

## Предисловие

В настоящее время мобильные системы радиосвязи являются наиболее быстро развивающимся сегментом рынка радиосредств. Микроминиатюризация аналоговых СВЧ микросхем и внедрение микропроцессоров качественно изменили аппаратуру радиосвязи, она стала не только средством специального и профессионального назначения, но и средством коммуникаций массового потребителя.

Мобильные системы радиосвязи являются сложными комплексами, включающими в себя достаточно самостоятельные компоненты: радиоканал, речепреобразование, помехоустойчивое кодирование и шифрование, частотно-территориальное планирование, сложные частотно-кодовые конструкции модулированных сигналов, повышающие достоверность обмена информацией в условиях многолучевого канала распространения радиоволн и применения технологии ММО, и т. д.

Основой функционирования современной системы радиосвязи является радиоканал цифровой передачи данных. Метод формирования спектра сигналов, вид модуляции, схема приемника высокочастотных модулированных сигналов, алгоритм восстановления переданного цифрового сообщения определяют основные эксплуатационные характеристики системы радиосвязи: число каналов связи в выделенной полосе частот, скорость передачи информации, достоверность и качество приема информации.

В настоящей книге последовательно изложены основные идеи и технические решения, составляющие основу цифровой передачи данных по радиоканалу, и работа радиоканала как части системы радиосвязи.

Передача данных по радиоканалу начинается с отображения цифрового сообщения на цифровой сигнал и заканчивается восстановлением цифрового сообщения по цифровому сигналу в аналоговом и дискретном представлениях. Соответственно, рассмотрены основные параметры цифрового сигнала с точки зрения его последующего преобразования в передатчике и приемнике: спектральная плотность мощности, расстояние между символами, ограничение ширины спектра с минимальными межсимвольными искажениями, влияние нелинейных искажений на достоверность приема.

Модуляция/демодуляция, совместно обеспечивающая прохождение сигналов по эфиру, является основной функцией приемника и передатчика. Параметры и структура модулированных сигналов

в решающей степени определяют структуру высокочастотной части оборудования, методы формирования и приема сигналов, разделения и управления каналами, допустимую скорость передачи информации, энергетический потенциал и т. д. Приведены базовые функциональные схемы приемников/передатчиков и основные характеристики модулированных сигналов, используемых в современных сетях радиосвязи: узкополосные с амплитудной, фазовой и частотной модуляцией, широкополосные (с прямым расширением спектра DSSS, со скачками частоты FHSS, с линейной внутримпульсной частотной модуляцией), сверхширокополосные UWB, многомерные OFDM. Единой методологической базой анализа модулированных сигналов является фундаментальное понятие комплексной огибающей модулированного сигнала. Определены источники линейных (частотных) и нелинейных искажений модулированного сигнала в высокочастотной части радиоканала, условия минимизации влияния этих искажений на информационные параметры и требования стандарта ЭМС.

Специальная глава выделена для определения основных характеристик синтезатора частоты — на сегодня ключевого компонента приемопередатчика. Шумовые характеристики синтезатора, величина и область распределения выбросов на паразитных комбинационных частотах, скорость переключения рабочей частоты, модуляционные характеристики фактически определяют выбор метода модуляции/демодуляции в приемопередатчике и область использования (эксплуатационные характеристики) радиостанции.

Построение и анализ функциональных схем классического приемника цифровых и модулированных сигналов в условиях белого гауссова шума производятся на основе последовательного применения функции максимального правдоподобия. Показаны оптимальная реализация когерентного и некогерентного приема, влияния временной, фазовой и частотной синхронизации, сравнительная достоверность обмена информацией для различных видов модуляции. Анализ оптимального приемника в идеальных условиях белого гауссова шума дополнен определением влияния на его параметры и функциональную схему реальных условий прием при многолучевом распространении радиоволн в городе (различного типа фединга). В отдельной главе рассматриваются основные положения двух базовых стандартов электромагнитной совместимости на радиоканал цифровой подвижной связи — российский РД 45.299-2002 (ГОСТ 12252-86) и европейский ETS-300-113 — предельные значения параметров передатчиков и приемников, функциональные схемы измерений. Указаны основные методы достижения указанных значений параметров при проектировании радиоаппаратуры.

Методологической основой анализа сетей радиосвязи является модель взаимодействия открытых систем OSI-7. В приложении к радиосетям уточняются назначение и выполняемые функции двух нижних уровней модели: физического и канального. Из всех функций канального уровня рассмотрены те, которые имеют прямое отношение к управлению радиоканалом, а именно: организация, разделение и коммутация каналов связи, передача данных в канале, симплексный и дуплексный и режим работы, сотовая, транкинговая и конвенциональная организация сети, доступ к каналам связи в случайные моменты времени (ALOHA) и определение занятости канала путем прослушивания несущей частоты сторонних радиостанций (CSMA), разрешение конфликтных ситуаций. Введен новый раздел оценки организации связи в многолучевых каналах на достоверность приема информации в фединговых каналах на основе технологии MIMO.

