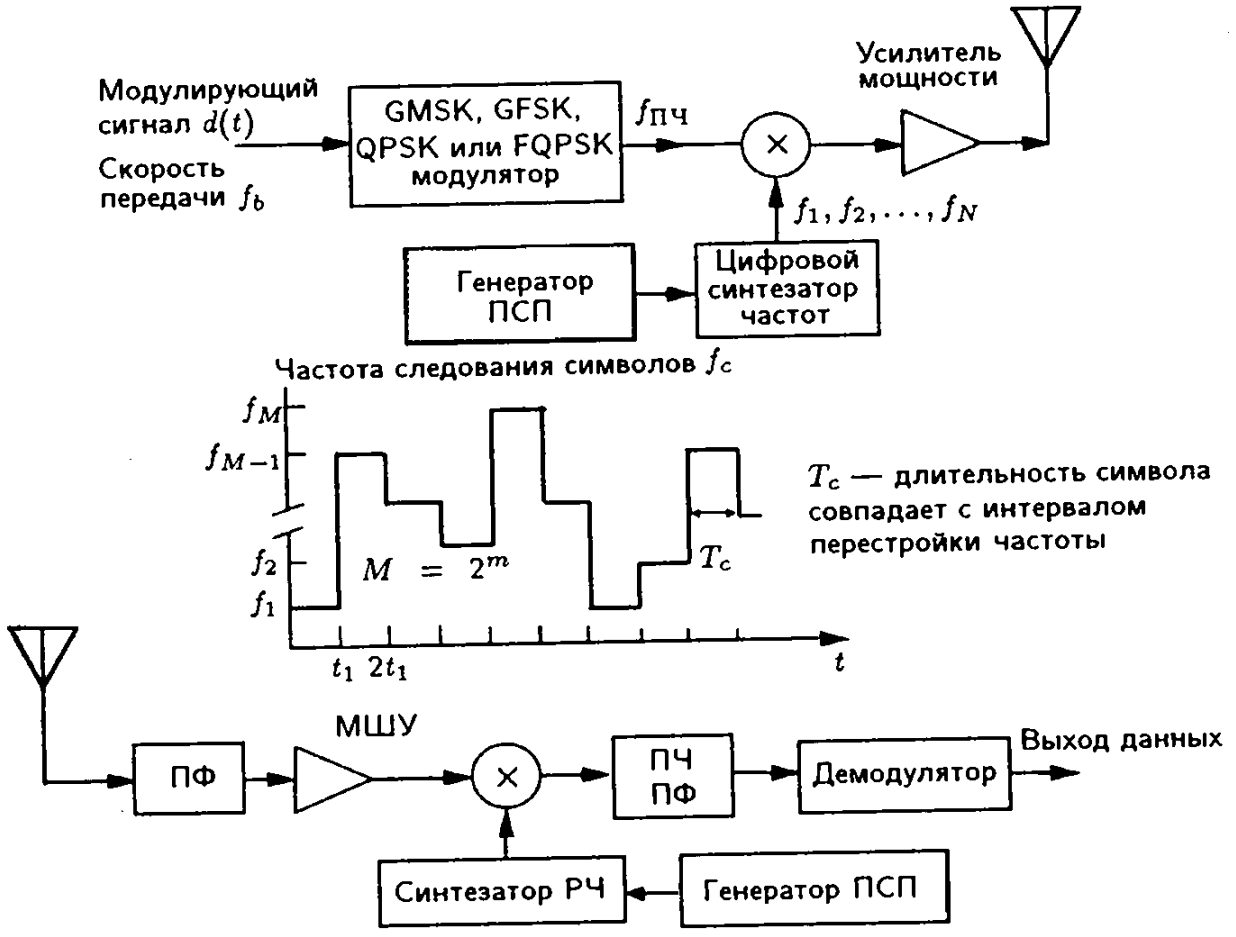


Рисунок 8.4-Структурные схемы передатчика и приемника системы с расширением спектра путем перестройки частоты

8.3 Псевдослучайные последовательности

8.3.1 Определения и системные требования.

В цифровых или персональных системах радиосвязи, использующих МДКРК и расширение спектра, с помощью псевдослучайных последовательностей решаются следующие основные задачи:

а) Расширение спектра модулированного сигнала с целью увеличения ширины полосы частот при передаче.

б) Разделение сигналов различных пользователей, использующих при передаче одну и ту же полосу в режиме многостанционного доступа.

Для решения указанных задач последовательности должны обладать специальными корреляционными свойствами.

Автокорреляционная функция $R_a(\tau)$ в общем виде определяется интегралом:

$$R_a(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) f(t-\tau) d\tau \quad . \tag{8.8}$$

Она является мерой соответствия между сигналом $f(t)$ и его копией, сдвинутой во времени на τ.

Взаимокорреляционная функция $R_{вз}(\tau)$ является мерой соответствия двух различных сигналов $f(t)$ и $g(t)$ при их сдвиге во времени на τ и определяется интегралом

$$R_{ВЗ}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g(t-\tau) d\tau \quad . \tag{8.9}$$

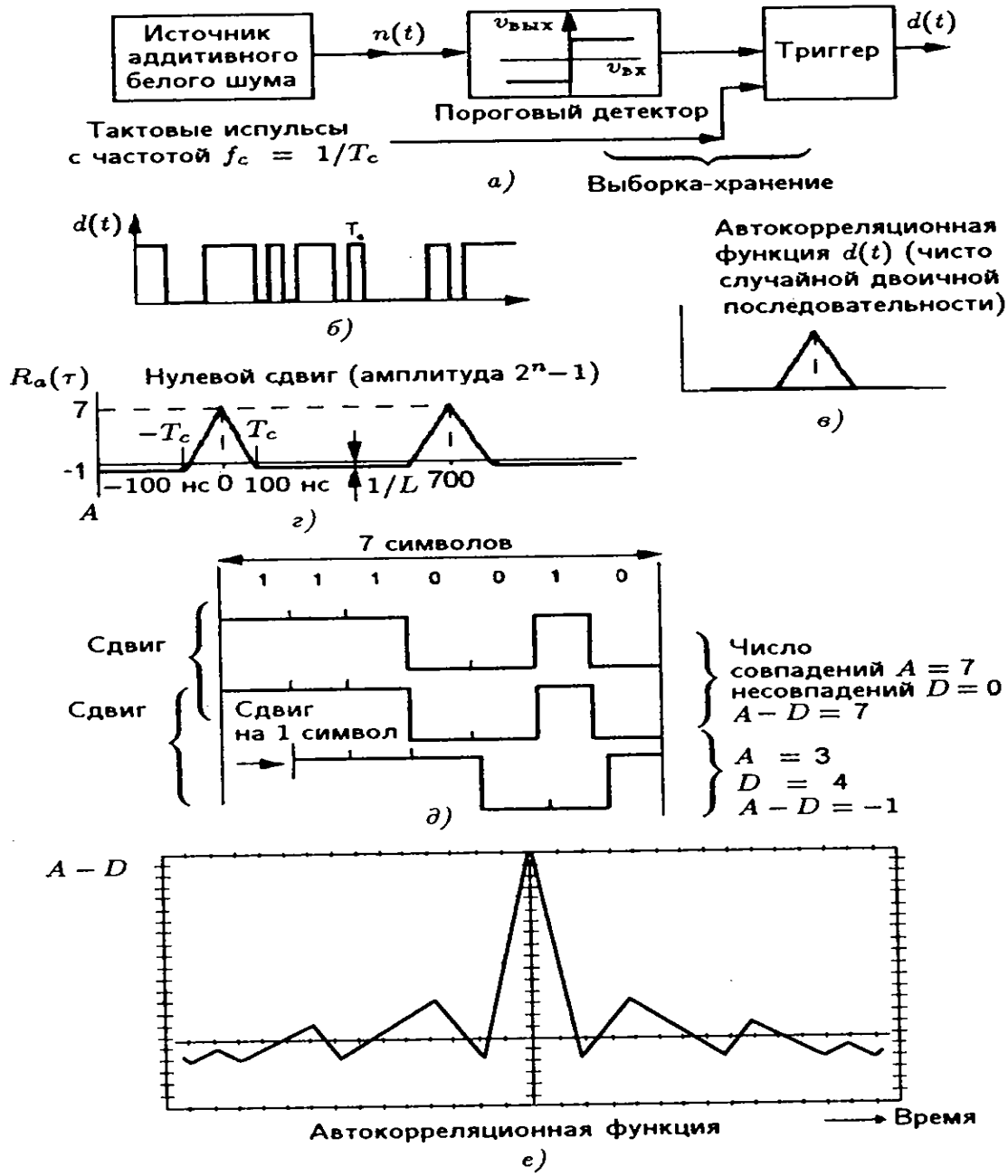
В известных системах радиосвязи в качестве сигналов расширения спектра используются двоичные цифровые ПСП. Авто- и взаимокорреляционные функции этих последовательностей при дискретных сдвигах, кратных длительности символа, в интересующей области вычисляются подсчетом количества совпадений (A) и несовпадений (D) при посимвольном (побитовом) сравнении (см.рисунок 8.5,е).

Для расширения спектра и равномерной загрузки полосы передачи спектральная плотность одиночной последовательности должна быть равномерной, как у АБГШ. Такая последовательность может быть получена с помощью схемы, изображенной на рисунке 8.5,а, где шумоподобная структура цифровой последовательности формируется путем ограничения аналогового сигнала АБГШ в сочетании с операцией «выборка-запоминание». Частота выборок (дискретизации) равна частоте следования символов: $f_o = 1/T_c$. Автокорреляционная функция сигнала случайной последовательности изображена на рисунке 8.5,в.

Наличие единственного узкого выброса автокорреляционной функции при $\tau = 0$ является очень важным свойством и упрощает синхронизацию приемника. Если последовательность длиной N символов периодически повторяется, то получается псевдошумовая или псевдослучайная последовательность. Для псевдослучайных последовательностей автокорреляционная функция имеет периодический характер (см.рисунок 8.5,г).

Второй и наиболее трудной задачей, решаемой с помощью ПСП в системе МДКРК со многими пользователями, является разделение сигналов различных пользователей, использующих одну и ту же полосу передачи. Сигнал ПСП выполняет функцию «ключа» для каждого пользователя и позволяет в приемнике выделить предназначенный ему сигнал. Поэтому полный ансамбль ПСП должен быть выбран таким, чтобы взаимная корреляция между любой парой последовательностей была достаточна мала. Это позволяет минимизировать уровень помехи по соседним каналам (ACI).

Теоретически нулевое значение взаимной корреляции имеют ансамбли ортогональных сигналов расширения спектра (например, базисные функции рядов Фурье и функции Уолша).



а - генератор синхронной случайной последовательности; б - временная диаграмма случайной последовательности; в -автокорреляционная функция; г - автокорреляционная функция короткой последовательности длиной; 7 символов; д - число совпадений и несовпадений; е - вычисленная как разность автокорреляционная функция.

Рисунок 8.5 – Автокорреляционные свойства случайной последовательности

Однако в реальных системах радиосвязи требуется, чтобы обеспечивалась простота когерентного формирования ПСП на передающей и приемной сторонах. К числу наиболее известных и хорошо изученных ПСП относятся последовательности максимальной длины (m-последовательности). Они очень привлекательны для систем с расширенным спектром, ориентированных на одного пользователя, и широко использовались в приложениях военного характера. С точки зрения требований к взаимокорреляционным свойствам, предъявляемым в МДКРК системах сотовой или персональной связи, более интересными являются последовательности Голда, Касами и Уолша. В некоторых случаях они комбинируются с τ-последовательностями. Ниже рассматриваются некоторые из указанных последовательностей и их основные свойства.

8.3.2 m-последовательности.

Рассмотрим сначала линейные коды максимальной длины, или последовательности с максимальной длиной регистра сдвига (τ-последовательности), которые играют важную роль в цифровых системах, системах с расширенным спектром и системах измерения дальности. На рисунке 8.6 приведена аппаратная реализация генератора τ-последовательности и соответствующего коррелятора, или фильтра совпадающих данных, используемого в приемнике. Генератор содержит цепочку последовательно включенных D-триггеров, выходы Q которых соединены со входами D последующих триггеров, за исключением входа D_0 первого триггера.

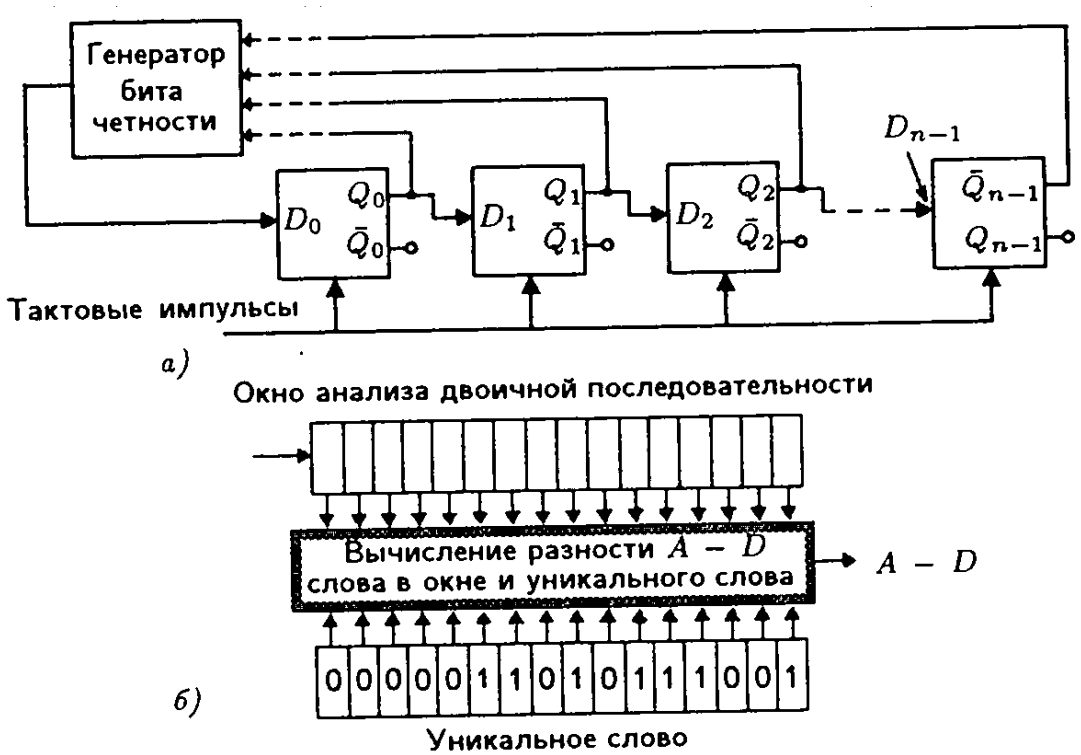


Рисунок 8.6 – Схемы генератора ПСП (а) и соответствующего коррелятора – фильтра совпадающих данных (б)

Некоторые из выходов Q триггеров не соединены с генератором бита четности, что отмечено на рисунке пунктирными линиями. Общее число триггеров n и число триггеров, соединенных с генератором бита четности, определяют соответственно длину и свойства формируемой ПСП. На выходе генератора бита четности формируется логический 0 при наличии четного числа логических 0 на входах и логическая 1 при наличии нечетного числа логических 1 на входах. Для линейных кодов максимальной длины всегда можно найти такой порядок подключения выходов триггеров к генератору бита четности, при котором формируется последовательность максимальной длины с периодом:

$$L = 2n - 1 \text{ символов,} \qquad (8.10)$$

где n — число триггеров.

