

Федеральное агентство связи
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и
информатики» (СибГУТИ)

Отчет
по лабораторной работе №2
по дисциплине «Основы систем мобильной связи»
Тема: «Проектирование радиопокрытия мобильных сетей.
Модели распространения сигналов. Бюджеты каналов.»

Вариант 3

Выполнил:
студент гр. ИА-232
Багрей Анастасия Олеговна
GitHub: <https://github.com/BagreyA/OCMC.git>



Новосибирск 2024

Содержание

ЦЕЛЬ	3
ЗАДАЧИ	3
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	3
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	11
ЭТАПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	11
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	17
ВЫВОД.....	19

Цель работы

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

Задачи

Рассчитать количество базовых станций, необходимых для обеспечения радиопокрытия заданной площади в среде Matlab, сравнить радиус действия в восходящем UL и нисходящем DL каналах.

- 1) Расчет бюджета восходящего канала, используя входные данные и определить уровень максимально допустимых потерь сигнала MAPL_UL.
- 2) Выполнить расчет бюджета нисходящего канала, используя входные данные и определить уровень максимально допустимых потерь сигнала MAPL_DL.
- 3) Построить зависимость величины входных потерь радиосигнала от расстояния между приемником и передатчиком по всем трем описанным в п.2.2 моделям. Выбрать нужную модель для заданных условий.
- 4) Определить радиус базовой станции в восходящем и нисходящем каналах. По меньшему из полученных значений рассчитать площадь одной базовой станции и, исходя из заданной площади, вычислить требуемое количество базовых станций (сайтов), необходимое для обеспечения непрерывного покрытия на этой территории.
- 5) Составьте отчет.

Теоретические сведения

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.

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, Hata, 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.

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.

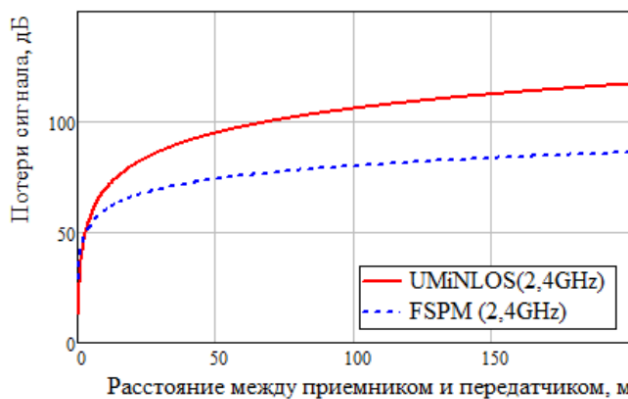


Рис. 2.1. Потери мощности радиосигнала в помещении, рассчитанные по моделям UMiNLOS и FSPM.

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 A и B для различных диапазонов частот.

Диапазоны частот, МГц	A	B
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):

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

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):

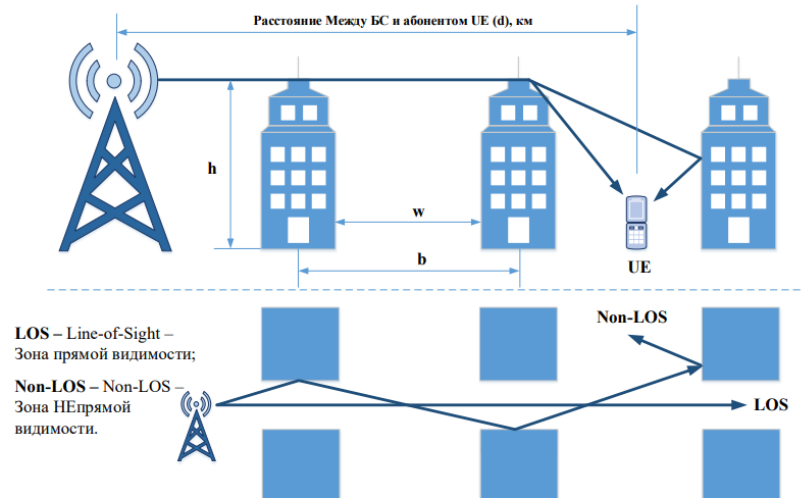
$$Lclutter = \begin{cases} \begin{matrix} 3 \text{ для } DU \\ 0 \text{ для } U \end{matrix} \\ - \left(2 \cdot \left[\log_{10} \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 + 5.4 \right) \text{ для } SU \\ - (4.78 \cdot [\log_{10}(f)]^2 - 18.33 \cdot \log_{10}(f) + 40.94) \text{ для } RURAL \\ - (4.78 \cdot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

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):

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

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.



h – средняя высота зданий, м

w – средняя ширина улиц, м

b – среднее расстояние между зданиями, м

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.

$$\begin{aligned} L_0 &= 32.44 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d). \\ L_2 &= -16.9 - 10\log_{10}(w) + 10\log_{10}(f) + 20\log_{10}(\Delta h - h_{ms}) + \\ &\begin{cases} -10 + 0.354\varphi & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075\varphi & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114\varphi & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$(2.11)$$

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

$$L_1 = L_{11} + k_a + kd\log_{10}(d) + kf\log_{10}(f) - 9\log_{10}(b). \quad (2.12)$$

$$L_{11} = \begin{cases} -18\log_{10}(1 + h_{BS} - \Delta h), & \text{если } h_{BS} > \Delta h \\ 0, & \text{если } h_{BS} \leq \Delta h \end{cases}. \quad (2.13)$$

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

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

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

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):

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

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):

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

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

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.

