

РАЗДЕЛ 1

ВВЕДЕНИЕ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ЭТАПИЗАЦИЯ

Сеть радиодоступа (**RAN – radio access network**) является частью телекоммуникационной сети или системы, которая в самом общем случае представляет собой сеть обмена и распределенной обработки информации, образуемой множеством взаимосвязанных абонентских (пользовательских) систем и средств связи. Она реализует технологию радиодоступа, концептуально размещается между пользовательским терминалом (телефонным аппаратом, мобильным телефоном, компьютером или вообще – каким-либо удаленно контролируемым устройством, называемым пользовательским оборудованием – UE) и обеспечивает соединение с опорной сетью (CN – core network) – рис. 1.1.



Рис. 1.1.

Если основным предназначением опорной сети является обеспечение возможности оперативного перемещения и распределение (коммутации, маршрутизации) больших массивов информации на любые расстояния, то главной целью функционирования сети доступа вообще и радиодоступа, в частности, является беспроводное (незаметное для пользователя) соединение пользовательского оборудования с опорной сетью. При этом – в случае радиодоступа – качество предоставляемой услуги не должно отличаться от качества предоставления той же услуги проводными средствами. Примерами сетей радиодоступа являются:

- GRAN: сеть радиодоступа GSM,
- GERAN: усовершенствованная сеть GRAN для работы в радио интерфейсе с технологией EDGE,
- UTRAN: сеть радиодоступа UMTS,
- E-UTRAN: сеть радиодоступа LTE.

Следует отметить, что радиодоступ ряда проприетарных (основанных на патентованных протоколах фирм-производителей) и стандартизованных (например, IEEE 802.1x) решений не имеют специфицированного наименования своих сетей радиодоступа.

Существует условное деление периодов развития сетей радиодоступа на следующие поколения.

Первое поколение (1960-е годы) – это в основном аналоговые средства доступа к аналоговым автоматическим телефонным станциям (АТС). В большинстве это узкополосные системы, позволяющие подключить до нескольких десятков или сотен телефонных каналов. Как правило, используются в качестве радио удлинителей линий связи между АТС и телефонными аппаратами, либо беспроводных телефонных аппаратов (БТА). Диапазон частот аналоговых радио удлинителей до 1 ГГц. В настоящее время они используются в малонаселенных сельских местностях. Уже в 1960-е годы системы радиодоступа давали возможность подключаться к сети общего пользования через одну базовую станцию или центральную станцию со способностью нескольких независимых соединений. В России радиодоступ к АТС осуществлялся через систему «Алтай». В последнее время ей на смену приходит оборудование стандарта МРТ 1327. Кроме того, для подключения к сетям общего пользования чаще используются аналоговые стыки по двухпроводным абонентским линиям. В настоящее время такие системы радиодоступа работают в диапазонах 30...57,5 МГц (оборудование УТК-015), 300 МГц (оборудование «Алтай» и МРТ 1327), 450 МГц (оборудование УТК-01). К первому поколению систем радиодоступа можно отнести также и аналоговые бесшнуровые телефонные аппараты диапазонов 30...40 МГц и 900 МГц.

Ко **второму** поколению (1980-е годы) следует отнести узкополосные цифровые системы радиодоступа к цифровым и аналоговым АТС, которые появились благодаря повышению требований к качеству передачи речи и появлению передачи данных. Развитие шло, прежде всего, в направлении создания проприетарных протоколов систем радиодоступа, реализующих функциональность беспроводного абонентского шлейфа. Качество передачи речи соответствовало качеству в сетях ЦСИО (ISDN), скорость передачи данных кратна 64 кбит/с. При присоединении к сети общего пользования использовались как аналоговые, так и цифровые стыки. В целом системы радиодоступа второго поколения были направлены на создание телефонных сетей высокого качества. Передача данных рассматривалась как дополнительная, не основная услуга в силу неразвитости компьютерных сетей и небольшой потребности в сетях передачи данных. К этому поколению относятся также системы стандартов DECT и СТ-2, которые обеспечивают подключение терминалов с услугой цифровой телефонии. Системы радиодоступа второго поколения активно разрабатывались и производились такими компаниями, как Airspan, Alcatel, Tadiran, AT&T, IRT,

Granger Telecom, SR-Telecom, некоторые из них были с успехом развернуты в России как корпоративные (технологические и выделенные), так и коммерческие сети связи. Сети второго поколения обеспечивают в режиме доступа по требованию от нескольких сотен до нескольких тысяч абонентов. Во время разработки и строительства сетей радиодоступа второго поколения в мире появилась тенденция экспоненциального роста объемов обмена данными в компьютерных сетях, сначала локальных, а затем и масштабов города. К началу 1990-х годов уже существовала сеть Интернет, использование в которой радио технологий носило традиционный характер (радиорелейные линии, удлинитель телефонных каналов, спутниковые линии). Однако потребности в объеме передаваемых данных возросли, и существующие радиосети не могли конкурировать с проводными линиями связи даже для локальных сетей.

Третье поколение (1990-е годы) характеризуется появлением возможности использования в компьютерных сетях связи преимуществ радиосвязи и обеспечения требуемой скорости передачи данных между компьютерами. В Институте инженеров электротехники и электроники IEEE (США) была организована исследовательская группа по стандартизации 802.11 оборудования беспроводных локальных сетей (WLAN). С этого момента начался новый этап развития систем радиодоступа. Стандарты группы 802.11 стали доминировать на рынке систем радиодоступа и быстро завоевали популярность среди изготовителей и потребителей оборудования. Связано это, прежде всего, с простотой оборудования, называемого тогда по аналогии с проводным стандартом Radio Ethernet. Влияние стандарта оказалось настолько сильным, что распространилось даже на оборудование, выпускаемое по внутрифирменным стандартам с диапазоном 3,4..3,6 ГГц. Оборудование стандарта IEEE 802.11 рассчитано на диапазон 2,4...2,4835 ГГц. Изначально стандарт был ориентирован на удовлетворение потребностей внутриофисных локальных сетей (с относительно низкой скоростью передачи информации в радиоканале 1 Мбит/с). В этом случае отдельным абонентам доступна скорость, не превышающая 256 кбит/с из-за используемых протоколов S-ALOHA или CSMA-CA и их низкой эффективности радиоканала: 36 и 53% соответственно. Скорость передачи информации оборудования оказалась недостаточной для осуществления связи между компьютерами локальной сети, поэтому довольно быстро появилась модификация стандарта IEEE 802.11b, допускающая скорость передачи в радиоканале 11 Мбит/с. Одновременно начала снижаться стоимость оборудования, и стандарт стал популярным среди специалистов компьютерных сетей, а затем и у связистов. Оборудование семейства стандартов IEEE 802.11 широко представлено на рынке связи, постоянно совершенствуется и выпускается известными производителями, такими как Cisco, Alvarion, Proxim, Lucent Technologies и другими. Стандарт 802.11 стал отправной точкой для разработки ряда технологий, сходных по организации протоколов, но для которых высокие скорости

передачи информации не требовались. Это стандарт 802.15.1, известный как Bluetooth, обеспечивающий скорость передачи 722 кбит/с в радиоканале, стандарт 802.15.4, разрабатываемый альянсом ZigBee со скоростями 20, 40 и 250 кбит/с. Перечисленные стандарты ориентированы, прежде всего, на решение специфических задач связи оборудования различного назначения ограниченного радиуса действия, где основными критериями качества являются низкое энергопотребление, малая стоимость устройств, способность к самоорганизации маршрутов в рамках совокупности устройств. Эти сети служат для подключения датчиков, сенсоров, управляющих систем дома или офиса в единую сеть, функционирующую надежно независимо от расположения элементов системы.

Кроме того, для данного поколения характерно выделение в сотовой связи класса сетей радиодоступа: GRAN – как сеть радиодоступа GSM и GERAN в качестве усовершенствованной сети GRAN для работы в радио интерфейсе с технологией EDGE.

Третье поколение систем радиодоступа дало начало активному использованию компьютерных технологий передачи информации и конвергенции систем радиодоступа с коммутацией каналов и пакетов. Однако отсутствие стандартизации в диапазонах за пределами 2,4...2,4835 ГГц в мировом масштабе привело к огромному разнообразию в реализации радио интерфейсов различных производителей. Здесь, как на опытном полигоне, отрабатывались способы разделения каналов (доступа к общему каналу), частотное разделение (FDMA), временное разделение (TDMA), кодовое разделение (CDMA) и их комбинации. В силу простоты своей организации первоначально широкое распространение в системах радиодоступа получил метод множественного доступа с частотным разделением каналов (FDMA – Frequency Division Multiple Access), когда в каждом сеансе связи за абонентом закрепляется своя полоса частот. При этом в рабочих каналах, передающих информацию от абонента к абоненту, обычно используется аналоговая частотная модуляция, а в каналах управления – цифровые сигналы (рис.1.2).

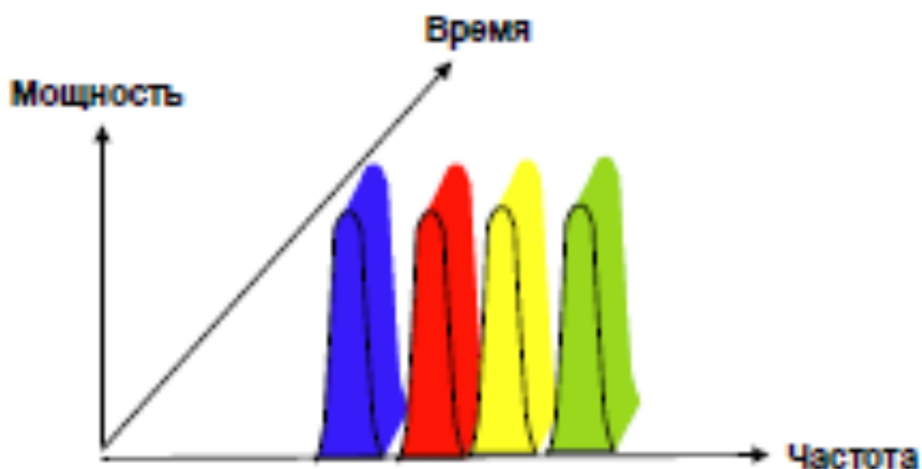


Рис. 1.2.

