

Занятие №2. Проектирование радиопокрытия мобильных сетей. Модели распространения сигналов. Бюджеты каналов.

1. Цель работы

Получить представление о том, как проектируется покрытие сетей мобильной связи и, научиться рассчитывать радиус действия (радиопокрытие) отдельных базовых станций БС (сот).

2. Краткие теоретические сведения

2.1. Понятие радиуса соты и потерь мощности сигнала

Сигнал, формируемый базовой станцией сети мобильной связи, распространяется в пространстве и затухает пропорционально увеличению расстояния между передатчиком и приемником. Очевидно, что его мощности в какой-то момент (на каком-то удалении от передатчика) станет недостаточно для того, чтобы корректно осуществлять сеанс передачи данных. Предельное расстояние, на котором возможна успешная передача данных между пользователями и базовой станцией называется *радиусом соты*. Радиус соты зависит от:

- мощности передатчика;
- несущей частоты сигнала;
- коэффициента усиления приемной и передающей антенн;
- чувствительности приемника;
- величины помех на пути распространения и пр.

Для сигнала, распространяющегося в свободном пространстве, можно определить зависимость величины потерь мощности радиосигнала PL (Path Loss) от расстояния между приемником и передатчиком d как (2.1-2.2):

$$PL_{\text{разы}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2 \quad (2.1)$$

$$PL_{\text{дБ}} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi df}{c}\right) \quad (2.2)$$

где f – это частота сигнала, а λ – длина волны. Эта модель называется моделью распространения сигнала в свободном пространстве – FSPM (Free Space Propagation Model). При этом очевидно, что в данной оценке величина потерь (в размах или дБ) зависит лишь от частоты сигнала и расстояния между приемником и передатчиком. Такие модели не используют при расчете покрытия/радиуса соты в реальных сетях, так как они не учитывают многочисленные факторы, влияющие на величину потерь в радиотракте. Для более точной оценки затуханий, как правило, операторы мобильных сетей используют эмпирические модели распространения радиосигналов в пространстве.

2.2 Модели распространения радиосигналов PL

Существует множество моделей, которые предсказывают затухание радиосигнала на определенном расстоянии от передатчика для самых различных радиоусловий. Это могут быть аналитические модели, например,

модель свободного пространства, представленная выше (2.1-2.2), не учитывающая факторы воздействия внешней среды на сигнал, а также **эмпирические**, полученные опытным путем для самых разных условий и типов приемопередающих устройств (например, модели Walfish-Ikegami, Knife-Edge, Okumura, Nata, и пр.).

Рассмотрим наиболее часто используемые модели распространения сигналов для современных сетей мобильной связи. Базовые станции могут устанавливаются практически где угодно: на зданиях, в бизнес-центрах, в аэропортах, вдоль железных дорог и пр.

2.2.1 Модель UMiNLOS (Urban Micro Non-Line-of-Sight)

Данная модель также применяется в условиях размещения точек доступа/небольших сот в помещениях (Indoor).

Формула для расчета затуханий имеет вид (2.3):

$$PL(d) = 26 \cdot \log_{10}(f[\text{ГГц}]) + 22.7 + 36.7 \cdot \log_{10}(d[\text{м}]), \quad (2.3)$$

На рисунке 2.1 представлены полученные с помощью описанных выше моделей распространения сигнала зависимости потерь мощности радиосигнала от расстояния между приемником и передатчиком.