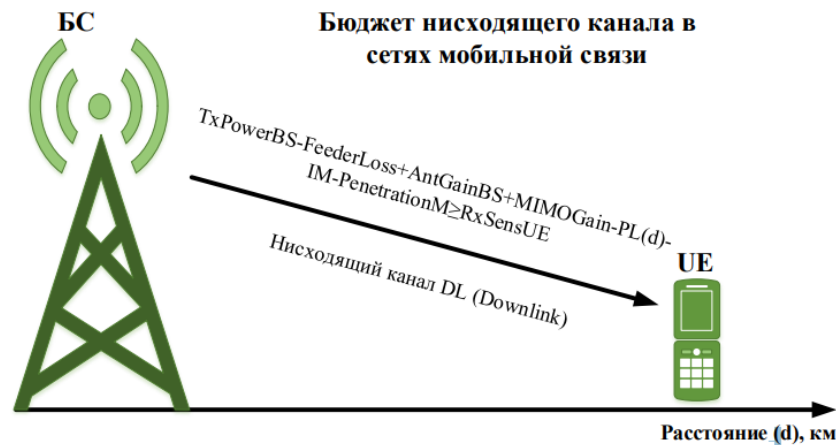
а) Бюджет нисходящего канала (DL Link Budget)

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.

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

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 маломощного 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.

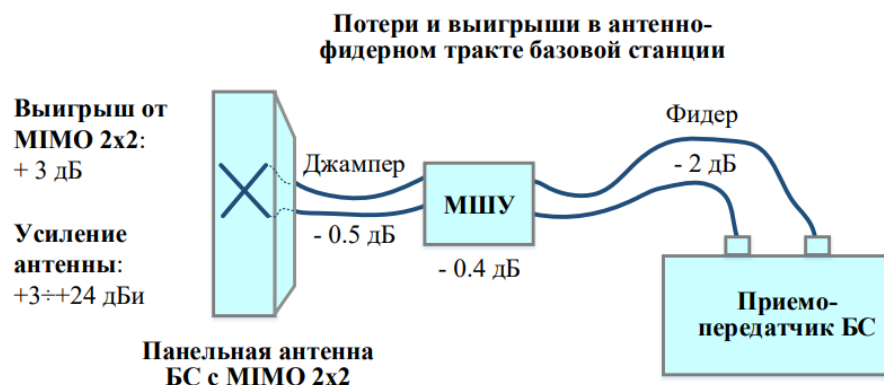


Рис. 2.4. Усиление и ослабление сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции.

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.

MIMO 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 независимые от расстояния максимально допустимые потери радиосигнала в восходящем канале UL, которые удовлетворяют минимальным требованиям успешного приема данных.

$$TxPowerUE - FeederLoss + AntGainBS + MIMOGain - MAPL_UL - IM - PenetrationM = RxSensBS. \quad (2.20)$$

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.



TxPowerUE – Мощность передатчика абонентской станции UE, 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
RxSensBS – 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.

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} .

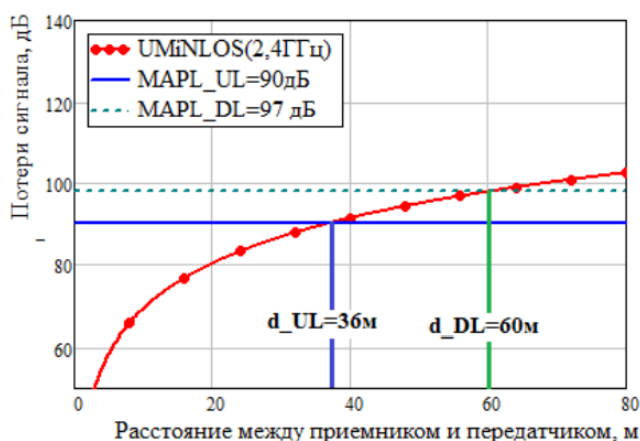


Рис. 2.6. Определение радиуса UL и DL в радиосети при проектировании соты в помещении

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.

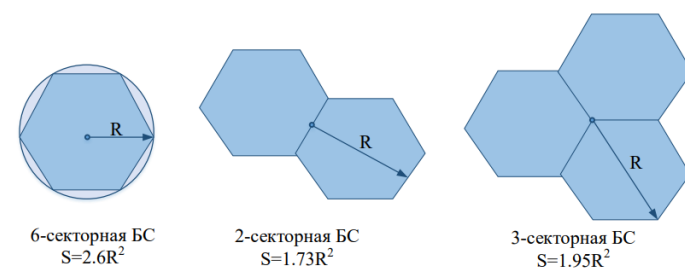


Рис. 2.7. Определение площади сайта (базовой станции) в зависимости от числа сконфигурированных секторов.