Значение второго основного параметра сигнала – времени – легло в основу метода множественного доступа с временным разделением каналов (TDMA, Time Division Multiple Access) – рис.1.3.

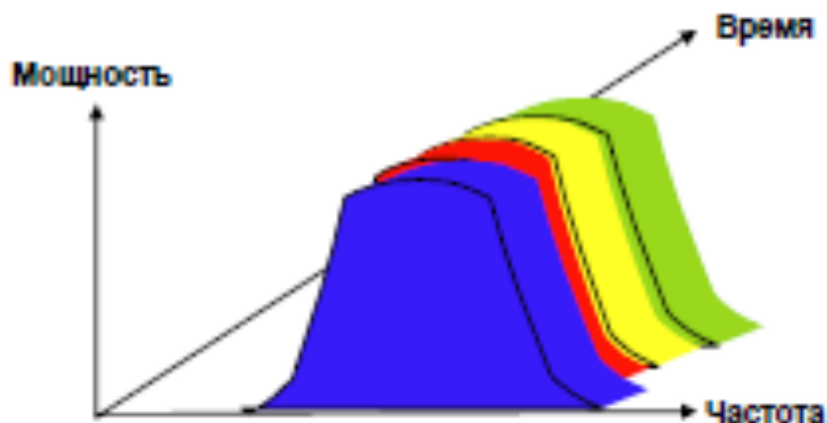


Рис. 1.3.

Каждый абонент получает в частотном канале определенный по длительности временной интервал, который, используется им для передачи своих сообщений. Использование этого метода требует представления информационного сигнала в цифровой форме (с использованием ИКМ или АДИКМ). Такие методы, где как в информационных каналах, так и в каналах управления используются цифровые сигналы, получили реализацию в большинстве стандартов радиодоступа сотовой связи, начиная с GSM.

Наконец, признаком, присущим только данному сигналу и позволяющим выделить его среди других, является его форма (или код). На этом признаке основан метод множественного доступа с кодовым разделением каналов – CDMA (Code Division Multiple Access) – рис. 1.4. Основная идея метода заключается в том, что в одной и той же полосе частот можно передавать сигналы, не влияющие друг на друга, если только выбирать их из специального ансамбля.

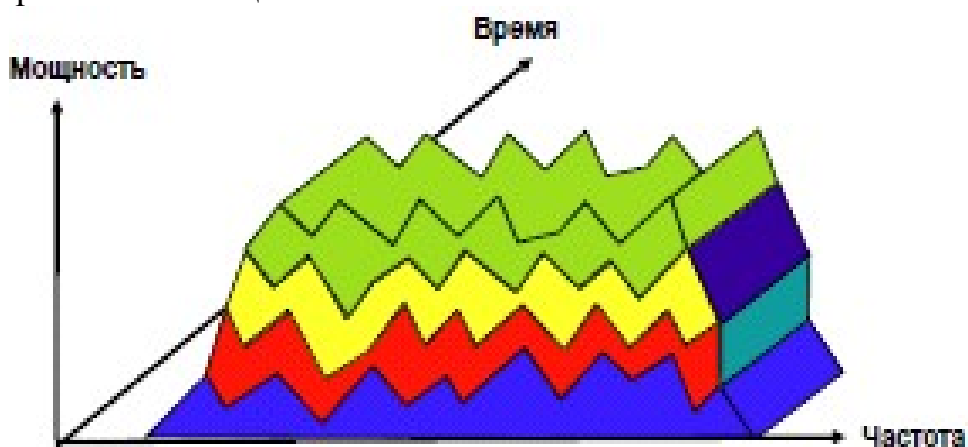


Рис. 1.4.

Канальный сигнал имеет шумоподобный характер, а занимаемая им полоса частот равна полосе частот, отведенной всей системе в целом. В отличие от методов FDMA и TDMA, где энергия сигнала от каждого абонента концентрируется либо в заданном диапазоне частот, либо в

заданном временном интервале, сигналы, использующие метод CDMA, распределены в непрерывном частотно-временном пространстве.

При разделении дуплексных каналов в сетях радиодоступа третьего поколения на смену частотному дуплексу (FDD) все чаще приходит временной (TDD), в силу большей своей гибкости при организации несимметричных потоков восходящего и нисходящего звена. Такой подход продиктован широким использованием радиодоступа для передачи Интернет трафика, имеющего ярко выраженную асимметрию – короткие запросы в UL (Up Link – восходящем звене, в направлении от UE к CN) и большие объемы скачивания в DL (Down Link – нисходящем звене, в направлении от CN к UE).

Важным достижением проведенной в это время опытно-конструкторской работы стало появление городских сетей (с зонами покрытия радиусом 10...15 км) с полным спектром предоставляемых услуг. Это быстро привело к расширению диапазона частот для реализации уже апробированных технологий на диапазоны 10,5 и 26 ГГц. А кроме того, третье поколение систем радиодоступа дало еще одно важное направление развития технологий - создание высокоскоростных сетей распределения синхронных потоков, кратных T1, E1, а также систем распределения телевизионных программ (MMDS и LMDS) в диапазонах частот до 26 ГГц включительно.

В оборудовании **четвертого** поколения (2000-е годы) заметной и преобладающей становится тенденция к глобальному процессу стандартизации. Во всех странах выделен один диапазон частот, стандартизованы стыки, параметры радио интерфейса и другие характеристики. Такое оборудование, в частности абонентское, может выпускаться любым производителем и функционировать в любой стандартизированной сети. Яркими примерами такого подхода стали сети радиодоступа UTRAN и E-UTRAN сотовых сетей UMTS и LTE, соответственно. Общей характеристикой четвертого поколения является адаптивность почти всех элементов сети и интерфейсов, а также нацеленность на удовлетворение индивидуальных нужд абонента. В частности, развиваются концепции локальных зон свободного доступа к услугам связи WiFi или HotSpot и зон свободного доступа в масштабах города вне офиса WiMAX (семейство стандартов IEEE 802.16). Пользователь сможет получать те же услуги связи, как в любой точке города, так и своей локальной сети. Таким образом, произошла четкая классификация - структуризация систем радиодоступа: какие системы применяют для решения задач построения «последней мили», а какие для решения задачи доступа к абоненту.

Важной особенностью стало совершенствование радио интерфейсов, повышение их производительности и спектральной эффективности. Спектральная эффективность повысилась до 3...5 бит/с/Гц за счет применения спектрально-эффективных методов модуляции и кодирования в сочетании с OFDM (Orthogonal Frequency Division

Multiplexing) – мультиплексированием с разделением по ортогональным частотным поднесущим. Это же сделало возможным работу абонентов в любой точке локальной или городской сети – благодаря повышенной устойчивости сигнала OFDM к замираниям и, следовательно, к возможности работы с сигналом без прямой видимости базовой станции или точки доступа. В состав радио интерфейса четвертого поколения входят адаптивные антенные системы, решающие комплекс задач: борьба с замираниями, борьба с помехами, повышение скорости передачи информации, пространственное разделение сигналов. Последнее реализуется технологией MIMO (Multiple Input – Multiple Output) обработки сигналов со многими выходами (передатчиками) и многими входами (приемниками). Технология использует методы пространственно-временной адаптивной обработки сигналов, в том числе пространственно-временного кодирования и позволяет увеличить количество активных абонентов в одной полосе частот в несколько раз по сравнению с методами CDMA, TDMA и FDMA.

1.2. МЕСТО И РОЛЬ РАДИО ДОСТУПА

Характер реализуемой сетью радиодоступа функциональности определяет место этих сетей в иерархии взаимодействия в основном на уровнях физического и канального слоев, а также частично сетевого – таблица 1.1.

Таблица 1.1.

Модель OSI		
Тип данных	Уровень (layer)	Функции
Данные	7. Прикладной (application)	Доступ к сетевым услугам
Поток	6. Уровень представления (presentation)	Представление и преобразование информации
Сеансы	5. Сеансовый (session)	Управление сеансом связи
Сегменты	4. Транспортный (transport)	Прямая связь между конечными пунктами и надежность
Пакеты / Дейтаграммы	3. Сетевой (network)	Маршрутизация и логическая адресация (адресация конечных точек)
Кадры	2. Канальный (data link)	Передача информации между соседними узлами Физическая адресация.
Биты	1. Физический (physical)	Работа со средой передачи. Модуляция, кодирование информации

Процедуры в сетях радиодоступа на уровнях L2 и L3:

- поиск и обнаружение сети абонентским терминалом,
- подсоединение и регистрация в сети,
- организация и прохождение вызовов,
- передача трафика,
- локализация абонентов в сети,
- организация эстафетной передачи,
- обеспечение безопасности связи.

Технологии физического уровня (L1) в системах радиодоступа:

- передача с частотно-временным разделением каналов (GSM),
- передача с кодовым разделением каналов (UMTS, CDMA2000),
- организация OFDM,
- технология многоантенной передачи и приема MIMO,
- виды модуляций в радиоканале,
- избыточное кодирование и перемежение,
- шифрация передаваемой информации,
- сжатие речи при телефонии – вокодирование.

Таким образом, из сказанного выше вытекают следующие свойства сети радиодоступа:

- прозрачность для протоколов вышележащих слоев модели взаимодействия ISO/OSI,
- реализация требований, предъявляемых к системам массового обслуживания,
- обеспечение качественных показателей не хуже проводной сети.

Реализация первого из этих требований (свойств) выражается в предложенной ETSI (Европейским институтом телекоммуникационных стандартов) эталонной архитектуре сети радиодоступа – рис. 1.5.