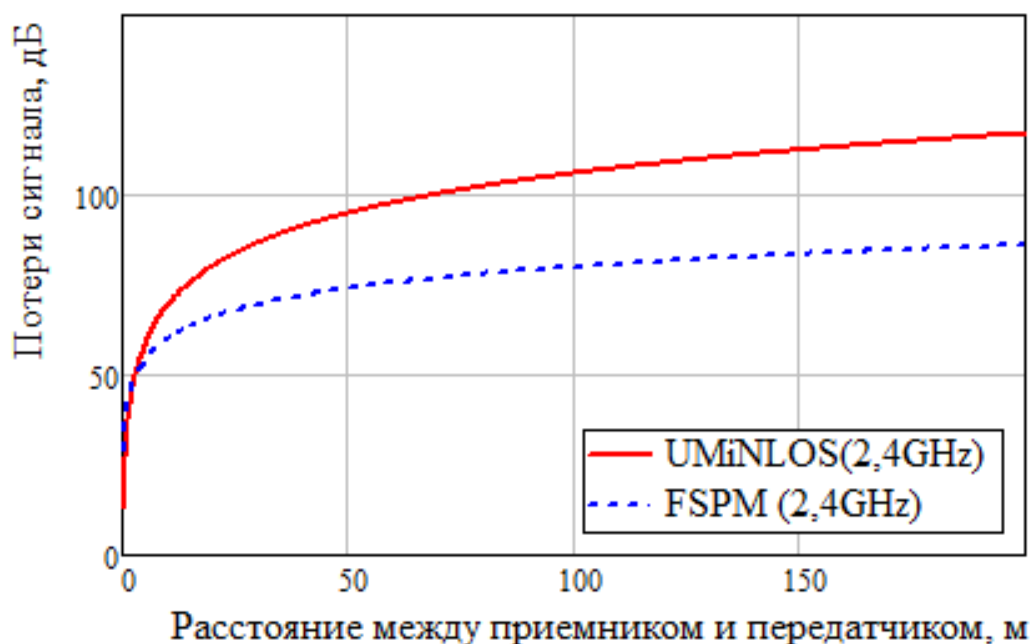


Рис. 2.1. Потери мощности радиосигнала в помещении, рассчитанные по моделям UMiNLOS и FSMP.

2.2.2 Модель Окумура-Хата и ее модификация COST231

Данная модель распространения сигнала является одной из наиболее часто используемых моделей **при проектировании покрытия макросот, например, для сетей LTE**. Она применима для сетей, работающих в частотных диапазонах от 150 МГц до 2 ГГц при высоте подвеса антенны базовой станции от 30 до 200 м, высоте антенны мобильного устройства от 1 до 10 м и радиусе соты от 1 до 20 км.

Формула для расчета затуханий имеет вид (2.14):

$$PL(d) = A + B \cdot \log_{10}(f) - 13.82 \cdot \log_{10}(hBS) - a + s \cdot \log_{10}(d) + Lclutter, \quad (2.4)$$

где f – это несущая частота сигнала в МГц, d – расстояние между приемником и передатчиком в км, hBS – высота подвеса антенны БС, $Lclutter, A, B$ – константы (см. Таблица 2.1).

Табл. 2.1. Значения коэффициентов А и В для различных диапазонов частот.

Диапазоны частот, МГц	А	В
150-1500	69.55	26.16
1500-2000	46.3	33.9

Параметр a зависит от высоты антенны мобильной станции hms , от несущей частоты f , а также от типа местности (или клаттера) и определяется по формуле (2.5):

$$a(hms) = \begin{cases} 3.2 \cdot [\log_{10}(11.75 \cdot hms)]^2 - 4.97 & \text{для } DU \text{ и } U \\ [1.1 \cdot \log_{10}(f)] \cdot hms - [1.56 \cdot \log_{10}(f) - 0.8] & \text{для } SU, \text{RURAL, ROAD} \end{cases} \quad (2.5)$$

где DU – это Dense Urban (плотная городская застройка), U – urban (город), SU – suburban (пригород), $RURAL$ – сельская местность, $ROAD$ – трасса.

Последняя составляющая в выражении (2.4) – это $Lclutter$, зависящая от несущей частоты f и от типа местности, определяется как (2.6):

$$Lclutter = \begin{cases} 3 & \text{для } DU \\ 0 & \text{для } U \\ -\left(2 \cdot \left[\log_{10}\left(\frac{f}{28}\right)\right]^2 + 5.4\right) & \text{для } SU \\ -(4.78 \cdot [\log_{10}(f)]^2 - 18.33 \cdot \log_{10}(f) + 40.94) & \text{для } RURAL \\ -(4.78 \cdot [\log_{10}(f)]^2 - 18.33 \cdot \log_{10}(f) + 35.94) & \text{для } ROAD \end{cases}, \quad (2.6)$$

Составляющая s зависит от высоты базовой станции hBS , от несущей частоты f и от расстояния между абонентом и базовой станцией d и определяется как (2.7):

$$s = \begin{cases} 44.9 - 6.55 \cdot \log_{10}(f), & \text{для } d \geq 1 \text{ км} \\ (47.88 + 13.9 \cdot \log_{10}(f) - 13.9 \cdot \log_{10}(hBS)) \times \frac{1}{\log_{10}(50)}, & \text{для } d < 1 \text{ км} \end{cases} \quad (2.7)$$

2.2.3 Модель Walfish-Ikegami

Данная модель распространения сигнала используется при проектировании покрытия макросот в условиях городской застройки с «манхэттенской» grid-образной архитектурой (рисунок 2.2). Она применима для сетей, работающих в частотных диапазонах от 800 МГц до 2 ГГц (частота в МГц в формулах) при высоте подвеса антенны базовой станции от 4 до 50 м, высоте антенны мобильного устройства от 1 до 3 м и радиусе соты от 30 м до 6 км.

