

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и
информатики»

Кафедра ВС и ТС

Отчет по лабораторной работе №2
по дисциплине
Основы систем мобильной связи

по теме:
ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОПОКРЫТИЯ МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ.
МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ. БЮДЖЕТЫ КАНАЛОВ

Студент:
Группа ИА-331

Я.А Гмыря

Предподаватель:
Заведующая кафедрой ТС и ВС

В.Г Дроздова

Новосибирск 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
2	РАСЧЕТ РАДИОПОКРЫТИЯ	12
3	ВЫВОД	21

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Цель:

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

Задачи:

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, resultующими таблицами, ответы на контрольные вопросы, и заключение и ссылка в виде QR-кода на репозиторий с кодом (git).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Что такое бюджет канала?

Бюджет канала - расчет баланса между мощностью передаваемого сигнала и уровнем шума в канале связи. Т.е это расчет, в котором суммируются начальная мощность сигнала, всевозможные усиления и потери.

Параметры модели

1. BS_POWER - мощность, с которой базовая станция излучает сигнал (dbm)
2. UE_POWER - мощность, с которой абонентский терминал излучает сигнал (dbm)
3. BS_ANTENNA_GAIN - усиление антенны базовой станции за счет перенаправления энергии (dbi)
4. PENETRATION - потери, заложенные на проникновение радиосигнала сквозь припятствия (db)
5. IM (Interference margin) - потери, заложенные на интерференцию (переотражение) сигнала (db)
6. FREQ_RANGE - диапазон частот, который используется в этой модели (GHz)
7. UL_BW - полоса частот, выделенная под Uplink канал (MHz)
8. DL_BW - полоса частот, выделенная под Downlink канал (MHz)
9. BS_NOISE_COEFF - шум, который присутствует в самой базовой станции (из-за компонентов) (db)
10. UE_NOISE_COEFF - шум, который присутствует в самом абонентском терминале (из-за компонентов) (db)
11. DL_SINR - минимально требуемый уровень отношения сигнала к шуму для Downlink канала (db)
12. UL_SINR - минимально требуемый уровень отношения сигнала к шуму для Uplink канала (db)
13. BS_MIMO_GAIN - усиление MIMO (db)

14. BS_FEEDER_LOSS - потери в антенно-фидерном тракте (путь от RU к антеннам) (db)

FEEDER_LOSS

Фидер - провод, которым соединяются Radio Unit и антенна. Еще между ними может быть джампер - гибкий короткий фидер, который используется для соединения фидера с антенной. Также между RU и антенной может находиться МШУ - устройство, усиливающее слабые сигналы с минимальным добавлением собственного шума. Вся эта схема в целом называется антенно-фидерный тракт. Каждый из ее компонентов вносит потери мощности. В среднем в фидере теряются 2db мощности (зависит от длины и типа фидера), в МШУ - 0.4db, в джампере - 0.5db. Итого на антенно-фидерный тракте в среднем потеряется 2.9db мощности. При этом MIMO с двумя передающими антеннами позволяет усилить сигнал на 3db 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. Таким образом MIMO компенсирует потери.