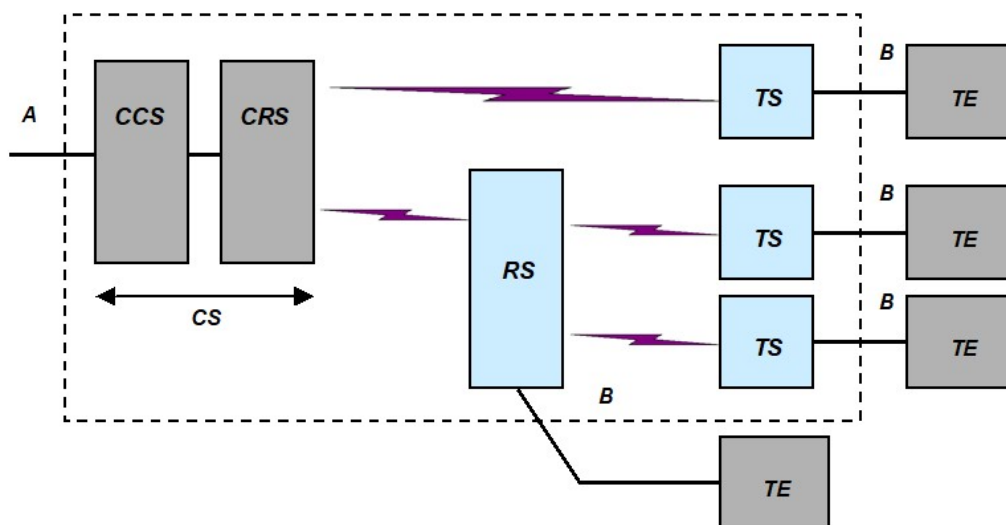


Рис. 1.5.

На рисунке обозначены:

A – точка подключения к опорной сети,

B – точка подключения пользовательского интерфейса,

CS – стационарное оборудование радиодоступа,

CCS – контроллер радио базовых станций (центральных терминалов),

CRS – радио базовые станции (центральные терминалы),

RS – радио ретрансляторы (может быть оборудован пользовательским интерфейсом),

TS – радио терминал (абонентский терминал),

TE – абонентское оборудование.

Реализация второго и третьего свойств совместно и в условиях ограниченности используемого ресурса – радиочастотных диапазонов – диктует необходимость применения соответствующих технологий, обеспечивающих спектральную эффективность, высокую степень готовности и низкий уровень ошибок.

Для уяснения подходов к решению этих задач необходимо, в первую очередь, рассмотреть особенности используемых частотных диапазонов – как с точки зрения эффектов при распространении радиосигналов, так и удобства их использования: информационной емкости (возможности широкополосных каналов) и особенностей регулирования их использования (на основе регламентации и/или требований электромагнитной совместимости).

В свою очередь, существующие эффекты распространения должны быть учтены при прогнозировании зон покрытия сетями радиодоступа (и значит должны быть описываемы моделями распространения), а для компенсации недостаточной информационной емкости (отсутствие возможности необходимых по ширине каналов) должны быть предложены методы спектрально-эффективных модуляции и кодирования сигналов.

Поэтому приводимая ниже в этом разделе информация должна дать общую характеристику рассматриваемых вопросов, а последующие разделы, посвященные определенным классам сетей радиодоступа, дадут более подробные сведения о технологиях применяемых решений и эксплуатационных показателях сетей радиодоступа каждого типа.

1.3. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ

Колебания, используемые в радиосвязи для переноса информации, называют несущими колебаниями. В радиосвязи принято использовать несущие колебания, лежащие в диапазоне радио частот от 3 кГц до 300 ГГц (рис. 1.6) и условно – для удобства характеристики обобщенных свойств –

разделенные на указанные на рисунке диапазоны с соответствующими названиями по длине волны и/или частоте.

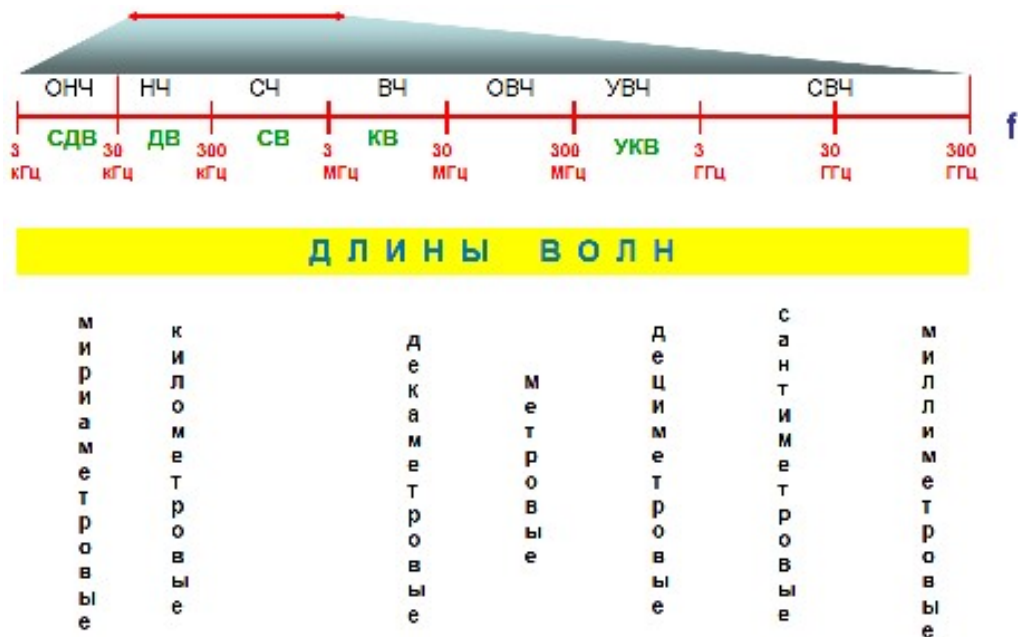


Рис. 1.6.

Освоение этих диапазонов радиоволн исторически происходило по мере увеличения частоты и было продиктовано потребностью в получении достаточных для передачи информации частотных полос. Так, желание передавать широкополосные приложения, например изображение, привело к необходимости использовать диапазоны очень- и ультра-высоких частот (ОВЧ и УВЧ, или метровых и дециметровых волн). Именно использование тех или иных диапазонов определяет технические и эксплуатационные особенности систем и сетей радиосвязи, потребительские свойства предоставляемых на их основе услуг.

Из курса физики известно, что особенностью переменного электромагнитного поля является его способность распространяться в окружающем пространстве. В свободном пространстве электромагнитные колебания распространяются прямолинейно и равномерно, то есть с постоянной скоростью, равной скорости света. На распространение электромагнитных волн в несвободном пространстве существенное влияние оказывает окружающая среда. В частности, распространение радиоволн в условиях Земли зависит от многих факторов: рельефа местности, климатических условий, времени суток и года и, в первую очередь, от длины волны этого колебания. Электромагнитные волны, расположенные в диапазоне частот, показанном на рис.1.6, используются в радиотехнике и называются радиоволнами.

Упрощенный механизм формирования электромагнитного поля можно представить следующим образом. Протекающий по проводнику переменный ток в соответствии с законом электромагнитной индукции будет возбуждать в пространстве, окружающем диполь, переменное магнитное поле. Изменяющееся магнитное поле, в свою очередь, порождает в окружающем

пространстве переменное электрическое поле. В процессе взаимного преобразования изменяющегося магнитного поля в электрическое, а переменного электрического поля в магнитное образуется единое электромагнитное поле. Явление возбуждения в пространстве электромагнитного поля переменным током, протекающим в проводнике, называется электромагнитным излучением. В общем случае любой отрезок проводника, по которому протекает переменный ток, создает в окружающем пространстве электромагнитное поле. Эти явления связаны принципом двойственности: в любом отрезке проводника, находящемся в электромагнитном поле, индуцируется переменная электродвижущая сила (ЭДС). Величина ЭДС, наводимой в проводнике, зависит как от энергии электромагнитного поля, так и от конфигурации проводника и соотношения его размеров и длины волны электромагнитных колебаний. Для оценки энергетических характеристик электромагнитных волн используют плотность потока мощности, проходящей через единицу площади, перпендикулярной направлению распространения волны. Если предположить, что источник излучения точечный (на практике это означает, что размеры источника излучения пренебрежимо малы по сравнению с длиной волны излучаемого колебания), то можно считать, что электромагнитная волна будет равномерно излучаться во всех направлениях. На удалении R от источника излучения плотность потока мощности Π , создаваемой точечным источником, одинакова и определяется выражением:

$$\Pi = P / 4\pi R^2 \quad (1.1)$$

где P — мощность источника излучения. Напряженности электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля, создаваемого этим источником, определяются мощностью излучения источника P и удалением R от источника. Так, для оценки напряженности электрического поля E при распространении радиоволн в свободном пространстве можно использовать приближенное соотношение:

$$E = \frac{\sqrt{30P}}{R} \quad (1.2)$$

Распространение радиоволн в условиях Земли имеет некоторые существенные отличия от распространения радиоволн в свободном пространстве. Поверхностные слои Земли и околоземного пространства представляют собой среды с разными характеристиками для распространения электромагнитного поля. Так же, как и для оптических волн, на границе сред с различными электрическими характеристиками (например, земля — околоземное пространство) возможно отражение и преломление радиоволн. В то же время и сама поверхность Земли, и околоземное пространство представляют собой неоднородные среды с различными электрическими параметрами (электропроводностью, диэлектрической проницаемостью и т.д.). Поэтому при распространении электромагнитных волн в неоднородных средах могут изменяться как направление, так и скорость распространения электромагнитной энергии (рефракция). Дополнительное поглощение энергии радиоволн наблюдается при их распространении в средах с потерями. Существенной особенностью

распространения радиоволн в земных условиях является зависимость характеристик распространения от длины волны. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности зависит от ее рельефа и физических свойств.