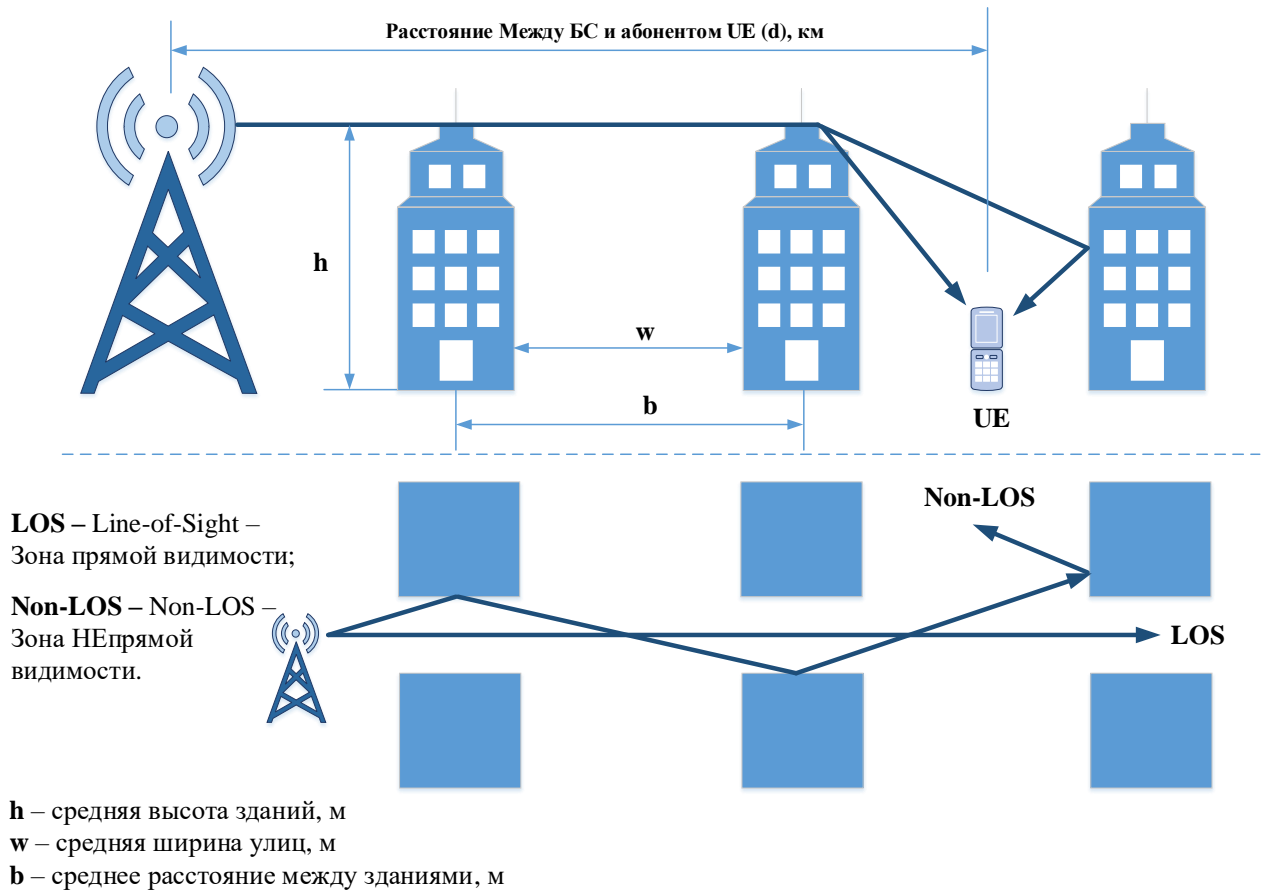


Рис. 2.2. Применение модели Walfish-Ikegami для расчета покрытия

Потери мощности радиосигнала, если абонент находится в зоне прямой видимости базовой станции (LOS) рассчитываются как (2.8):

$$L_{LOS} = 42.6 + 20\log_{10}(f) + 26\log_{10}(d). \quad (2.8)$$

При отсутствии прямой видимости между абонентом и BS, потери определяются как (2.9)-(2.16):

$$L_{NLOS} = \begin{cases} L_0 + L_1 + L_2, & \text{если } L_1 + L_2 > 0 \\ L_0, & \text{если } L_1 + L_2 \leq 0 \end{cases}, \quad (2.9)$$

где L_0 – потери сигнала в свободном пространстве, L_1 – потери сигнала за счет переотражений от стен зданий, L_2 – потери сигнала за счет переотражений от крыш зданий.

$$L_0 = 32.44 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d). \quad (2.10)$$

$$L_2 = -16.9 - 10\log_{10}(w) + 10\log_{10}(f) + 20\log_{10}(\Delta h - h_{ms}) + \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & 0 \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075\varphi & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ, \\ 4.0 - 0.114\varphi & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases}$$

$$(2.11)$$

где φ – средний угол между направлением распространения сигнала и улицей.

