

## **Лекция 4. Особенности мобильных сетей связи**

**Цель лекции** – изучение особенностей мобильных сетей связи, в частности, их структуры, механизмы работы, а также анализа факторов, влияющих на качество связи, таких как многолучевое распространение сигналов и расчет потерь при распространении радиоволн.

### **Введение**

Мобильные сети связи стали неотъемлемой частью современного общества, обеспечивая пользователям возможность общения и доступа к информации в любое время и в любом месте. С каждым годом технологии мобильной связи развиваются, предлагая новые стандарты и улучшая качество обслуживания. В данной лекции мы рассмотрим ключевые аспекты функционирования мобильных систем, включая их структуру, механизмы передачи сигналов и влияние различных факторов на качество связи. Одной из основных задач мобильных сетей является обеспечение надежного соединения, несмотря на динамические условия окружающей среды и перемещение абонентов. Для этого разработаны различные подходы к проектированию сетей, включая использование многолучевого распространения сигналов и адаптивных методов регулировки мощности. Мы также уделим внимание анализу полос частот, используемых в мобильной связи, и методам расчета потерь при распространении радиоволн. Понимание этих аспектов является критически важным для эффективного проектирования и эксплуатации мобильных систем, а также для дальнейшего развития технологий связи.

### **Полосы частот сотовой связи**

В мобильных сетях связи выделенные полосы частот строго ограничены и содержат относительно небольшое число частотных каналов. Это делает необходимым рациональное использование доступных ресурсов для повышения емкости системы связи. Полосы частот, используемые в мобильных системах, относятся к дециметровому диапазону радиоволн, которые преимущественно распространяются в пределах прямой видимости. В этом диапазоне дифракция сигналов выражена слабо, а молекулярное поглощение и поглощение в гидрометеорах, таких как капли дождя и снежинки, незначительны. Тем не менее, в городских условиях присутствие различных преград – таких как здания и движущиеся автомобили – приводит к появлению отраженных сигналов. Эти отраженные сигналы интерферируют друг с другом, создавая эффект многолучевого распространения. В результате сигнал может достигать приемника по нескольким путям, что создает сложности в расчетах и управлении качеством связи. Многолучевое распространение оказывает значительное влияние на характеристики связи, включая уровень принимаемого сигнала и вероятность его искажения. Эффективное проектирование систем связи требует понимания этого явления и применения соответствующих методов для минимизации потерь и улучшения качества обслуживания абонентов. Полосы частот, используемые в сотовой связи, представлены в таблице 4.1.

Многолучевое распространение существенно затрудняет расчет интенсивности сигналов как функции удаления от базовой станции, так как в некоторых случаях результирующий сигнал может усиливаться, а в некоторых (что бывает гораздо чаще) – ослабевать. Для грамотного проектирования системы сотовой связи такой расчет необходим.

Таблица 4.1 – Полосы частот, используемые в сотовой связи стандартами GSM

Стандарт	Частота, МГц		Длина волны, см	
	Обратный канал	Прямой канал	Обратный канал	Прямой канал
GSM-900	890-915	935-960	32,8-33,7	31,2-32,1
GSM-1800	1710-1785	1805-1880	16,8-17,6	16,0-16,6
GSM-1900	1850-1910	1930-1990	15,7-16,2	15,1-15,6

### Многолучевое распространение сигналов и методы расчета потерь при распространении

Типовая модель системы мобильной радиосвязи включает высокоподнятую антенну базовой станции (БС) и одну или несколько подвижных антенн, которые могут быть установлены на автомобиле или в приемопередатчике мобильной станции (МС). В условиях прямой видимости (LOS) между БС и МС существует относительно короткий участок распространения радиоволн. Однако в большинстве случаев из-за естественных и искусственных препятствий, таких как здания и другие конструкции, связь может осуществляться по неполному участку прямой видимости. Это приводит к образованию линий не прямой видимости (NLOS), что, в свою очередь, создает многолучевое распространение сигнала. При этом трасса радиопередачи может моделироваться как случайно изменяющаяся, поскольку сигнал проходит по множеству путей. В качестве примера, антенна базовой станции может находиться на высоте 70 метров, например, на крыше самого высокого здания (рис. 4.1). Прямая LOS трасса с распространением в свободном пространстве ( $d_{OCB}$ ) пролегает между базовой антенной и первым зданием.