Т а б л и ц а 8.1- Длина L и число S ПСП максимальной длины m при заданном числе разрядов (триггеров) регистра сдвига n

Число разрядов (триггеров) n	Длина последователь-ности, L = 2n —1	Число m-последова-тельностейS	D_0 для L = 2n —1 в схеме
3	7	2	Q1 ⊕ Q2
4	15	2	Q2 ⊕ Q3
5	31	6	Q3 ⊕ Q4
6	63	6	Q4 ⊕ Q5
7	127	18	Q5 ⊕ Q6
8	255	16	Q1 ⊕ Q2 ⊕ Q3 ⊕ Q7
9	511	48	Q4 ⊕ Q8
10	1023	60	Q6 ⊕ Q9
11	2047	176	Q8 ⊕ Q10
12	4095	144	Q1 ⊕ Q9 ⊕ Q10 ⊕ Q11
13	8191	630	Q0 ⊕ Q10 ⊕ Q11 ⊕ Q12
14	16383	756	Q1 ⊕ Q11 ⊕ Q12 ⊕ Q13
15	32767	1800	Q13 ⊕ Q14

В таблице 8.1 приведена логика подключения выходов триггеров к входам генератора бита четности в схеме на рисунке 8.6,а, а для значений n от 3 до 15. Длина получаемых при этом m-последовательностей может быть от 7 до 32767 бит. Так же в таблице приведен один из возможных вариантов соединений выходов триггеров регистра сдвига с генератором бита четности. Существуют и другие варианты, которые приводят к различным m-последовательностям с малым уровнем взаимной корреляции. Верхняя

граница для количества различных m-последовательностей определяется выражением:

$$S \le (L - 1)/n. \qquad (8.11)$$

Значения S приведены в таблице 8.1. В одном периоде m-последовательности содержится $2n$-1 — 1 нулей и $2n$-1 единиц.

Если в исходной m-последовательности, состоящей из символов (0,1), произвести замену символов 0 на +1 и 1 на —1 и получить последовательность символов (—1,+1), то периодическая автокорреляционная функция определяется выражением:

$$R_a(\tau) = L = \begin{cases} 2^n - 1, & r = 0; \\ -1, & r \neq 0. \end{cases}$$

И является наилучшей в том смысле, что не существует какой-либо другой двоичной последовательности с минимальным значением автокорреляционной функции при $\tau \neq 0$. Это свойство m-последовательностей имеет важное значение при их использовании в качестве синхропреамбул для обеспечения символьной и цикловой синхронизации.

Так как m-последовательность является периодической последовательностью, то она не может считаться случайной. Но для нее все же могут быть определены статистические свойства серий единиц и нулей. Действительно, в каждом периоде половина серий имеет длину 1, четверть серий — длину 2, восьмая часть серий — длину 3 и т.д.

Пример. Составить таблицу и построить автокорреляционную функцию m-последовательности длиной 23 — 16 = 7 символов, полагая, что частота следования символов равна f_o = 10 Мсимв./с, а опорная последовательность имеет структуру 1110010.

Решение примера. В результате подсчета количества совпадений A и несовпадений D опорной последовательности и ее циклических сдвигов на один символ получаем следующие данные, приведенные в таблице 8.2

Т а б л и ц а 8.2 - Результат подсчета примера

Номер сдвига	Последовательность	Число совпадений A)	Число несовпадений (D)	A-D
0	1110010	7	0	7
1	0111001	3	4	-1
2	1011100	3	4	-1
3	0101110	3	4	-1
4	0010111	3	4	-1
5	1001011	3	4	-1
6	1100101	3	4	-1

Результирующая автокорреляционная функция сигнала m-последовательности изображена на рисунке 8.5,г. Обратите внимание, что значения автокорреляционной функции для всех сдвигов, за исключением сдвигов с номерами 0, 7, 14 и т.д., равны -1. Для этих номеров сдвигов значения автокорреляционной функции максимальны и равны 7.

Максимальное значение автокорреляционной функции принято называть максимальным выбросом автокорреляционной функции. Этот выброс используется для кодовой или цикловой синхронизации. Для промежуточных значений временного сдвига, лежащих между 0 и +1 или —1, автокорреляционная функция является линейно убывающей. Поэтому автокорреляционная функция m-последовательности имеет треугольную форму, как показано на рисунке 8.5.

Два или более независимых сигналов могут быть переданы одновременно в одной и той же полосе и затем успешно выделены, если их кодовые последовательности представляют собой циклические сдвиги m-последовательностей более, чем на один символ. В системах измерения дальности может быть обеспечена точность измерения в пределах длительности одного символа, если в качестве маркера использовать максимальный выброс автокорреляционной функции.

8.3.3 Последовательности Голда.

По сравнению с обычными m-последовательностями последовательности Голда более привлекательны для МДКРК систем со многими пользователями. Для этих систем необходимо значительно большее число последовательностей с хорошими взаимокорреляционными свойствами между ними.

Этот метод состоит в сложении по mod 2 двух различных m-последовательностей, тактируемых единым тактовым генератором (см.рисунок 8.6). Наиболее существенный момент при формировании последовательностей Голда с «хорошими» корреляционными свойствами заключается в том, что могут быть использованы только особые пары m-последовательностей, называемые предпочтительными.

Так как обе m-последовательности имеют одну и ту же длину L и тактируются единым генератором, то формируемая последовательность Голда имеет длину L, но не является последовательностью максимальной длины. Пусть n — количество разрядов регистра сдвига в генераторе m-последовательностей, тогда длина последовательности Голда $L = 2n - 1$.

Подсчитаем число различных последовательностей Голда, формируемых с помощью двух генераторов m-последовательностей при различных начальных условиях. Напомним, что при любом новом циклическом сдвиге начальных условий генераторов m-последовательностей формируется новая последовательность Голда.

Так как каждая m-последовательность имеет длину L, то число различных сдвигов между ними также равно L. Поэтому генератор

последовательностей Голда на основе двух различных m-последовательностей может формировать $L = 2n — 1$ последовательностей Голда. При выборе соответствующей пары m-последовательностей можно получить ансамбль последовательностей Голда с «хорошими» корреляционными свойствами.

8.4 Характеристики системы с прямым расширением спектра

Одним из преимуществ систем с расширенным спектром является способность противостоять воздействию помех, которые в других системах могут полностью нарушить связь. В этом разделе рассматриваются характеристики систем с прямым расширением спектра в условиях воздействия относительно узкополосной помехи и теплового, т.е. АБГШ.

8.4.1Свойство расширения спектра по отношению к тепловому шуму.

Обратимся к схемам, изображенным на рисунках 8.1 и 8.2, и отметим, что расширение спектра сигнала обеспечивается во втором модуляторе с помощью сигнала расширения спектра *g(t)* в виде ПСП с частотой следования символов $R_c = f_0 = 1/T_c$. Сигнал расширения спектра не зависит от сигнала сообщения с частотой следования информационных символов $f_b = 1/T_b$.

Рассмотрим самый простой случай BPSK без фильтрации, когда смена сигнальных состояний +1 и -1 происходит со скоростью $f_b = 1/T_b$. Смена же состояний +1 и -1 сигнала ПСП происходит со скоростью $f_0 = 1/T_c$ (см.рисунок 8.2). Если рассмотреть систему с расширением спектра в целом, то можно заметить, что сигнал передаваемого сообщения *d(t)* умножается дважды на сигнал расширения/сжатия спектра *g(t*) в виде ПСП. Так как *g2(t)* = 1, , то влияние сигнала *d(t)* никаким образом не проявляется в выходном сжатом по спектру сигнале приемника. Тепловой шум или АБГШ вносится в приемной части канала связи подсистемами малошумящего усилителя (МШУ) и преобразователя частоты вниз. АБГШ по своей природе является широкополосным и имеет примерно гауссовскую функцию плотности распределения вероятности. Шумовая полоса МШУ и преобразователя частоты вниз, как правило, превышает ширину полосы сигнала с расширенным спектром.

В процессе сжатия спектра осуществляется умножение шума на псевдослучайный сигнал, в результате которого происходит изменение полярности шумовой реализации в номинально случайные моменты времени, кратные длительности $T_c = 1/f_0$ символов ПСП. Изменение полярности не оказывает влияния на спектральную плотность и функцию плотности распределения вероятности АБГШ. Поэтому P_e для системы с расширенным спектром в условиях воздействия АБГШ сохраняется такой же, как в системе без расширения спектра при соответствующем выборе методов модуляции/демодуляции: $P_e = f(E_b/N_o)$. Например, $P_e = f(E_b/N_o)$ для системы с расширенным спектром и когерентной демодуляцией BPSK сигналов определяется выражением:

$$P_e = (1/2)erfc\left(\sqrt{E_b/N_0}\right), \tag{8.12}$$

где $E_b = CT_b$ — удельные энергетические затраты, средняя энергии принимаемого сигнала на бит сообщения;

C — средняя мощность принимаемой несущей;

N_0 — спектральная плотность шума, т.е. мощность шума на 1 Гц полосы;

$T_b = 1/f_b$ — длительность бита сообщения;

f_b — скорость передачи, бит/с.

Аналогичные выводы можно сделать относительно эквивалентности характеристик вероятности ошибки для других видов модуляции.

8.4.2 Ослабление влияния узкополосной помехи.

Будем предполагать, что мощность АБГШ в полосе пропускания существенно меньше мощности узкополосной помехи. Показано, что гармоническая помеха является «наихудшей» из класса узкополосных помех. Воспользуемся обозначениями и методикой анализа. Входной сигнал приемника определяется следующим выражением:

$$v_{np}(t) = \sqrt{2P_c}\, d(t) g(t) \cos\omega_0 t + \sqrt{2P_J}\, \cos(\omega_0 t + \theta), \tag{8.13}$$

где $d(t)$ — сигнал передаваемого сообщения на входе передатчика и выходе приемника;

$g(t)$ — сигнал ПСП с частотой следования символов $f_0 = 1/T_c$;

ω_0 — частота несущей или промежуточная после преобразования частоты вниз;

P_J — мощность помехи на входе приемника;

P_c — мощность полезного сигнала на входе приемника;

θ —случайная фаза, равномерно распределенная в интервале $[0, \pi]$.

При сжатии спектра входной сигнал умножается на синхронный сигнал ПСП $g(t)$. При наличии упрощающих предположений $g2(t) = 1$, поэтому входной сигнал интегратора:

$$v'_0(t) = \sqrt{P_c}\, d(t) + \sqrt{P_J}\, g(t) \cos(\theta). \tag{8.14}$$

Если длительность бита T_b намного превышает период несущей частоты $T_0 = 1/f_0 = 2\pi/\omega_0$ или она кратна полупериоду несущей, то на входе интегратора спектральная плотность демодулированной помехи $G_J(f)$ определяется следующим выражением:

$$G_J(f) = \frac{P_J \overline{\cos^2\theta}}{2 f_0} = \frac{\sin \pi f / f_0}{\pi f / f_0}. \tag{8.15}$$

Демодулированная помеха оказывается широкополосной, причем первые нули спектральной плотности имеют место при $f = f_o$. Эквивалентная спектральная плотность помехи расположена в окрестности частоты $f_{рч}$ (см. рисунок 8.2); ее первые нули имеют место на частотах $f_{рч} \pm f_o$. После интегрирующего фильтра со сбросом, имеющего эквивалентную полосу пропускания $f_b = 1/T_b$, имеем:

$$G_J(f) = \frac{P_J \overline{\cos^2\theta}}{2 f_0}, \quad |f| \le f_b. \tag{8.16}$$

Так как фаза θ относительно узкополосной помехи является случайной величиной с равномерным распределением и независящей от фазы несущей полезного сигнала, то $\overline{\cos^2\theta} = 1/2$ и спектральная плотность узкополосной помехи на выходе демодулятора будет определяться следующим выражением:

$$G_J(f) = \frac{P_J}{4 f_0}, \quad |f| \le f_b \ . \tag{8.17}$$

Из (8.15) и (8.17) следует, что гармоническая узкополосная помеха, имеющая мощность P_J на частоте $\omega_0 = 2\pi f_o = 2\pi f_{рч}$, преобразуется в широкополосный сигнал, имеющий практически равномерную спектральную плотность $G_J(f) = P_J / 4f_o$. Таким образом, спектральная плотность помехи на выходе демодулятора обратно пропорциональна частоте следования символов ПСП (f_o). Спектральная плотность помехи $GJ(f)$ определена для положительных и отрицательных частот $-f_b \le f \le f_b$. Практическое значение имеют только положительные частоты, поэтому введем спектральную плотность, определенную только для положительных частот, $0 \le f \le f_b$:

$$I(f) = 2G_J(f), \qquad 0 \le f \le f_b \ . \tag{8.18}$$

Выражение для вероятности ошибки (8.12) можно использовать также и в случае узкополосных помех, предполагая, что демодулированная помеха I в полосе модулирующих частот на входе решающего устройства обладает свойствами АБГШ. В случае когерентной демодуляции PSK сигналов имеем:

$$P_e = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{E_b}{I(f)}}\right) = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{E_b}{2P_J/(4f_0)}}\right) = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{P_s}{P_J}\frac{f_0}{f_b}}\right). \tag{8.19}$$

Величину

$$P'_J = \frac{P_J}{2(f_0/f_b)} \tag{8.20}$$

можно рассматривать как эффективную мощность помехи. Поэтому отношение мощности сигнала P_c к эффективной мощности определяет вероятность ошибки в системе с расширенным спектром.

Из (8.19) следует, что отношение частоты следования символов к скорости передачи (f_0/f_b) определяет степень ослабления узкополосной помехи. Поэтому выигрыш при обработке может быть определен, как

$$G_p = \frac{f_0}{f_b}. \tag{8.21}$$

В подразделе 8.2.2, согласно выражениям (8.4) и (8.5), выигрыш при обработке формально определен, как

$$G_p = \frac{(S/I)_{вых}}{(S/I)_{вх}} = \frac{BW_{рч}}{f_b}. \tag{8.22}$$

Здесь $(S/I)_{вых}$ представляет собой отношение сигнал/помеха на выходе демодулятора, $(S/I)_{вх}$ — отношение сигнал/помеха на входе приемника, т.е. здесь произведена замена величины N (мощности шума) на величину I (мощность помехи), которая адекватно характеризует ситуацию при воздействии узкополосной помехи.

8.4.3 Экспериментальная проверка степени подавления узкополосной помехи.