Эти характеристики определяют параметры отраженных и преломленных волн на границе раздела двух сред. Электропроводность почвы определяет также потери энергии при распространении волн. Потери энергии при распространении радиоволн отсутствуют, если поверхность Земли можно считать идеальным проводником либо идеальным диэлектриком. В реальных условиях распространяющиеся над поверхностью земли электромагнитные колебания наводят в почве индукционные токи. При протекании этих токов в почве выделяется тепло. В конечном итоге это вызывает безвозвратные потери распространяющейся электромагнитной волны. Эти потери растут с ростом частоты.

Не менее важное влияние на распространение радиоволн в околоземном пространстве играет земная атмосфера (газообразная оболочка Земли). По комплексу физических признаков атмосферу принято делить на три характерных слоя: тропосферу, стратосферу и ионосферу.

Искривление направления распространения радиоволн (отклонение направления распространения радиоволн от прямолинейного имеет ту же природу, что и преломление световых волн при прохождении светом оптических сред с различными показателями преломления) обусловлено изменением параметров среды распространения (в ионосфере – это изменение концентрации ионизированного газа) и зависит, в том числе, от высоты над поверхностью Земли. Показатели преломления ионосферы изменяются с высотой таким образом, что направление распространения радиоволн искривляется в сторону Земли. Такое явление называется нормальной рефракцией. Нередко это искривление становится настолько значительным, что излученные с поверхности Земли радиоволны возвращаются обратно на Землю. Характеристики искривления направления радиоволн в существенной степени зависят от длины распространяемой волны. Чем короче длина волны, тем меньше степень преломления направления радиоволн. С ростом частоты преломление радиоволн сказывается все в меньшей степени, очень короткие волны проходят сквозь атмосферу и продолжают распространяться в космическом пространстве. Диапазон радиоволн, способных преодолеть ионосферу, используется в системах космической и спутниковой связи. Величина изменения направления распространения радиоволн зависит также от угла падения радиоволн на ионизированный слой. Чем меньше угол падения радиоволн на ионизированный слой, тем меньше он испытывает изменение направления распространения волны в этом слое. В ионизированных слоях атмосферы радиоволны затухают гораздо сильнее, чем при распространении в тропосфере, причем ослабление радиоволн растет с уменьшением частоты.

Таким образом, распространение радиоволн зависит от многих факторов. В первую очередь, условия распространения электромагнитных колебаний изменяются с уменьшением длины волны (увеличением частоты

колебаний). Рассмотрим особенности распространения радиоволн в зависимости от длины волны электромагнитного излучения.

Радиоволны с длиной волны более 1 километра имеют отличительную особенность – способность хорошо огибать Землю при своем распространении. Поэтому волны этой части диапазона способны распространяться далеко за пределами прямой видимости. Конечно, при удалении излучающей антенны за линию горизонта сигнал будет значительно ослаблен, но, в общем, в этом диапазоне частот может быть обеспечена достаточно уверенная связь на расстояниях в сотни и тысячи километров. Радиоволны, которые распространяются вдоль поверхности Земли, называют земными или поверхностными волнами. В этом диапазоне частот, кроме поверхностных волн, для связи используют и пространственные волны. Пространственными (ионосферными, небесными) называют такие волны, которые, будучи излученными от поверхности Земли, отражаются от ионосферы и вновь вернутся на Землю. Траектория распространения пространственной волны, вернувшейся на Землю после отражения от ионосферы, называется скачком. Электромагнитные волны нижней части радиодиапазона также хорошо отражаются от поверхности Земли (то есть с малыми потерями). Отраженные от Земли радиоволны при достижении ионосферы повторно отражаются от ее нижних слоев, образуя следующий скачок. Таким образом, упрощенную модель среды распространения длинных и сверхдлинных радиоволн можно представить в виде двух электропроводящих сфер с совмещенными центрами. Радиоволны распространяются в промежутке между этими сферами, попеременно отражаясь то от внешней, то от внутренней сферы. Земля вместе с нижней границей ионосферы образуют для этого диапазона своеобразный сферический волновод. Изменения свойств ионосферы сказываются не столь существенно для этого диапазона радиоволн, поэтому связь на этих частотах достаточно устойчива даже на далеких расстояниях и слабо зависит от времени суток. Высокая стабильность распространения радиоволн этого диапазона используется, например, радиопередатчиками службы точных частот и времени, сигналы которых используются в системах связи всех диапазонов частот.

В заключение характеристики этого диапазона следует отметить особенности распространения электромагнитных колебаний самой нижней части радиодиапазона. Поскольку величина потерь при распространении радиоволн в среде с потерями (почва, вода, ионизированные газы и т.д.) уменьшается с увеличением длины волны, то и глубина проникновения радиоволн в эту среду увеличивается с увеличением длины волны. Эта особенность распространения радиоволн используется, например, для связи с подводными лодками, погруженными на глубину в сотни метров от поверхности океана. Для такого (единственно возможного) вида радиосвязи используют очень низкие частоты (очень длинные волны), что требует больших размеров антенн и высоких мощностей радиопередатчиков.

Радиоволны с длиной волны от 100 до 1000 метров так же, как и более длинные, распространяются и поверхностными, и пространственными волнами, но их распространение имеет свои особенности. Влияние нестабильностей параметров ионосферы на распространение радиоволн этого диапазона становится все заметнее, и длина пути, проходимого пространственной волной в точку приема, в разное время года и суток оказывается разной. Днем в этом диапазоне волн на расстояниях до нескольких сотен километров для связи используются поверхностные волны. С увеличением частоты колебаний требуется более высокая концентрация заряженных частиц ионосферы для формирования отраженной волны, при этом радиоволны проникают во все более высокие слои атмосферы. Но с увеличением длины пути, проходимой радиоволной в ионосфере, возрастают ее потери. Радиоволны этого диапазона достигают ионосферы и возвращаются к Земле. Распространение двух волн – поверхностной и пространственной – приводит к тому, что на больших дальностях в местах приема может наблюдаться эффект замирания, или фединга, проявляющийся в изменении уровня принимаемого сигнала. Основной причиной замирания сигналов является интерференция пространственной и поверхностной волн. Так как длина пути, который проходят радиоволны, может постоянно изменяться, то непрерывно изменяются и фазы приходящих сигналов. В результате сложения двух сигналов одной частоты, но с различными фазами интенсивность сигнала изменяется от максимального значения (когда фазы приходящих колебаний совпадают) до минимального (когда фазы этих сигналов противоположны). Если мощности колебаний, приходящих с различных направлений, приблизительно одинаковы, то уровень принимаемого сигнала, образуемого в результате интерференции, может спадать практически до нуля. Вблизи передатчика, где присутствуют, в основном, поверхностные волны, эффект замирания практически отсутствует. На больших расстояниях, где возможно распространение и пространственной, и поверхностной волн, ночью связь может улучшаться, но со значительными замираниями. И на очень больших расстояниях, куда практически не достигает земная волна, ночью возможен прием пространственной волны.

Радиоволны с длиной волны от 10 до 100 метров распространяются также в виде пространственной и поверхностной волн, но с ростом частоты еще более возрастает поглощение Землей энергии поверхностных волн, и они ослабевают быстрее. Поэтому в коротковолновом радиодиапазоне распространение поверхностных волн ограничивается практически пределами прямой видимости. Далее простирается зона молчания, где невозможен уверенный прием сигналов. В диапазоне дециметровых волн также возможен эффект замирания. Причиной его также является интерференция, но уже двух или более пространственных лучей, приходящих в точку приема разными путями. Волны этого диапазона еще глубже проникают в ионосферу, а отраженные от ионосферы волны достигают поверхности Земли на гораздо большем удалении от передатчика.

На еще большем удалении от точки излучения возможен приход волны после двукратного отражения от ионосферы. Если в этот же пункт приема приходит другая пространственная волна, например, после однократного отражения от ионосферы, то в точке приема наблюдается интерференция сигналов и, как следствие ее, - замирание во время приема.

Радиоволны, длина которых менее 10 метров, практически не обладают дифракцией, то есть не могут огибать препятствия на пути распространения. Концентрация заряженных частиц в ионосфере недостаточна для значительного влияния на траекторию распространения радиоволн этого диапазона, поэтому радиоволны практически не отражаются от ионосферы. С одной стороны, это делает невозможной дальнюю связь на поверхности Земли за пределами прямой видимости, с другой стороны, позволяет использовать радиоволны этого диапазона для спутниковой связи. Таким образом, основные характеристики распространения электромагнитных колебаний ультракоротковолнового (УКВ) диапазона определяют возможной связь в этом диапазоне в пределах прямой видимости между передающей и приемной антеннами. Для увеличения дальности связи антенны устанавливаются на высокие опоры. В этом диапазоне волн также возможна интерференция сигналов, но уже с отраженными сигналами от Земли или других неровностей рельефа, либо строений.

При достаточно большой мощности передатчика связь за горизонтом возможна и в этом диапазоне волн. Дальняя связь за пределами прямой видимости оказывается возможной благодаря тому, что в атмосфере Земли по ряду причин могут возникать локальные неоднородности. Эти неоднородности и вызывают рассеяние радиоволн, в том числе и в направлении пункта приема. При достаточной чувствительности приемного устройства может быть организована радиосвязь в труднодоступных районах на расстоянии нескольких сотен километров. На этом эффекте – рассеяния радиоволн на неоднородностях тропосферы – основаны сети связи на линиях дальнего тропосферного распространения (ДТР).

Остановимся подробнее на диапазонах частот, которые используются сетями радиодоступа. Выбор определенных диапазонов частот (рис. 1.7) для использования в сетях радиодоступа определяется требованием к ним, как к системам массового обслуживания и, вследствие этого, продиктован двумя аспектами: стремлением к возможности организации широкополосных каналов для увеличения информационной емкости и ограничением дальности связи для возможности повторного использования частот.