$$L_1 = L_{1_1} + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f) - 9\log_{10}(b). \quad (2.12)$$

$$L_{1_1} = \begin{cases} -18\log_{10}(1 + hBS - \Delta h), & \text{если } hBS > \Delta h \\ 0, & \text{если } hBS \leq \Delta h \end{cases}. \quad (2.13)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & \text{если } hBS > \Delta h \\ 54 - 0.8(hBS - \Delta h), & \text{если } hBS \leq \Delta h \text{ и } d > 0.5 \\ 54 - 0.8(hBS - \Delta h) \cdot \frac{d}{0.5}, & \text{если } hBS \leq \Delta h \text{ и } d \leq 0.5 \end{cases}. \quad (2.14)$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & \text{если } hBS > \Delta h \\ 18 - 15 \cdot \frac{hBS - \Delta h}{\Delta h}, & \text{если } hBS \leq \Delta h \end{cases}. \quad (2.15)$$

$$k_f = -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right). \quad (2.16)$$

2.3 Особенности проектирования радиопокрытия мобильных сетей

В рамках данной работы нас будут интересовать принципы расчета радиуса действия одной соты в сетях мобильной связи. При расчете радиопокрытия беспроводных точек доступа или базовых станций, нужно учитывать физические факторы, ограничивающие зону действия. Прежде всего, это чувствительность приемного устройства *RxSens* (приемника базовой станции или пользовательского терминала UE), которая вычисляется по формуле (2.17):

$$RxSens = NoiseFigure + ThermalNoise + RequiredSINR, \quad (2.17)$$

где *NoiseFigure* – коэффициент шума, который обычно указывается производителем оборудования; *RequiredSINR* – требуемое отношение мощности сигнала к мощности шумов и интерференции, зависящее от используемых схем модуляции и кодирования MCS, а также от механизмов, позволяющих снизить это значение; *ThermalNoise* – тепловой шум приемника, определяемый по формуле (2.18):

$$ThermalNoise = -174 + 10 \cdot \log_{10}(BW), \quad (2.18)$$

где *BW* – ширина полосы частот принимаемого сигнала в Гц, а -174 дБм – уровень шума на 1 Гц полосы частот при температуре 20°C.

Значение *RxSens*, получаемое из выражения (2.17) – это минимальный требуемый уровень радиосигнала, при котором возможно успешное декодирование битов данных.

Для того чтобы определить, какой должен быть максимальный уровень допустимых потерь радиосигнала MAPL (Maximum Allowed Path loss), при котором будет возможно успешно декодировать данные, составляется и рассчитывается так называемый бюджет восходящего (от пользователя к точке доступа UL) и нисходящего (от точки доступа к пользователю DL) каналов.

а) Бюджет нисходящего канала (DL Link Budget)

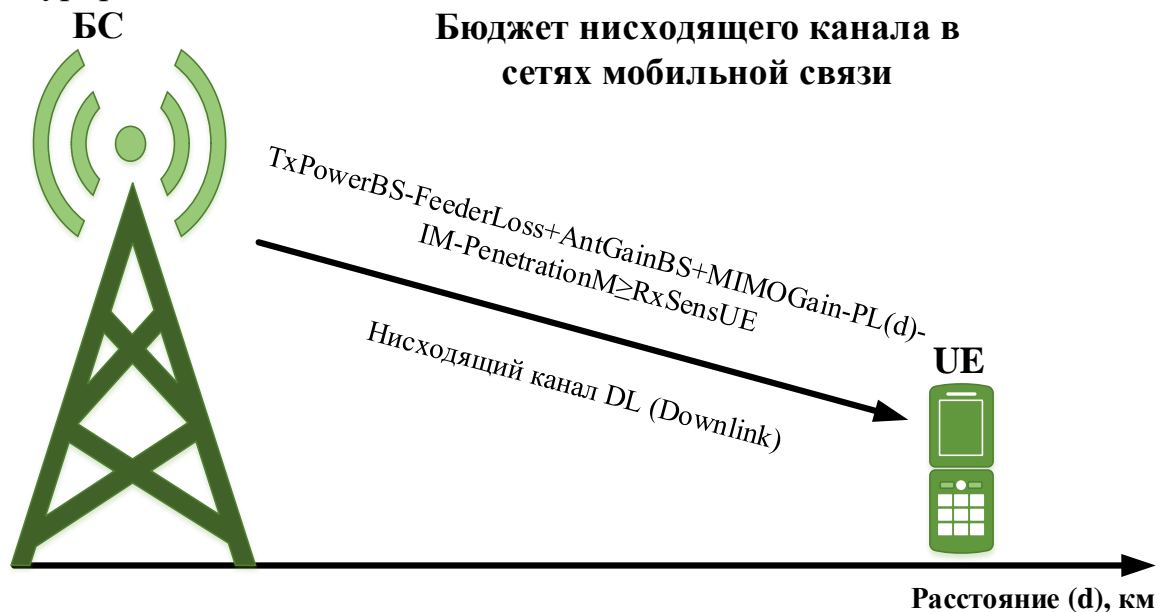
На рисунке 2.3 показано из каких компонентов составляется бюджет нисходящего канала DL.