Частотно-территориальное планирование сети связи включает расчет дальности радиосвязи, определение оптимального расположения и конфигурации сот, мощности передатчиков и диаграмм направленности антенн базовых радиостанций, распределения частот по сотам, числа каналов на основании ожидаемой внутриканальная и межканальной интерференции, загрузки сот и качества обслуживания абонентов.

Весь анализ радиоканала, функциональных схем, сопутствующих канальных и сетевых функций, ожидаемых эксплуатационных характеристик ориентирован на мобильные радиостанции. Критерии выбора аппаратной и программной реализации ориентированы прежде всего на требования программно-ориентированного радио, которое позволяет модернизировать приемопередатчик путем изменения программного обеспечения с минимальными аппаратными изменениями. В частности, показана важность введение функции анализа состояния эфира.

# 1 Беспроводные сети связи

---

В современной радиотехнике термин «беспроводные сети связи» относится к сетям, которые призваны заменить проводные или кабельные сети связи. На сегодняшний день существует множество разнообразных сетей радиосвязи: от простейших типа «walkie-talkie», которые обеспечивают связь между двумя абонентами на расстоянии несколько десятков метров, до глобальных сотовых и спутниковых сетей, обслуживающих десятки миллионов абонентов во всех концах земного шара. В общем многообразии радиосетей выделяют группу мобильных сетей связи, которые в зависимости от реализации подразделяются на спутниковые, наземные и локальные сети связи [1].

В известной степени почти любую сеть радиосвязи можно назвать мобильной сетью связи. Радиоволны, в отличие от тока в проводных сетях, не требуют физической среды для распространения, поэтому системы радиосвязи, за исключением, может быть, радиорелейных или сетей фиксированного радиодоступа, не предъявляют требований к неизменному положению приемников или передатчиков. Однако реально термин «мобильная связь» применяется к значительно более узкому классу, а именно к сетям радиосвязи, в которых неопределенное местоположение абонента принципиально важно как при построении аппаратуры, так и организации системы связи. Общепринято называть мобильной систему связи, реализующую поиск мобильного абонента, установление и поддержание персонального канала связи с этим абонентом при его перемещении в ареале, обслуживаемом сетью. С этой точки зрения телевидение или радиовещание, которые формально могут иметь в своем составе мобильные передатчики и работать на переносные приемники, не являются мобильными системами связи. В этих сетях, как и пейджинговых, не осуществляется персональный поиск абонента, а подвижность абонента никак не учитывается в организации сети связи. К типовым мобильным сетям относят наземные и морские сети связи, сети локального радиодоступа, сети беспроводного доступа (бесшнуровой телефон) с конвенциональной, транкинговой или сотовой организацией.

В настоящей главе кратко рассматривается концептуальная модель открытых систем связи OSI-7 в приложении к мобильным наземным системам радиосвязи, которые предназначены для передачи речи и данных в сегментах массового, служебного и персонального

применения [2]. Показана функциональная схема системы радиосвязи, принципы работы, состав, структура радиоканала для обмена информацией. Подробно работа сетей связи второго, третьего поколения рассмотрена в [3–6].

### 1.1. Модель OSI-7 для сетей радиосвязи

Мобильная сеть радиосвязи, как и любая другая, анализируется с помощью ключевых понятий: иерархичность структуры, узел, соединение, канал передачи информации.

Узел связи является функциональным элементом сети, обеспечивающим прием и/или передачу сообщения, коммутацию (переключение) направления передачи сообщения, соединение со сторонними функциональными элементами: периферийным оборудованием, базами данных и устройствами управления. Физической реализацией узла связи является совокупность аппаратурных и программных средств.

Соединение является функциональным элементом, обеспечивающим передачу сообщений между узлами сети связи. Физическими реализациями соединения являются телефонные, оптоволоконные или радиолинии. Узлы связи соединяются между собой одним или несколькими соединениями.

Каналом связи называется выделенная упорядоченная совокупность узлов и соединений, совместно обеспечивающих передачу сообщений между удаленными узлами сети связи.

Основой описания работы сети связи является многоуровневая иерархическая модель, в соответствии с которой множество узлов и множество соединений разделяются на иерархические уровни. Все физические устройства и программные средства, входящие в узел связи, группируются в уровни. Каждый уровень выполняет строго определенную группу задач (процедур). Иерархия уровней означает, что для выполнения задач (процедур), соответствующих каждому отдельному уровню, физические и программные устройства этого уровня обращаются к физическим и программным устройствам только тех уровней, которые непосредственно примыкают в иерархической структуре к данному уровню. Все возможные связи между соседними уровнями в узле и между различными узлами в сети группируются в интерфейсы и протоколы соответственно. Иерархия интерфейсов означает, что каждый интерфейс описывает взаимодействие только двух соседних уровней в узле связи. В интерфейсе перечислены требования, которые могут быть предъявлены устройствами данного уровня к нижнему соседнему уровню, и перечислены услуги, которые могут быть предоставлены данным

Таблица 1.1

## Модель открытой системы связи OSI-7

Уровень	№	Уровень	
Верхние уровни	7	Прикладной	
	6	Представления	
	5	Сеансовый	
	4	Транспортный	
Нижние уровни	3	Сетевой	
	2	Канальный	Подуровень логической передачи данных
			Подуровень управления доступом к среде
	1	Физический	

уровнем для вышестоящего соседнего уровня. Иерархия протоколов означает, что при взаимодействии двух узлов сети связи обмен информацией возможен только между однотипными уровнями. В протоколе перечислены форматы представления информации и сигналов управления при взаимодействии однотипных уровней различных узлов.