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.км;
- Базовые станции с фидерами.

Этапы выполнения работы

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

Handwritten calculations for the uplink budget:

$$\begin{aligned} 1) & \text{Tx Power UE} - \text{FeederLoss} + \text{Ant Gain BS} + \text{MIMO Gain} - \text{MAPL}_{UL} \\ & - 1M - \text{Penetration M} = \text{Rx Sens BS} \\ \text{Rx Sens BS} &= \text{Noise Figure} + \text{Thermal Noise} + \text{Required SINR} \\ \text{Thermal Noise} &= -174 + 10 \cdot \log_{10}(BW) = -174 + 10 \cdot \log_{10}(10 \cdot 10^6) = -104,6 \text{ dBm} \\ \text{Rx Sens BS} &= 2,4 + (-104,6) + 4 = -97,6 \text{ dBm} \\ \text{FeederLoss} &= 2 + 0,4 + 0,5 = 2,9 \text{ dB (с фидером, без нуля 0,5)} \\ 24 - 2,9 + 21 + 3 - \text{MAPL}_{UL} - 1 - 15 &= -97,6 \Rightarrow \text{MAPL}_{UL} = 126,7 \text{ dB (с фидером)} \\ 24 - 0,5 + 21 + 3 - \text{MAPL}_{UL} - 1 - 15 &= -97,6 \Rightarrow \text{MAPL}_{UL} = 129,5 \text{ dB (без фидера)} \end{aligned}$$

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

$$2) P_{\text{PowerBS}} - \text{FeederLoss} + \text{AntGainBS} + \text{MinGain} - \text{MAPL_DL} - 1 \text{ м} - \text{Penetration} \text{ м} \rightarrow R_{\text{SensUE}}$$

$$R_{\text{SensUE}} = 6 + (-101) + 2 = -93,5 \text{ дБм}$$

$$TN = -174 + 10 \log_{10}(20 \cdot 10^6) = -101,5 \text{ дБм}$$

$$46 - 2,9 + 21 + 3 - \text{MAPL_DL} - 1 - 15 = -93 \Rightarrow \text{MAPL_DL} = 144,15 \text{ дБм}$$

$$46 - 0,5 + 21 + 3 - \text{MAPL_DL} - 1 - 15 = -93 \Rightarrow \text{MAPL_DL} = 146,55 \text{ дБм}$$

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.

$$3) PL_{\text{ray}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi f d}{c} \right)^2 = \left(\frac{4\pi \cdot 1800 \cdot 1,8 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} \right)^2 = 5,86485 \cdot 10^3$$

$$PL_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f d}{c} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot 1800 \cdot 1,8 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} \right) = 37,547$$

Модель Умилос

$$d_1 = 10 \text{ м} \quad d_2 = 2000 \text{ м} \quad d_3 = 100000 \text{ м}$$

$$PL(d) = 26 \log_{10}(f) + 22,7 + 36,7 \log_{10}(d)$$

$$PL(10) = 26 \log_{10}(1,8) + 22,7 + 36,7 \log_{10}(10) \approx 66,03$$

$$PL(2000) = 26 \log_{10}(1,8) + 22,7 + 36,7 \log_{10}(2000) \approx 187,184$$

$$PL(100000) = 26 \log_{10}(1,8) + 22,7 + 36,7 \log_{10}(100000) \approx 249,53$$

Модель Окумура-Хата (Cost 231)

$$PL(d) = A + B \log_{10}(f) - 13,83 \log_{10}(h_{\text{BS}}) - a + 5 \log_{10}(d) + L_{\text{ducter}}$$

$$f = 1800 \text{ МГц} \quad h_{\text{BS}} = 50 \text{ м} \quad h_{\text{MS}} = 3 \text{ м} \quad L_{\text{ducter}} = 3 \text{ дБ}$$

$$A = 46,3 \quad B = 33,9 \quad L_{\text{ducter}} = 3 \text{ дБ}$$

0,01 км:

$$S = (44,88 + 13,9 \cdot \log_{10}(1800) - 13,9 \cdot \log_{10}(0,05)) \cdot \frac{1}{\log_{10}(50)} \approx 65,45$$

$$a(h_{\text{MS}}) = 3,2 (1 \log_{10}(11,75 \cdot 0,003))^2 - 4,97 \approx 1,784$$

$$PL(0,01) = 46,3 + 33,9 \log_{10}(1800) - 13,83 \log_{10}(0,05) - 1,784 + 65,45 \log_{10}(0,01) + 0 \approx 41,32$$

$$PL(0,01) = 46,3 + 33,9 \log_{10}(1800) - 13,83 \log_{10}(0,05) - 1,784 + 65,45 \log_{10}(0,01) + 3 \approx 44,32$$