Для подтверждения возможности подавления узкополосной помехи в системе с расширением спектра была разработана структурная схема, в соответствии с рисунком 8.1 [32]. В экспериментальном макете были выбраны: промежуточная частота $f_{пч}$ = 70 МГц, скорость передачи сообщений f_b = 10 кбит/с и частота следования символов ПСП f_c = 2 Мсимв./с. Соотношение скорости передачи и частоты следования символов примерно соответствовали принятому в системе с прямым расширением спектра, предложенной фирмой Qualcomm. При формировании BPSK сигналов какая-либо фильтрация отсутствовала, т.е. передавались BPSK сигналы с бесконечной полосой. В демодуляторе использовался простой постмодуляционный селективный фильтр, позволяющий выделить модулирующий сигнал и подавить составляющие несущей частоты второго и более высоких порядков. При экспериментах роль такого фильтра выполнял фильтр нижних частот Баттерворта четвертого порядка с полосой пропускания $f_з$ дБ = 30 кГц. Заметим, что при скорости передачи 10 кбит/с минимальная полоса по Найквисту составляет 5 кГц.

8.4.4 Подавление широкополосной помехи.

Принципиально механизм подавления узкополосной помехи, описанный в пункте 8.4.2, оказывается справедливым и для широкополосных мешающих сигналов.

Суммарная мощность широкополосных мешающих сигналов, например, внутрисистемной помехи, создаваемой в системе с прямым расширением спектра, имеющей различные псевдослучайные последовательности (расширяющие спектр функции) $g_1(t)$, $g_2(t),\ldots, g_N(t)$ уменьшается в результате выполнения операции сжатия спектра. Причем уменьшение мощности широкополосной помехи происходит во столько же раз, во сколько уменьшается мощность узкополосной помехи, рассмотренной в предыдущих разделах.

Физический механизм ослабления широкополосной помехи во многом схож с механизмом ослабления узкополосной помехи. В результате выполнения операции сжатия спектра энергия полезного сигнала оказывается сосредоточенной в полосе модулирующих частот.

Сжатие спектра касается лишь полезного сигнала, поскольку передаваемая ПСП $g_k(t)$ оказывается при перемножении коррелированной с аналогичной последовательностью $g_L(t)$, формируемой в приемнике. Широкополосная помеха перемножается с некоррелированным опорным сигналом $g_L(f)$, поэтому их произведение имеет широкий спектр. При фильтрации относительно узкополосным фильтром лишь небольшая часть энергии широкополосной помехи, пропорциональная отношению будет проходить на выход демодулятора.

Контрольные вопросы:

1) Перечислите основные преимущества расширенного спектра.

2) Рассказать о системах с прямым расширением спектра.

3) Дать описание характеристикам систем с прямым расширением спектра.

4) Объяснить процесс расширения и сжатия спектра.

ГЛАВА 9

9 Системы с расширением спектра путем перестройки рабочей частоты

9.1 Системы с медленной перестройкой рабочей частоты

В системах с расширенным спектром путем перестройки рабочей частоты последняя сохраняется постоянной в течение каждого интервала перестройки, но изменяется скачком от интервала к интервалу (см. рисунок 8.4). Частоты передачи формируются цифровым синтезатором частот, управляемым кодом («словами»), поступающим в последовательном либо параллельном виде и содержащим m двоичных символов (битов) [33].

Каждому m-битовому слову или его части соответствует одна из M = 2m частот. Хотя для осуществления перестройки частот имеется M = 2m, (m = 2, 3, ...) частот, но не все из них обязательно используются в конкретной системе. Скорость перестройки частот передачи f_h определяется числом скачков частоты в единицу времени и измеряется в скачках на секунду (ск/с), килоскачках на секунду (кск/с), мегаскачках на секунду (Мск/с). Системы с расширением спектра путем программной перестройки рабочей частоты подразделяются на следующие категории:

а) системы с медленной перестройкой;

б) системы с быстрой перестройкой;

в) системы со средней скоростью перестройки.

В системах с медленной перестройкой скорость перестройки f_h, меньше скорости передачи сообщений f_b. Таким образом, в интервале перестройки, прежде чем осуществится переход на другую частоту, могут быть переданы два бита сообщения или более (в некоторых системах свыше 1000). Длительность интервала перестройки T_h связана с длительностью бита T_b соотношением:

$$T_h = kT_b, \quad \mathrm{k} = 1,2,3,...; \quad f_0 = f_h = 1/T_h \quad . \tag{9.1}$$

В системе с быстрой перестройкой рабочей частоты f_h больше скорости передачи сообщений f_b. В этом случае за время передачи одного бита частота сначала может измениться два раза и больше. Здесь длительность интервала перестройки связана с длительностью бита T_b соотношением:

$$T_c = T_h = T_b/k, \quad \mathrm{k} = 1,2,3,...; \quad f_h = 1/T_h; \quad f_0 = f_h = 1/T_c \ . \tag{9.2}$$

В системах со средней скоростью перестройки скорость перестройки равна скорости передачи. Наибольшее распространение получили системы с быстрой и медленной перестройкой рабочей частоты.

На рисунке 9.1 изображены структурные схемы передающей и приемной частей системы с перестройкой частоты, содержащие кроме основных блоков, приведенных на рисунке 8.4, блоки кодирования/декодирования с исправлением ошибок и временной синхронизации. Необходимость введения блока кодирования/декодирования с исправлением ошибок обусловлена следующими причинами. Если одна рабочая частота или более оказываются пораженными помехой большой мощности, то один или несколько битов сообщения, передаваемых на этих частотах, могут быть с большой вероятностью приняты с ошибками.

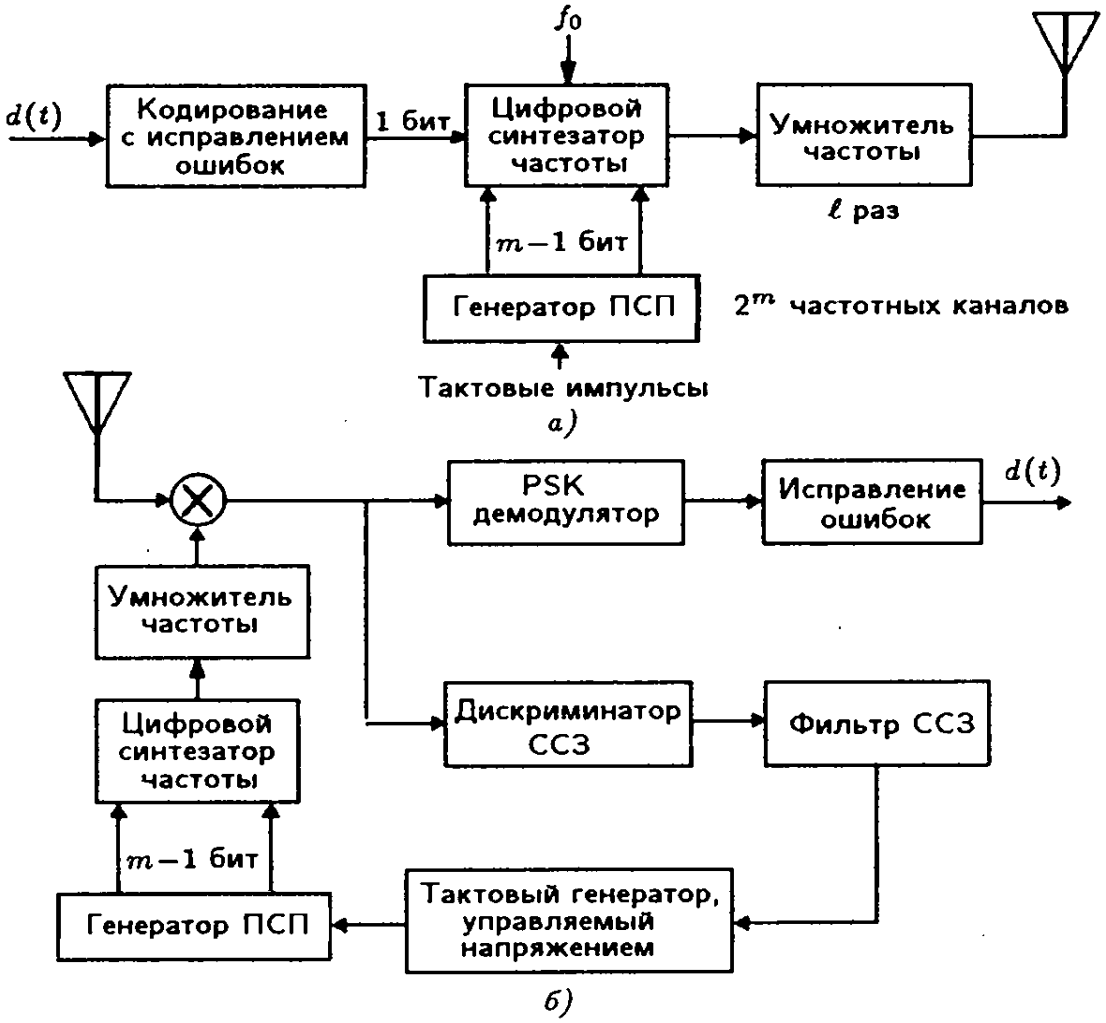


Рисунок 9.1- Структурные схемы передатчика (а) и приемника (б) системы с программной перестройкой частоты

Управляющее слово цифрового синтезатора частот состоит из m битов, один из них может быть информационным, а другие (m - 1) бит формируются генератором ПСП. Цифровые синтезаторы из соображений простоты очень часто формируют сетку частот в диапазоне ПЧ и поэтому имеют ограниченные пределы перестройки. Включение умножителя частоты вслед за синтезатором ПЧ позволяет в несколько раз увеличить значения каждой из

имеющихся дискретных частот и перейти в диапазон РЧ, увеличивая при этом выигрыш при обработке сигналов.

Пусть частотный разнос между соседними дискретными частотами цифрового синтезатора частот равен Δf. Минимальное значение частотного разноса должно быть больше ширины полосы РЧ несущей, модулированной только сигналом передаваемого сообщения со скоростью f_b. Например, при скорости передачи f_b = 300 кбит/с минимальное значение ширины полосы QPSK сигналов при ограничении полосы и линейном усилении равно $\Delta f_{min} = f_b/2$ = 150 кГц ,что соответствует теоретическому значению показателя спектральной эффективности, равному 2 бит/(с·Гц). Для некоторых простейших видов FSK сигналов, допускающих нелинейное усиление, значение показателя спектральной эффективности лежит в пределах от 0,25 до 0,5 бит/(с·Гц). В этом случае $\Delta f_{min} = f_b/(0{,}24...0{,}5) = (2...4)f_b$. Поэтому для FSK сигналов минимальный частотный разнос увеличивается до 600... 1000 кГц.

Ширина полосы РЧ сигнала с перестройкой рабочей частоты в результате умножения частоты увеличивается в К раз (при умножении частоты увеличивается также частотный разнос) и становится равной:

$$BW_{РЧ} = lM\Delta f \ , \tag{9.3}$$

где l — коэффициент умножения частоты;

M = 2m — число частот, формируемых синтезатором.

Выигрыш при обработке (G_p) для систем с программной перестройкой рабочей частоты определяется выражением:

$$G_p = BW_{РЧ} / BW_{мод} \ , \tag{9.4}$$

где $BW_{мод}$ — ширина полосы РЧ, модулированной сигналом передаваемого сообщения с целью расширения спектра.

Это означает, что выигрыш при обработке в системах с прямым расширением спектра и расширением спектра путем перестройки частоты один и тот же.

9.2 Система с быстрой перестройкой частоты

В системах с быстрой перестройкой частоты в течение длительности одного бита происходит k скачков частоты, так как $T_b = kT_h$ или $f_b = k/f_h$. В связи с этим согласно (9.3) ширина полосы РЧ:

$$BW_{РЧ} = klM\Delta f \quad . \tag{9.5}$$

Если показатель эффективности системы (без перестройки частоты) равен 1 бит/(с·Гц), то

$$BW_{РЧ} = f_b = 1/T_b = \Delta f \quad , \tag{9.6}$$

и в этом случае выигрыш при обработке:

$$G_p = \frac{BW_{РЧ}}{BW_{мод}} = \frac{klM\Delta f}{\Delta f} klM \quad . \tag{9.7}$$

Таким образом, выигрыш при обработке в системе с быстрой перестройкой частоты зависит от количества используемых различных частот (*M*), количества скачков частоты в пределах одного бита (*k*) и коэффициента умножения частоты (*l*).

В приемнике сигналов с перестройкой рабочей частоты, изображенном на рисунке 9.1(б), принимаемый сигнал перемножается с опорным, формируемым с помощью последовательно включенных генератора ПСП, цифрового синтезатора частот и умножителя частоты. Здесь программа смены частот определяется генератором ПСП, которая идентична ПСП соответствующего передатчика. Если временные параметры принимаемой и опорной ПСП согласованы, т.е. имеет место точная временная синхронизация, то в перемножителе происходит сжатие спектра принимаемого РЧ сигнала (точно так же, как для сигналов с прямым расширением спектра) до пределов, определяемых шириной полосы сигнала, модулированного только передаваемым сообщением. Наиболее часто используется FSK, для которой демодуляторы реализуются достаточно простыми средствами. Можно использовать и другие методы модуляции/демодуляции, например PSK.

Демодулированный сигнал данных поступает на вход декодера с функцией исправления ошибок. На выходе декодера получается оценка сигнала источника сообщения *d*(t)*, переданного по каналу связи. Дискриминатор схемы слежения за задержкой (ССЗ), содержащий два ключа, переключаемых с опережением и запаздыванием, сглаживающий петлевой фильтр ССЗ и перестраиваемый генератор тактовых импульсов входят в подсистему синхронизации. До тех пор, пока синхронизация не будет установлена, т.е. не определено начало предаваемого пакета (если МДКРК приемопередатчик работает в пакетном режиме), не будет происходить сжатие спектра входного сигнала и его трансформация в пределы полосы пропускания демодулятора FSK сигналов. В течение процедуры синхронизации на вход демодулятора будет поступать широкополосный шумоподобный сигнал, из которого невозможно выделить полезный сигнал передаваемого сообщения *d(t).*

9.3 Характеристики систем с перестройкой рабочей частоты при воздействии помех

Приведем вывод выражения для вероятности ошибки P_e, вытекающий из понимания принципов и возможностей ослабления помех, присущих этим системам. Будем полагать, что уровень помехи существенно превышает уровень теплового шума, так что появление ошибок обусловлено воздействием «сильной» помехи. При такой модели воздействия помех на систему ошибки появятся с вероятностью 0,5 всякий раз, когда мощность помехи в пределах ширины полосы некоторого частотного канала превысит мощность несущей (ширина полосы демодулятора приемника примерно равна минимальному частотному разносу соседних частот).

Для системы с перестройкой рабочей частоты и без какой-либо информационной избыточности, например, за счет кодирования/ декодирования с исправлением ошибок, среднее значение вероятности ошибки равно [34].

$$P_e = J/M\,, \tag{9.8}$$

где J — число источников помехи, мощность которых не меньше мощности несущей полезного сигнала;

M — общее число имеющихся частот в системе.

В тех случаях, когда имеется избыточность за счет кодирования с исправлением ошибок или за счет многократной передачи одного и того же бита на различных частотах, среднее значение вероятности ошибки P_e может быть определено с помощью приближенного выражения:

$$P_e = \sum_{x=r}^{c} \binom{c}{r} p^x q^{c-x}\,, \tag{9.9}$$

где p = J/M — вероятность ошибки при демодуляции одного символа;

J — количество источников помехи, мощность которой не меньше мощности несущей полезного сигнала;

M — количество имеющихся частот в системе;

$q = 1 - p$ — вероятность правильной демодуляции одного символа;

c — количество различных частот, используемых при передаче каждого бита сообщения;

r — количество ошибочных решений, необходимых для возникновения ошибки в бите при декодировании;

$\binom{c}{r}$ — биномиальные коэффициенты.