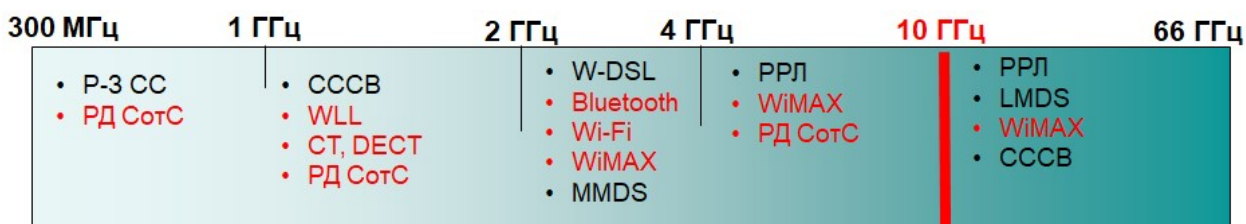


Рис. 1.7.

Следует отметить, что верхняя граница в 66 ГГц определена на основании рекомендаций IEEE 802.16 (WiMAX) как наибольшая частота из определенных на сегодня для использования в целях радиодоступа. Кроме сетей радиодоступа, выделенных на рисунке красным цветом, названы также службы, работающие в тех же диапазонах частот:

- ✓ Р-3 СС – радиально-зонавые системы связи или транкинговые системы, осуществляющие автоматическое распределение каналов связи между абонентами на время сеанса связи и допускающие режим прямой связи между абонентскими станциями,
- ✓ CCCB – системы спутниковой связи и вещания,
- ✓ W-DSL – радио удлинитель,
- ✓ РД СотС – радиодоступ сотовых систем связи,
- ✓ СТ – бесшнуровой телефон, предшественник DECT,
- ✓ РРЛ – радиорелейные линии связи,
- ✓ MMDS – беспроводный аналог кабельного телевидения,
- ✓ LMDS – микроволновая система распределения телевидения (отчасти используется в качестве магистралей сотовой связи).

Вертикальная красная линия на рисунке символизирует границу, выше которой проявляются негативные эффекты значительного затухания радиоволн в земной атмосфере из-за рассеяния на взвешенных молекулах воды. Кроме этого, имеются и другие различия в свойствах сетей радиодоступа, использующих разные частоты из диапазона 300 МГц ... 66 ГГц – рис. 1.8.



Рис. 1.8.

В рамках используемого диапазона частот особый интерес для сетей радиодоступа, как систем массового обслуживания, представляют те частотные полосы, которые не требуют лицензирования, то есть получения разрешения от уполномоченных органов на их использование. Законодательную основу такого использования в первую очередь формирует Регламент радиосвязи, разрабатываемый и поддерживаемый МСЭ – Международным союзом электросвязи, конкретнее – его Радиокommunikационным сектором ITU-R. В регламенте радиосвязи пунктами 5.138 и 5.150 определены полосы, предназначенные для безлицензионного использования в целях промышленных, научных и медицинских применений, называемые диапазонами ISM:

«5.138 Следующие полосы:

- 6765–6795 кГц (центральная частота 6780 кГц);
- 433,05–434,79 МГц (центральная частота 433,92 МГц) в Районе 1;
за исключением стран, упомянутых в п. 5.280;
- 61–61,5 ГГц (центральная частота 61,25 ГГц);
- 122–123 ГГц (центральная частота 122,5 ГГц); и
- 244–246 ГГц (центральная частота 245 ГГц)

предназначены для промышленных, научных и медицинских применений (ПНМ). Использование этих полос частот для применений ПНМ должно производиться по специальному разрешению соответствующей администрации, при согласии других администраций, чьи службы радиосвязи могут быть затронуты. При применении настоящего положения администрации должны учитывать соответствующие последние Рекомендации МСЭ-R.»

«5.150 Следующие полосы:

- 13 553–13 567 кГц (центральная частота 13 560 кГц);
- 26 957–27 283 кГц (центральная частота 27 120 кГц);
- 40,66–40,70 МГц (центральная частота 40,68 МГц);
- 902–928 МГц в Районе 2 (центральная частота 915 МГц);
- 2 400–2 500 МГц (центральная частота 2 450 МГц);
- 5 725–5 875 МГц (центральная частота 5 800 МГц);
- и
- 24–24,25 ГГц (центральная частота 24,125 ГГц)
- *предназначаются также для промышленных, научных и медицинских применений (ПНМ). Работающие в этих полосах службы радиосвязи должны мириться с вредными помехами, которые могут быть вызваны такими применениями. Промышленное, научное и медицинское оборудование работает в этих полосах согласно положениям п. 15.13.»*

Важно отметить, что окончательное решение по безлицензионному использованию указанных диапазонов частот Регламент радиосвязи оставляет за уполномоченными органами стран. Применительно к нашей стране таким правоустанавливающим документом является «Постановление Правительства РФ от 12 октября 2004 г. N 539 «О порядке регистрации

радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств». В этом документе обратим внимание на те положения, которые касаются сетей радиодоступа:

- абонентские станции фиксированного беспроводного доступа технологии CDMA (протокол IS-95) в полосах радиочастот 828 - 837 МГц и 873 - 882 МГц;
- абонентские (использующие не более 1 абонентского номера) бесшнуровые телефонные аппараты в полосах радиочастот 814 - 815 МГц и 904 - 905 МГц;
- портативные абонентские радиоблоки и бесшнуровые телефонные аппараты технологии DECT в полосе радиочастот 1880 - 1900 МГц с допустимой мощностью излучения передатчика не более 10 мВт;
- радиоэлектронные средства технологии «Bluetooth» в полосе радиочастот 2400 - 2483,5 МГц с максимальной эквивалентной изотропно излучаемой мощностью передатчика не более 2,5 мВт;
- маломощные радиостанции в полосе радиочастот 433,075 - 434,750 МГц с мощностью излучения передающих устройств не более 10 мВт;
- пользовательское (оконечное) оборудование передающее, включающее в себя приемное устройство, малого радиуса действия стандартов IEEE 802.11, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n (Wi-Fi), работающее в полосе радиочастот 2400 - 2483,5 МГц, с допустимой мощностью излучения передатчика не более 100 мВт, в том числе встроенное либо входящее в состав других устройств;
- пользовательское (оконечное) оборудование передающее, включающее в себя приемное устройство, малого радиуса действия стандартов IEEE 802.11a, IEEE 802.11n (Wi-Fi), работающее в полосах радиочастот 5150 - 5350 МГц и 5650 - 6425 МГц, с допустимой мощностью излучения передатчика не более 100 мВт, в том числе встроенное либо входящее в состав других устройств;
- пользовательское (оконечное) оборудование передающее, включающее в себя приемное устройство, работающее в полосах радиочастот 2300 - 2400 МГц, 2500 - 2690 МГц, 3400 - 3450 МГц и 3500 - 3550 МГц, с допустимой мощностью излучения передатчика не более 1 Вт, в том числе встроенное либо входящее в состав других устройств;
- неспециализированные (любого назначения) устройства в полосах радиочастот: 433,075 - 434,790 МГц с допустимой мощностью излучения передатчика не более 10 мВт; 864 - 865 МГц, 868,7 - 869,2 МГц и 5725 - 5875 МГц с допустимой мощностью излучения передатчика не более 25 мВт;
- устройства малого радиуса действия: используемые в сетях беспроводной передачи данных на борту воздушных судов, в полосах радиочастот 5150 - 5250 МГц, 5250 - 5350 МГц и 5650 - 5825 МГц с максимальной эквивалентной изотропно излучаемой мощностью передатчика не более 100 мВт; используемые внутри закрытых помещений, в полосе радиочастот 5150 - 5250 МГц с максимальной

эквивалентной изотропно излучаемой мощностью передатчика не более 200 мВ;

- устройства малого радиуса действия в сетях беспроводной передачи данных в полосе радиочастот 2400 - 2483,5 МГц с максимальной эквивалентной изотропно излучаемой мощностью передатчика не более 2,5 мВт при использовании псевдослучайной перестройки рабочей частоты, устройства малого радиуса действия в сетях беспроводной передачи данных внутри закрытых помещений в полосе радиочастот 2400 - 2483,5 МГц с максимальной эквивалентной изотропно излучаемой мощностью передатчика не более 100 мВт при использовании псевдослучайной перестройки рабочей частоты, устройства малого радиуса действия в сетях беспроводной передачи данных вне закрытых помещений в полосе радиочастот 2400 - 2483,5 МГц только при высоте установки радиоэлектронных средств не более 10 м от поверхности земли, устройства малого радиуса действия, используемые в сетях беспроводной передачи данных в полосе радиочастот 2400 - 2483,5 МГц с максимальной эквивалентной изотропно излучаемой мощностью передатчика не более 100 мВт при использовании прямого расширения спектра и других отличных от псевдослучайной перестройки рабочей частоты видов модуляции: при максимальной спектральной плотности эквивалентной изотропно излучаемой мощности 2 мВт/МГц, при максимальной спектральной плотности эквивалентной изотропно излучаемой мощности 10 мВт/МГц - внутри закрытых помещений;
- базовые станции сетей подвижной радиосвязи стандарта GSM в полосах радиочастот 1710 - 1785 МГц и 1805 - 1880 МГц, устанавливаемые на борту морских и воздушных судов;
- неспециализированные (любого назначения) сверхширокополосные устройства малого радиуса действия, работающие в полосе радиочастот 2,85 - 10,6 ГГц (ширина полосы излучения радиочастот не менее 500 МГц) и имеющие технические характеристики, соответствующие характеристикам, указанным в таблице 1.2.

Таблица 1.2.