20 км:

$$S = 44,9 - 6,55 \cdot \log_{10}(1800) \approx 23,57$$

$$a(h_{\text{MS}}) \approx 1,784$$

$$PL(20) = 46,3 + 33,9 \log_{10}(1800) - 13,83 \log_{10}(0,05) - 1,784 + 23,57 \log_{10}(20) + 0 \approx 203,4$$

$$PL(20) = 46,3 + 33,9 \log_{10}(1800) - 13,83 \log_{10}(0,05) - 1,784 + 23,57 \log_{10}(20) + 3 \approx 206,483$$

10⁶ км:

$$PL(10^6) = 46,3 + 33,9 \log_{10}(1800) - 13,83 \log_{10}(0,05) - 1,784 + 23,57 \log_{10}(10^6) + 0 \approx 314,24$$

$$PL(10^6) = 46,3 + 33,9 \log_{10}(1800) - 13,83 \log_{10}(0,05) - 1,784 + 23,57 \log_{10}(10^6) + 3 \approx 317,24$$

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math
```

Константы

c = 3e8 # Скорость света, м/с

f_MHz = 1800 # Частота сигнала в МГц для модели Окумура-Хата и Walfish-Ikegami

f_GHz = f_MHz / 1000

wavelength = c / (f_MHz * 1e6)

h_BS = 50 # Высота антенны базовой станции, м

h_MS = 3 # Высота антенны мобильного устройства, м

w = 20 # Средняя ширина улицы, м

b = 30 # Среднее расстояние между зданиями, м

distance_km = np.linspace(0.01, 20, 1000) # Расстояние в км

```

distance_m = distance_km * 1000

# Модель FSPM (Free Space Propagation Model) в дБ
def PL_fspm(distance_m, f_MHz):
    return 20 * np.log10((4 * np.pi * distance_m * f_MHz * 1e6) / c)
# Модель UMiNLOS (Urban Micro Non-Line-of-Sight) в дБ
def PL_umi_nlos(distance_m, f_GHz):
    return 26 * np.log10(f_GHz) + 22.7 + 36.7 * np.log10(distance_m)
# Модель Окумура-Хата для городов в дБ (обычный город)
def PL_okumura_hata(distance_km, f_MHz, h_BS, h_MS):
    A = 46.3 # Для частоты 1500-2000 МГц
    B = 33.9
    a_hms = 3.2 * (np.log10(11.75 * h_MS))**2 - 4.97
    s = np.where(distance_km >= 1,
        44.9 - 6.55 * np.log10(f_MHz),
        (47.88 + 13.9 * np.log10(f_MHz) - 13.9 * np.log10(h_BS)) * (1 / np.log10(50)))
    L_clutter = 0
    PL = A + B * np.log10(f_MHz) - 13.82 * np.log10(h_BS) - a_hms + s * np.log10(distance_km) + L_clutter
    return PL
# Модель COST231-Hata для плотной городской застройки (Dense Urban)
def PL_cost231_hata_dense_urban(distance_km, f_MHz, h_BS, h_MS):
    A = 46.3
    B = 33.9
    a_hms = 3.2 * (np.log10(11.75 * h_MS))**2 - 4.97
    s = np.where(distance_km >= 1,
        44.9 - 6.55 * np.log10(f_MHz),
        (47.88 + 13.9 * np.log10(f_MHz) - 13.9 * np.log10(h_BS)) * (1 / np.log10(50)))
    L_clutter = 3
    PL = A + B * np.log10(f_MHz) - 13.82 * np.log10(h_BS) - a_hms + s * np.log10(distance_km) + L_clutter
    return PL
# Модель Walfish Ikegami
class WalfishIkegamiModel:
    def __init__(self, f, h_bs, h_ms, w, b):
        self.f = f
        self.h_bs = h_bs
        self.h_ms = h_ms
        self.w = w
        self.b = b

    def calculate_loss(self, d):
        return 42.6 + 20 * math.log10(self.f) + 26 * math.log10(d)
    def calculate_non_loss(self, d):
        L0 = 32.44 + 20 * math.log10(self.f) + 20 * math.log10(d)
        L1, L2 = self.calculate_non_loss_L1_L2(d)
        return L0 + L1 + L2 if L1 + L2 > 0 else L0
    def calculate_non_loss_L1_L2(self, d):
        delta_h = self.h_bs - self.h_ms
        phi = 30
        L11 = -18 * math.log10(1 + self.h_bs - delta_h) if self.h_bs > delta_h else 0
        ka = self.calculate_ka(delta_h)
        kd = self.calculate_kd(delta_h)
        kf = -4 + 0.7 * (self.f / 925 - 1)
        L1 = L11 + ka + kd * math.log10(d) + kf * math.log10(self.f) - 9 * math.log10(self.b)
        L2 = self.calculate_L2(phi, delta_h)
        return L1, L2

    def calculate_L2(self, phi, delta_h):
        if phi < 35:
            return -16.9 - 10 * np.log10(self.w) + 10 * np.log10(self.f) + 20 * np.log10(delta_h)
        elif 35 <= phi < 55:
            return -16.9 - 10 * np.log10(self.w) + 10 * np.log10(self.f) + 20 * np.log10(delta_h) - 10 + 0.354 * phi
        return -16.9 - 10 * np.log10(self.w) + 10 * np.log10(self.f) + 20 * np.log10(delta_h) + 4.0 - 0.114 * phi

```