Стандарт связи, включающий описание протоколов, интерфейсов и процедур, обеспечивает совместимость оборудования и программного обеспечения различных производителей.

**Модель OSI-7.** Концептуальная модель OSI-7 описывает прохождение информации от одного абонента к другому через физический медиум, называемый сетью связи. Сеть связи представляется в виде иерархической структуры узлов и соединений, не зависящей от физической и программной реализации узлов и соединений, вида и назначения передаваемой информации. Любой узел сети связи представляется семью уровнями, каждый из которых выполняет определенную группу процедур и способен взаимодействовать с соседними уровнями данного узла в соответствии с установленными интерфейсами и аналогичными по иерархическому положению уровнями другого узла в соответствии с установленными протоколами. Процедуры, протоколы и интерфейсы достаточно независимы друг от друга, что позволяет изменять их в отдельности с минимальным влиянием на другие. Графически модель OSI-7 представлена в табл. 1.1.

Четыре верхних уровня модели OSI-7 определяют прохождение информации по магистральным сетям, организацию интерактивного соединения, взаимодействие с периферийными устройствами, взаимодействие с базами данных и т. д. Все процедуры, выполняемые на этих уровнях, реализуются в программном виде. Взаимодействие верхних уровней описывается протоколами высокого уровня, в

значительной степени не зависящими от конкретной структуры или физической реализации нижних уровней. В стандартах радиосвязи эти уровни отсутствуют или представлены в виде так называемых портов (шлюзов) с ограниченным набором функций.

Нижние уровни модели (с 1-го по 3-й) определяют передачу данных между выделенными узлами сети и существенно зависят от реализации сети связи. Процедуры на этих уровнях выполняются как программно (например, протокол обмена данными), так и аппаратно (например, формирование физического сигнала для передачи по линии связи).

Прохождение информации между двумя узлами (абонентами) сети определяется интерфейсами взаимодействия уровней в узле и процедурами, выполняемыми на каждом данном уровне. На сетевом уровне происходит поиск абонента в локальной сети и сопровождение мобильного абонента при его передвижении с целью поддержания непрерывности сеанса связи. На канальном уровне выполняется помехоустойчивое кодирование информации, определяется доступность канала связи между двумя выделенными узлами сети и осуществляется контроль достоверности передачи информации между взаимодействующими узлами. На физическом уровне происходит преобразование информационного потока в реальный сигнал, который и передается по соединению. Затем данные одного узла связи проходят по каналу связи (соединению сети), поступают на физический уровень другого узла связи и проходят обратный путь от физического уровня к представительскому. Только соседние уровни каждого узла взаимодействуют в процессе приема и передачи информации. Указанная последовательность действий описывает в самом общем случае установление, поддержание и завершение соединения между двумя узлами сети. Ясно, что в зависимости от функционального назначения узлов далеко не все уровни (функции) могут или должны быть использованы.

Модель OSI-7 является общей, концептуальной схемой передачи информации в открытой сети связи, а не конкретным стеком (совокупностью) протоколов и интерфейсов. Реальная сеть связи описывается стандартом связи, который включает ограниченный набор функций из возможностей, предусмотренных в концептуальной модели. И наоборот, во многих стандартах радиосвязи нижние уровни модели OSI-7 делятся на большое число подуровней, отражающих специфику функционирования сети. Стандарты радиосетей в подавляющем большинстве случаев ограничиваются описанием трех нижних уровней (сетевое, канальное и физическое). Простейшие конвенциональные сети связи включают только физический и неполный канальный уровень.

### 1.1.1. Сетевой уровень

Основная характеристика сети радиосвязи, которая определяется на сетевом уровне, заключается в определении способа взаимодействия множества радиостанций. Сетевой уровень определяет конфигурацию локальной сети связи и обеспечивают управление этой сетью. Базы данных являются неотъемлемой принадлежностью сетевого уровня. С помощью баз данных реализуется аутентификация (определение подлинности) абонента и идентификация параметров радиостанций пользователя, адресация и управление абонентами при их миграции на ареале работы сети связи. Сетевой уровень является чисто программным и в значительной степени не зависит от физической реализации передачи информации между узлами сети. На сетевом уровне выполняются следующие основные процедуры, связанные со спецификой радиосвязи, прежде всего с принадлежностью мобильных абонентов к различным локальным сетям, мобильностью абонента, ограниченной пропускной способностью радиоканала:

- конфигурирование взаимодействия абонентов при ограниченном числе каналов в сети радиосвязи;
- определение местоположения и управление мобильными абонентами при их перемещении по ареалу, обслуживаемому радиосетью;
- маршрутизация и управление вызовами;
- идентификация и аутентификация абонентов по эфиру;
- взаимодействие с другими сетями радиосвязи;
- разрешение конфликта при конкуренции абонентов за доступ к ограниченному числу свободных каналов связи;
- частотно-территориальное планирование системы связи.