Если три или более частот (частотные скачки) используются для передачи каждого бита сообщения, а в приемнике при декодировании

применяется мажоритарное правило (голосование по большинству), то характеристика вероятности ошибки может быть значительно улучшена.

Пример. Вычислим среднее значение вероятности ошибки P_e в системе с расширением спектра путем перестройки рабочей частоты. В системе имеется 1000 частот, а мощность гармонической помехи, измеренная в приемнике, превышает мощность несущей полезного сигнала на 4 дБ.

Будем предполагать, что:

а) один бит сообщения передается на каждой частоте;

б) один бит сообщения передается на трех различных частотах.

В приемнике используется мажоритарный алгоритм декодирования в варианте б, согласно которому выносится правильное окончательное решение, если два из трех предварительных решений были правильными.

Решение примера.

а) при передаче одного бита на каждой частоте на основании выражения (9.8) имеем:

$$P_e = J/M = 1/1000 = 0{,}001.$$

Для многих применений это значение оказывается недопустимо высоким;

б) в случае передачи одного бита на трех различных частотах среднее значение вероятности ошибки определяется выражением (9.9), в котором следует считать $c = 3$ (число частот, используемых для передачи одного бита), $r = 2$ (число ошибочных решений относительно значения двоичного символа, передаваемого на трех различных частотах), $p = 10^{-3}$ (вероятность ошибки при демодуляции символа сообщения, передаваемого на одной из трех частот, вычисленная в варианте а).

$q = 1 - p = 1 - 10^{-3} = 0{,}999$ - вероятность отсутствия ошибки.

В результате:

$$P_e = \sum_{x=2}^{3} \binom{3}{2} \left(10^{-3}\right)^x \left(1-10^{-3}\right)^{c-x} = 3\cdot 10^{-3}\left(1-10^{-3}\right)^1 + 3\cdot 10^{-9}\left(1-10^{-3}\right)^0 \approx 3\cdot 10^{-3}.$$

Из приведенного примера следует, что значение усредненной вероятности ошибки благодаря введению трехкратной избыточности в сочетании с мажоритарным правилом декодирования снижается в 333 раз. Однако количество рабочих частот и скорость их перестройки при этом увеличивается в три раза. Если минимальный разнос частот Δf считать фиксированным (поскольку он определяется шириной полосы частот модулированного сигнала до расширения его спектра), то необходимая РЧ полоса также увеличивается пропорционально скорости перестройки частот.

9.4 Временное рассеяние: устойчивость систем с перестройкой рабочей частоты к воздействию помех из-за многолучевости

Временное рассеяние сигналов из-за многолучевости в канале подвижной радиосвязи показано на рисунке 9.2 [35].

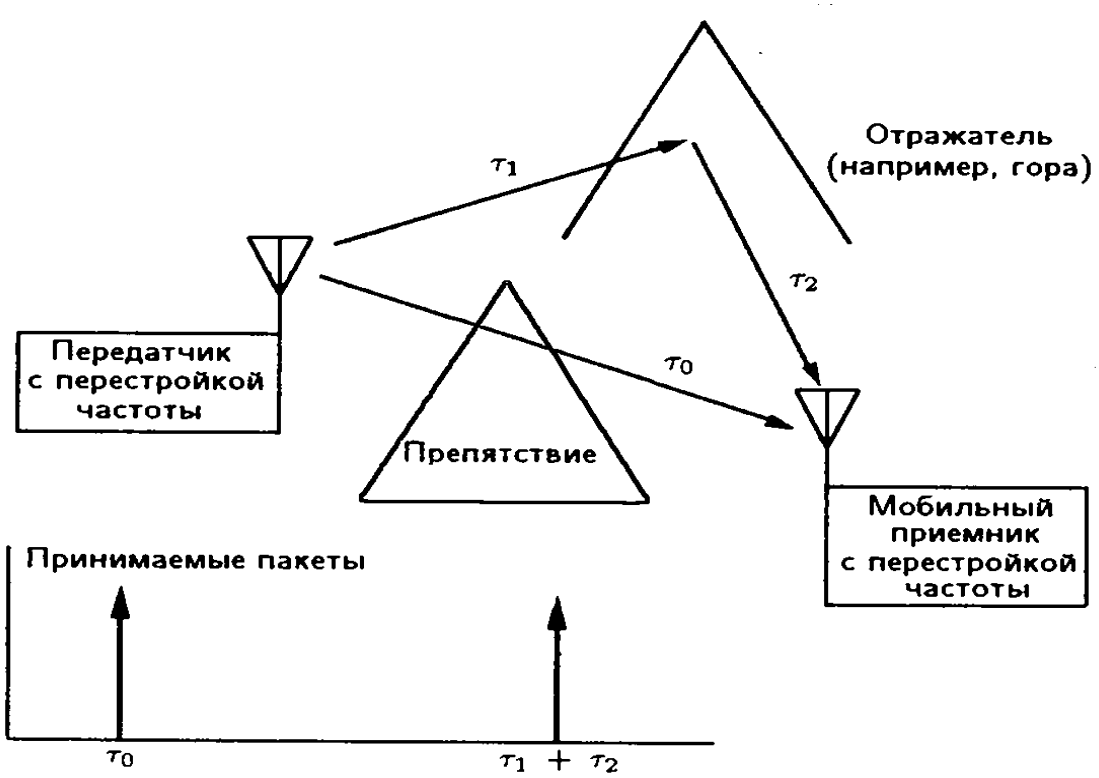


Рисунок 9.2 - Временное рассеяние сигналов из-за многолучевости

Здесь на прямом (кратчайшем) пути распространения от базовой станции к приемнику подвижного объекта встречается препятствие в виде возвышенности. Время запаздывания при прохождении по прямому пути равно τ_o, и уровень принимаемого сигнала соизмерим с уровнем переотраженного сигнала, который имеет запаздывание $\tau_1+\tau_2$. Запаздывающий сигнал будет интерферировать с основным сигналом, создавая сильную внутриполосную помеху, если только переход на другую частоту в синтезаторе будет происходить не раньше момента его прихода. Если же скорость перестройки частоты f_h будет превышать величину, обратную разности задержек между переотраженным и прямым сигналами, т.е.

$$f_h > \frac{1}{\tau_1 + \tau_2 - \tau_0}, \tag{9.10}$$

синтезатор частот приемника перестроится на другую частоту приема раньше, чем на вход приемника поступит переотраженный сигнал. Таким образом, при

относительно высокой скорости перестройки частоты влияние временного рассеяния на ухудшение характеристики системы может быть минимизировано.

Пример В цифровой сухопутной системе подвижной радиосвязи используется радиомодем QPSK сигналов со скоростью f_b = 4,8 кбит/с. Определим минимальную скорость перестройки частоты, если в эту систему с многостанционным доступом на основе временного разделения каналов (TDMA) ввести режим расширения спектра путем перестройки рабочей частоты для предотвращения временного рассеяния сигнала с запаздыванием, превышающим τ = 300 мкс.

Решение примера. Полагаем: $\tau_0 = 0$ и $\tau_1 + \tau_2 = 300$ мкс. Из (9.10) имеем

$$f_h > \frac{1}{300 мкс - 0} = 3{,}33 \text{ кбит/с}.$$

Для некоторых применений введение относительно медленной перестройки частоты оказывается более простым техническим решением по сравнению со сложными адаптивными корреляторами, необходимыми для коррекции сигнала в случае большого временного рассеяния. В частности, разработка адаптивных корректоров при некогерентной демодуляции сигналов может представлять сложную задачу.

9.5 Сравнение МДКРК систем с прямым расширением спектра и перестройкой рабочей частоты

Рассмотрим архитектуры систем, дадим краткое сравнение двух методов расширения спектра: прямого — путем дополнительной модуляции сигналом псевдослучайной последовательности и косвенного — путем перестройки рабочей частоты. Генератор ПСП во втором случае должен иметь тактовую частоту $k(m— 1)f_b$, где $f_b = 1/T_b$ — скорость передачи сообщений, бит/с, k— число битов в интервале перестройки частоты (9.1), (9.2) и m — длина генератора ПСП (длина регистра). Таким образом, тактовая частота генератора ПСП оказывается ниже, чем в варианте прямого расширения спектра. Это — одно из преимуществ метода расширения спектра путем перестройки рабочей частоты. Другими преимуществами являются быстрая синхронизация и более простое решение проблемы помехи «близкий-удаленный», что предполагает управление передаваемой мощностью с меньшей точностью. К числу недостатков косвенного метода расширения спектра путем перестройки рабочей частоты по сравнению с прямым методом относится необходимость использования сложных быстродействующих синтезаторов частот с низким уровнем фазового шума. Кроме того, метод расширения спектра сигнала путем перестройки рабочей частоты малопригоден для измерения дальности и скорости изменения дальности.

9.6 Синхронизация систем с расширенным спектром

Для синхронизации приемников при приеме сигналов с расширенным спектром может потребоваться три устройства синхронизации:

а) устройство фазовой синхронизации несущей (восстановления несущей);

б) устройство символьной синхронизации (восстановления тактовой частоты);

в) устройство временной синхронизации генераторов, формирующих кодовые или псевдослучайные последовательности.

В случае реализации некогерентных алгоритмов демодуляции FSK и DPSK сигналов устройство фазовой синхронизации не требуется, поскольку демодуляция осуществляется с помощью частотного дискриминатора или автокорреляционного демодулятора. Для когерентных алгоритмов демодуляции требуются три устройства синхронизации.

Временная синхронизация обеспечивается в два этапа, в течение которых выполняются:

а) поиск (первоначальная, грубая синхронизация);

б) слежение (точная синхронизация).

Далее приводится описание некоторых методов синхронизации, используемых в системах с прямым расширением спектра и перестройкой рабочей частоты.

9.6.1 Поиск и отслеживание сигналов с прямым расширением спектра.

В целях упрощения процедуры и сокращения времени синхронизации, т.е. поиска сигналов с прямым расширением спектра, модуляцию сигналом передаваемого сообщения *d(t)* исключают, полагая *d(t)* = 1.

Немодулированный сигнал с прямым расширением спектра (без модуляции передаваемым сообщением) носит название пилот-сигнала, который определяется следующим образом:

$$v_{вх} = \sqrt{2P_s}\, g(t)\cos(\omega_0 t + \theta). \qquad (9.11)$$

Такой сигнал поступает на вход приемника в течение процедуры поиска.

Простейшая процедура поиска может быть проиллюстрирована с помощью схемы, изображенной на рисунке 9.3. Первоначально ключ находится в положении 1, и один из входов схемы «И» соединен с источником положительного напряжения. Перестраиваемый генератор тактовых импульсов в автономном режиме управляет генератором ПСП приемника. Генератор ПСП имеет частоту следования символов f_0, симв./с, примерно равную частоте следования символов ПСП соответствующего передатчика.

Перед началом процедуры поиска синхронизация передающего и приемного генераторов ПСП отсутствует, т.е. временное положение

формируемых ПСП не согласовано. Выходной сигнал перемножителя в этом случае определяется выражением:

$$v_{пр} = v_{вх}\, g(t - iT_c) = \sqrt{2P_s}\, g(t)\cos(\omega_0 t + \theta)\cdot g(t - iT_c), \qquad (9.12)$$

где i =0,1,2,3,...;

T_c — длительность символа ПСП.

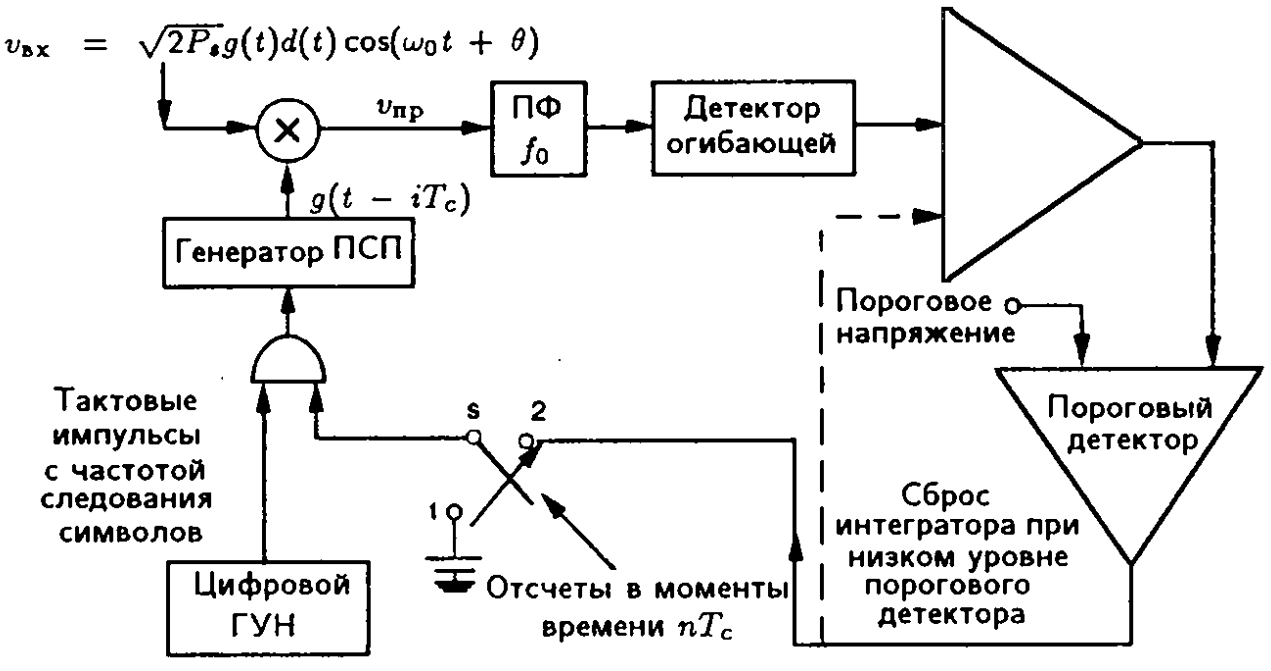


Рисунок 9.3 - Схема поиска сигналов с прямым расширением спектров в системе МДКРК

В этом выражении iT_c определяет первоначальный временной сдвиг принимаемого сигнала с прямым расширением спектра и опорной ПСП приемника. Произведение сигналов $v_{пр}(t)$ при $i \neq 0$ представляет собой сигнал с прямым расширением спектра. Этот сигнал имеет достаточно широкий спектр и низкий уровень спектральной плотности. Поэтому после относительно узкополосной фильтрации и выделения огибающей уровень сигнала будет достаточно низким. Выходные сигналы интегратора и компаратора будут иметь низкий уровень. Ключ каждые nT_c секунд переводится в положение 2. Если выходной уровень компаратора в момент времени nT_c, когда ключ находится в положении 2, оказывается низким, то в схеме «И» происходит запрет поступления тактовых импульсов с выхода перестраиваемого генератора тактовых импульсов на генератор ПСП.