```

def calculate_ka(self, delta_h):
    if self.h_bs > delta_h:
        return 54
    return 54 - 0.8 * (self.h_bs - delta_h)
def calculate_kd(self, delta_h):
    if self.h_bs > delta_h:
        return 18
    return 18 - 15 * (self.h_bs - delta_h) / delta_h
def calculate_losses(self, d):
    return self.calculate_loss_losses(d) if d <= 0.5 else self.calculate_non_loss_losses(d)

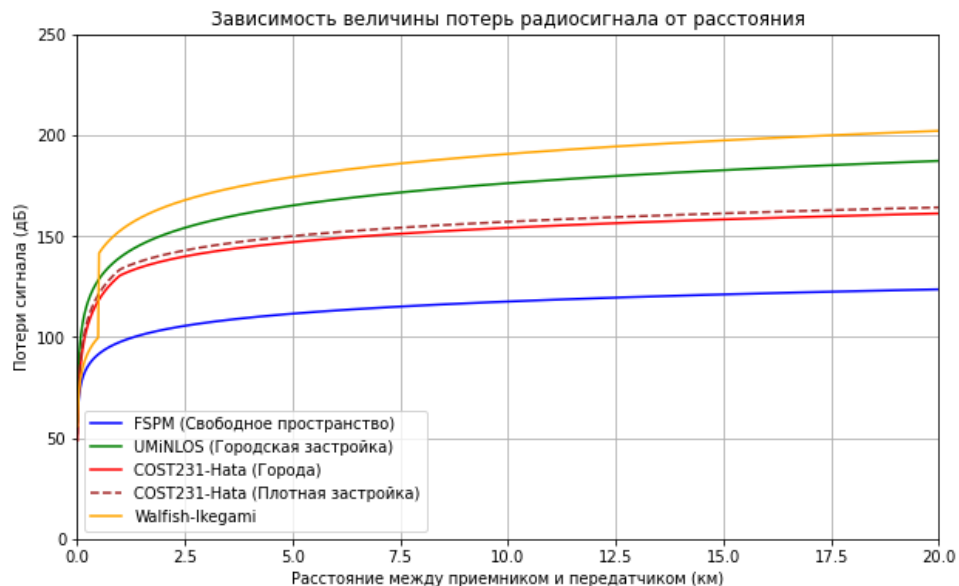
walfish_ikegami_model = WalfishIkegamiModel(f_MHz, h_BS, h_MS, w, b)

PL_fspm_values = PL_fspm(distance_m, f_MHz)
PL_umi_nlos_values = PL_umi_nlos(distance_m, f_GHz)
PL_okumura_hata_values = PL_okumura_hata(distance_km, f_MHz, h_BS, h_MS)
PL_cost231_hata_dense_values = PL_cost231_hata_dense_urban(distance_km, f_MHz, h_BS, h_MS)
PL_walfish_values = [walfish_ikegami_model.calculate_losses(d) for d in distance_km]

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(distance_km, PL_fspm_values, label='FSPM (Свободное пространство)', color='blue')
plt.plot(distance_km, PL_umi_nlos_values, label='UMiNLOS (Городская застройка)', color='green')
plt.plot(distance_km, PL_okumura_hata_values, label='COST231-Hata (Города)', color='red')
plt.plot(distance_km, PL_cost231_hata_dense_values, label='COST231-Hata (Плотная застройка)', color='brown', linestyle='--')
plt.plot(distance_km, PL_walfish_values, label='Walfish-Ikegami', color='orange')