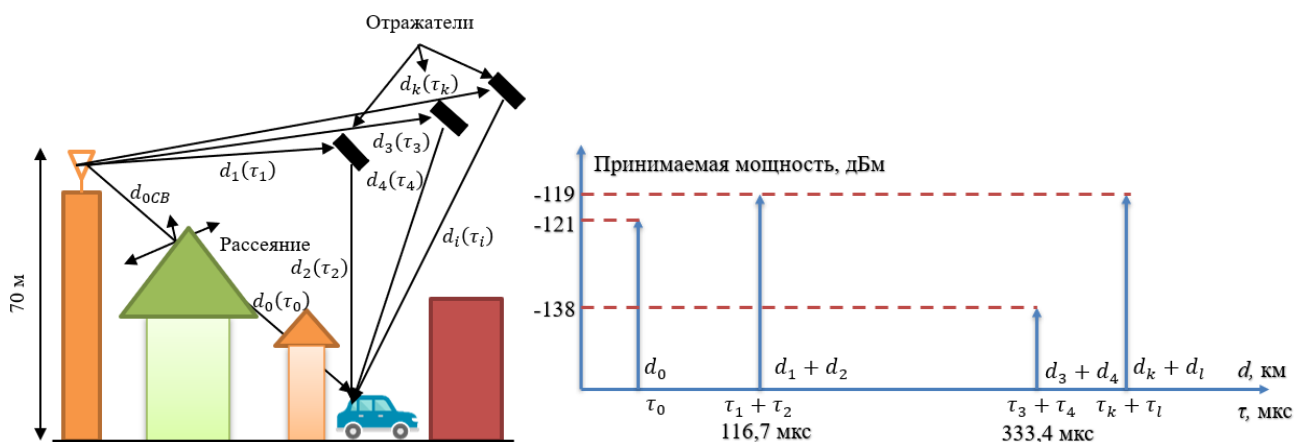


Рисунок 4.1. Среда распространения радиоволн

Из-за его влияния на прямой трассе  $d_0$  вносится затухание, выражающееся в более быстром, чем в свободном пространстве, убывании интенсивности принимаемого сигнала (рис. 4.2). Изменение среднего значения напряженности поля  $E$  в зависимости от расстояния  $R$  МС от БС называют затуханиями, а всплески – замираниями. Расположенные в отдалении возвышенности отражают сигналы. Отраженные задержанные сигналы при приеме могут иметь мощность, сравнимую с мощностью ослабленных сигналов прямой трассы.

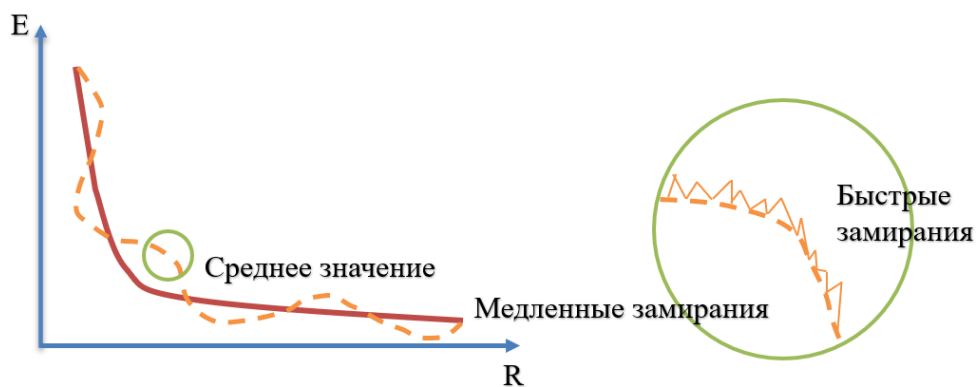


Рисунок 4.2. Зависимость напряженности поля от расстояния между БС и ПС

Итак, существует более одного пути распространения радиоволн. Трасса распространения изменяется при перемещениях подвижного объекта, базового оборудования и/или движении окружающих предметов и среды, а, следовательно, изменяются параметры принимаемого сигнала.

Пусть абонент 1 относительно неподвижен, а часть окружающей среды движется со скоростью 100 км/час. Автомобили на автостраде становятся «отражателями» радиосигналов. Если во время передачи или приема абонент 2 также движется (например, со скоростью 100 км/час), то параметры случайным образом отраженных сигналов изменяются с большей скоростью. Скорость изменения уровня сигнала часто описывается доплеровским рассеянием.

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

Когда приемник, передатчик или окружающая среда даже незначительно перемещаются, эффективное перемещение превышает несколько сотых длины волны. Например, в системах радиосвязи диапазона 2 ГГц длина волны равна 15 см. Таким образом, если приемник перемещается лишь на расстояние 1,5 см, он смещается на  $1,5/15=0,1$  длины волны. Перемещение на расстояние, большее, чем несколько сотых длин волны, может вести к флуктуациям огибающей.