В неравенстве, показанном на рисунке 2.3, все входные параметры за исключением $PL(d)$ являются константами. В левой части этого неравенства стоят составляющие, характеризующие реальный уровень сигнала в зависимости от расстояния d , в правой же – требования к уровню такого

сигнала, при котором декодирование будет осуществимо. Если приравнять левую и правую часть неравенства, мы получим уравнение (2.19), где $PL(d)$ можно заменить на $MAPL_DL$ – уже независимые от расстояния максимально допустимые потери радиосигнала, которые удовлетворяют минимальным требованиям успешного приема данных.

$$TxPowerBS - FeederLoss + AntGainBS + MIMOGain - MAPL_DL - IM - PenetrationM = RxSensUE. \quad (2.19)$$

На рисунке 2.4 показано, что происходит с сигналом при прохождении через антенно-фидерный тракт. Потери сигнала во многом зависят от того, как сконфигурирована базовая станция.



TxPowerBS – Мощность передатчика базовой станции BS, дБм

FeederLoss – Уровень потерь сигнала при прохождении через фидер или джампер, дБ

AntGainBS – коэффициент усиления приемо-передающей антенны базовой станции, дБи

MIMOGain – выигрыш за счет использования MIMO, дБ

PL(d) – уровень потерь радиосигнала в зависимости от удаленности пользователя, определяемый моделью распространения сигнала, дБ

IM – запас мощности на интерференцию (Interference Margin), дБ

PenetrationM – запас сигнала на проникновение сквозь стены, дБ

RxSensUser – чувствительность приемника пользователя, дБм

Рис. 2.3. Бюджет нисходящего канала DL в сетях мобильной связи

В случае использования фидера, как правило, фидер доходит до малошумящего усилителя (МШУ), который монтируется максимально близко к антенне, а затем, с помощью соединительного джампера сигнал передается на антенну, где происходит его усиление за счет конфигурации антенны и MIMO.

Потери и выигрыши в антенно-фидерном тракте базовой станции

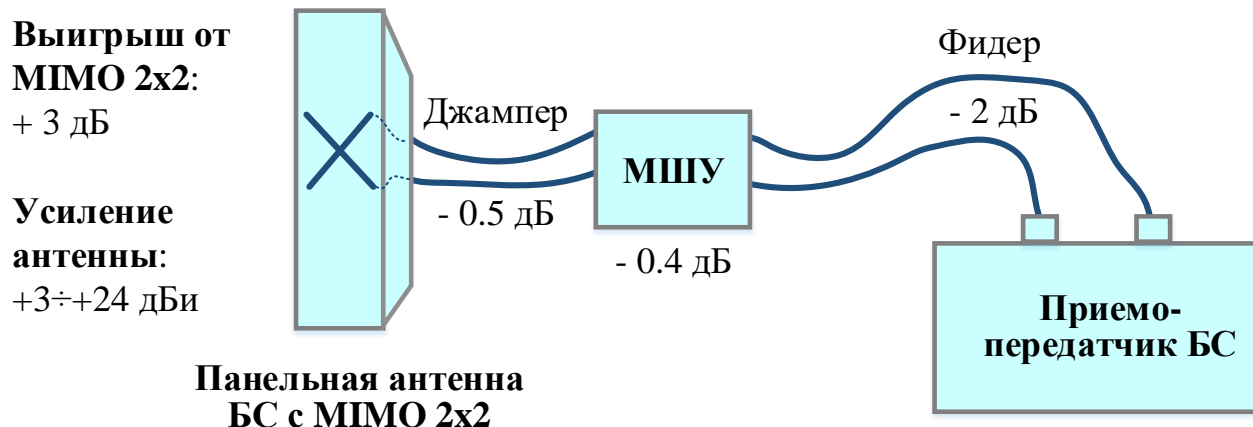


Рис. 2.4. Усиление и ослабление сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции.

Если с выхода базовой станции сигнал попадает в фидер, то там он ослабляется примерно на 2 дБ. Точное значение ослабления зависит от типа и длины фидера. Затем сигнала попадает на МШУ, где ослабляется еще на 0.4 дБ, после чего в джампере до антенны он затухает еще на 0.5 дБ. Если базовая станция сконфигурирована без фидера (приемо-передатчик близко с антенной), то потерями в антенно-фидерном тракте будут считаться только потери 0.5 дБ в джампере между приемо-передатчиком и антенной.

ММО с двумя передающими антеннами позволяет усилить сигнал на 3 дБ или в 2 раза (*MIMOGain*). В настоящее время бывают базовые станции и с четырьмя, и с восьмью передающими антеннами, что в свою очередь еще больше усиливает сигнал.

Запас (margin) мощности сигнала на проникновения *PenetrationM* включает в себя не только возможные затухания сигнала при прохождении через такие препятствия как стены зданий, но и затухания в теле человека (Body penetration) при телефонном разговоре (учитывается только для голосовых сервисов).

