

РАЗДЕЛ 1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕТЕЙ И СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ

Развитие общества характеризуется потребностью в передаче все возрастающих объемов информации. Человек получает информацию через органы чувств (зрения, слуха и т.д.), но физиологические возможности человека не позволяют обеспечивать передачу больших объемов информации на значительные расстояния. Сигналы, несущие информацию о человеческой речи, видимом изображении (и прочих), имеют такой спектральный состав, который затрудняет их непосредственную передачу на расстояния, превышающие обусловленные природой дальности акустического или визуального восприятия. Для преодоления этой ограниченности в передаче информации существуют технические средства, обеспечивающие передачу и прием информации, объединяемых понятием связь, телекоммуникации – совокупность средств организации связи на расстоянии. Одной из технологий осуществления передачи информации на расстоянии является радиосвязь, которая реализуется с помощью различного вида радиоканалов, когда передача информации осуществляется с помощью радиоволн, распространяющихся в различных средах, именуемых обобщенно радио эфиром. Основные достоинства радиосвязи:

- быстрота развертывания систем связи;
- возможность работы с мобильными абонентами;
- возможность широковещательного режима.

В развитии радиосвязи, как и электросвязи вообще, реализуется ряд тенденций.

Цифровизация. Переход к цифровым сигналам обеспечивает высокую помехоустойчивость передачи, повышает ее качество и надежность, существенно сокращает вес и габариты оборудования. Поскольку представление цифрового сигнала одинаково для всех видов трафика, то это создает реальную платформу для их объединения в одном канале передачи.

Глобализация. Практически телекоммуникационные сети приобретают всемирный характер. Это касается и телефонии, когда мы можем связаться с абонентом в любой стране, и передачи данных (сеть Интернет). Примерами глобальных сетей также являются: сети сотовой связи, сети спутниковой связи (InMarSat, Global Star и др.).

Персонализация. С появлением сотовых телефонов, терминалов спутниковой связи телекоммуникации все больше привязываются не к месту нахождения терминала (телефонный аппарат, телевизор и т.п.), а к персоне, человеку, который носит или возит терминал с собой.

Мобильность. Эта тенденция существовала и раньше, но сейчас она развивается в массовых средствах связи благодаря развитию технологий радиосвязи, которые являются беспроводными и поэтому обеспечивают услугами абонентов, находящихся в движении, как при перемещении пешком, так и в автомобиле или даже самолете или космическом аппарате.

Интеграция услуг. Цифровые сигналы позволяют объединить разнородный трафик (голос, данные, видео) в одном цифровом потоке.

1.1. 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. 1.1) и условно – для удобства характеристики обобщенных свойств – разделенные на указанные на рисунке диапазоны с соответствующими названиями по длине волны и/или частоте.



Рис. 1.1.

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.1.1, 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 преодолевать 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 возможную связь в этом диапазоне в пределах прямой видимости между передающей и приемной антеннами. Для увеличения дальности связи антенны устанавливают 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).

1.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БЮДЖЕТ РАДИО ЛИНИИ

Таким образом, вторым по значимости фактором (после выбранного диапазона частот), определяющим эффективность системы радиосвязи, является энергетический бюджет радиолиний, действующих в сети радиосвязи. 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. 1.2.

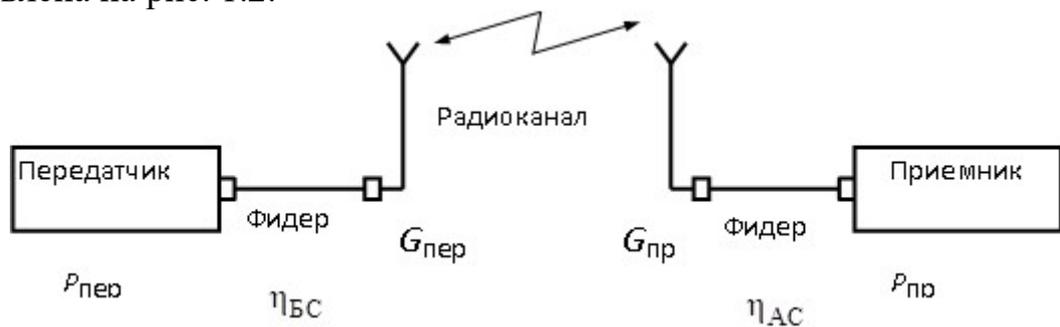


Рис. 1.2.