Полоса радиочастот (МГц)	Максимальная спектральная плотность эквивалентной изотропно излучаемой мощности (дБм/МГц)	Дополнительные условия использования
2850 - 3375	-57	использование в закрытых помещениях (за исключением воздушных судов и терминалов аэропортов)

3375 - 3950	-61,5	
3950 - 4425	-54,5	
4425 - 5470	-50	
5470 - 6000	-62,5	
6000 - 8100	-47	
8100 - 8625	-65	
8625 - 9150	-47	
9150 - 10600	-45	
2850 - 3375	-57	
3375 - 4800	-76	
4800 - 5475	-50	
5475 - 6000	-62,5	
6000 - 7250	-47	
7250 - 7750	-73	
7750 - 8625	-69	
8625 - 9150	-47	
9150 - 10600	-45	

Подводя итог рассмотрения данного документа, можно составить диаграмму безлицензионных полос (выделены зеленым цветом на рис. 1.9) частот, принятых в Российской Федерации.

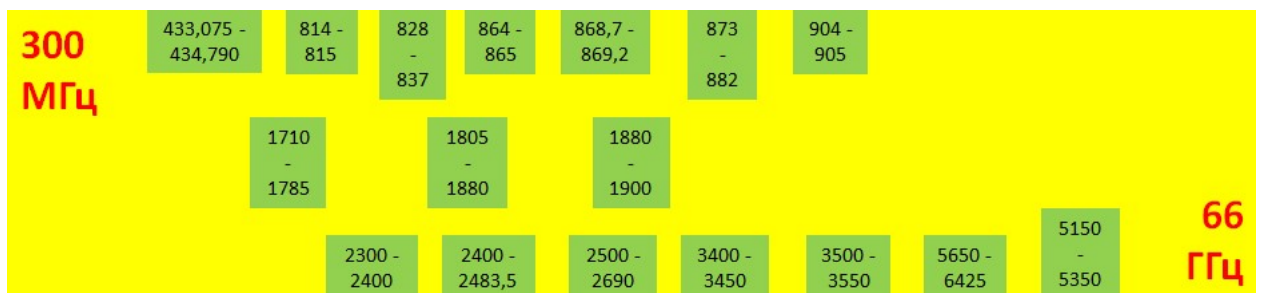


Рис. 1.9.

На основе рассмотрения регламентаций по безлицензионной работе в радиоэфире важно отметить, что безлицензионное использование определяется не только номиналом частот, но и мощностью излучения. Это обстоятельство оказывает существенное влияние на величину зоны покрытия сети радиодоступа, определяемую также энергетическим бюджетом радиолинии.

1.4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БЮДЖЕТ ЛИНИИ РАДИОДОСТУПА

Вторым по значимости фактором (после выбранного диапазона частот), определяющим эффективность системы радиодоступа, является энергетический бюджет радиолиний, действующих в сети радиодоступа. Понятие эффективности означает обеспечение радиообмена с заданным качеством на пределе расчетной дальности. При этом понятие качества трактуется как предоставление канала связи с допустимой вероятностью отказа (или чрезмерно долгого ожидания связи), достаточной разборчивостью при аналоговой телефонии или достаточно малой

вероятностью поэлементной ошибки при передаче цифровых сигналов. Главным элементом оценки эффективности являются энергетические расчеты радиолиний между корреспондентами сети. Эквивалентная схема такой линии, характеризуемой выходной мощностью $P_{\text{пер}}$ передатчика БС, коэффициентами усиления $G_{\text{пер}}$ и $G_{\text{пр}}$ передающей и приемной антенн БС, а также КПД $\eta_{\text{БС}}$ и $\eta_{\text{АС}}$ фидерных трактов БС и АС соответственно, представлена на рис. 1.10.

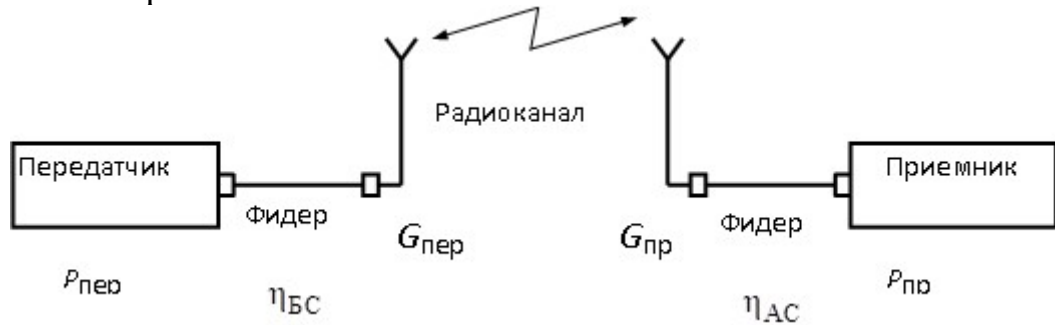


Рис. 1.10.

Для случая свободного пространства и изотропной антенны (излучающей в телесном угле 4π стерадиан) мощность $P_{\text{пер}}$ излучается равномерно во всех направлениях. Поскольку площадь поверхности сферы радиуса r есть $4\pi r^2$, плотность потока мощности на расстоянии r во всех направлениях равна $P_{\text{пер}} / (4\pi r^2)$.

Однако, если передающая антенна обладает избирательностью в определенном направлении, характеризуемой коэффициентом усиления $G_{\text{пер}}$, то в этом случае плотность потока мощности на расстоянии r составляет $G_{\text{пер}} P_{\text{пер}} / (4\pi r^2)$. Произведение $G_{\text{пер}} P_{\text{пер}}$ называется *эффективной мощностью излучения* (ЭМИ) и, по существу, определяет мощность излучения относительно изотропной антенны, для которой $G_{\text{пер}} = 1$.

Приемная антенна, ориентированная в направлении излученной мощности, собирает долю мощности, пропорциональную площади ее поперечного сечения, поэтому мощность $P_{\text{пр}}$, принимаемую антенной приемника, можно представить в виде

$$P_{\text{пр}} = \frac{A_{\text{пр}} G_{\text{пер}} P_{\text{пер}}}{4\pi r^2},$$

где $A_{\text{пр}}$ – эффективная площадь антенны. В теории антенн показывается, что при работе на длине волны λ коэффициент усиления произвольной антенны G и ее эффективная площадь A связаны соотношением $A = G\lambda^2 / (4\pi)$ при условии $A \gg \lambda^2$. Таким образом, для свободного пространства справедливо соотношение, дающее значение мощности сигнала в точке приема, находящейся на расстоянии r от передатчика:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2},$$

или, если уровень принимаемой мощности измерять в дБ,

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + L_{\text{св}}(r). \quad (1.3)$$

При этом величина $L_{\text{св}}(r) = 20 \lg[\lambda / (4\pi r)]$ определяет потери энергии сигнала при распространении в свободном пространстве. Заметим, что в (1.3) коэффициенты $G_{\text{пер}}$ и $G_{\text{пр}}$ вычисляются с учетом КПД антенно-фидерных трактов. Коэффициент усиления G зависит от длины волны излучаемой мощности и физических размеров антенны.

Если принять, что наиболее существенной составляющей помехи является *тепловой шум* в каскадах приемника, то энергетический расчет радиолинии в свободном пространстве выглядит следующим образом.

Тепловой шум вызывается тепловым движением электронов во всех проводящих элементах. Спектральная плотность такого шума постоянна для всех частот, вплоть до 10^{12} Гц, поэтому тепловой шум часто называют *белым*. Физической моделью такого шума является генератор, выделяющий при температуре T (в градусах Кельвина) на сопротивлении 1 Ом мощность

$$N = 4kTF,$$

где F – ширина полосы частот, а k – постоянная Больцмана, численно равная $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К или, если энергетический расчет проводится в дБ, $k = -228,6$ дБВт/кГц. Следовательно, спектральная (односторонняя) плотность N_0 белого шума (мощность на 1 Гц полосы) равна (в Вт/Гц)

$$N_0 = \frac{N}{F} = kT. \quad (1.4)$$

Основным параметром, определяющим *энергетический бюджет* канала, является *отношение сигнал/шум* (Signal-to-Noise Ratio, SNR) на входе приемника. Количественно такое отношение может быть определено по-разному. Одним из наиболее часто встречающихся способов количественной оценки является отношение мощности немодулированной несущей P_c к мощности шумов (Carrier Power-to-Noise Power, C/N):

$$C/N = \frac{P_c}{N} = \frac{P_c}{kTF}. \quad (1.5)$$

При использовании приемников аналоговых сигналов ширина полосы шума (называемая эффективной или эквивалентной шумовой полосой) обычно превышает ширину полосы сигнала и отношение P_c/N – это основной параметр качества работы системы связи. Если же производится прием цифровых сигналов, обычно на основе корреляторов или согласованных фильтров, ширина полосы шума принимается равной ширине полосы сигнала. В случае приема цифровых сигналов в качестве критерия качества используется отношение энергии E , затрачиваемой на передачу одного бита информации, к спектральной плотности мощности шума N_0 , связанное с (1.5) соотношением

$$\frac{E}{N_0} = \frac{P_c}{N} \left(\frac{F}{R} \right) = C/N \left(\frac{F}{R} \right),$$

где $R = 1/T_b$ – битовая скорость, т.е. количество бит информации, передаваемых в единицу времени. Значение E/N_0 определяет реализуемую

в системе связи вероятность ошибочного приема $p_{\text{ош}}$ (или, короче, вероятность ошибки). Типичный вид зависимости $p_{\text{ош}}(E/N_0)$ представлен на рис. 1.11.