Решив уравнение (2.19), можно определить допустимые потери уровня сигнала *MAPL_DL* в нисходящем канале, однако, расстояние, на котором сигнал затухнет на эту величину все еще неизвестно. Для того чтобы это выяснить, необходимо подобрать подходящую модель распространения радиосигнала (см. раздел 2.2).

б) Бюджет восходящего канала (*UL Link Budget*)

На рисунке 2.5 представлены основные составляющие бюджета восходящего канала UL.

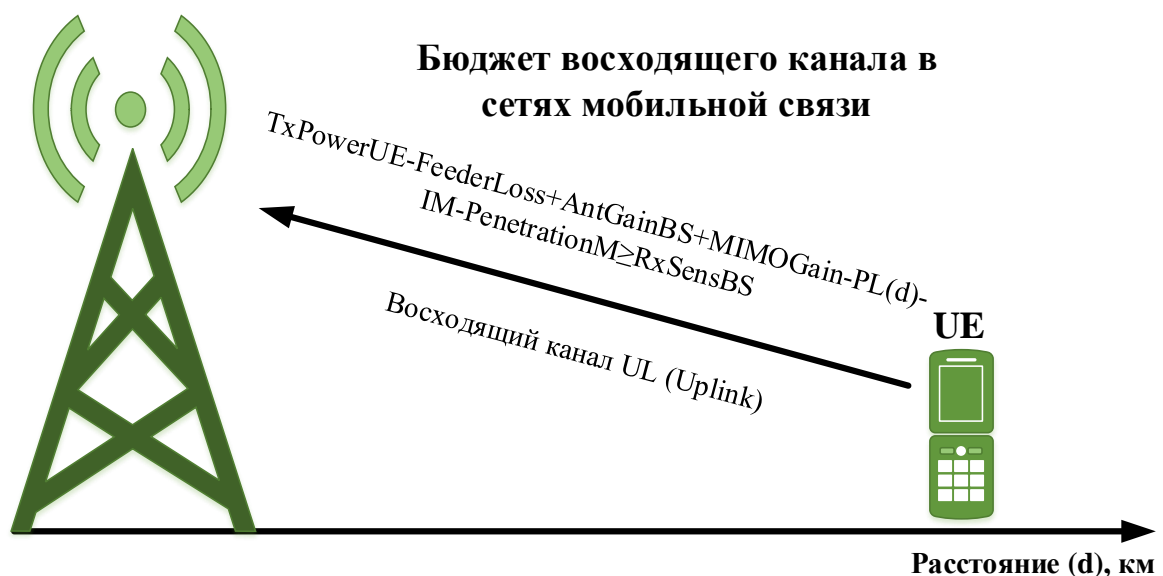
В неравенстве, показанном на рисунке 2.5, все входные параметры за исключением $PL(d)$ – это константы. В левой части данного неравенства стоят составляющие, отражающие реальный уровень сигнала на некотором расстоянии d от пользователя, в правой же части – требования к уровню такого

радиосигнала, при котором декодирование будет возможно. Приравняв левую и правую часть неравенства, получаем уравнение (2.20), где $PL(d)$ можно заменить на **MAPL_UL** – это независящие от расстояния максимально допустимые потери радиосигнала в восходящем канале UL, которые удовлетворяют минимальным требованиям успешного приема данных.

$$TxPower_{UE} - FeederLoss + AntGain_{BS} + MIMO_{Gain} - MAPL_{UL} - IM - PenetrationM = RxSens_{BS}. \quad (2.20)$$

Принципиальными отличиями бюджетов восходящего и нисходящего каналов являются чувствительность приемника $RxSens$ (в зависимости от направления – это либо чувствительность UE, либо BS), которая определяется по формуле (2.17) и мощность передатчика $TxPower$ (UE или BS).

Результатом решения уравнения (2.20) будет определение допустимых потерь $MAPL_{UL}$ в восходящем канале UL, однако расстояние, на котором сигнал затухнет на эту величину все еще неизвестно.



TxPower_{UE} – Мощность передатчика абонентской станции UE, дБм

FeederLoss – Уровень потерь сигнала при прохождении через фидер или джампер, дБ

AntGain_{BS} – коэффициент усиления приемо-передающей антенны базовой станции, дБи

MIMO_{Gain} – выигрыш за счет использования MIMO, дБ

PL(d) – уровень потерь радиосигнала в зависимости от удаленности пользователя, определяемый моделью распространения сигнала, дБ

IM – запас мощности на интерференцию (Interference Margin), дБ

PenetrationM – запас сигнала на проникновение сквозь стены, дБ

RxSens_{BS} – чувствительность приемника BS, дБм

Рис. 2.5. Бюджет нисходящего канала UL сети мобильной связи.