Основной специфической функцией сетевого уровня для радиосетей является организация связи подвижных абонентов между собой и локальными центрами в условиях ограниченной пропускной способности радиосети. Выделяют три основных, базовых конфигурации систем радиосвязи: конвенциональная, транкинговая и сотовая.

**Конвенциональная организация сети связи.** Конвенциональная организация является радиотехническим вариантом реализации конфигурации произвольной сети «мэш», как показано на рис. 1.1.

Конвенциональная сеть связи характеризуется отсутствием выделенного центра управления сетью. Конвенциональная сеть связи может включать в себя радиостанции различного типа (персональные, автомобильные, стационарные) с различными техническими



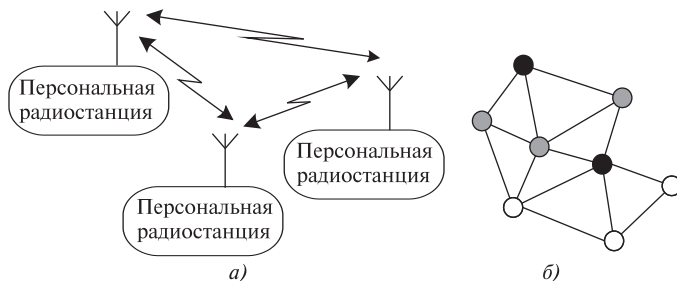


Рис. 1.1. Конвенциональная сеть связи: а — функциональная схема; б — структурная схема

характеристиками и возможностями. Например, стационарная радиостанция имеет в своем составе диспетчерский пульт и возможность выхода в фиксированные телефонные сети, персональные радиостанции обладают минимальными техническими возможностями. Однако с точки зрения сети все радиостанции функционально одинаковые. Никакая радиостанция не имеет средств управления или контроля другой радиостанцией, единственный способ регулирования работы конвенциональной сети — это назначение по договоренности (конвенции) одного из абонентов диспетчером, к которому и обращаются в случае необходимости другие абоненты. Использование частотного ресурса (каналов, выделенных для радиосвязи) не регулируется и равнодоступно всем абонентам. Абонент конвенциональной сети связи самостоятельно выбирает заранее согласованный канал связи с другим абонентом (по предварительной договоренности), при этом канал может оставаться доступным и другим абонентам для совместной работы или прослушивания. В «продвинутых» сетях возможен автоматический анализ занятости каналов и вызов абонента по персональному номеру, что исключает прослушивание и вмешательство в сеанс связи.

Основные свойства конвенциональных сетей связи — простота, предельно низкая стоимость оборудования, возможность быстрого оперативного установления сеанса связи. Соответственно, область применения сетей — служебная связь, в которой отсутствует напряженный трафик, передаются короткие служебные указания или сообщения абонентам, местоположение которых заранее известно. Например, локальная группа спасателей, небольшое подразделение службы безопасности в офисе или здании, строительная бригада и т. п.

**Транкинговая организация сети связи.** Транкинговая сеть радиосвязи представляет радиально-зонавую структуру (типа «звезда»), которая осуществляет автоматическое распределение каналов

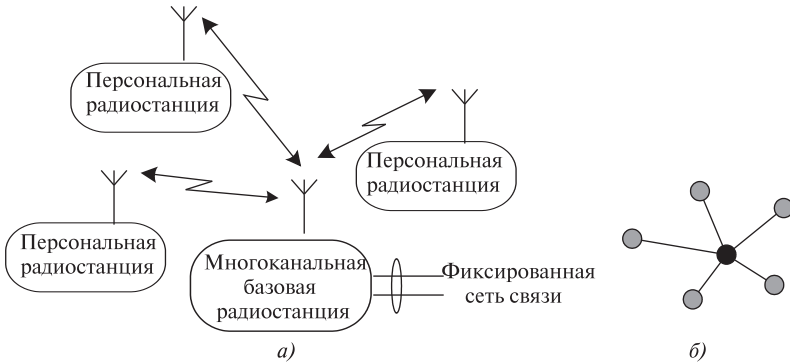


Рис. 1.2. Транкинговая сеть связи: *а* — функциональная схема; *б* — структурная схема

между базовой радиостанцией и мобильными радиостанциями, как показано на рис. 1.2.