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,

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

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. 1.3.

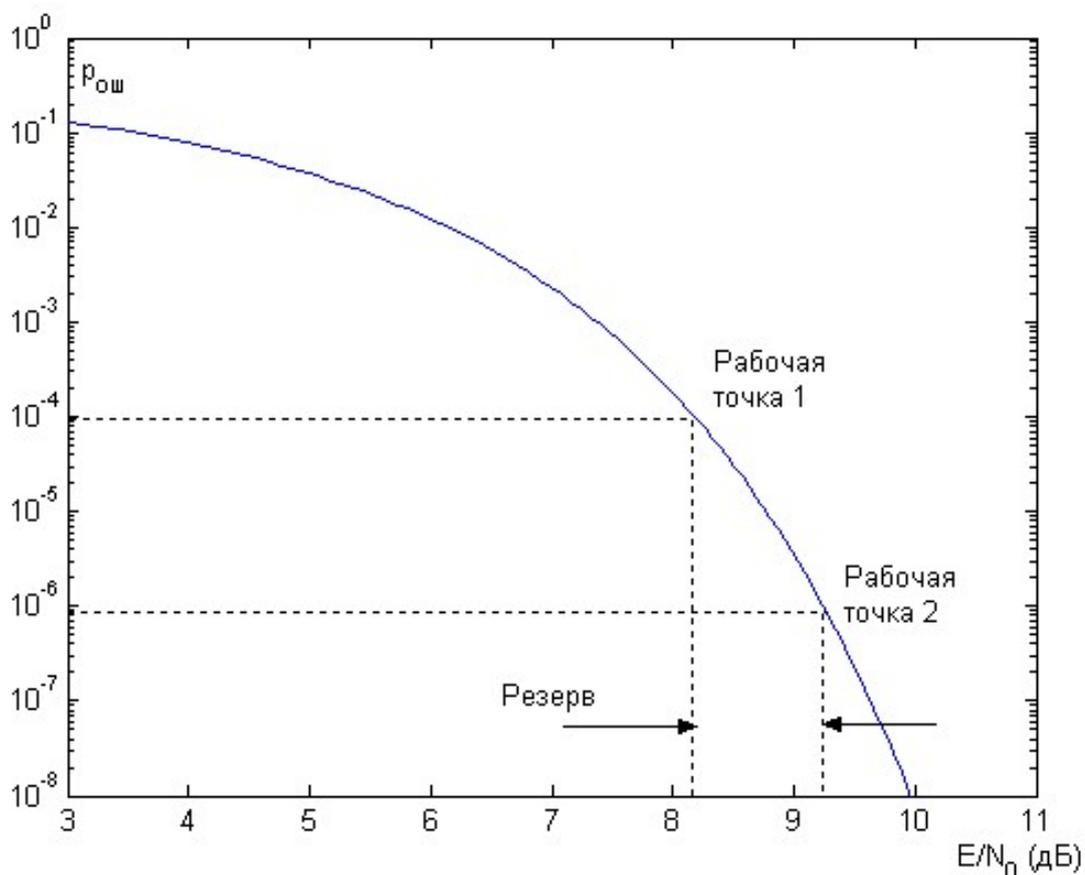


Рис. 1.3.

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).

1.3. ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИО ВОЛН

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. 1.4).