Для того чтобы определить радиус соты, необходимо подобрать подходящую модель распространения сигналов, отражающую реальные особенности местности, в которой требуется спроектировать сеть.

2.4 Расчет радиуса и площади соты (Range and area calculation)

Применив выбранную модель распространения радиосигнала, получаем зависимость, отражающую затухание радиосигнала при увеличении расстояния между пользователем UE и базовой станцией BS. Для того чтобы определить, на каком расстоянии декодирование данных будет все еще возможно в восходящем и нисходящем каналах, нужно знать уровень максимально допустимых потерь в обоих направлениях ($MAPL_{UL}$ и $MAPL_{DL}$).

Отложив значения потерь радиосигнала в нисходящем и восходящем каналах на графике зависимости потерь сигнала от расстояния между пользователем и базовой станцией, как показано на рисунке 2.6, можно найти радиусы сот. Точки пересечения $MAPL_{UL}$ и $MAPL_{DL}$ с кривой $PL(d)$ покажут радиусы сот LTE в UL и DL направлениях (d_{UL} и d_{DL}).

При проектировании радиопокрытия всегда берется меньшая из величин d_{UL} и d_{DL} , в данном примере – это d_{UL} .

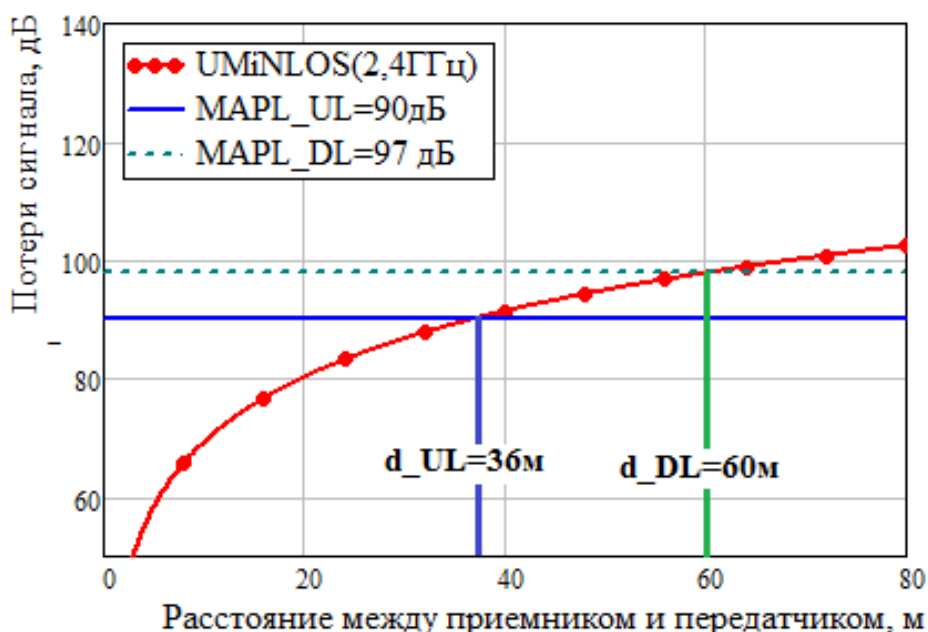


Рис. 2.6. Определение радиуса UL и DL в радиосети при проектировании соты в помещении

Используя модель распространения сигнала UMiNLOS (подходит для расчета покрытия в небольших помещениях, то есть для фемтосот), и рассчитав максимально допустимые потери сигнала в обоих направлениях, получаем радиус соты в восходящем канале 36 м и в нисходящем канале 60 м. В результате, зона действия соты ограничена радиусом 36 м.

На рисунке 2.7 показано как определить площадь покрытия базовой станции, зная сколько секторов (сот) планируется сконфигурировать на каждой базовой станции.