plt.title('Зависимость величины потерь радиосигнала от расстояния')
plt.xlabel('Расстояние между приемником и передатчиком (км)')
plt.ylabel('Потери сигнала (дБ)')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.xlim(0, 20)
plt.ylim(0, 250)
plt.show()

```



Исходя из указанных моделей и заданных условий, можно сделать следующие выводы:

- COST 231 Hata подходит для проектирования базовых станций на общей территории в 100 кв. км.

- UMiNLOS подходит для более детального проектирования в бизнес-центрах на площади 4 кв. км.

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.

3-секторная БС: $S=1.95R^2$

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

P_tx_UL = 24
P_tx_DL = 46
I_noise_UL = 6
I_noise_DL = 2.4
SINR_UL = 4
SINR_DL = 2
MAPL_UL = 126.7
MAPL_DL = 144.1

distance_km = np.linspace(0.01, 100, 1000)

def PL_cost231_hata_dense_urban(distance_km, f_MHz=1800, h_BS=50, h_MS=3):
    A = 46.3
    B = 33.9
    a_hms = 3.2 * (np.log10(11.75 * h_MS))**2 - 4.97

    s = np.where(distance_km >= 1,
                  44.9 - 6.55 * np.log10(f_MHz),
                  (47.88 + 13.9 * np.log10(f_MHz) - 13.9 * np.log10(h_BS)) * (1 / np.log10(50)))

    L_clutter = 3
    PL = A + B * np.log10(f_MHz) - 13.82 * np.log10(h_BS) - a_hms + s * np.log10(distance_km) + L_clutter
    return PL

def PL_UMiNLOS(distance_km, f_MHz=1800, h_BS=50, h_MS=3):
    PL = 36.7 * np.log10(distance_km) + 22.7 + 26 * np.log10(f_MHz)
    return PL

PL_Macro = PL_cost231_hata_dense_urban(distance_km)
PL_Micro = PL_UMiNLOS(distance_km)

plt.figure(figsize=(10, 6))

plt.plot(distance_km, PL_Macro, label='COST 231 Hata (Macrocells)', color='blue')
plt.plot(distance_km, PL_Micro, label='UMiNLOS (Microcells)', color='orange')

plt.axhline(y=MAPL_UL, color='green', linestyle='--', label='MAPL_UL')
plt.axhline(y=MAPL_DL, color='red', linestyle='--', label='MAPL_DL')

d_MAC_UL_ind = np.where(PL_Macro <= MAPL_UL)[0]
d_MAC_DL_ind = np.where(PL_Macro <= MAPL_DL)[0]
d_MIC_UL_ind = np.where(PL_Micro <= MAPL_UL)[0]
d_MIC_DL_ind = np.where(PL_Micro <= MAPL_DL)[0]

d_MAC_UL = distance_km[d_MAC_UL_ind[-1]] if d_MAC_UL_ind.size > 0 else None
d_MAC_DL = distance_km[d_MAC_DL_ind[-1]] if d_MAC_DL_ind.size > 0 else None
d_MIC_UL = distance_km[d_MIC_UL_ind[-1]] if d_MIC_UL_ind.size > 0 else None
d_MIC_DL = distance_km[d_MIC_DL_ind[-1]] if d_MIC_DL_ind.size > 0 else None
```



```

if d_MAC_UL is not None:
    plt.axvline(x=d_MAC_UL, color='blue', linestyle=':')
if d_MAC_DL is not None:
    plt.axvline(x=d_MAC_DL, color='red', linestyle=':')
if d_MIC_UL is not None:
    plt.axvline(x=d_MIC_UL, color='orange', linestyle=':')
if d_MIC_DL is not None:
    plt.axvline(x=d_MIC_DL, color='orange', linestyle='--')

if d_MAC_UL is not None:
    plt.text(d_MAC_UL + 0.5, MAPL_UL + 5, f'd_MAC_UL = {d_MAC_UL:.2f} км', color='blue')
if d_MAC_DL is not None:
    plt.text(d_MAC_DL + 0.5, MAPL_DL + 5, f'd_MAC_DL = {d_MAC_DL:.2f} км', color='red')
if d_MIC_UL is not None:
    plt.text(d_MIC_UL + 0.5, MAPL_UL + 5, f'd_MIC_UL = {d_MIC_UL:.2f} км', color='orange')
if d_MIC_DL is not None:
    plt.text(d_MIC_DL + 0.5, MAPL_DL + 5, f'd_MIC_DL = {d_MIC_DL:.2f} км', color='orange')

d_min_macro = min(d_MAC_UL, d_MAC_DL) if d_MAC_UL is not None and d_MAC_DL is not None else None
d_min_micro = min(d_MIC_UL, d_MIC_DL) if d_MIC_UL is not None and d_MIC_DL is not None else None
d_min = min(d_min_macro, d_min_micro) if d_min_macro and d_min_micro else (d_min_macro or d_min_micro)

area_per_bs_macro = 1.95 * (d_min_macro ** 2) if d_min_macro is not None else 0
area_per_bs_micro = 1.95 * (d_min_micro ** 2) if d_min_micro is not None else 0

total_area = 100
area_business_centers = 4
number_bs_total_macro = total_area / area_per_bs_macro if area_per_bs_macro > 0 else np.inf
number_bs_business_centers_macro = area_business_centers / area_per_bs_macro if area_per_bs_macro > 0 else np.inf
number_bs_total_micro = area_business_centers / area_per_bs_micro if area_per_bs_micro > 0 else np.inf

number_of_sectors = 3
cell_area_macro = area_per_bs_macro / number_of_sectors if area_per_bs_macro > 0 else 0
cell_area_micro = area_per_bs_micro / number_of_sectors if area_per_bs_micro > 0 else 0

radius_femto = 0.5
area_per_femto = 1.95 * (radius_femto ** 2)
number_bs_femto = area_business_centers / area_per_femto

area_per_bs_femto = area_business_centers / area_per_femto if area_per_bs_macro > 0 else np.inf

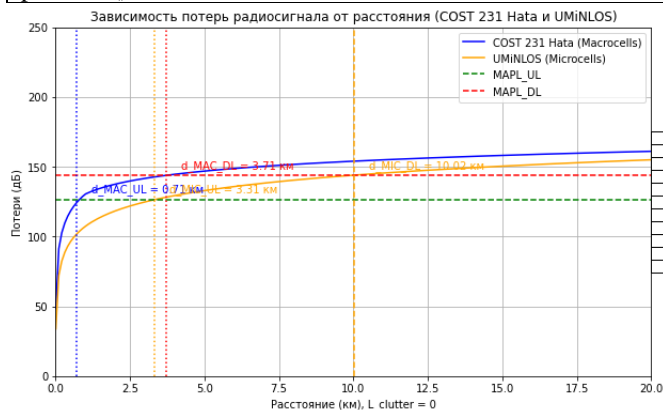
results = [
    ['Площадь одной соты (кв.км, макро)', f'{cell_area_macro:.2f}'],
    ['Площадь одной БС (кв.км, макро)', f'{area_per_bs_macro:.2f}'],
    ['Необходимые БС (100 кв.км, макро)', f'{np.ceil(number_bs_total_macro):.0f}'],
    ['Необходимые БС (4 кв.км, макро)', f'{np.ceil(number_bs_business_centers_macro):.0f}'],
    ['Площадь одной соты (кв.км, микро)', f'{cell_area_micro:.2f}'],
    ['Площадь одной БС (кв.км, микро)', f'{area_per_bs_micro:.2f}'],
    ['Необходимые БС (4 кв.км, микро)', f'{np.ceil(number_bs_total_micro):.0f}'],
    ['Площадь одной соты (кв.км, фемто)', f'{area_per_femto:.2f}'],
    ['Площадь одной БС (кв.км, фемто)', f'{area_per_bs_femto:.2f}'],
    ['Необходимые БС(4 кв.км, фемто)', f'{np.ceil(number_bs_femto):.0f}']
]

# Отображение таблицы результатов
table = plt.table(cellText=results, colLabels=['Параметр', 'Значение'], loc='right', cellLoc='center')
table.auto_set_font_size(False)
table.set_fontsize(10)
table.scale(1, 1)

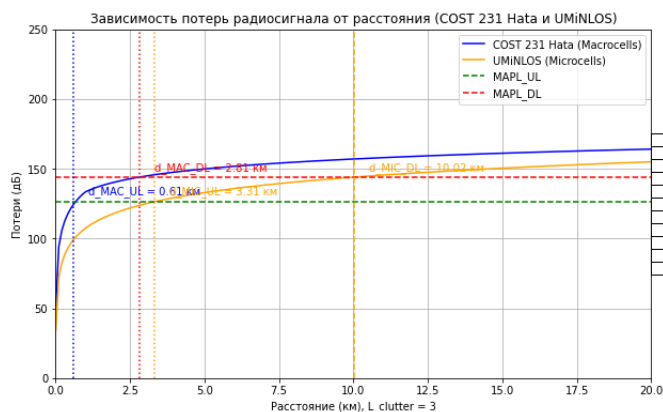
```



```
# Настройки графика
plt.title("Зависимость потерь радиосигнала от расстояния (COST 231 Hata и UMiNLOS)")
plt.xlabel('Расстояние (км), L_clutter = 3')
plt.ylabel('Потери (дБ)')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.xlim(0, 20)
plt.ylim(0, 250)
plt.show()
```