Из-за отсутствия поступления тактовых импульсов в этом интервале времени на генератор ПСП в нем принудительно задерживается

формирование ПСП относительно ПСП передатчика. Затем производится сброс интегратора, ключ вновь переводится в положение 1, и поиск продолжается. Это происходит каждые nT_c секунд. Процедура проб и ошибок в конце концов приводит к временному согласованию принимаемого и опорного сигналов, которое означает, что $iT_c = 0$. После завершения поиска имеем:

$$g(t)g(t - iT_c) = g(t)g(t - 0 \cdot T_c) = g^2(t) = 1. \quad (9.13)$$

При этом происходит сжатие спектра принимаемого пилот-сигнала, и выражение (9.12) принимает следующий вид:

$$v_{вх} = \sqrt{2P_s}\, g(t)\cos(\omega_0 t + \theta). \quad (9.14)$$

т.е. получается немодулированный «пилот-тон». Через узкополосный полосовой фильтр, настроенный на частоту f_0, проходит вся мощность принимаемого сигнала на вход детектора огибающей. В результате интегрирования огибающей в течение времени nT_c формируется высокий уровень сигнала на выходе компаратора, что свидетельствует о завершении этапа поиска или грубой синхронизации. После него начинается следующий этап полной процедуры синхронизации-слежения или точная синхронизация.

Слежение или точная синхронизация сигналов с прямым расширением спектра осуществляется с помощью схемы слежения за задержкой (ССЗ), изображенной на рисунке 9.4. Включение ССЗ производится сразу же после завершения поиска или грубой синхронизации. На этом этапе временное рассогласование генераторов ПСП лежит в пределах длительности одного символа, однако опорная ПСП может формироваться с опережением (A) или запаздыванием (D) относительно принимаемой ПСП. Поэтому выходной сигнал генератора ПСП приемника может быть записан как $g(t - \tau)$, где $-T_c < \tau < T_c$. Сигналы в различных точках схемы, изображенной на рисунке 9.4, могут быть выражены следующим образом:

$$v_D = \sqrt{2P_s}\, g(t)g(t + \tau - T_c/2)d(t)\cos(\omega_0 t + \theta), \quad (9.15)$$

$$v_A = \sqrt{2P_s}\, g(t)g(t + \tau + T_c/2)d(t)\cos(\omega_0 t + \theta), \quad (9.16)$$

$$v_{DF} = \sqrt{2P_s}\left[g(t)g(t + \tau - T_c/2)\right]d(t)\cos(\omega_0 t + \theta), \quad (9.17)$$

$$v_{AF} = \sqrt{2P_s}\left[g(t)g(t + \tau + T_c/2)\right]d(t)\cos(\omega_0 t + \theta). \quad (9.18)$$

Полоса пропускания фильтров выбирается гораздо уже по сравнению с шириной спектра ПСП, поэтому при прохождении произведений сигналов через полосовые фильтры происходит усреднение огибающих.

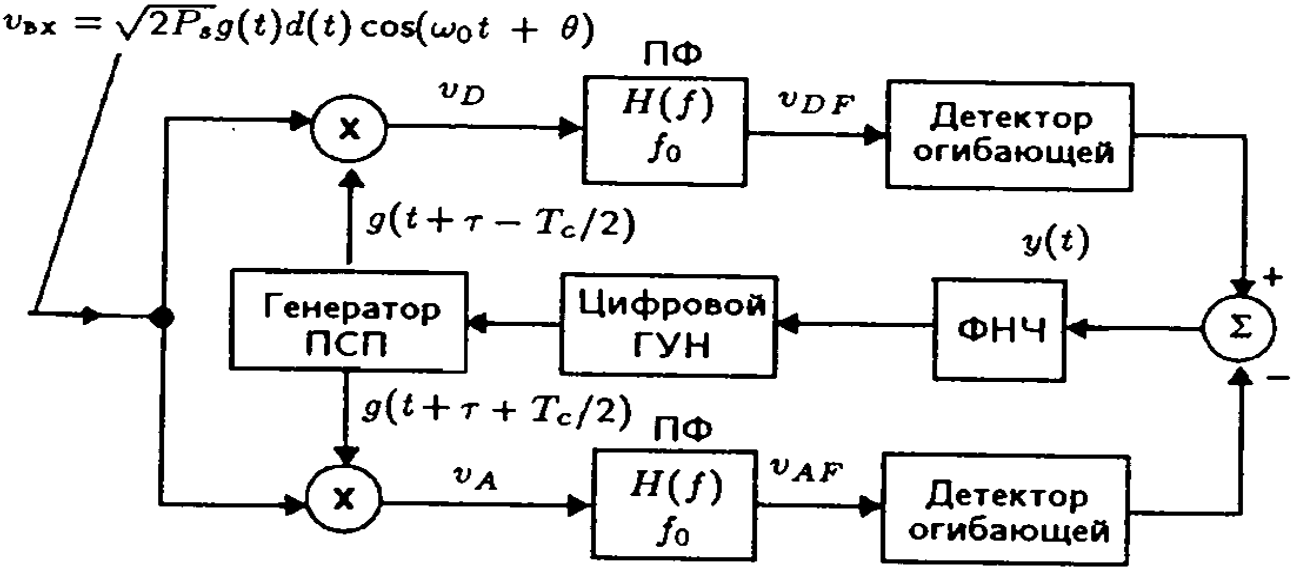


Рисунок 9.4- Схема слежения за задержкой с прямым расширением спектра

Среднее значение произведений $g(t)g(t + \tau \pm T_c/2)$ представляет собой автокорреляционные функции ПСП

$$R_a(r \pm T_c/2) = \overline{g(t)g(t - r \pm T_c/2)}. \quad (9.19)$$

Детекторы огибающей выделяют огибающую сигналов *vDF(t)* и *vAF(t)*, в связи с чем исключается модуляция сигналом передаваемого сообщения *d(t)*. Поэтому получаем:

$$|V_{DF}(t)| = |R_a(r - T_c/2)|, \quad (9.20)$$

$$|V_{AF}(t)| = |R_a(r + T_c/2)|. \quad (9.21)$$

Управляющий сигнал перестраиваемого генератора *y(t)* определяется разностью

$$y(t) = |R_a(r - T_c/2)| - |R_a(r + T_c/2)| \ . \quad (9.22)$$

Если *r* принимает положительные значения, то формируется управляющий сигнал с положительным знаком, и частота перестраиваемого генератора возрастает. Это приводит к уменьшению *r*. При отрицательных значениях *r* формируется управляющий сигнал с отрицательным знаком, и частота перестраиваемого генератора уменьшается. Это приводит к

увеличению r. Зависимость управляющего сигнала от задержки r (дискриминационная характеристика) изображена на рисунке 9.5.

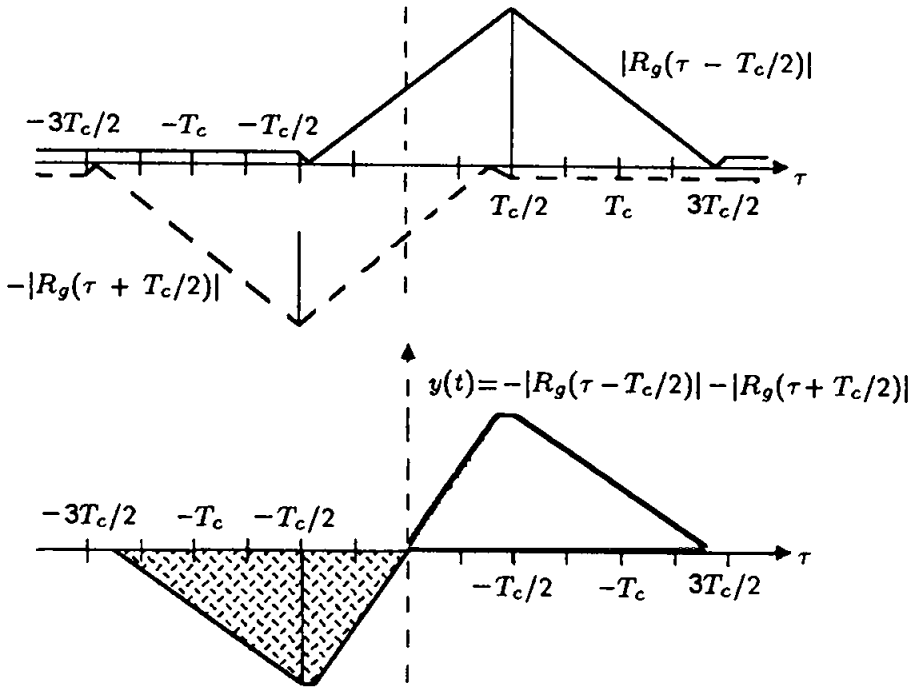


Рисунок 9.5 - Управляющий сигнал

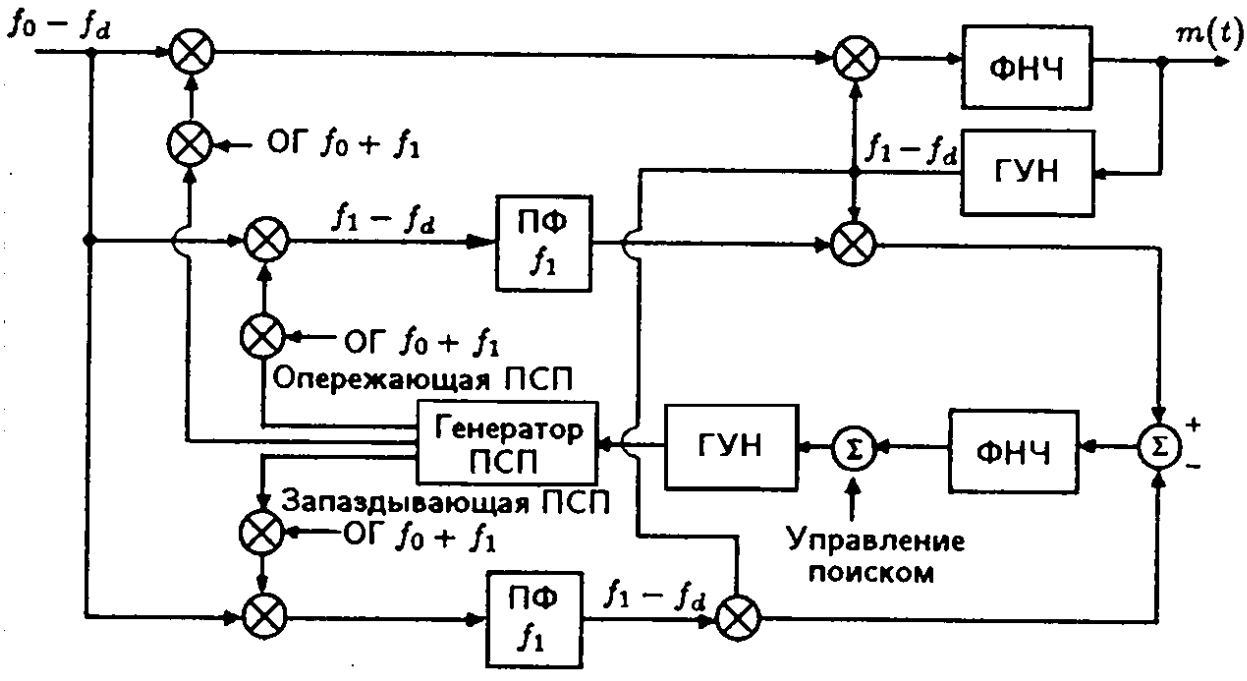


Рисунок 9.6 - Когерентный приемник с прямым расширением спектра

Структурная схема когерентного приемника сигналов с прямым расширением спектра, включая подсистемы поиска и слежения, приведена на рисунке 9.6.

9.6.2 Поиск и отслеживание сигналов с перестройкой рабочей частоты

Структурная схема, реализующая один из возможных методов поиска сигналов с перестройкой рабочей частоты, изображена на рисунке 9.7. Если в передатчике таких сигналов используется m рабочих частот, например, r = 1000, то схема поиска (коррелятор) содержит 1000 перемножителей, полосовых фильтров, квадратичных детекторов огибающей и элементов задержки. Элементы задержки производят выравнивание задержек, поэтому для совпадающей последовательности частотных элементов сложение сигналов $v_1, v_2, \ldots, v_m$ в сумматоре будет происходить в один и тот же момент времени. Поэтому с высокой вероятностью пороговый уровень будет превышен, что указывает на то, что синхронизация приемника с принимаемым сигналом достигнута. При этом формируется основной выброс корреляционной функции, указывающий начало формирования ПСП [36].

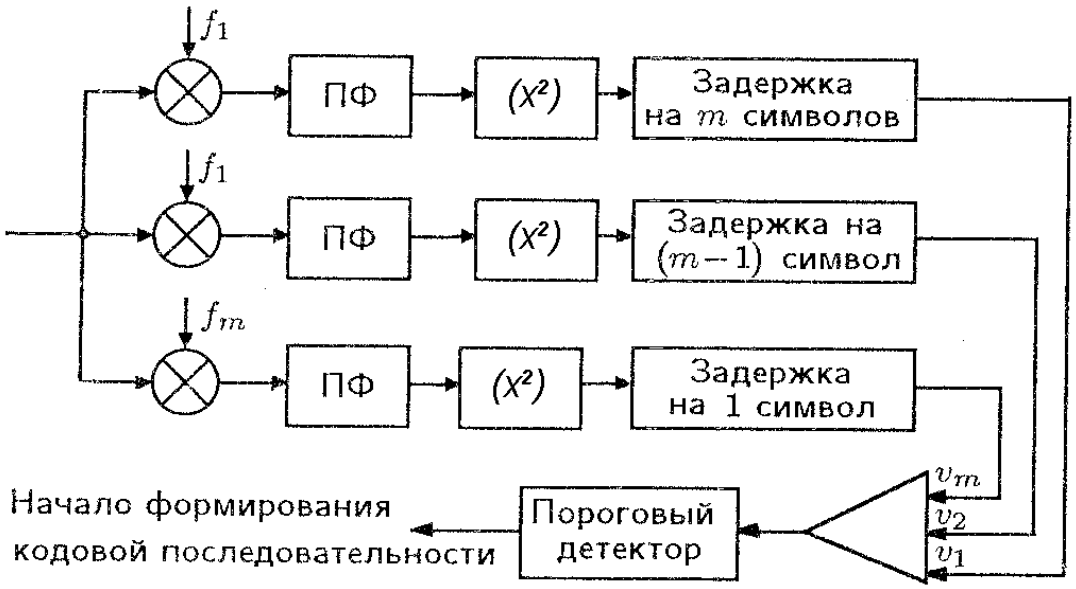


Рисунок 9.7 - Схема параллельного поиска

Хотя и рассмотренный метод поиска с помощью набора корреляторов или согласованного фильтра позволяет осуществить быстрый поиск, все-таки существенно сократить сложность, размеры и стоимость приемника можно при использовании одного коррелятора, реализуя циклический поиск. Однако это сопровождается существенным увеличением времени поиска, поскольку в этом случае он осуществляется последовательно, а не параллельно.