Транкинговая сеть связи включает многоканальную базовую радиостанцию и некоторое число мобильных радиостанций, связь между радиостанциями устанавливается только через базовую радиостанцию. При частотном разделении каналов базовая радиостанция обычно содержит от 2 до 16 приемопередатчиков, каждый из которых работает на фиксированной частоте радиоканала. Относительно небольшое число каналов определяется возможностью построения многоканального базового радиоцентра и неэффективным использованием частотного ресурса. Кроме связи с мобильными радиостанциями, базовая радиостанция поддерживает выход в телефонную сеть общего пользования и другие, фиксированные или мобильные, сети связи. Как правило, антенны базовой радиостанции устанавливаются максимально высоко, что при большой мощности базового и мобильного передатчиков реально позволяет достичь дальности связи, ограниченной только горизонтом или естественными и искусственными препятствиями.

Организация связи в транкинговой сети может быть децентрализованной (выбор рабочего канала осуществляется непосредственно абонентской радиостанцией) или централизованной (под управлением базовой радиостанции).

Простейший децентрализованный алгоритм взаимодействия базовой станции с мобильными станциями основан на непрерывном прослушивании каналов связи приемниками всех радиостанций и независимом, автономном установлении связи на любом свободном канале. Радиостанция мобильного абонента непрерывно сканирует (прослушивает) все выделенные или разрешенные частотные каналы и определяет состояние канала занят/свободен. При требовании

абонента на установление связи радиостанция останавливается на любом свободном канале и посылает запрос на базовую радиостанцию. Билинговая система базовой радиостанции проверяет легальность вызывающего абонента, выдает разрешение на установление связи и получает номер вызываемого абонента. Процедура аутентификации повторяется снова в отношении вызываемого абонента и при ее успешном завершении базовая радиостанция посылает вызов на абонентскую радиостанцию. Мобильная радиостанция, непрерывно сканирующая все разрешенные к работе частоты, идентифицирует номер вызываемого абонента как собственный, посылает на базовую радиостанцию сигнал готовности к сеансу связи и включает звуковой зуммер для абонента.

В более сложных транкинговых системах реализовано централизованное управление мобильными радиостанциями базовой радиостанцией с помощью специального служебного канала, предназначенного только для передачи сигналов взаимодействия базовой и мобильных радиостанций. Хотя это и приводит к дополнительным затратам частотных ресурсов (по выделенному служебному каналу не производится передача пользовательской информации), однако в конечном счете обеспечивается более эффективное использование имеющихся каналов путем уменьшения времени установления радиосвязи, установления очередности и длительности вызовов, управления передачей информации. Например, при высоком приоритете абонента базовая радиостанция в случае отсутствия свободных каналов может прервать один из текущих сеансов связи и предоставить канал для срочного аварийного вызова.

Достоинством транкинговой организации сети связи является относительно низкая стоимость оборудования и большая автономность в сочетании с широким спектром предоставляемых услуг. Транкинговая сеть может быть развернута в короткие сроки на любой территории, в том числе совершенно необжитой, при минимальных затратах времени и средств. Сеть может оперативно подключаться к фиксированным локальным сетям (телефонным) или к выделенным физическим линиям передачи. Отдельные транкинговые сети совместимых стандартов могут объединяться в единую сеть на уровне больших регионов и территорий. Однако в связи с большим радиусом действия и относительно небольшим числом рабочих каналов на каждой базовой радиостанции целью объединения является не увеличение числа абонентов в сети, а максимальное покрытие территории, например, для организации служебной радиосвязи вдоль железных и шоссежных дорог, магистральных трубопроводов. Основная область применения транкинговых сетей связи на

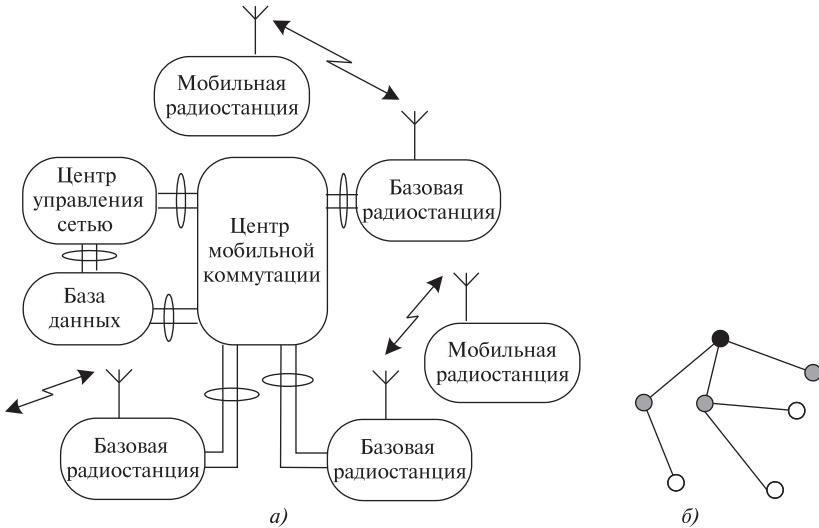


Рис. 1.3. Сотовая сеть связи: а – функциональная схема; б – структурная схема

сегодняшний день — это специальная или локальная связь без напряженного трафика: скорая помощь, милиция, армия, служебная связь на железнодорожных станциях, в зонах вокзала или аэропорта, протяженная магистральная связь, оперативная связь в районе стихийного бедствия и т. д.