Параметр	Значение
Площадь одной соты (кв. км, макро)	0.33
Площадь одной БС (кв. км, макро)	0.98
Необходимые БС (100 кв. км, макро)	102
Необходимые БС (4 кв. км, макро)	5
Площадь одной соты (кв. км, микро)	7.13
Площадь одной БС (кв. км, микро)	21.40
Необходимые БС (4 кв. км, микро)	1
Площадь одной соты (кв. км, фемто)	0.49
Площадь одной БС (кв. км, фемто)	8.21
Необходимые БС (4 кв. км, фемто)	9



Параметр	Значение
Площадь одной соты (кв. км, макро)	0.24
Площадь одной БС (кв. км, макро)	0.73
Необходимые БС (100 кв. км, макро)	138
Необходимые БС (4 кв. км, макро)	6
Площадь одной соты (кв. км, микро)	7.13
Площадь одной БС (кв. км, микро)	21.40
Необходимые БС (4 кв. км, микро)	1
Площадь одной соты (кв. км, фемто)	0.49
Площадь одной БС (кв. км, фемто)	8.21
Необходимые БС (4 кв. км, фемто)	9

Контрольные вопросы

1) Какие модели распространения сигналов используются для расчета радиопокрытия сетей мобильной связи?

Для расчета радиопокрытия сетей мобильной связи используются различные модели распространения радиоволн, которые помогают предсказать, как сигнал будет распространяться в реальной среде. Основные модели включают:

- Модель Окума-Хата: Используется для городских условий, особенно в больших и средних городах. Она учитывает высоту антенны, расстояние и характеристики застройки.
- Модель Кост-231 Хата: Модификация модели Окума-Хата для диапазонов выше 1 ГГц.
- Модель Хата-CPC-231: Применяется в сельских условиях.
- Модель Лосевского (Free-Space Path Loss): Учитывает только потери в свободном пространстве, применима для открытых пространств и линий прямой видимости.
- Модель Вайнбергера (Walfisch-Ikegami): Учитывает влияние городских застроек и высоту зданий на распространение сигнала.