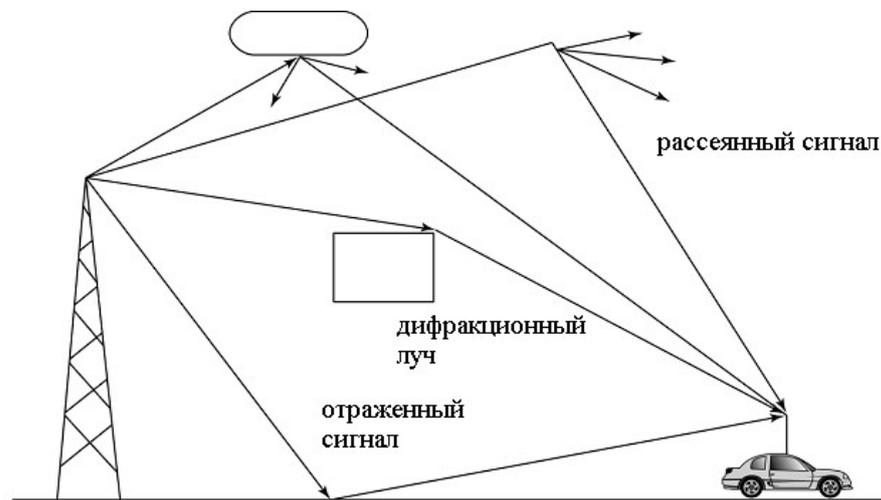


Рис. 1.4.

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. 1.5).

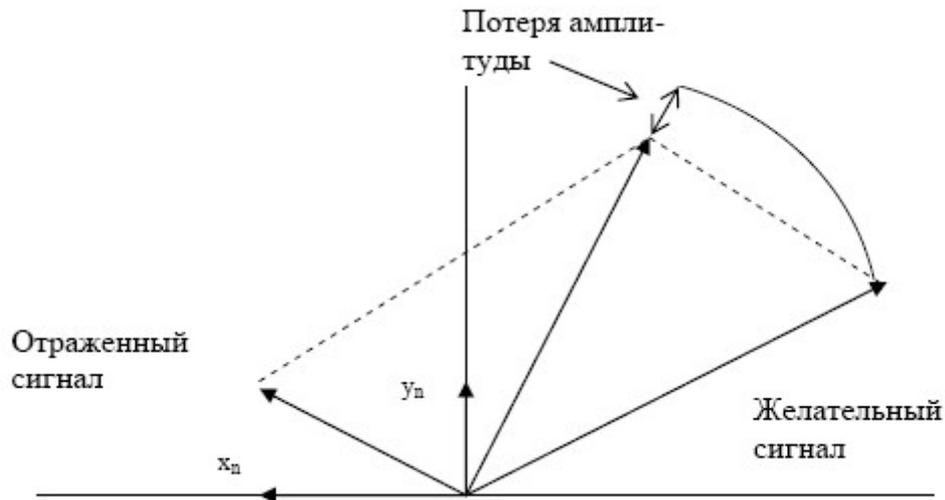


Рис. 1.5.

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 1.6).

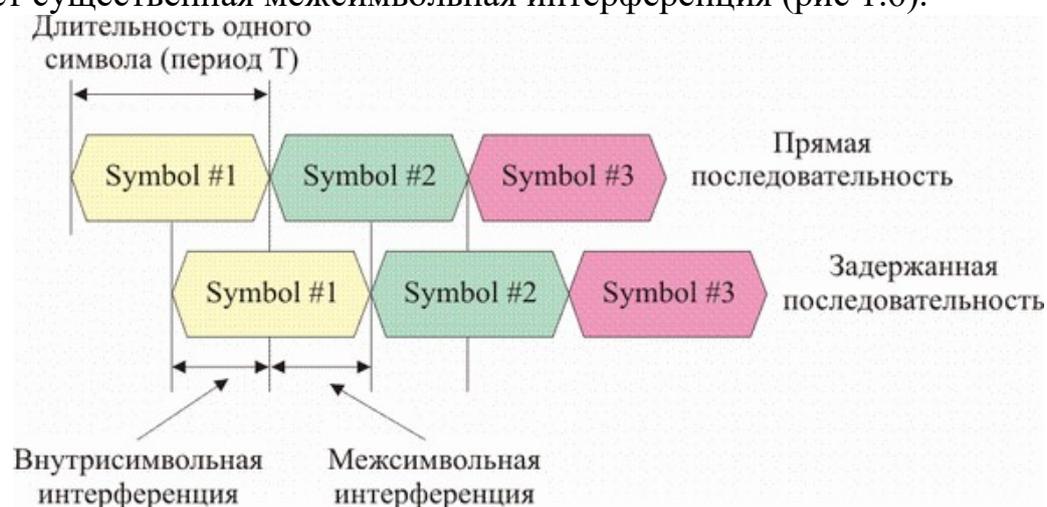


Рис. 1.6.