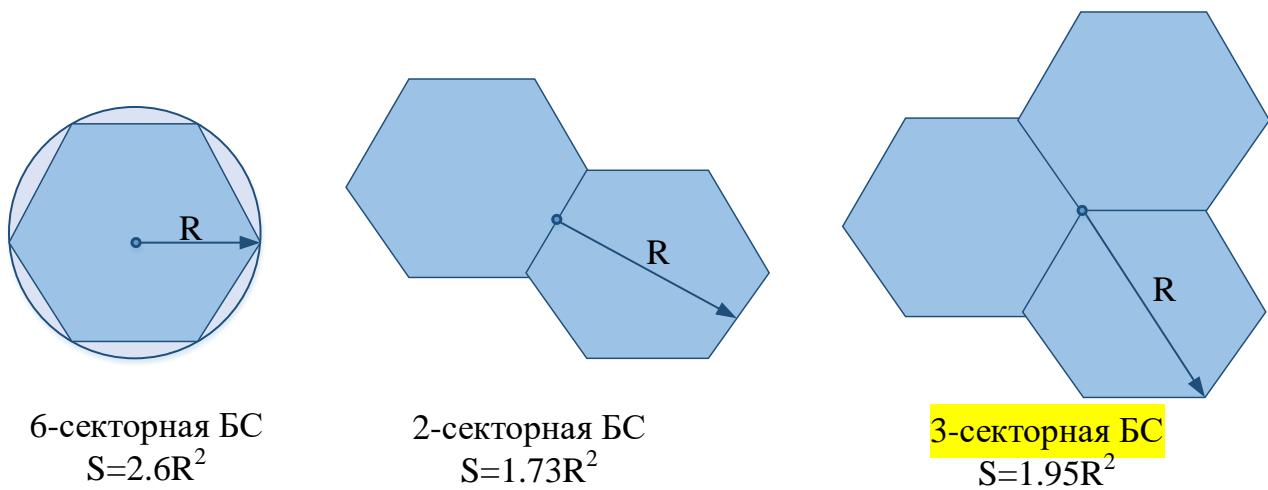


Рис. 2.7. Определение площади сайта (базовой станции) в зависимости от числа сконфигурированных секторов.

3. Задание для выполнения практической работы

В рамках данной лабораторной работы студентам предлагается рассчитать количество базовых станций, необходимых для обеспечения радиопокрытия заданной площади в среде MathCad/Matlab/Excel/Python (или Octave при отсутствии лицензии на Matlab), сравнить радиус действия в восходящем UL и нисходящем DL каналах.

Порядок выполнения работы:

Исходные данные:

- Мощность передатчиков BS: 46 дБм;
- Число секторов на одной BS: 3;
- Мощность передатчика пользовательского терминала UE: 24 дБм;
- Коэффициент усиления антенны BS: 21 дБи;
- Запас мощности сигнала на проникновения сквозь стены: 15 дБ;
- Запас мощности сигнала на интерференцию: 1 дБ;
- Модель распространения сигнала для макросот: COST 231 Hata;
- Модель распространения сигнала для фемто- и микросот: UMiNLOS;
- Диапазон частот: 1.8 ГГц;
- Полоса частот в UL: 10 МГц;
- Полоса частот в DL: 20 МГц;
- Дуплекс UL и DL: FDD;
- Коэффициент шума приемника BS: 2.4 дБ;
- Коэффициент шума приемника пользователя: 6 дБ;
- Требуемое отношение SINR для DL: 2 дБ;
- Требуемое отношение SINR для UL: 4 дБ;
- Число приемо-передающих антенн на BS (MIMO): 2;

- Площадь территории, на которой требуется спроектировать сеть: 100 кв.км;
- Площадь торговых и бизнес центров, где требуется спроектировать сеть **на базе микро- и фемтосот**: 4 кв.к м;
- Базовые станции с фидерами.

1) Выполните расчет бюджета восходящего канала, используя входные данные и определите уровень максимально допустимых потерь сигнала MAPL_UL.

2) Выполните расчет бюджета нисходящего канала, используя входные данные и определите уровень максимально допустимых потерь сигнала MAPL_DL.

3) Постройте зависимость величины входных потерь радиосигнала от расстояния между приемником и передатчиком по всем трем описанным в п.2.2 моделям. Выберите нужную модель для заданных условий.

4) Определите радиус базовой станции в восходящем и нисходящем каналах. По меньшему из полученных значений рассчитайте площадь одной базовой станции и, исходя из заданной площади, вычислите требуемое количество базовых станций (сайтов), необходимое для обеспечения непрерывного покрытия на этой территории.

5) Составьте отчет. Отчет должен содержать титульный лист, содержание, цель и задачи работы, теоретические сведения, исходные данные, этапы выполнения работы, сопровождаемые скриншотами и графиками, демонстрирующими успешность выполнения, результирующими таблицами, ответы на контрольные вопросы, и заключение и **ссылка в виде QR-кода на репозиторий с кодом (git)**.

4. Контрольные вопросы

- 1) Какие модели распространения сигналов используются для расчета радиопокрытия сетей мобильной связи?
- 2) Какие основные составляющие бюджета восходящего (UL) и нисходящего (DL) каналов в радиосетях?
- 3) Чем отличается чувствительность приемника базовой станции E и пользовательского терминала UE?
- 4) Что такое тепловой шум и как он определяется?
- 5) Что ограничивает радиус соты мобильных сетей в нисходящем и восходящем каналах?
- 6) Из чего состоят потери сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции BS?

Учебное издание

Дроздова Вера Геннадьевна

Основы мобильных сетей LTE

Редактор *С.С. Александров*
Корректор

Подписано в печать 01.11.2017.

Формат бумаги 62 × 84/16, отпечатано на ризографе, шрифт № 10,
п. л. – 2,3, заказ № , тираж – 50.

Редакционно-издательский отдел СибГУТИ
630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, офис 107, тел. (383) 269-82-36