2) Какие основные составляющие бюджета восходящего (UL) и нисходящего (DL) каналов в радиосетях?

Бюджет восходящего (UL) и нисходящего (DL) каналов включает расчет потерь и усиления при передаче сигнала от передатчика к приемнику. Основные составляющие бюджета канала:

- Мощность передачи: Мощность сигнала, исходящего от передатчика.
- Чувствительность приемника: Минимальный уровень сигнала, который приемник может принять.
- Потери в свободном пространстве: Потери сигнала по мере увеличения расстояния.
- Потери в антенно-фидерных трактах: Потери сигнала в кабелях, разъемах и антенных системах.
- Усиление антенны: Увеличение мощности сигнала благодаря направленности антенны.
- Потери на препятствиях: Затухание сигнала из-за зданий, деревьев и других физических объектов.
- Интерференция и шум: Влияние помех на принимаемый сигнал.

3) Чем отличается чувствительность приемника базовой станции E и пользовательского терминала UE?

Чувствительность базовой станции (BS), как правило, выше, чем у пользовательского терминала (UE). Это объясняется тем, что базовые станции имеют более мощные и сложные приемные цепи, а также антенны с большим усилением, что позволяет им принимать слабые сигналы от мобильных устройств.

Чувствительность пользовательского терминала (UE) обычно ниже, поскольку мобильные устройства ограничены по мощности и размерам, что снижает их способность принимать слабые сигналы на больших расстояниях.

4) Что такое тепловой шум и как он определяется?

Тепловой шум — равновесный шум, обусловленный тепловым движением носителей заряда в проводнике, в результате чего на концах проводника возникает флуктуирующая разность потенциалов.

ThermalNoise – тепловой шум приемника, определяемый по формуле:

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

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

5) Что ограничивает радиус соты мобильных сетей в нисходящем и в восходящем каналах?

В нисходящем канале (DL) радиус соты ограничен мощностью передатчика базовой станции (BS) и чувствительностью приемника терминала (UE). Если сигнал от базовой станции становится слишком слабым, пользовательский терминал не сможет его принять.

В восходящем канале (UL) радиус ограничен мощностью передатчика пользовательского устройства (UE) и чувствительностью базовой станции (BS). Мобильное устройство имеет ограниченную мощность, и если сигнал не доходит до базовой станции, передача данных невозможна.

6) Из чего состоят потери сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции BS?

Потери сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции включают:

- Потери в кабелях: Затухание сигнала в коаксиальных кабелях, которые соединяют передатчик/приемник с антенной.
- Потери в разъемах и соединителях: Потери, возникающие на местах соединения кабелей и антенн.
- Потери в коммутаторах и фильтрах: Затухание сигнала при прохождении через дополнительные элементы, такие как дуплексеры или фильтры.
- Потери на антенне: Затраты мощности на излучение сигнала в пространство, зависят от качества и типа антенны.

Вывод

В результате проведенных расчётов определены основные параметры сети передачи данных, включая максимально допустимые потери сигнала и радиус действия базовых станций. Эти данные помогут в планировании эффективной структуры сети на заданной территории.

Были рассчитаны бюджеты для восходящих (MAPL_UL) и нисходящих (MAPL_DL) каналы исходя из исходных данных. Построили зависимость величины входных потерь радиосигнала от расстояния между приемником и передатчиком по всем описанным моделям и выбрать нужную модель для заданных условий. В эти модели входят:

1. FSPM (Free Space Propagation Model): Для сигнала, распространяющегося в свободном пространстве;
2. UMinLOS (Urban Micro Non-Line-of-Sight): Данная модель применяется в условиях размещения точек доступа/небольших сот в помещениях (Indoor).
3. Окумура-Хата и ее модификация COST231: Данная модель распространения сигнала является одной из наиболее часто используемых моделей при проектировании покрытия макросот. 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.
4. Walfish-Ikegami: Данная модель распространения сигнала используется при проектировании покрытия макросот в условиях городской застройки с «манхэттенской» grid-образной архитектурой. 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.

Для наших условий были выбраны 2 модели:

- COST 231 Hata подходит для проектирования базовых станций на общей территории в 100 кв. км.
- UMiNLOS подходит для более детального проектирования в бизнес-центрах на площади 4 кв. км.

Переделили радиус базовой станции в восходящем и нисходящем каналах. По меньшему из полученных значений рассчитали площадь одной базовой станции и, исходя из заданной площади, вычислили требуемое количество базовых станций, необходимое для обеспечения непрерывного покрытия на этой территории. Для 100км² с обычной застройкой у нас получилось с учетом макросот 102 БС, для плотной 138 БС и для 4км² на макросотах 5 БС и 6 БС. По второй модели на макросотах 4км² 1 БС, а с учетом фемтосот 9 БС.