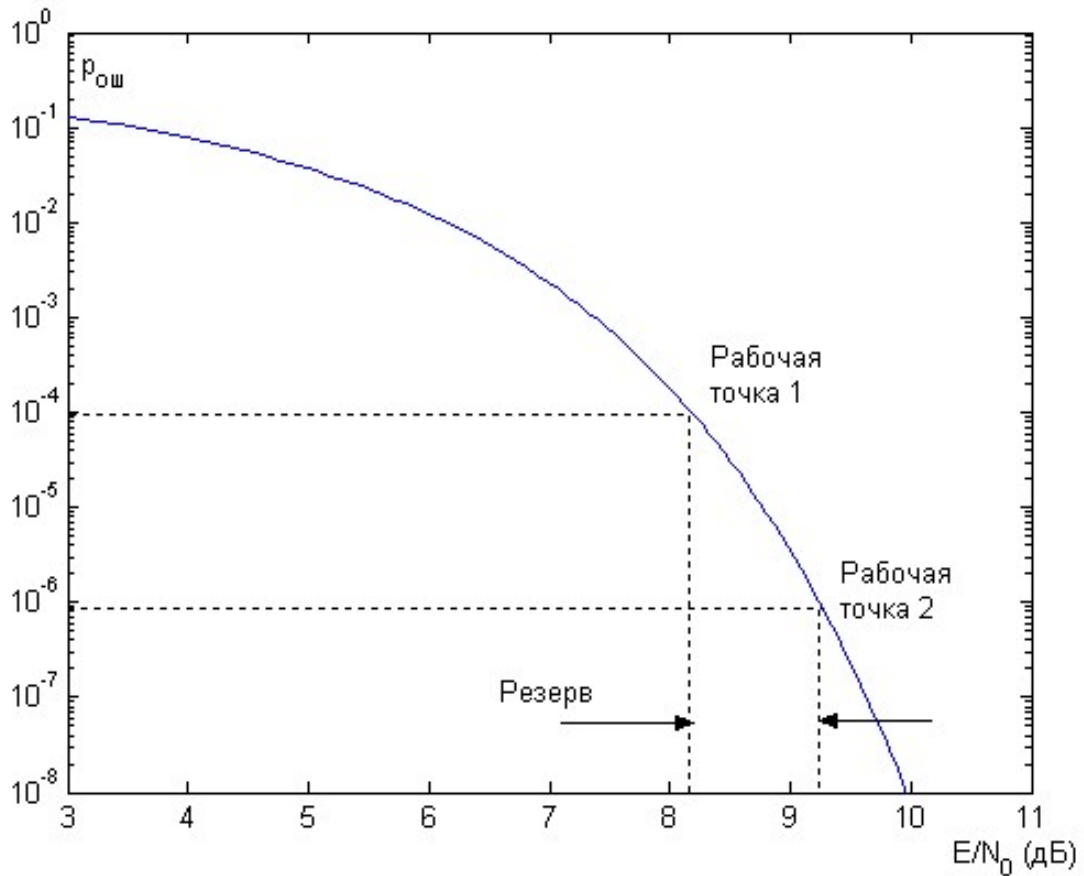


Рис. 1.11.

При расчете энергетического бюджета канала связи следует различать *требуемое* $(E/N_0)_{\text{треб}}$ и *принятое* $(E/N_0)_{\text{прин}}$ отношение сигнал/шум. Пусть в рабочей точке 1 отношение $E/N_0 = (E/N_0)_{\text{треб}}$, при котором реализуется максимально допустимая вероятность ошибки $p_{\text{ош}} = 10^{-4}$. Это означает, что в процессе эксплуатации системы реальное значение $E/N_0 = (E/N_0)_{\text{прин}}$, при котором реализуются значения вероятности ошибки $p_{\text{ош}} < 10^{-4}$, не должно оказаться меньше, чем $(E/N_0)_{\text{треб}}$. Разность (в дБ)

$$\Delta = (E/N_0)_{\text{прин}} - (E/N_0)_{\text{треб}}$$

и определяет энергетический бюджет канала связи. Если подставить в это выражение все параметры канала, то получим следующее выражение:

$$\Delta = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}} + L_{\text{св}}(r) - (E/N_0)_{\text{треб}} - kT - R. \quad (1.6)$$

При этом мощность переданного сигнала $P_{\text{пер}}$ и потери $L_{\text{св}}(r)$ выражаются в децибел-ваттах (дБВт), спектральная плотность мощности шума $N_0 = kT$ – в децибел-ваттах на герц (дБВт/Гц), коэффициенты усиления

$G_{\text{пер}}$ и $G_{\text{пр}}$ – в децибелах относительно изотропного излучения (дБи); скорость передачи данных R – в децибелах относительно величины 1 бит/с (дБбит/с). Для поддержания положительного баланса необходимо искать приемлемое соотношение между всеми параметрами, входящими в (1.6).

1.5. ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Приведенные выше соотношения описывает идеализированный случай распространения волн в свободном пространстве. Основными физическими процессами, определяющими характер распространения сигнала в реальных условиях, являются отражение, дифракция и рассеяние (см. рис. 1.12).

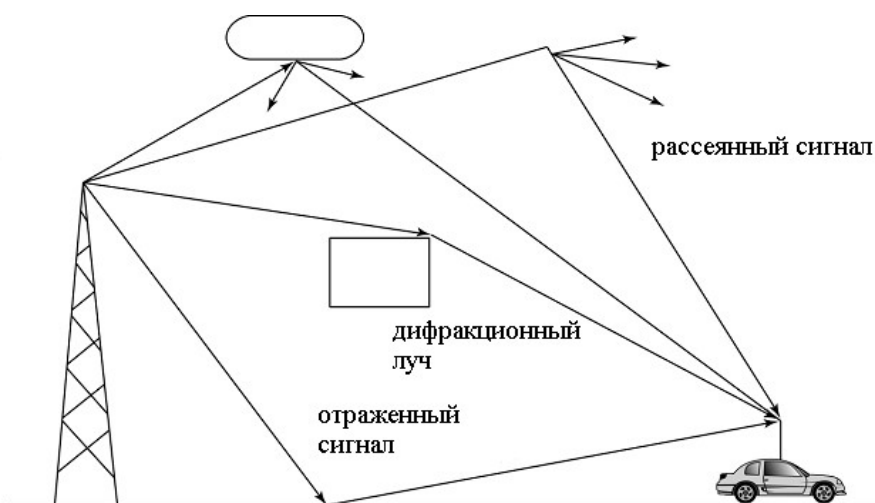


Рис. 1.12.

Отражение радиоволн происходит при наличии на трассе гладкой поверхности с размерами, намного превышающими длину волны радиочастотного сигнала. В системах мобильной связи отражение радиоволн может происходить от земной поверхности, стен зданий, мебели или оборудования внутри помещений.

Дифракция радиоволн наблюдается при наличии между передатчиком и приемником объекта с размерами, превышающими длину волны, и препятствующего прямому распространению сигнала. В результате дифракции радиоволны могут достигать приемной антенны в отсутствии прямой видимости между передатчиком и приемником. В городских условиях радиоволны дифрагируют на краях зданий, автомобилях и многих других объектах.

Рассеяние встречается при наличии шероховатой поверхности или объектов, размеры которых малы по сравнению с длиной волны. В условиях города рассеяние радиоволн может происходить на фонарных столбах, дорожных знаках, деревьях и т.п.

Указанные эффекты распространения определяют многолучевой характер распространения радиоволн и связанное с этим явление замираний и межсимвольной интерференции.

При многолучевом характере распространения принимаемый сигнал можно рассматривать как сумму переменных во времени векторов, имеющих случайные амплитуды и фазы (рис. 1.13).

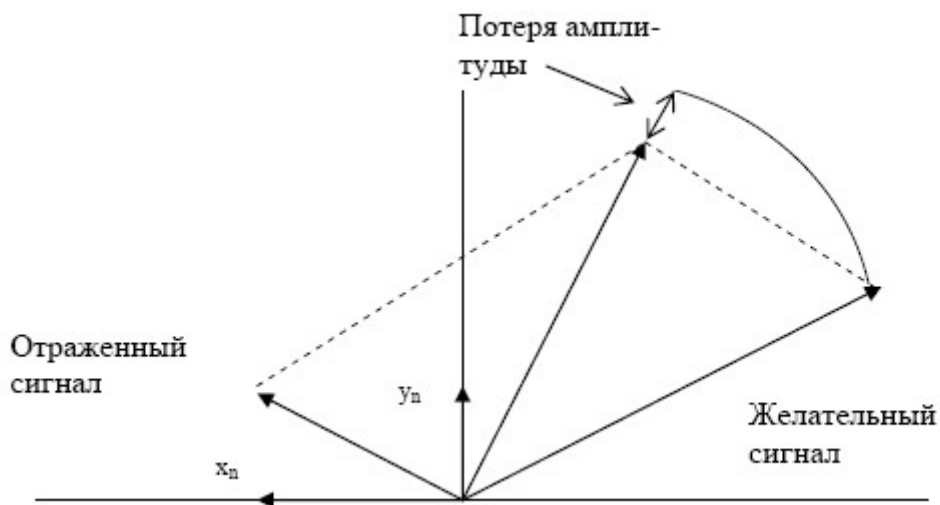


Рис. 1.13.

Значительные изменения амплитуды, приводящие к заметным вариациям принимаемого сигнала, могут возникать только при наличии существенных изменений в условиях распространения сигнала. Это ведет к возникновению замираний. При определенных соотношениях фаз сигналы, приходящие вдоль разных траекторий могут взаимно компенсироваться, при других – усиливаться. Наблюдаемые вариации амплитуды принимаемого сигнала, обусловленные нестационарностью канала, называются замираниями.

В каналах мобильной связи наблюдаются замирания сигналов двух типов – крупномасштабное и мелкомасштабное замирания. Крупномасштабное замирание отражает среднее ослабление мощности сигнала или потери в тракте вследствие распространения на большое расстояние. Крупномасштабное замирание определяется наличием вдоль трассы распространения таких объектов, как холмы, леса, здания рекламные щиты и т.д. Статистика крупномасштабного замирания позволяет приблизительно рассчитать потери в тракте как функцию расстояния. В этом случае мощность принимаемого сигнала уменьшается с расстоянием по степенному закону, а отклонения от среднего значения определяются логарифмически нормальным распределением. Мелкомасштабное замирание – это значительные вариации амплитуды и фазы сигнала на масштабах порядка длины волны. Мелкомасштабное замирание проявляется как расширение сигнала во времени (временное рассеяние) и нестационарное поведение канала. В системах мобильной связи параметры канала изменяются во времени из-за движения передатчика или приемника. Мелкомасштабное замирание называется релеевским, если прямая видимость между передатчиком и приемником отсутствует, а сигнал в точку приема приходит в результате многократных отражений от различных объектов. Огибающая такого сигнала статистически описывается с помощью

релеевской функции плотности вероятности. Если преобладает прямой сигнал (между передатчиком и приемником есть прямая видимость), то огибающая мелкомасштабного замирания описывается функцией плотности вероятности Райса.