Итак, замирания на трассе можно разделить на долговременные – медленные, или усредненные замирания и кратковременные, или быстрые замирания из-за многолучевости. Диапазон изменения уровня сигнала при быстрых замираниях может достигать 40дБ, из которых примерно 10 дБ – превышение над средним уровнем и 30 дБ – провалы ниже среднего уровня, причем более глубокие провалы встречаются реже, чем менее глубокие. При неподвижном абонентском аппарате интенсивность принимаемого сигнала не меняется. При перемещении ПС периодичность флуктуаций в пространстве составляет около полуволны, т. е. 10 – 15 см в линейной мере. Период флуктуаций во времени зависит от скорости перемещения ПС: например, при скорости 50 км/ч период флуктуаций составляет около 10мс, а при 100 км/ч – около 5мс. Частота замираний глубиной 30 – 10 дБ при скорости порядка 50 км/ч составляет 5 – 50 провалов в секунду соответственно, а средняя длительность замираний ниже уровня 30

– 140 дБ при той же скорости – порядка 0,2 – 2 мс. После того как быстрые замирания из-за многолучевости устраняются усреднением на интервале нескольких сотен длин волн, остается еще неселективное затенение. Причиной затенения являются в основном особенности рельефа местности вдоль трассы распространения радиосигналов сухопутных подвижных систем. Это явление вызывает медленные изменения средних значений параметров релейских замираний. Хотя для затенения не имеется подходящей математической модели, распределением, наилучшим образом соответствующим экспериментальным данным в типичном городском районе, признан логарифмически нормальный закон распределения. Интенсивность медленных флуктуаций не превышает 5 – 10 дБ, а их периодичность соответствует перемещению ПС на десятки метров. Фактически медленные замирания представляют собой изменение среднего уровня сигнала при перемещении ПС, на которое накладываются быстрые замирания вследствие многолучевого распространения.

Формула для потерь при распространении в свободном пространстве (или потерь при распространении) для всенаправленных передающей и приемной антенн с единичным коэффициентом усиления ( $G = 1$ ), расположенных друг от друга на расстоянии  $r$  метров, имеет вид

$$\frac{P_R}{P_T} = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 = \left( \frac{c}{4\pi r f} \right)^2. \quad (4.1)$$

Изотропная антенна – это идеальная антенна без потерь, которая излучает мощность равномерно во всех направлениях. В подвижной связи наиболее часто используют всенаправленные антенны, являющиеся приближениями идеальных изотропных антенн. Как передающие антенны они одинаково излучают во всех направлениях, как приемные – одинаково хорошо принимают сигналы со всех направлений. Коэффициент усиления этих антенн примерно равен единице:  $G = 1$ , или 0 дБ.

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

$$GT = 4\pi A/\lambda^2 \quad (4.2)$$

и коэффициентом усиления приемной антенны

$$GR = 4\pi A/\lambda^2, \quad (4.3)$$

где  $P_R$  – мощность сигнала, принимаемого МС,  $P_T$  – мощность передаваемого сигнала,  $A$  – эффективная апертура антенны,  $\lambda$  – длина волны,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света,  $f$  – частота несущей при передаче) формула для потерь при распространении в свободном пространстве принимает следующий вид:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2. \quad (4.4)$$

Полагаем, что  $P_R = P_{Rmin}$  представляет собой минимальную мощность несущей, которая приводит к приемлемому, или «пороговому», значению вероятности ошибки на бит. Для речевой связи в качестве «приемлемой, или пороговой, характеристики» часто принимается

$BER = 3 \cdot 10^{-2}$  при передаче без кодирования и предварительной обработки. Тогда радиус зоны уверенного приёма:

$$r_{\max} = \sqrt{\frac{P_T G_T G_R}{P_{R\min}}} \frac{\lambda}{4\pi} = \sqrt{\frac{P_T G_T G_R}{P_{R\min}}} \frac{c}{f} \frac{1}{4\pi}, \quad (4.5)$$

где  $r_{\max}$  выражено в метрах.

Коэффициент усиления системы является полезным показателем для оценки характеристик системы, так как объединяет много параметров, представляющих интерес для проектировщиков систем радиосвязи. В простейшей форме, применимой только к аппаратуре, коэффициент усиления системы – это разность между выходной мощностью передатчика и пороговой чувствительностью приемника. Пороговая чувствительность приемника – это минимальная принимаемая мощность, необходимая для достижения приемлемого уровня характеристик, таких как максимальное значение вероятности ошибки на бит (BER). Коэффициент усиления системы должен превышать или, по крайней мере, быть равным сумме коэффициентов усиления и внешних по отношению к аппаратуре потерь.