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.

1.4. 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.

1.5. СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Само несущее колебание является периодическим и новой информации получателю не доставляет. Для того, чтобы несущее колебание отражало передаваемую информацию, нужно один или несколько параметров несущего колебания связать с передаваемым сообщением. Процесс изменения какого-либо из параметров несущего колебания по закону передаваемого сообщения называется модуляцией. В качестве несущего

колебания наиболее часто используют гармоническое колебание. В зависимости от того, какой из параметров несущего колебания—амплитуда, частота или начальная фаза несущего колебания—изменяется по закону передаваемого сообщения, различают виды модуляции: соответственно амплитудная, частотная или фазовая. Сигнал, получаемый в процессе модуляции, называют модулированным колебанием, или радиосигналом. Если в качестве несущего колебания используют последовательность импульсов, то в результате модуляции (которую в этом случае принято также именовать манипуляцией) изменяют параметры последовательности импульсов: амплитуду, временное положение, длительность импульса. Соответственно процесс называют амплитудно-импульсной модуляцией, время-импульсной модуляцией, широтно-импульсной модуляцией. Если в результате модуляции формируют код, соответствующий какому-либо из этих параметров, и представляют его набором импульсов, то такой вид модуляции называют кодово-импульсной.

В современных цифровых системах радиосвязи модуляция наряду с указанной выше задачей способствует повышению спектральной эффективности путем увеличения позиционности формируемых сигналов – 4-ФМ, 8-ФМ, КАМ-16, КАМ-64, пр.

При передаче цифровой информации по каналу связи передают последовательность чисел в двоичном коде, т.е. последовательность нулей 0 и единиц 1. Прием информации состоит в том, чтобы с максимальной вероятностью отличить 0 от 1. При передаче информации (модулирующего сигнала) по радиоканалу используют различные методы модуляции (или манипуляции – Keying). При этом, учитывая ограниченность частотного ресурса и все возрастающие объемы широкополосных приложений, стараются повысить спектральную эффективность системы радиосвязи. Спектральная эффективность определяется как отношение скорости передачи информации B , бит/с, к полной полосе частот канала Π_w , Гц,

$$\gamma = \frac{B}{\Pi_w}.$$

Спектральная эффективность измеряется числом битов в секунду, приходящихся на 1 Гц полосы канала, т.е. в бит/с/Гц.

При использовании многопозиционной цифровой манипуляции

$$B = B_S \cdot \log_2(M),$$

где M – число элементов пространства сигналов; B_S – скорость передачи символов цифрового потока.

Согласно критерию Найквиста максимальная скорость передачи символов B_S (в идеализированном случае прямоугольной формы спектра сигнала) в выделенной полосе частот численно равна Π_w и тогда спектральная эффективность равна $\log_2(M)$ и будет тем выше, чем больше кратность модуляции, что достигается применением многопозиционных методов модуляции (манипуляции).

Для оценки спектральной эффективности удобно также использовать показатель компактности спектра:

$$\frac{\int_0^{f_T} S(f) df}{\int_0^{\infty} S(f) df}$$

Этот показатель согласно рис. 1.7 характеризует соотношение между энергией сигнала, заключенной в главном лепестке спектра (полосе частот входного фильтра приемника в идеальном случае) и всей энергией сигнала. Из сравнения представленных на рисунке спектральных характеристик сигналов с ЧММС и 2-ФМ видно, что с точки зрения компактности спектр ЧММС выгодно отличается более узкой полосой главного лепестка и меньшей энергией боковых лепестков.