Крупномасштабное замирание принято рассматривать как пространственное усреднение мелкомасштабных флуктуаций сигнала. Оно определяется, как правило, путем усреднения сигнала по интервалу, превышающему 10-30 длин волн. В этом случае мелкомасштабные флуктуации (главным образом релеевские) отделяются от крупномасштабных вариаций (обычно с логарифмически нормальным распределением).

Кроме описанного выше эффекта замираний параллельно ему существует такое явление, как межсимвольная интерференция или временное рассеяние. Дело в том, что изменения фазы на 2π радиан могут происходить даже при изменении времени запаздывания соответствующего луча на малую величину $2\pi/\omega$, что возможно при относительно малых вариациях параметров канала. Таким образом, даже при малых вариациях параметров канала возникает существенная межсимвольная интерференция (рис 1.14).

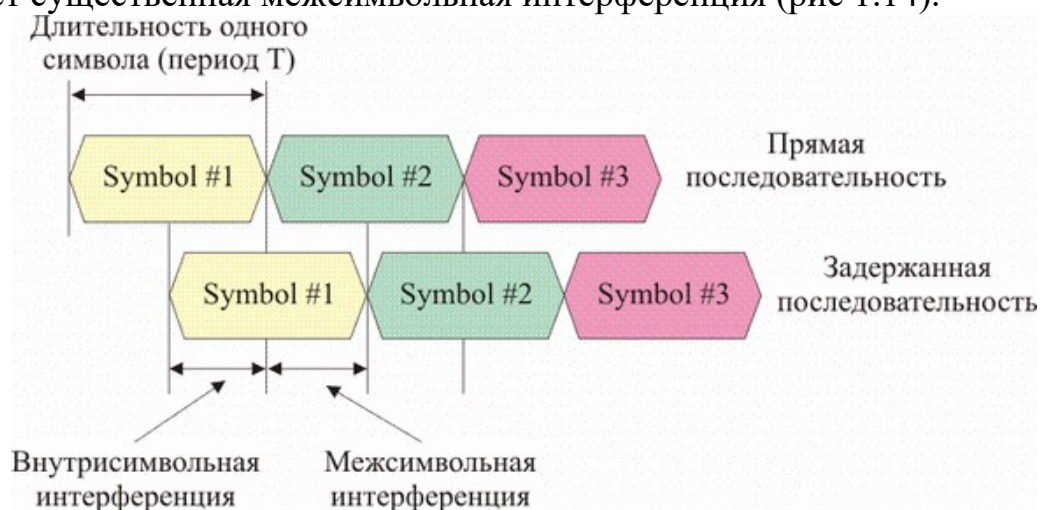


Рис. 1.14.

Как правило, временные задержки сигналов, связанные с многолучевостью, изменяются с различной скоростью и случайным образом. Это означает, что принимаемый сигнал можно считать случайным процессом и при наличии большого количества лучей можно рассматривать как комплексный гауссовский случайный процесс.

Достоверность передачи информации определяется несколькими факторами, среди которых можно выделить отношение сигнал/шум, а также искажения сигнала, вызванные межсимвольной интерференцией. Уменьшение отношения сигнал/шум может быть вызвано снижением мощности сигнала, повышением мощности шума или мощности сигналов, интерферирующих с полезным сигналом. Эти механизмы называются, соответственно, потерями (ослаблением) и шумом (интерференцией). Ослабление может происходить в результате поглощения энергии сигнала, отражения части энергии сигнала или рассеяния. Существуют несколько источников шумов и интерференции – тепловой шум, галактический шум,

атмосферные и промышленные помехи, перекрестные и интерферирующие сигналы от других источников. Цели повышения достоверности передачи информации в системах и сетях радиосвязи служат определенные технологии, например, для уменьшения отрицательного эффекта от замираний сигналов применяется технология скачков по частоте. Подробнее эти вопросы будут рассмотрены в последующих разделах.

1.6. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Учет особенностей распространения радиоволн и оценки дальности связи (зоны радиодоступа) в реальных условиях и с учетом различных факторов могут выполняться на основе или строгой теории поля, или приближенных математических выражений, или большого количества феноменологических моделей и эмпирических формул.

При организации сети сотовой радиосвязи для определения оптимального места установки и числа базовых станций, а также для решения других задач необходимо уметь рассчитывать характеристики сигнала в любой точке пространства в пределах всей зоны обслуживания. Городская среда создает специфические условия для распространения радиоволн. Теневые зоны, многократные отражения и рассеяние волн формируют многолучевые поля со сложной интерференционной структурой и резкими пространственными изменениями уровня сигнала. Многолучевой характер распространения радиоволн, когда в точку приема приходят волны с разных направлений и с разными временными задержками, порождает явления межсимвольной интерференции при передаче кодовых последовательностей. Искажения сигнала, обусловленные межсимвольной интерференцией, могут вызывать серьезное ухудшение характеристик системы и качества высокоскоростной передачи цифровой информации, если длительность задержки превышает длительность символа. Необходимой предпосылкой для разработки эффективных систем связи, работающих в городской среде, является глубокое знание характеристик многолучевого канала распространения.

Любую радиотрассу можно представить в виде набора нескольких основных путей, по которым сигнал от базовой станции доходит до антенны мобильного телефона и наоборот. На каждом из этих путей находятся различные объекты, влияющие на распространение радиоволн. В городских условиях можно выделить следующие основные элементы:

- направляющие структуры (проспекты, улицы, участки рек, контактные линии городского электротранспорта и др);
- отдельное здание или группы зданий;
- поверхность Земли и препятствия на ней (автомобили, столбы, заборы и т.п.);
- участки растительности (парки, скверы, дворовые насаждения и пр.).

Моделирование влияния перечисленных объектов на распространения радиоволн можно осуществлять различными способами:

детерминированными, статистическими и комбинированными. К первым относят в основном методы геометрической оптики, физической и геометрической теорий дифракции, метод параболического уравнения, а также численные методы электродинамики. Они позволяют произвести расчеты напряженности поля с большой степенью точности, но предъявляют высокие требования к точности задания модели среды. Статистические методы учитывают случайный характер распределения неоднородностей среды, оказывающих влияние на процесс распространения радиоволн. Они позволяют предсказать некоторые средние характеристики сигналов.

В настоящее время существует целый ряд математических моделей, дающих возможность рассчитать усредненное значение принимаемой в городских условиях мощности в зависимости от различных параметров, характеризующих конкретные условия мобильной связи. Большинство из них являются почти полностью эмпирическими.

Исторически одними из первых явились эмпирические графики полученные Окамурой и позволяющие определить медианное значение сигнала в условиях статистически однородного города, а также в какой-то степени учесть те или иные особенности данного города или отдельных городских районов. Эти графики были получены путем замеров напряженности поля в условиях Токио при излучении сигнала с одного из небоскребов города. В этой модели для вычисления медианного значения мощности сигнала, принимаемого антенной подвижного объекта в городских условиях, предлагается использовать следующее уравнение, в котором все величины приведены в децибелах:

$$P_p = P_0 - A_m(f, d) + H_b(h_b, d) + H_m(h_m, f),$$

где:

P_p - значение искомой мощности принимаемого сигнала;

P_0 - его мощность при передаче в свободном пространстве;

и определяемые по экспериментально полученным зависимостям и отраженным на соответствующих графиках величины:

$A_m(f, d)$ - фактор изменения медианного значения мощности в городе относительно затухания в свободном пространстве при эффективной высоте антенны центральной станции $h_b=200$ м и высоте антенны на подвижном объекте $h_m=3$ м.;

$H_b(h_b, d)$ - фактор «высота – усиление» в децибелах для центральной станции с $h_b=200$ м, расположенной в городе;

$H_m(h_m, f)$ - фактор «высота – усиление» в децибелах для станции на подвижном объекте с $h_m=3$ м, расположенном в городе.

По полученным Окамурой графикам различными авторами были выведены аналитические выражения для расчета поля. Одной из первых работ на эту тему является исследование, выполненное К. Олсбруком и Дж. Парсонсом. Разработанная ими модель позволяет предсказать так

называемые потери передачи. Но наиболее удачной и подробной является аналитическая модель, полученная М. Хатой как результат прямой аппроксимации кривых Окамуры. Модель Хаты не охватывает всех результатов, полученных Окамурой, и справедлива при следующих ограничениях: диапазон частот – 150... 1500 МГц, высота антенны центральной станции – 30 ... 200 м, высота антенны абонентской станции – 1 ... 10 м, дальность связи – 1 ... 20 км.

В соответствии с этой моделью средние потери передачи выражаются формулой:

$$L = 69,55 + 26,15 \lg f - 13,82 \lg h_b - \alpha(h_m) + (44,9 - 6,55 \lg h_b) \lg r,$$

где $\alpha(h_m)$ -поправочный коэффициент, используемый при высоте мобильной антенны h_m , отличной от эталонной, равной 1,5м (в экспериментах Окамуры $h_m=3$ м).

Выражения для $\alpha(h_m)$ получаются различными для крупных и средних городов. Для города средних размеров

$$\alpha(h_m) = (1,1 \cdot \lg f - 0,7)h_m - (1,56 \lg f - 0,8),$$

для крупного города

$$\alpha(h_m) = 3,2(\lg 11,75h_m)^2 h_m - 4,97.$$

Для потерь передачи в пригороде

$$L_s = L\{\text{город}\} - 2\left(\lg(f/28)^2\right) - 5,4.$$

Эти усредненные эмпирические формулы позволяют определить затухание с точностью до 7...17дБ.