Идея последовательного поиска иллюстрируется структурной схемой, изображенной на рисунке 9.8. Генератор тактовых импульсов с частотой f_h, генератор ПСП и синтезатор частот образуют перестраиваемый генератор опорных сигналов. Генератор ПСП формирует псевдослучайную последовательность, аналогичную последовательности соответствующего передатчика. В зависимости от состояния управляющего сигнала на выходе компаратора генератор тактовых импульсов находится в состоянии либо

«включено», либо «выключено». Частота синтезатора частот задается цифровым сигналом генератора ПСП. По мере смены состояний генератора ПСП частота синтезатора частот «пробегает» весь набор значений от f_1 до f_M, возвращаясь затем к f_1 и т.д. Скорость перестройки частоты равна $f_h = 1/T_h$.

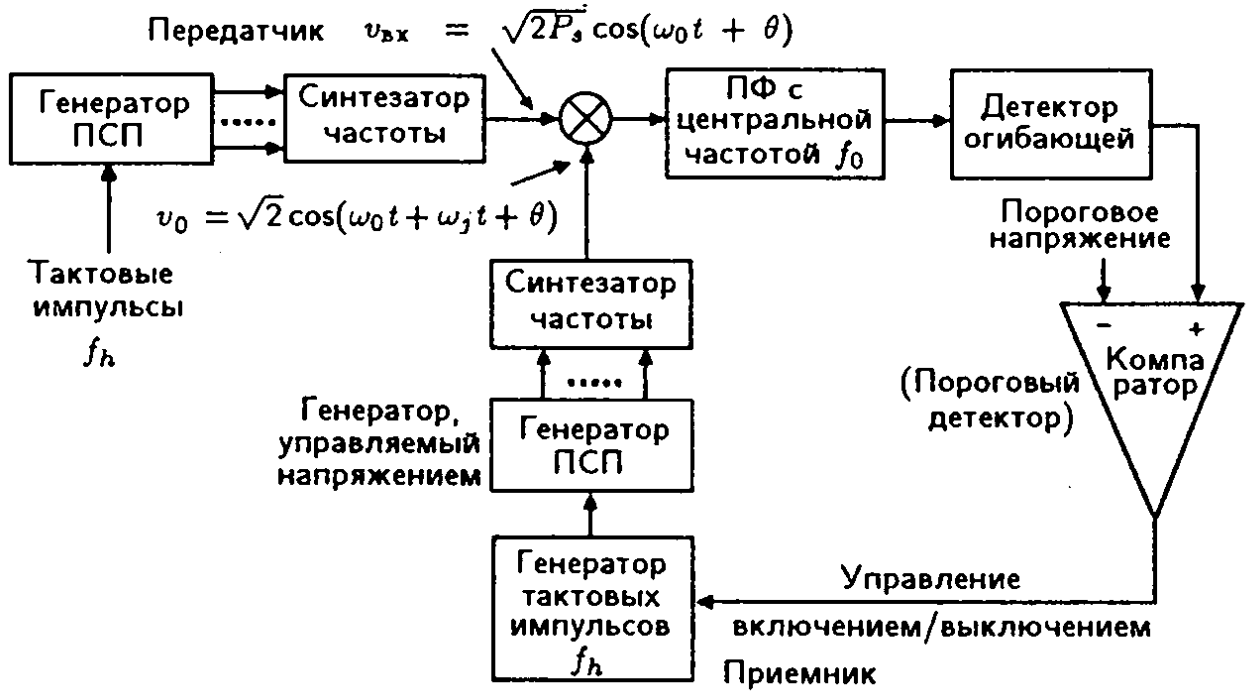


Рисунок 9.8 - Схема последовательного поиска

В начале процедуры поиска частота принимаемого и опорного сигналов не совпадают, т.е. $f_i \neq f_j$. В этом случае сжатие спектра принимаемого сигнала не происходит из-за отсутствия корреляции, и спектр сигнала на входе полосового фильтра сохраняется широким. Через полосовой фильтр с относительно узкой полосой пропускания, равной примерно $2f_h$, на вход детектора огибающей пройдет лишь небольшая часть мощности входного сигнала. На выходе компаратора сигнал будет иметь низкий уровень, соответствующий состоянию «выключено» генератора тактовых импульсов. Генератор ПСП не перейдет к очередному состоянию, а в синтезаторе частот приемника сохранится предыдущая частота $f_o + f_j$, т.е. он останется в позиции ожидания. Когда наконец частота принимаемого сигнала станет равной f_j, разностная частота совпадает с частотой настройки полосового фильтра и на его выходе появится сигнал.

На выходе детектора огибающей сигнал будет иметь уровень выше порогового, и выходной сигнал компаратора будет иметь высокий уровень, соответствующий состоянию «включено» генератора тактовых импульсов. Генератор ПСП приемника входит в синхронизм с аналогичным генератором передатчика, т.е. этап грубой синхронизации заканчивается.

После завершения этого этапа сохраняется относительная задержка (частотно-временное рассогласование) принимаемого и опорного сигналов, равная τ.

На втором этапе, этапе точной синхронизации, это рассогласование устраняется. Достигается это с помощью следящей системы, изображенной на рисунке 9.9.

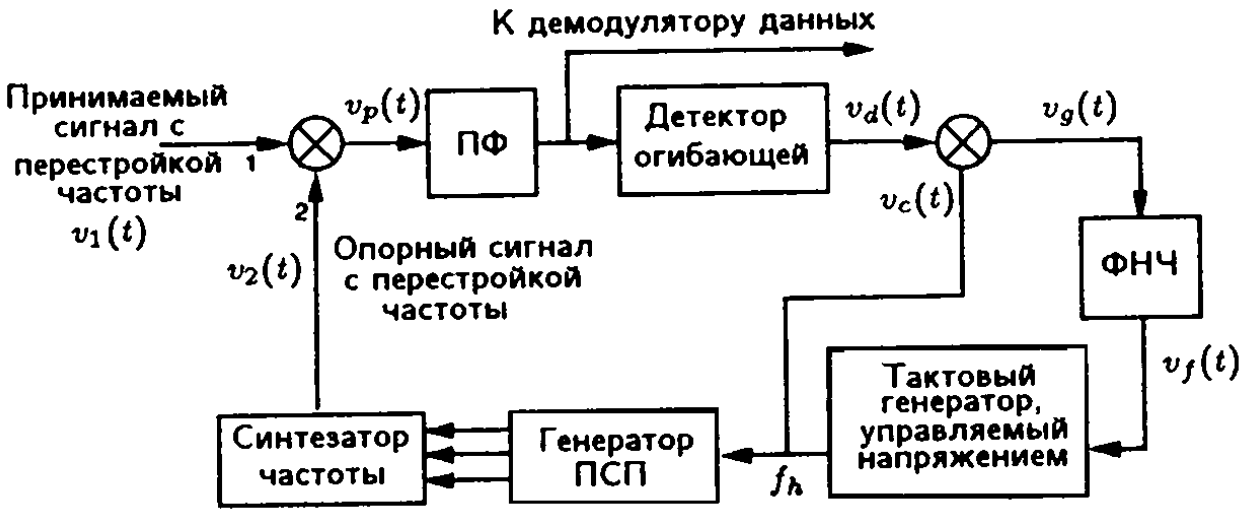


Рисунок 9.9 - Схема слежения за задержкой сигналов с перестройкой

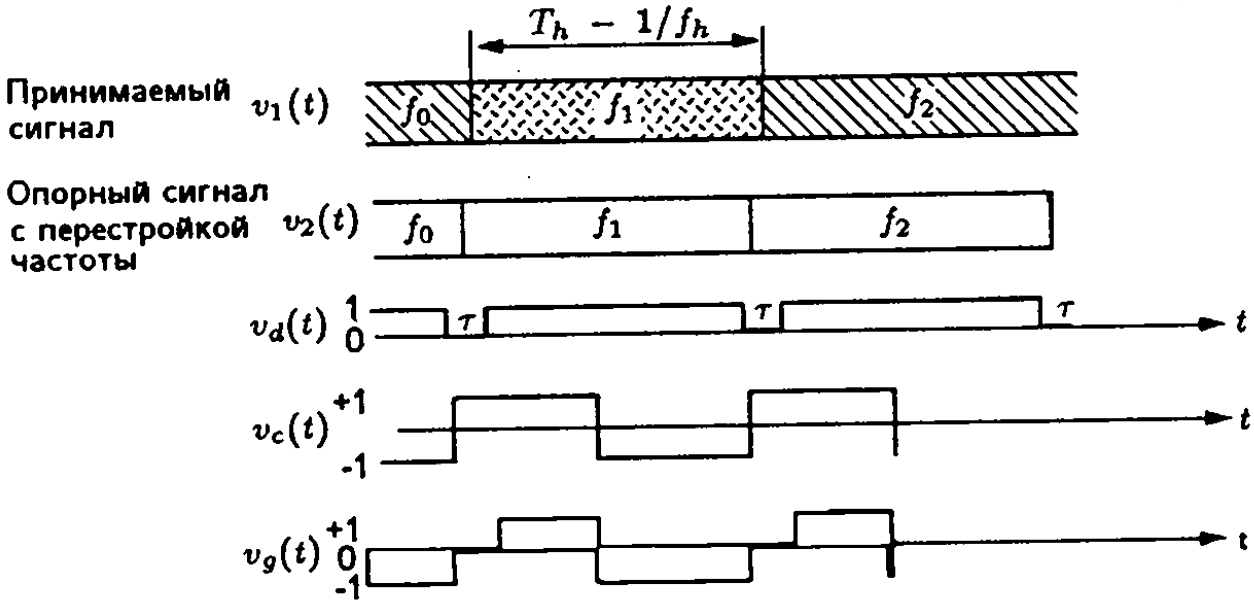


Рисунок 9.10 - Временные диаграммы, иллюстрирующие работу схем слежения

Временные диаграммы, поясняющие работу системы, изображены на рисунке 9.10. Здесь полосовой фильтр имеет полосу пропускания частот,

достаточную для прохождения сигнала промежуточной частоты, содержащейся в произведении $v_p(t) = v_1(t)v_2(t)$ при совпадении частот и недостаточную для прохождения сигнала разностной частоты, содержащейся в произведении при несовпадении частот. Поэтому на выходе детектора огибающей сигнал $v_d(t)$ имеет положительный уровень, когда частоты сигналов $v_1(t)$ и $v_2(t)$ совпадают, и близкий к нулю, когда частоты этих сигналов не совпадают.

Выходной сигнал детектора огибающей $v_d(t)$ перемножается с сигналом меандра $v_c(t)$ тактовой частоты f_h. Произведение $v_d(t)v_c(t)$ представляет собой трехуровневый сигнал с соотношением площадей положительных и отрицательных фрагментов, зависящим от значения и знака временного рассогласования. В результате усреднения этого сигнала фильтром нижних частот формируется управляющий сигнал для перестраиваемого генератора тактовых импульсов, который будет отрицательным, если опорный сигнал «опережает» принимаемый, и положительным, в противном случае. Под воздействием управляющего напряжения будет изменяться в соответствующую сторону частота перестраиваемого генератора тактовых импульсов и первоначальное рассогласование сведено к минимуму. На этом этап точной синхронизации системы с перестройкой рабочей частоты заканчивается.

Системы с расширенным спектром, использующие прямое расширение спектра и перестройку рабочей частоты, а также технологию МДКРК широко используются в системах сотовой, персональной, сухопутной, подвижной, спутниковой подвижной связи. Исследования и разработки действующей аппаратуры, проведенные в конце 80-х и начале 90-х годов фирмой Qalcomm, вывели технологию МДКРК на уровень коммерческого применения. МДКРК.

Для диапазонов частот 902...928 МГц, 2,4...2,48 ГГц и 5,4...5,6 Гц, выделенных Федеральной комиссией по связи США, разработаны различные системы и их элементы, использующие технологию МДКРК и программную перестройку рабочей частоты. Исследования, выполненные в AT&T Bell Laboratories, показали, что системы с медленной перестройкой рабочей частоты и многостанционным доступом на основе временного разделения каналов (SFH-TDMA) по сравнению с обычными сотовыми МДВРК системами обладают большей емкостью и улучшенными характеристиками. Преимущества этих систем заключаются в наличии разнесения, высокой помехоустойчивости, нечувствительности к временному рассеянию сигналов.

Контрольные вопросы:

1) Рассказать о системе с медленной перестройкой частоты.

2) Рассказать о системе с быстрой перестройкой частоты.

3) Какие три устройства синхронизации используются в системах с расширением спектра?

4) Как избежать интерференции при частотном уплотнении?

ГЛАВА 10

10 Беспроводные локальные сети

В 1999 году IEEE ратифицировал стандарт IEEE 802.11b для продуктов беспроводных сетей, которые работают на скорости 11 Mbps (подобно Ethernet). Совместимость продуктов различных производителей гарантируется независимой организацией, которая называется Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA). Эта организация была создана лидерами индустрии беспроводной связи в 1999 году. В настоящее время членами WECA являются более 80 компаний, в том числе такие известные производители, как Cisco, Lucent, IBM, Apple, Dell, Siemens, AMD и пр. С продуктами, удовлетворяющими требованиям Wi-Fi (термин WECA для IEEE 802.11b), можно ознакомиться на сайте WECA. [37]

Как и все, стандарты IEEE 802, 802.11 работает на нижних двух уровнях модели ISO/OSI: физическом уровне и канальном уровне. Любое сетевое приложение, сетевая операционная система или протокол (например, TCP/IP) будут так же хорошо работать в сети 802.11, как и в сети Ethernet.

Основная архитектура, особенности и службы 802.11b определяются в первоначальном стандарте 802.11. Спецификация 802.11b затрагивает только физический уровень, добавляя лишь более высокие скорости доступа.

802.11 определяет два типа оборудования – клиент, который обычно представляет собой компьютер, укомплектованный беспроводной сетевой интерфейсной картой (Network Interface Card, NIC), и точку доступа (Access point, AP), которая выполняет роль моста между беспроводной и проводной сетями. Точка доступа обычно содержит в себе приёмопередатчик, интерфейс проводной сети (802.3), а также программное обеспечение, занимающееся обработкой данных. В качестве беспроводной станции может выступать ISA, PCI или PC Card_- сетевая карта в стандарте 802.11, либо встроенные решения, например, телефонная гарнитура 802.11.

На физическом уровне определены два широкополосных радиочастотных метода передачи и один – в инфракрасном диапазоне.

Радиочастотные методы работают в ISM диапазоне 2,4 ГГц и обычно используют полосу 83 МГц от 2,400 ГГц до 2,483 ГГц. Технологии широкополосного сигнала, используемые в радиочастотных методах, увеличивают надёжность, пропускную способность, позволяют многим несвязанным друг с другом устройствам разделять одну полосу частот с минимальными помехами друг для друга.

Стандарт 802.11 использует метод прямой последовательности (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) и метод частотных скачков (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Эти методы кардинально отличаются и несовместимы друг с другом.

Реализация метода передачи в инфракрасном диапазоне (IR) в стандарте 802.11 основана на излучении ИК передатчиком ненаправленного (diffuse IR)

сигнала. Вместо направленной передачи, требующей соответствующей ориентации излучателя и приёмника, передаваемый ИК сигнал излучается в потолок. Затем происходит отражение сигнала и его приём. Такой метод имеет очевидные преимущества по сравнению с использованием направленных излучателей, однако есть и существенные недостатки – требуется потолок, отражающий ИК излучение в заданном диапазоне длин волн (850 – 950 нм); радиус действия всей системы ограничен 10 метрами. Кроме того, ИК лучи чувствительны к погодным условиям, поэтому метод рекомендуется применять только внутри помещений.