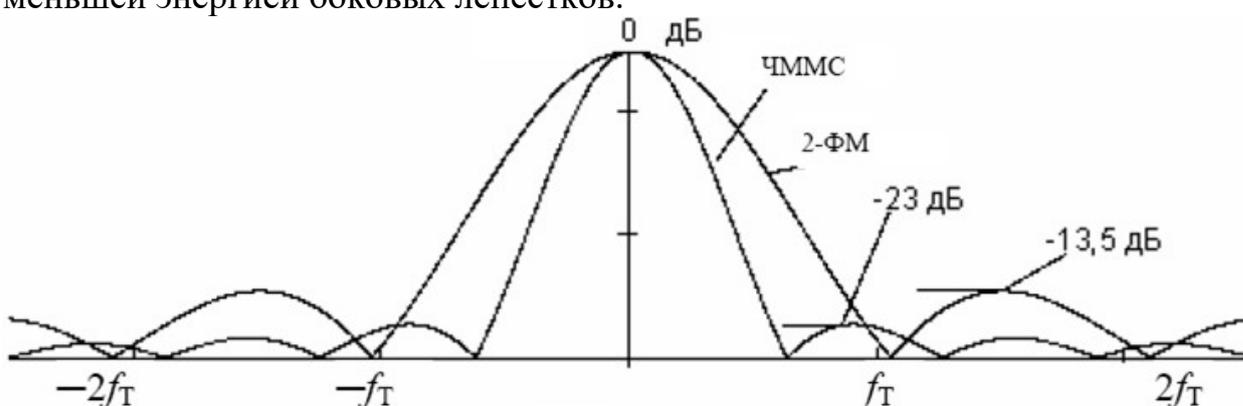


Рис. 1.7.

1.6. МНОГОСТАНЦИОННЫЙ ДОСТУП И УПЛОТНЕНИЕ РАДИОКАНАЛОВ

Для того, чтобы на приемном конце можно было разделить сигналы от разных источников, используют какой-либо отличительный признак несущего колебания. Наиболее часто в качестве такого отличительного признака является частота несущего колебания. В таком случае говорят о частотном разделении сигналов. На приемном конце устанавливается устройство, реагирующее только на сигнал с заранее определенным отличительным признаком. При частотном разделении сигналов в качестве обнаружителя отличительного признака используют частотные фильтры, настроенные на частоту выбранного несущего колебания. На выход такого фильтра проходит сигнал только с выбранной несущей частотой, несмотря на то, что на вход фильтра поступают все сигналы, наведенные в приемной антенне. В технике связи могут быть использованы сигналы и с другими отличительными признаками. После выбора несущего колебания с выбранным отличительным признаком выделяют информацию, заключенную в модуляции какого-либо из параметров выбранного несущего колебания. На этом этапе обработки принимаемого сигнала выполняют операции, обратные операциям модуляции, выполняемым при передаче сигнала, и данный этап преобразований сигналов называют демодуляцией.

Как правило, в системах радиосвязи используется принцип многоканальной передачи сообщений, когда по общему каналу передается большое число сигналов от индивидуальных абонентов, поступающих по индивидуальным каналам. Любой сигнал в системах радиосвязи можно охарактеризовать тремя основными параметрами. Первый – частота или ширина спектра сигнала. Второй – время или длительность сигнала. Третий – энергия или мощность сигнала.

Чтобы индивидуальные приемники могли выделить соответствующий сигнал отдельного канала, должны существовать определенные признаки, присущие только данному сигналу. Таким признаком может быть концентрация энергии сигнала в определенном диапазоне частот или в конкретном временном интервале, или в конкретном сигнале определенной формы.

Исторически первым методом многоканальной передачи сообщений в системах радиосвязи был метод множественного доступа с частотным разделением каналов, 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. Таким образом, основным параметром, по значению которого происходит идентификация абонента, является частота, или ширина спектра сигналов. Методы, в основу которых положен принцип разделения каналов по частотным интервалам (FDMA, Frequency Division Multiple Access, метод множественного доступа с частотным разделением каналов), получили распространение в аналоговых сетях и системах радиосвязи (рис.1.8).