Существует несколько методик расчета энергетических потерь мощности на трассе распространения от МС до БС, или обратно.

Линия передачи соединяет радиопередатчик, имеющий радиочастотный (РЧ) усилитель мощности (УМ), с передающей антенной. В приемнике антенна соединяется в маломощным радиочастотным усилителем (РЧ МШУ). Усиленный принятый сигнал поступает на преобразователь частоты вниз и демодулируется. В МС для передачи и приема используется одна и та же антенна. Передающий РЧ усилитель мощности возбуждает передающую антенну, которая излучает электромагнитные волны.

Пусть передающий РЧ усилитель отдает  $P_T$  ватт мощности передающей антенне. Плотность излучаемой мощности  $\rho$ , Вт/м<sup>2</sup>, или исходящий поток электромагнитной энергии, измеренный на расстоянии  $r$  от антенны, определяется формулой:

$$\rho = P_T / (4\pi r^2) \quad (4.6)$$

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

$$P_R = \rho A = P_T A / (4\pi r^2). \quad (4.7)$$

У идеальных всенаправленных антенн  $G = 1$ ; следовательно, имеем:

$$A = \lambda^2 / (4\pi). \quad (4.8)$$

Из (2.4) получаем выражение для потерь при распространении ( $L_f$ , дБ):

$$L_f = 10 \lg \frac{P_R}{P_T} = 10 \lg G_T + 10 \lg G_R - 20 \lg f - 20 \lg r + 147,56 \text{ дБ} \quad (4.9)$$

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

$$L_B[\text{дБ}] = +27,56 - 20\lg f[\text{МГц}] - 20\lg r[\text{м}] \quad (4.10)$$

или по формуле:

$$L_B = -32,44 - 20\lg f[\text{МГц}] - 20\lg r[\text{км}] \quad (4.11)$$

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

### **Потери при распространении для систем непрямо́й видимости (NLOS) и прямо́й видимости (LOS)**

Из формул (4.10, 4.11) видно, что при работе в пределах LOS принимаемая мощность уменьшается по закону  $1/r^2$  по мере увеличения расстояния  $r$  между антеннами. Другими словами, средние потери при распространении растут пропорционально степени  $n$  расстояния. Показатель степени  $n$  для систем прямой видимости при отсутствии препятствий на трассе распространения радиоволн равен 2 ( $n = 2$ ).

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

$$L(d) \sim L_B(d/d_0)^{-n}, \quad (4.12)$$

где  $n$  – показатель степени  $3,5 \leq n \leq 5$ ,  $d$  – расстояние или разнесение между БС и МС,  $d_0$  – эталонное расстояние или длина отрезка трассы до первого препятствия (участок распространения в свободном пространстве),  $L_B$  – потери при распространении на трассе LOS для  $d_0$ , м (формулы 4.10 и 4.11),  $L$  – суммарные потери (при распространении) комбинированной трассы, состоящей из участков LOS и NLOS.

Показатель степени  $n$  показывает, насколько быстро возрастают потери при распространении с увеличением расстояния. Эталонное расстояние  $d_0$  предполагает, что в пределах него между антенной и точкой  $d_0$ , имеет место распространение сигнала (беспрепятственное) в свободном пространстве. На практике значения  $d_0$  внутри зданий обычно лежат в диапазоне 1...3 м.

Абсолютные средние потери при распространении  $L(d)$ , выраженные в децибелах, определяются как потери от передатчика до точки на эталонном расстоянии  $L(d_0)$  плюс дополнительные потери при распространении, описываемые выражением (4.12).

Таким образом,

$$L(d_{\text{общ}}) = L(d_0) - 10\lg(d/d_0). \quad (4.13)$$

$$d = d_{\text{ОБЩ}} - d_0 \quad (4.14)$$

### **Контрольные вопросы:**

1. Какие основные элементы входят в состав мобильной системы связи?
2. Что такое многолучевое распространение сигналов и как оно влияет на качество связи?
3. Какова роль центра коммутации в мобильных сетях?
4. Как осуществляется расчет потерь при распространении сигналов в мобильных системах?
5. Каковы основные характеристики полос частот, используемых в стандартах GSM?
6. В чем заключается разница между прямой и непрямой видимостью в контексте радиосвязи?
7. Что такое коэффициент усиления системы и почему он важен для проектирования сетей связи?
8. Какие методы используются для уменьшения влияния замираний и затенения на связь?