**Сотовая организация сети связи.** Сотовая сеть связи (рис. 1.3) характеризуется наличием значительного числа локальных базовых радиостанций, связанных с единым центром управления по выделенным фиксированным линиям связи («древовидная» конфигурация) [3].

Каждая базовая радиостанция в сотовой организации имеет маленький (относительно транкинговой) радиус действия, так что на обслуживаемой территории одновременно находится только небольшое число мобильных абонентов. Каждая базовая радиостанция работает на частоте или группе частот, не совпадающих с частотами соседних базовых радиостанций. Установление всех вызовов от мобильной радиостанции к базовой или от базовой радиостанции к мобильной производится только по выделенным каналам управления. Все мобильные радиостанции, находящиеся в одной соте, непрерывно прослушивают канал управления и периодически выходят на связь с базовым передатчиком. Таким способом мобильные радиостанции подтверждают свою активность, отмечают текущее географическое положение в сети и поддерживают в готовности ка-

нал связи. В базе данных центра мобильной коммутации хранятся координаты (адреса сот) всех активных абонентов. При вызове мобильного абонента сигнал к установлению связи передается в ограниченном ареале, включающем соту, где последний раз отметилась мобильная радиостанция, и ближайшие к ней соты. В течение разговора канал связи с мобильным абонентом поддерживается только одной базовой радиостанцией, прочие базовые радиостанции свободны для обслуживания других абонентов. В результате общее число каналов, которое одновременно поддерживается сотовой сетью связи, равно произведению числа каналов базовой радиостанции соты на число сот. И хотя число каналов связи в каждой отдельной соте, работающей фактически в транкинговой организации, по-прежнему относительно невелико, суммарное число каналов связи в сотовой сети может быть очень большим.

Основное отличие сотовой организации сети связи от транкинговой заключается: 1) в наличии высокоскоростных фиксированных линий связи между базовыми радиостанциями и центром мобильной коммутации; 2) регистрации положения всех мобильных абонентов в базе данных центра мобильной коммутации и 3) малом числе абонентов в зоне действия базовой радиостанции (соты). Высокоскоростные фиксированные линии связи, обладающие очень высокой пропускной способностью, передают основной объем информации, что обеспечивает возможность поддержки одновременно большого числа соединений. Регистрация местоположения всех мобильных абонентов в центре мобильной коммутации и вызов абонента в ограниченном ареале обеспечивают эффективный поиск абонента в сети и загрузку только минимально необходимого числа радиоканалов. Небольшое число абонентов в соте позволяет обеспечить связь по эфиру при минимальных частотных ресурсах и не ограничивает пропускную способность сети связи в целом. Абонентские радиостанции сотовой сети связи фактически являются радиоудлинителями, позволяющими абоненту работать на некотором расстоянии от ближайшего многоканального телефонного аппарата (базовой радиостанции). Аналогия с бесшнуровым радиотелефоном была бы полной, если бы радиотелефон мог работать не только с собственным, но и с любым иным базовым аппаратом. Сотовая организация сети радиосвязи позволяет на несколько порядков увеличить число одновременно обслуживаемых абонентов по сравнению с транкинговыми сетями и сделать радиосвязь доступной для массового пользователя.

**Сети высокоскоростной передачи данных.** Системы наземной радиосвязи четвертого и пятого поколения характеризуются

скоростью передачи данных  $R$  десятки и сотни мегабит/с и, соответственно, несущей частотой модулированного сигнала  $f_c$  десятки гигагерц [4–6]. Повышение рабочей частоты с увеличением скорости передачи информации является прямым следствием требования узкой полосы частот модулированного сигнала  $\Delta f \ll f_c$ , сопоставимой по величине со скоростью передачи информации  $R$ . Только при выполнении этого условия отсутствуют линейные (частотные) искажения информационного сигнала в сквозном радиоканале.

В отличие от УКВ диапазона, радиоволны в диапазоне СВЧ не огибают препятствий, а распространяются в пространстве по законам геометрической оптики. Как следствие, в сложных условиях города возникает множество теневых зон, недоступных для радиосвязи. До настоящего времени высокоскоростной обмен данными возможен только через так называемые точки доступа, которые не образуют сплошного радиопокрытия. Точка доступа фактически есть базовая радиостанция, которая в пределах прямой видимости (с учетом ретрансляторов) обеспечивает радиосвязь с абонентской радиостанцией. Связь базовых радиостанций с ближайшими соседями и центром мобильной коммутации, как и в классической сотовой структуре, осуществляется по фиксированным высокоскоростным линиям связи. Расположение точек доступа, ретрансляторов, вынесенных антенн и т. п. выбирается исключительно по конкретному распределению естественных и искусственных препятствий с целью создания максимально сплошного радиополя в местах скопления потенциальных абонентов.