Поддерживаются две скорости передачи данных – 1 и 2 Mbps. На скорости 1 Mbps поток данных разбивается на квартеты, каждый из которых затем во время модуляции кодируется в один из 16-ти импульсов. На скорости 2 Mbps метод модуляции немного отличается – поток данных делится на битовые пары, каждая из которых модулируется в один из четырёх импульсов.

При использовании метода частотных скачков FHSS полоса 2,4 ГГц делится на 79 каналов по 1 МГц. Отправитель и получатель согласовывают схему переключения каналов (на выбор имеется 22 таких схемы), и данные посылаются последовательно по различным каналам с использованием этой схемы. Каждая передача данных в сети 802.11 происходит по разным схемам переключения, а сами схемы разработаны таким образом, чтобы минимизировать шансы того, что два отправителя будут использовать один и тот же канал одновременно. Метод FHSS позволяет использовать очень простую схему приёмопередатчика, однако ограничен максимальной скоростью 2 Mbps. Это ограничение вызвано тем, что под один канал выделяется ровно 1 МГц, что вынуждает FHSS системы использовать весь диапазон 2,4 ГГц. Это означает, что должно происходить частое переключение каналов (например, в США установлена минимальная скорость 2,5 переключения в секунду), что, в свою очередь, приводит к увеличению накладных расходов.

Метод DSSS делит диапазон 2,4 ГГц на 14 частично перекрывающихся каналов. Для того чтобы несколько каналов могли использоваться одновременно в одном и том же месте, необходимо, чтобы они отстояли друг от друга на 25 МГц (не перекрывались) для исключения взаимных помех. Таким образом, в одном месте может одновременно использоваться максимум 3 канала. Данные пересылаются с использованием одного из этих каналов без переключения на другие каналы. Чтобы компенсировать посторонние шумы, используется 11-ти битная последовательность Баркера, когда каждый бит данных пользователя преобразуется в 11 бит передаваемых данных. Такая высокая избыточность для каждого бита позволяет существенно повысить надёжность передачи, при этом значительно снизив мощность передаваемого сигнала. Даже если часть сигнала будет утеряна, он в большинстве случаев всё равно будет восстановлен. Тем самым минимизируется число повторных передач данных.

Основное дополнение, внесённое 802.11b в основной стандарт, – это поддержка двух новых скоростей передачи данных – 5,5 и 11 Mbps. Для достижения этих скоростей был выбран метод DSSS, так как метод частотных скачков в силу ограничений FCC не может поддерживать более высокие скорости. Из этого следует, что системы 802.11b будут совместимы с DSSS системами 802.11, но не будут работать с системами FHSS 802.11.

Для поддержки очень зашумлённых сред, а также работы на больших расстояниях сети 802.11b используют динамический сдвиг скорости, который позволяет автоматически изменять скорость передачи данных в зависимости от свойств радиоканала. Например, пользователь может подключиться с максимальной скоростью 11 Mbps, но в том случае, если повысится уровень помех или пользователь удалится на большое расстояние, мобильное устройство начнёт передавать на меньшей скорости – 5,5, 2 или 1 Mbps. В том случае, если возможна устойчивая работа на более высокой скорости, мобильное устройство автоматически начнёт передавать с более высокой скоростью. Сдвиг скорости – механизм физического уровня и является прозрачным для вышестоящих уровней и пользователя.

Канальный уровень 802.11 состоит из двух подуровней: управления логической связью (Logical Link Control, LLC) и управления доступом к носителю (Media Access Control, MAC). 802.11 использует тот же LLC и 48-битовую адресацию, что и другие сети 802, что позволяет легко объединять беспроводные и проводные сети, однако MAC уровень имеет кардинальные отличия. MAC уровень 802.11 очень похож на реализованный в 802.3, где он поддерживает множество пользователей на общем носителе, когда пользователь проверяет носитель перед доступом к нему. Для Ethernet сетей 802.3 используется протокол Carrier Sence Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD), который определяет, как станции Ethernet получают доступ к проводной линии и как они обнаруживают и обрабатывают коллизии, возникающие в том случае, если несколько устройств пытаются одновременно установить связь по сети. Чтобы обнаружить коллизию, станция должна обладать способностью и принимать, и передавать одновременно. Стандарт 802.11 предусматривает использование полудуплексных приёмопередатчиков, поэтому в беспроводных сетях 802.11 станция не может обнаружить коллизию во время передачи.

Чтобы учесть это отличие, 802.11 использует модифицированный протокол, известный как Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) или Distributed Coordination Function (DCF). CSMA/CA пытается избежать коллизий путём использования явного подтверждения пакета (ACK), что означает, что принимающая станция посылает ACK пакет для подтверждения того, что пакет получен неповреждённым.

Для определения того, является ли канал свободным, используется алгоритм оценки чистоты канала (Channel Clearance Algorithm, CCA). Его суть заключается в измерении энергии сигнала на антенне и определения мощности принятого сигнала (RSSI). Если мощность принятого сигнала ниже

определённого порога, то канал объявляется свободным, и MAC уровень получает статус CTS. Если мощность выше порогового значения, передача данных задерживается в соответствии с правилами протокола. Стандарт предоставляет ещё одну возможность определения незанятости канала, которая может использоваться либо отдельно, либо вместе с измерением RSSI – метод проверки несущей. Этот метод является более выборочным, так как с его помощью производится проверка на тот же тип несущей, что и по спецификации 802.11. Наилучший метод для использования зависит от того, каков уровень помех в рабочей области.

Таким образом, CSMA/CA предоставляет способ разделения доступа по радиоканалу. Механизм явного подтверждения эффективно решает проблемы помех. Однако он добавляет некоторые дополнительные накладные расходы, которых нет в 802.3, поэтому сети 802.11 будут всегда работать медленнее, чем эквивалентные им Ethernet локальные сети.

Наконец, MAC уровень 802.11 предоставляет возможность расчёта CRC и фрагментации пакетов. Каждый пакет имеет свою контрольную сумму CRC, которая рассчитывается и прикрепляется к пакету. Здесь наблюдается отличие от сетей Ethernet, в которых обработкой ошибок занимаются протоколы более высокого уровня (например, TCP). Фрагментация пакетов позволяет разбивать большие пакеты на более маленькие при передаче по радиоканалу, что полезно в очень «заселённых» средах или в тех случаях, когда существуют значительные помехи, так как у меньших пакетов меньше шансы быть повреждёнными. Этот метод в большинстве случаев уменьшает необходимость повторной передачи и, таким образом, увеличивает производительность всей беспроводной сети.

MAC уровень 802.11 несёт ответственность за то, каким образом клиент подключается к точке доступа. Когда клиент 802.11 попадает в зону действия одной или нескольких точек доступа, он на основе мощности сигнала и наблюдаемого значения количества ошибок выбирает одну из них и подключается к ней. Как только клиент получает подтверждение принятия точкой доступа, он настраивается на радиоканал, в котором она работает. Время от времени он проверяет все каналы для проверки предоставления другой точки доступа службы более высокого качества. Если такая точка доступа находится, то станция перенастраивается на её частоту.

Процесс динамического подключения и переподключения позволяет сетевым администраторам устанавливать беспроводные сети с очень широким покрытием, создавая частично перекрывающиеся «соты». Идеальным вариантом является такой, при котором соседние перекрывающиеся точки доступа будут использовать разные DSSS каналы, чтобы не создавать помех в работе друг другу.

Так как мобильные станции и точки доступа являются СВЧ устройствами, у многих возникают вопросы по поводу безопасности использования компонентов Wave LAN. Известно, что чем выше частота радиоизлучения, тем опаснее оно для человека. В частности, известно, что

если посмотреть внутрь прямоугольного волновода, передающего сигнал частотой 10 или более ГГц, мощностью около 2 Вт, то неминуемо произойдёт повреждение сетчатки глаза, даже если продолжительность воздействия составит менее секунды. Антенны мобильных устройств и точек доступа являются источниками высокочастотного излучения, и ,хотя мощность излучаемого сигнала очень невелика, всё же не следует находиться в непосредственной близости от работающей антенны. Как правило, безопасным расстоянием является расстояние порядка десятков сантиметров от приёмо-передающих частей [38].

В настоящее время начато внедрение двух конкурирующих стандартов на беспроводные сети следующего поколения – стандарт IEEE 802.11a и европейский стандарт HIPERLAN-2. Оба стандарта работают во втором ISM диапазоне, использующем полосу частот в районе 5 ГГц. Скорость передачи данных в сетях нового поколения составляет 54 Mbps.

Bluetooth - это современная технология беспроводной передачи данных, созданная в 1998 году группой компаний: Ericsson, IBM, Intel, Nokia, Toshiba. С помощью Bluetooth можно соединять друг с другом практически любые устройства: мобильные телефоны, ноутбуки, принтеры, цифровые фотоаппараты и даже холодильники, микроволновые печи, кондиционеры. Bluetooth - это маленький чип, представляющий собой высокочастотный (2.4 - 2.48 МГц) приёмопередатчик, работающий в диапазоне ISM (Industry, Science and Medicine - диапазон, предназначенный для использования в промышленных, научных и медицинских целях). Для передачи данных могут быть использованы асимметричный (721 Кбит/сек в одном направлении и 58 Кбит/сек в другом) и симметричный методы (433 Кбит/сек) [39].

Интерфейс Bluetooth в зависимости от мощности позволяет устанавливать связь в пределах 10 или 100 метров. Разница в расстоянии, безусловно, большая, однако соединение в пределах 10 м позволяет сохранить низкое энергопотребление, компактный размер и достаточно невысокую стоимость компонентов. Так, маломощный передатчик потребляет всего 0.3 мА в режиме standby и в среднем 30 мА при обмене информацией.

Основным направлением использования Bluetooth стало создание так называемых персональных сетей (PAN - private area networks), включающих такие разноплановые устройства, как мобильные телефоны, PDA, MP3-плееры, компьютеры и даже микроволновые печи с холодильниками.

Основным структурным элементом сети Bluetooth является так называемая «пикосеть» (piconet) - совокупность от 2 до 8 устройств, работающих на одном и том же шаблоне. В каждой пикосети одно устройство работает как master, а остальные - как slave. Master определяет шаблон, на котором будут работать все slave-устройства его пикосети, и синхронизирует ее работу. Стандарт Bluetooth предусматривает соединение независимых и даже не синхронизированных между собой пикосетей (до 10) в так называемую «scatternet» (один из вариантов перевода глагола to scatter звучит как «рассеивать»). Для этого каждая пара пикосетей должна иметь как,

минимум, одно общее устройство, которое будет master в одной и slave в другой. Таким образом, в пределах отдельной scatternet с интерфейсом Bluetooth может быть одновременно связано, максимум, 71 устройство, однако нет ограничения применения устройств при использовании Internet.

В диапазоне 2.4 МГц работают также различные медицинские приборы, бытовая техника, беспроводные телефоны, беспроводные локальные сети стандарта IEEE. Во избежание интерференции с ними Bluetooth работает по принципу скачкообразной перестройки частоты FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum).

Контрольные вопросы:

1) Перечислите и кратко охарактеризуйте уровни протокола IEEE 802.

2) В чем различие между точкой доступа и порталом?

3) С какими характеристиками беспроводной локальной сети связаны уникальные вопросы безопасности, не возникающие в проводной сети?

4) Что Вы знаете про технологии Bluetooth ,Wi-Fi, Wimax, Zigbee?

Тестовые задания

@1
Как называется процедура, используемая при перемещении абонента из одной ячейки в другую?
1@
A) передача обслуживания от одной БС к другой
B) роуминг
C) аутентификация
D) идентификация
E) регистрация
@2
Как называется процедура, используемая при перемещении абонента на территорию другой системы?
2@
A) роуминг
B) передача обслуживания от одной БС к другой
C) идентификация
D) регистрация
E) аутентификация
@3
Что называется кластером?
3@
A) группа сот с различным набором частот
B) диапазон частот, предоставленный для организации сотовой связи
C) устройство, обеспечивающее повторение частот
D) повторяющиеся частоты
E) нет ответа
@4
Что называется размерностью кластера?
4@
A) число сот в наборе
B) максимальный размер соты системы
C) минимальный размер соты системы
D) средний размер соты системы
E) количество используемых в наборе частот
@5
Для чего применяют модели повторного использования частот (кластеры)?
5@
A) для увеличения числа каналов на соту без расширения общей полосы частот
B) для увеличения числа каналов на соту с расширением общей полосы частот
C) для расширения полосы частот и уменьшения числа каналов на соту
D) для уменьшения числа каналов на соту и сужения общей полосы частот

E) нет ответа
@6
Что называется аутентификацией абонента?
6@
A) процедура подтверждения подлинности абонента системы сотовой связи
B) процедура выявления утерянных, украденных аппаратов
C) процедура выявления неисправных аппаратов
D) процедура определения видов услуг для данной подвижной станции
E) нет ответа
@7
Какова структура системы сотовой связи?
7@
A) центр коммутации, базовые станции, подвижные станции
B) базовая станция, центры коммутации, подвижные станции
C) подвижная станция, базовая станции, ретрансляторы
D) телефонная сеть общего пользования, подвижная станция
E) телефонная сеть общего пользования, центр коммутации
@8
Для чего предназначен эквалайзер приемника подвижной станции?
8@
A) для частичной компенсации искажений сигнала вследствие многолучевого распространения
B) для управления работой подвижной станции
C) выделяет из входного потока управляющую информацию
D) восстанавливает поступающий с кодера канала сигнал речи
E) для выполнения всех вышеперечисленных функций
@9
Для чего предназначен модулятор передатчика подвижной станции?
9@
A) для переноса информации кодированного видеосигнала на несущую частоту
B) для выделения из модулированного радиосигнала кодированного видеосигнала
C) для переноса информации кодированного радиосигнала на видеочастоту
D) для выделения из кодированного видеосигнала модулированного радиосигнала
E) для выполнения всех вышеперечисленных функций
@10
Для чего на базовой станции устанавливается несколько приемников и передатчиков?
10@
A) для одновременной работы на нескольких каналах с различными частотами
B) на базовой станции устанавливают несколько приемников и один передатчик

C) на базовой станции устанавливают несколько передатчиков и один приемник
D) на базовой станции устанавливают один передатчик и один приемник
E) для согласования с несколькими приемными и передающими антеннами
@11
Что представляет собой центр коммутации?
11@
A) Это автоматическая телефонная станция системы сотовой связи, обеспечивающая все функции управления сетью
B) это станция, которой управляют базовые станции
C) это станция, которой управляют подвижные станции
D) это станция, дублирующая работу базовой станции
E) нет ответа
@12
Какой узел центра коммутации содержит сведения об абонентах-гостях?
12@
A) гостевой регистр
B) домашний регистр
C) регистр аппаратуры
D) коммутатор
E) контроллер связи
@13
Какой узел центра коммутации содержит сведения об украденных абонентских аппаратах или об аппаратах, имеющих технические дефекты?
13@
A) регистр аппаратуры
B) домашний регистр
C) контроллер связи
D) гостевой регистр
E) коммутатор
@14
Почему в CDMA сигналы называются шумоподобными?
14@
A) для тех, кто не знает, на какую последовательность был перемножен полезный сигнал, он выглядит как шум
B) по частотному спектру сигналы похожи на шум
C) спектр сигнала шире спектра шума
D) сигнал и шум трудно различить
E) нет ответа
@15
Какой фактор обеспечивает в CDMA более высокую пропускную способность по сравнению с другими технологиями?
15@
A) использование всего частотного ресурса