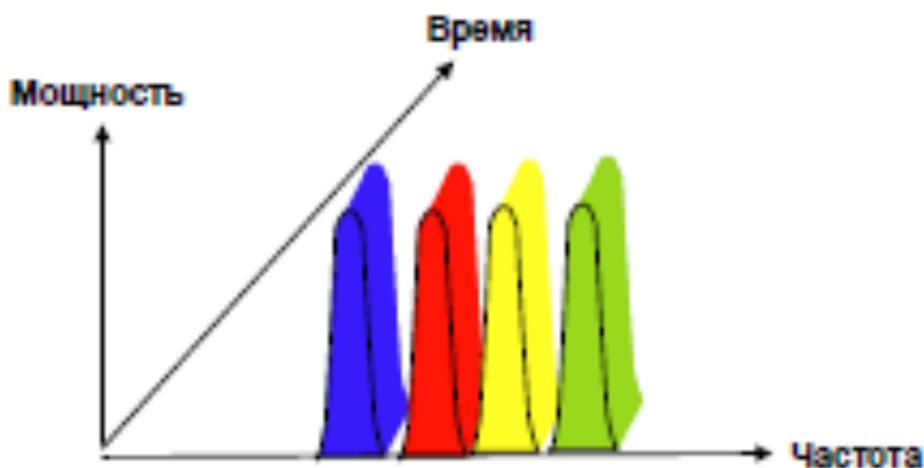


Рис. 1.8.

Значение второго основного параметра сигнала – времени – легло в основу метода множественного доступа с временным разделением каналов (TDMA, Time Division Multiple Access) – рис.1.9.

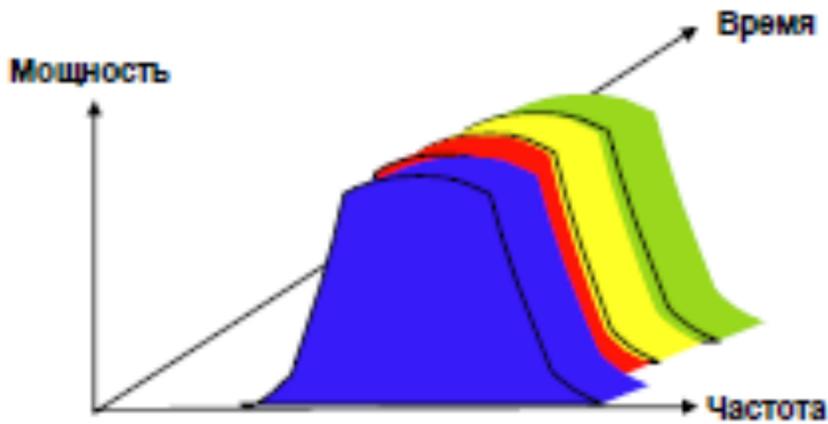


Рис. 1.9.

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 сотовой связи второго поколения, например, в европейском стандарте GSM, американском D-AMPS, японском JDC.

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 (рис. 1.10). Основная идея метода заключается в том, что в одной и той же полосе частот можно передавать сигналы, не влияющие друг на друга, если только выбрать их из специального ансамбля.

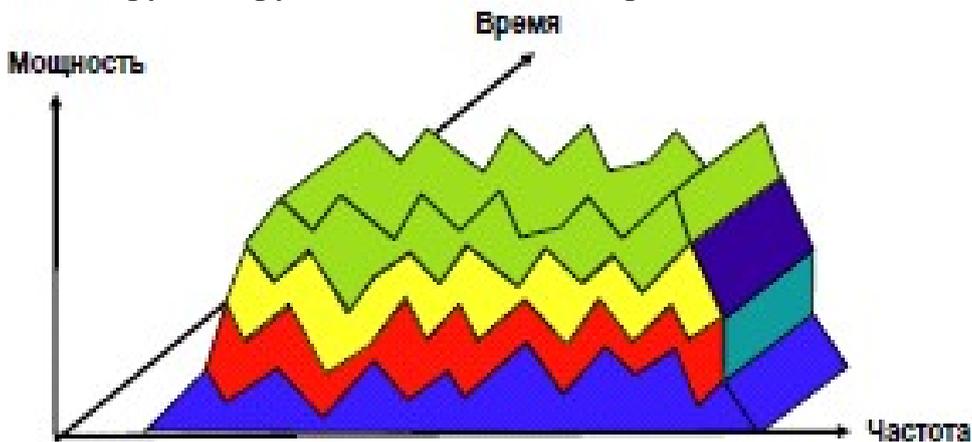


Рис. 1.10.

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.