### 1.1.2. Канальный уровень

Канальный уровень определяет процедуры, протоколы и интерфейсы, которые обеспечивают достоверное прохождение информации по физической линии передачи между узлами сети, а также управление аппаратурой физического уровня. Назначение функций канального уровня — поддержка логического соединения между двумя узлами сети, также как физический уровень обеспечивает реальное (физическое) соединение узлов. Канальный уровень выполняет последнее преобразование информации перед ее передачей (приемом) по физическому каналу связи и по этому признаку определяется как граница раздела между физической и программной средой. Принято подразделять канальный уровень как минимум на два подуровня: управление логической передачей данных (LLC — Logical Link Control) и управление доступом к среде передачи данных (MAC — Media Access Control). На канальном уровне выполняются следующие основные процедуры:

- контроль и распределение ограниченных ресурсов радиоаппаратуры в соответствии с требованиями логических устройств верхних уровней и состоянием радиоканала;
- разрешение конфликтных требований доступа различных логических устройств к одним и тем же устройствам физического уровня;
- формирование команд управления радиоаппаратурой (установка рабочей частоты и мощности, переключение режима приема-передачи);
- контроль состояния радиоканала (занят/свободен) и активизации соответствующих процедур приема и передачи: установка шумового порога приемника, выходной мощности передатчика;
- анализ тестовых последовательностей для определения состояния радиоканала и установки переменных параметров эквалайзера.

Протокол канального уровня обеспечивает взаимодействие с канальным уровнем другого узла сети, а именно:

- кодирование/декодирование информации для повышения помехоустойчивости канала связи;
- интерливинг/деинтерливинг сообщений для исключения влияния быстрых замираний сигнала в эфире на качество принимаемой информации;
- формирование требований на повторную передачу сообщений или снижение скорости передачи информации при недопустимо высоком уровне ошибок.

На канальном уровне главным образом определяются метод разделения каналов (множественный доступ) в выделенном частотном спектре, а также метод коммутации каналов связи.

**Частотное разделение каналов связи FDMA** (Frequency Division Multiple Access). Частотное разделение каналов обеспечивает наиболее простую организацию множества каналов связи в выделенном частотном диапазоне  $\Delta F$ . Каждому физическому каналу связи отводится определенная полоса частот  $\Delta f$ , в пределах которой и производится передача модулированного высокочастотного колебания (рис. 1.4). С уменьшением ширины канала  $\Delta f$

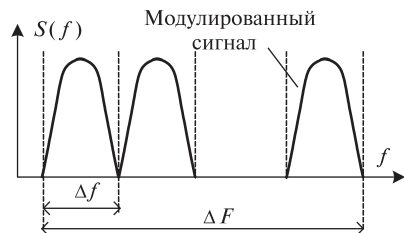


Рис. 1.4. Частотное разделение каналов

увеличивается число каналов связи в выделенном участке спектра  $\Delta F$ , а следовательно, и число одновременно работающих пользователей в сети. С другой стороны, уменьшение полосы частот кана-

ла приводит к уменьшению скорости передачи и снижению помехозащищенности. Полоса частот канала разделяется на минимально необходимую информационную часть, величина которой определяется отсутствием искажений информации в сигнале, и защитный интервал, в котором обеспечивается подавление мощности сигнала до величины, не влияющей на параметры сигнала в соседнем канале. Как правило, защитный интервал составляет не менее половины общей ширины спектра. Частотное разделение каналов является универсальным методом множественного доступа, и реализуются как для аналоговой, так и для цифровой модуляции.

Типичная ширина канала для передачи речи и низкоскоростных данных составляет 12,5 или 25 кГц. Более широкие полосы отражают либо специальное применение модулированного сигнала (передача музыки 100 кГц, телевизионного сигнала 6,5 МГц, высокоскоростного Интернета и т. д.) или многоканальное уплотнение (временное или кодовое).

**Временное разделение каналов связи** (Time Division Multiple Access — TDMA). Этот метод используется в сетях связи только с цифровой модуляцией. Временное разделение каналов заключается в поочередной передаче информации различным абонентам на одной и той же частоте. Каждому абоненту для передачи/приема выделяется свой временной интервал (слот) в периодически повторяющемся временном кадре (фрейме). Например, в стандарте TETRA кадр содержит 4 временных интервала, так что одновременно до четырех абонентов могут работать на одной частоте (рис. 1.5).

Реализация поочередной передачи/приема информации в реальном времени на одной и той же частоте для нескольких абонентов основана на возможности сжатия (изменения символьной скорости) исходного цифрового сигнала. Если физическая скорость передачи данных в каждом временном интервале выше, чем скорость передачи информации, то требуемый объем данных может быть передан не в реальном времени, а в более короткий промежуток времени.