B) более высокая скорость передачи информации
C) использование только части частотного ресурса
D) применение статистического экономного кодирования
E) нет ответа
16@
Какая модуляция применяется в современных радиопередатчиках низовой связи?
16@
A) амплитудная
B) угловая и импульсная
C) фазовая
D) частотная
E) угловая
@17
Какого вида множественного доступа в системах беспроводной связи сейчас не существует?
17@
A) на основе кодового разделения каналов
B) на основе частотного разделения каналов
C) на основе фазового разделения каналов
D) на основе временного разделения каналов
E) FDMA/TDMA
@18
Преимуществом транкинговых радиосистем по сравнению с сотовыми системами является
18@
A) малое время установления соединения,
B) увеличение зоны обслуживания путем создания многозоновой сети,
C) множество сервисных возможностей,
D) нет преимуществ
E) роуминг
@19
Общеевропейским стандартом цифровой транкинговой системы радиосвязи является
19@
A) TETRA
B) Inmarsat-A
C) D-AMPS (IS-54, впоследствии IS-136)
D) все перечисленные
E) CDMA

@20
Какой метод построения ветвей разнесения в зависимости от характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи не существует?
20@
A) амплитудный
B) пространственный
C) угловой
D) поляризационный
E) все перечисленные
@21
В каких системах радиосвязи используется 3,4-5,25 ГГц?
21@
A) спутниковые системы
B) системы персонального радиовызова
C) транкинговые системы
D) ведомственные диспетчерские радиосистемы
E) сотовые системы
@22
Какая технология беспроводной связи позволяет подключать друг к другу такие разноплановые устройства, как мобильные телефоны, ноутбуки, принтеры, цифровые фотоаппараты, PDA, MP3-плееры?
22@
A) BLUETOOTH
B) IEEE 802.11a
C) IEEE 802.11b
D) HIPERLAN
E) AMPS
@23
Интерфейс Bluetooth в зависимости от мощности позволяет устанавливать связь в пределах:
23@
A) 10 или 100 метров
B) 50 или 500 метров
C) 100 или 1000 метров
D) 500 или 5000 метров
E) 1 или 10 км
@24
Какие параметры характеризуют канал радиосвязи ?
24@
A) все перечисленные
B) полоса пропускания частот
C) время действия
D) пропускная способность канала
E) нет ответа,

@25
Какие технические каналы обладают наибольшей пропускной способностью?
25@
A) оптоволоконные каналы
B) телевизионные каналы
C) телефонные каналы
D) телеграфные каналы
E) спутниковые каналы
@26
В каких системах радиосвязи используется диапазон 800-900 МГц?
26@
A) сотовые системы
B) спутниковые системы
C) беспроводные оптические системы
D) системы персонального радиовызова
E) все перечисленные
@27
Транкинг – это
27@
A)метод свободного доступа большого числа абонентов к ограниченному числу каналов
B) метод доступа ограниченного числа абонентов к множеству каналов
C) сеть общего доступа абонентов к множеству каналов
D) метод свободного доступа абонентов по принципу «полудуплекс»
E) все перечисленные
@28
В сравнении с сотовыми системами к преимуществам транкинговых радиосистем следует отнести:
28@
A) все перечисленные преимущества
B) гибкую систему вызовов (индивидуальный, групповой, вещательный, приоритетный, аварийный и др.)
C) малое время установления соединения
D) экономичность
E) нет ответа
@29
Для многостанционного доступа с частотным разделением справедливо соотношение:
29@
A) «одна несущая - один канал»
B) «одна несущая - несколько каналов»
C) «несколько несущих - один канал»
D) «несколько несущих - несколько каналов». Число несущих > числа каналов
E) все перечисленные

@30
Для многостанционный доступ с временным уплотнением справедливо соотношение
30@
A «одна несущая - несколько каналов»
B) «одна несущая - один канал»
C) «несколько несущих - один канал»
D) «несколько несущих - несколько каналов». Число несущих больше числа каналов
E) все перечисленные

Список сокращений

А3	—	Алгоритм аутентификации
А8	—	Алгоритм формирования ключа шифрования
АЛС	—	Атмосферная лазерная связь
АТ	—	Абонентский терминал
АТС	—	Автоматическая телефонная станция
АР	—	Абонентская радиостанция
АРК	—	Автоматическое распределение каналов
АСТ	—	Абонентский спутниковый терминал
АЦП	—	Аналого-цифровой преобразователь
БД	—	База данных
БППС	—	Базовая приемо-передающая станция
БС	—	Базовая станция
БСПИ	—	Беспроводные сети передачи информации
ВВ	—	Внутренний вызов
ВОС	—	Взаимодействие открытых систем
ВР	—	Временное разделение
ВС	—	Ведомственная сеть
ВЧ	—	Высокая частота
ВЭО	—	Высокоэллиптическая орбита
ГВ	—	Групповой вызов
ГСО	—	Геостационарная орбита
ДП	—	Диспетчерский пульт
ДПК	—	Двухсторонний пользовательский канал
ДС	—	Диспетчер сети
ЗС	—	Земная станция
ЕС	—	Европейское сообщество
ИБ	—	Информационный блок
ИБС	—	Информационно-биллинговая система
ИВ	—	Индивидуальный вызов
ИКМ	—	Импульсно-кодовая модуляция
ИН	—	Идентификация номера
ИСЗ	—	Искусственный спутник земли
КА	—	Космический аппарат
КБС	—	Контролер базовой станции
КЛА	—	Космический летательный аппарат
КС	—	Космические системы
КТ	—	Канал трафика
КУ	—	Канал управления
КШ	—	Ключ шифрования
ЛВС	—	Локальная вычислительная сеть
ЛК	—	Логический канал
МА	—	Мобильный (подвижный) абонент

МДВД — Многостанционный доступ с временным разделением
МДЧР — Многостанционный доступ с частотным разделением
МИН Международный идентификационный номер
МККР — Международный консультативный комитет по радио
МКРЧ Международный комитет по регистрации частот
МОС — Международная организация стандартов
МС — Мобильная связь
МСЭ — Международный союз электросвязи
МШУ — Малошумящий усилитель
НВО — Низковысотная орбита
НС — Наземная станция
НСД — Несанкционированный доступ
НЧ — Низкая частота
ОГКА — Орбитальная группировка КА
ОК — Обратный канал
ОП — Оконечный пункт
ОР — Опорный ретранслятор
ОСС — Оптические системы связи
ПД — Передача данных
ПИН — Персональный идентификационный номер
ПК — Персональный компьютер
ПП — Промежуточный пункт
ППД — Пакетная передача данных
ППРИ — Псевдослучайная перестройка рабочей частоты
ПС — Подвижная станция
ПСП — Псевдослучайная последовательность
ПСС — Подвижная спутниковая служба
ПСТ — Персональный спутниковый терминал
ПЧ — Промежуточная частота
РА — Радиоабонент
РК — Радиоканал
РМВ — Реальный масштаб времени
РС — Радиостанция
РСР — Транкинговая система (сеть) радиосвязи
РСС — Радиотелефонная система связи
РСС — Радиовещательная спутниковая служба
РТ — Ретранслятор
РЧ — Радиочастота
СБС — Система базовой станции
СВО — Средневысотная орбита
СКК — Сеть с коммутацией каналов
СКП — Сеть с коммутацией пакетов
СМС — Система мобильной связи
СПР — Система персонального радиовызова

СПС — Сеть подвижной связи
СПСС — Сеть персональной спутниковой связи
СР — Спутник-ретранслятор
СС — Система спутниковой связи
ССЗ — Схемы слежения за задержкой
ССС — Система сотовой связи
ССРС — Сотовая сеть радиотелефонной связи
ССЦС — Сотовые системы цифровой связи
СТОП — Сеть телекоммуникаций общего пользования
СЦУ — Системы с централизованным управлением
ТК — Технический комитет
ТОЭ — Терминал обслуживания и эксплуатации
ТПД — Терминал передачи данных
ТС — Телефонная сеть
ТСОП — Телефонная сеть общего пользования
ТСС — Транкинговые системы связи
УМ — Усилитель мощности
УУ — Устройство управления
ФК — Физический канал
ФМ — Фазовая модуляция
ФСПР — Федеральная сеть персонального радиовызова
ФСС — Фиксированная спутниковая служба
ЦК — Центр коммутации
ЦУС — Центр управления системой
ЧМ — Частотная модуляция
ШПС — Широкополосный сигнал
ШС — Шлюзовая станция
ЭП — Электронная почта

Заключение

Настоящая книга предназначена для широкой аудитории читателей, которым будет полезно изучение современных беспроводных методов связи и организации сетей, а также сопутствующих технологий.

В результате изучения дисциплины «Технологии беспроводной связи» студент должен:

- иметь представление о тенденциях развития технологий беспроводной связи, о закономерностях, определяющих связь между показателями качества каналов, энергетическими параметрами, показателями эффективного использования полос частот и мощности, экономическими показателями;

- знать технические концепции построения систем беспроводной связи; основные параметры радиоканалов и методы определения этих параметров; основные методы расчёта энергетических параметров систем беспроводной связи и технических параметров сетей; назначение и функциональные схемы центров беспроводной связи; принципы построения системы сетевого управления; способы многостанционного доступа и области их применения; технические параметры стандартов систем беспроводной связи, методы разнесения сигналов; структурные схемы систем с расширением спектра; методы измерения основных характеристик каналов, устройств и систем; принципы построения беспроводных локальных сетей;

- уметь оценивать и выбирать основные энергетические параметры аппаратуры: радиус ячейки, чувствительность приёмника и т.п., исходя из существующих норм на качество канала и реальных параметров трассы беспроводной связи; разрабатывать частотно-территориальный план при заданных стандартах системы беспроводной связи для заданной местности; оптимизировать архитектуру сети беспроводной связи по комплексным критериям эффективности.

Авторы книги надеются, что настоящий учебник послужит достаточно основательным фундаментом для изучения по интересующим внимательного читателя вопросам и самостоятельного освоения специальных новых дисциплин, формирующих грамотного и вдумчивого бакалавра в области современной теории и техники беспроводной связи.

Список литературы

1 Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. -М.: Техносфера, 2005.

2 Немировский М.С. Беспроводные технологии от последней мили до последнего дюйма. –М.: Экотрендз, 2009.

3 Феер К. Беспроводная цифровая связь. –М.: Радио связь, 2000.

4 Григорьев В.А., Лагутенко О.И. Сети и системы радиодоступа. – М.: Экотрендз, 2005.

5 Ратынский М.В. Основы сотовой связи. –М.: Радио и связь, 2003.

6 Невдяев Л. М. Мобильная связь 3-го поколения. Серия изданий «Связь и бизнес».- М.: МЦНТИ - Международный центр научной и технической информации, ООО «Мобильные коммуникации», 2000.

7 Коньшин С.В. Транкинговые радиосистемы: Учебное пособие.- Алматы: АИЭС, 2000.

8 Материалы сайта http://www.spectrum.kz/page.php

9 Овчинников А.М., Воробьёв С.В., Сергеев С.И. Открытые стандарты цифровой транкинговой радиосвязи. – М.: МЦНТИ, 2009.

10 Материалы сайта http://www.library.com.ua/oc.ruki/trank/1.shtml

11 Материалы сайта http://www.viol.uz/node/63.htm

12 Карташевский В.Г. Сети подвижной связи. –М.: Эко-трендз, 2001.

13 Коньшин С.В., Демидова Г.Д. Технологии беспроводной связи: Конспект лекций.- Алматы: АУЭС, 2011.

14 Тамаркин В.М., Громов В.Б., Сергеев С.И. Системы и стандарты транкинговой связи. – М.: ИТЦМК, 1998.

15 Соколов А.В. Альтернатива сотовой связи: транкинговые системы. –М.: БХВ- Петербург, 2002.

16 Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной связи. –М.: Радио и связь, 1999.

17 Клочковская Л.П. , Коньшин С.В. Технологии беспроводной связи.- Расчет параметров мобильной связи: Учебное пособие.- Алматы: АИЭС, 2007.

18 Материалы сайта http://www.computer-museum.ru/connect/satrad.htm

19 Материалы сайта http://www.vibiraem.com/2006/12/09/ kak_vybrat_sistemu_sputnikovojj_svjazi.html

20 Андрианов В.И. Средства мобильной связи. – С. BHV-Санкт-Петербург, 2001.

21 Материалы сайта http://sigal.kg/thur_os.html

22 Коньшин С.В., Сабдыкеева Г.Г. Теоретические основы систем связи с подвижными объектами: Учебное пособие.- Алматы: АИЭС, 2002.

23 Афанасьев В.В. Эволюция мобильных сетей. –М.: Связь и бизнес, 2001.

24 Информационные технологии в радиотехнических системах. - ред. И.Б. Федоров. – М.: Изд-воМГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.

25 Материалы сайта http://physoptika.ru/

26 Клоков А. Беспроводная оптическая связь. - М.: Технологии и средства связи, №6, 2008.

27 Милинкис Б., Петров В. Атмосферная лазерная связь. - М.: Информост-Радиоэлектроника и Телекоммуникации №5, 2001.

28 Коньшин С.В. Технологии беспроводной связи: Учебное пособие.- Алматы: АИЭС, 2006.

29 Гаранин М.В., Журавлев В.И., Кунегин С.В. Системы и сети передачи информации: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2001.

30 Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. –М.: Горячая линия-телеком, 2007.

31 Бабков В.Ю., Вознюк М.А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. –М.: Горячая линия-телеком, 2007

32 Одинский А. Перспективные технологии подвижной радиосвязи Информост, №2 (20) 2008.

33 Орлов И.Я. Перспективные методы защиты информационных радиосистем от помех. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации». – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2006.

34 Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. –М.: Вильмс, 2003.

35 Борисов В.И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. – М.: Радио и связь, 2003.

36 Закиров З.Г. Сотовая связь стандарта GSM. –М.: Экотрендз, 2004.

37 Материалы сайта http://www.ixbt.com/comm/wlan.shtml

38 Русев Д. Технологии беспроводного доступа: Справочник. - СПб.: БХВ- Петербург, 2007.

39 Материалы сайта http://leeet.net/technology_bluetooth.php

Коньшин Сергей Владимирович
Демидова Галина Дмитриевна

ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

Учебник

Редактор Л.Т.Сластихина

Сдано в набор ___.___.2014
Формат 60х84 1/16
Бумага типографская №2
Уч. изд. лист.- 10,69. Тираж 100 экз. Заказ № Цена_____ тенге.
Подписано в печать ___ ___. 2014

Отпечатано в типографии ТОО «378»
050034, Алматы, ул. Райымбека, 212/1
+7(727)330-03-12, +7(727)330-03-13