Для примера, показанного на рис. 1.5, исходный речевой сигнал, преобразованный в цифровую форму, запоминается (в течение одной фреймы 20 мс) и со скоростью в 4 раза большей, чем исходная, пере-



Рис. 1.5. Временное разделение каналов

дается по радиоканалу за 5 мс. На приемном конце радиолинии цифровой сигнал вновь расширяется до 20 мс, и после преобразо-



вания его в аналоговую форму абонент слышит нормальную речь в реальном времени. В оставшиеся свободными 15 мс аналогичным образом передается сжатая информация трем другим абонентам. В первом приближении временное разделение каналов не увеличивает общее число каналов в выделенном диапазоне частот, так как пропорционально числу одновременно обслуживаемых абонентов увеличивается скорость передачи и, соответственно, ширина канала. Но при этом значительно упрощается управление абонентами в сети, уменьшается объем служебной информации, которая теперь передается одновременно нескольким абонентам в выделенном служебном интервале, можно оперативно перераспределять ресурсы по объему обмена информацией между пользователями путем увеличения/уменьшения числа интервалов, назначенных каждому пользователю и т. д.

Временное разделение каналов широко используется в системах связи второго и третьего поколений: в стандарте TETRA совмещенный частотно-временной множественный доступ TDMA/FDMA используется для четырех пользователей на один частотный канал шириной 25 кГц, в стандарте GSM — для восьми пользователей на один канал шириной 200 кГц.

**Кодовое разделение каналов** (Code Division Multiple Access — CDMA). Кодовое разделение каналов предполагает одновременную работу всех абонентов в одной и той же полосе частот. Для разделения абонентов используется дополнительный цифровой модулирующий сигнал, не связанный с информационным сигналом, и со скоростью, в десятки раз превышающей скорость информационного сигнала. В результате спектр модулируемого сигнала существенно расширяется, а его амплитуда уменьшается (рис. 1.6). Спектр модулированного сигнала приобретает шумоподобный характер, а мощность передаваемого сигнала «размывается» в широкой полосе частот. Расширяющая последовательность является псевдослучайной и уникальна для каждого абонента. При корреляционном приеме все прочие расширенные сигналы воспринимаются приемником как шум, и только сигнал, коррелированный с персональной кодовой последовательностью, восстанавливается как узкополосный цифровой информационный сигнал с высоким отношением сигнал/шум.

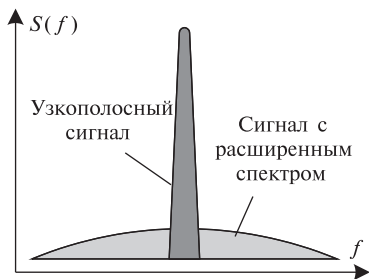


Рис. 1.6. Спектры узкополосного и широкополосного сигналов

Потенциально число каналов в сети определяется числом различных кодов, которое может быть очень большим. Реальное число активных каналов определяется допустимым шумовым фоном, который создается всеми работающими радиостанциями. При очень большом числе одновременно работающих радиостанций шумовой фон может стать настолько большим, что базовая радиостанция не сможет выделить слабый полезный сигнал наиболее удаленных абонентов на фоне высокого уровня шума. Однако для близко расположенных абонентов система будет продолжать работать. Показано, что возможное число каналов связи при кодовом разделении каналов примерно такое же, как при частотном и временном разделении. Использование кодового разделения значительно повышает помехоустойчивость системы связи и максимально упрощает управление абонентам. Персональные радиостанции CDMA также отличаются экологичностью, так как характеризуются очень малой плотностью излученной мощности в широкой полосе частот.

**Порядок обмена информацией.** В принципе сеть радиосвязи может поддерживать три основных варианта обмена информацией между радиостанциями: симплексный, дуплексный и полудуплексный (двухчастотный симплекс), как показано на рис. 1.7.

Симплексный канал связи характеризуется чередованием во времени режимов приема и передачи. Каждая радиостанция ведет попеременно прием и передачу сигналов на одной и той же частоте  $f$ . В процессе обмена информацией абоненты должны по взаимному соглашению устанавливать режим работы своей радиостанции; в противном случае могут возникнуть перерывы связи, если обе радиостанции будут одновременно находиться в режиме приема или

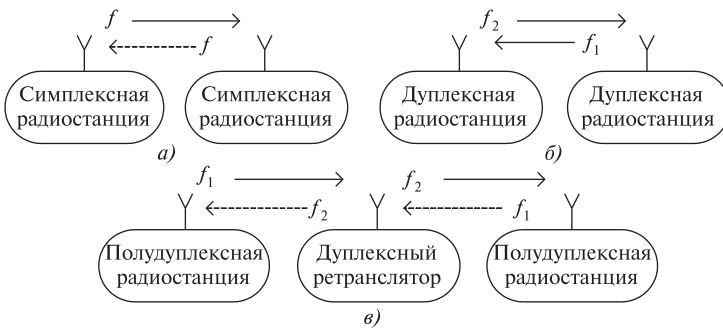


Рис. 1.7. Каналы связи: а — симплекс; б — частотный дуплекс; в — двухчастотный симплекс

передачи. Аппаратурная реализация симплексного канала наиболее простая, но связана с некоторым неудобством для пользователей и