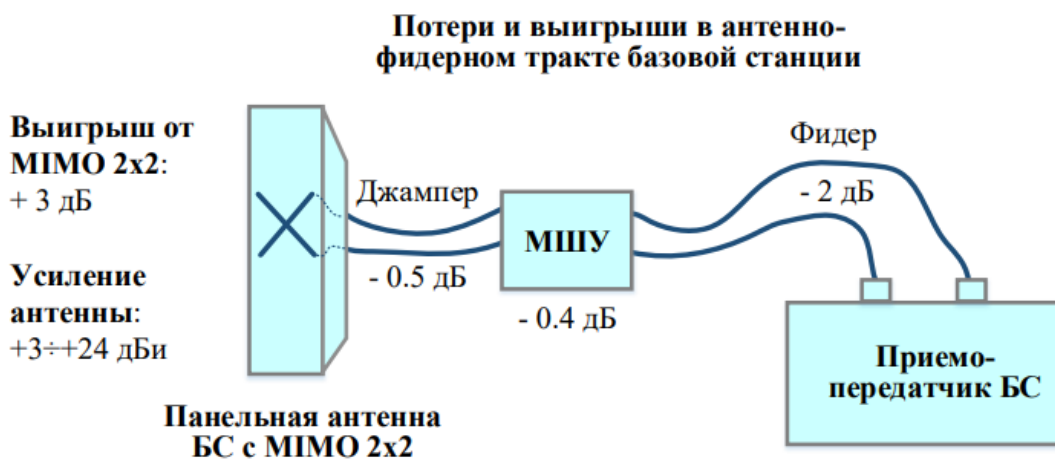


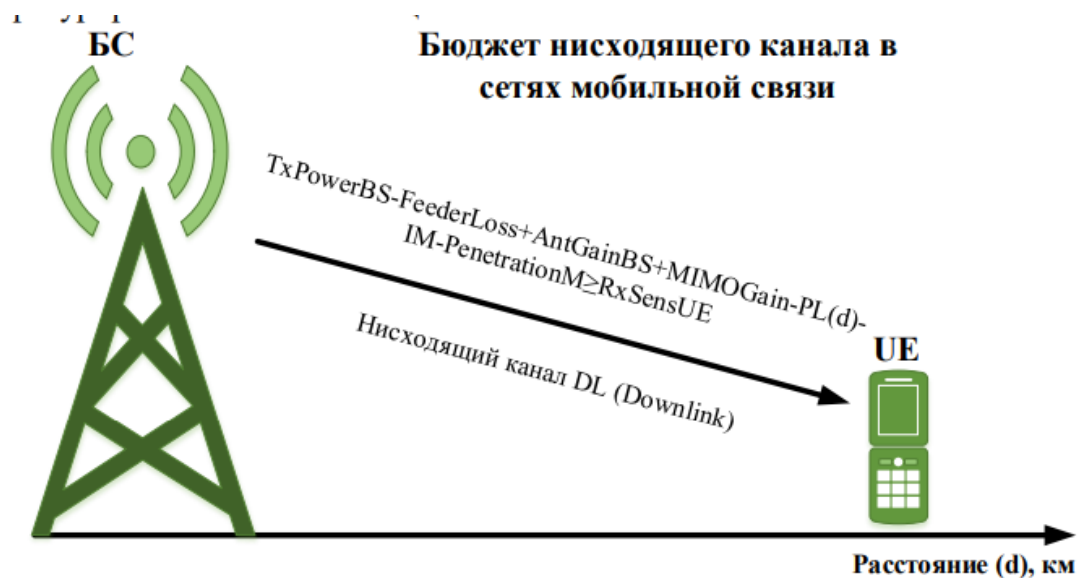
Рис. 2.4. Усиление и ослабление сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции.

Рисунок 1 — Антенно-фидерный тракт

Расчет бюджета восходящего канала

Чтобы понять, как составить бюджет канала, необходимо проследить путь сигнала от момента его создания до момента приема получателем.

Сигнал излучается абонетским терминалом с мощностью UE_POWER , далее сигнал попадает в радиоканал, где он будет нести потери мощности из-за $PENETRATION$, IM , BS_FEEDER_LOSS , $PL(d)$ (затухание из-за расстояния), но усилится на базовой станции за счет BS_MIMO_GAIN и $BS_ANTENNA_GAIN$. Теперь у нас есть баланс мощности и потерь для восходящего канала, но нужно не забывать, что устройство абонента может принять не всякий сигнал, ведь в радиоканале всегда есть шумы, например Thermal Noise - шум, вызванный движением электронов из-за температуры окружающей среды (чем жарче, тем выше шум), Figure Noise - шум, который вносят компоненты устройств, которые участвуют в обработке сигнала. То есть любой сигнал по мощности меньший Thermal Noise + Figure Noise для устройства является просто шумом. Помимо это еще необходимо учитывать 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. Все эти три величины (TN, FN, RequiredSINR) составляют такой параметр как RX_{sens} - минимальный требуемый уровень радиосигнала, при котором возможно успешное декодирование битов данных. RX_{sens} должен быть больше чем бюджет канала. Во всей этой схеме нам неизвестно только $PL(d)$ - максимальное число потерь. Можем ввести новую переменную MAPL (Max Allowed Path Loss) и заменить ею $PL(d)$, а все выражение приравнять к RX_{sens} . Таким образом, у нас в уравнении остается только одно неизвестное значение - MAPL. Что дает нам MAPL? Если мы знаем MAPL и зависимость затухания сигнала от расстояния $PL(d)$, то мы легко сможем найти радиус покрытия соты. Все выше сказанное иллюстрирует картинка ниже:



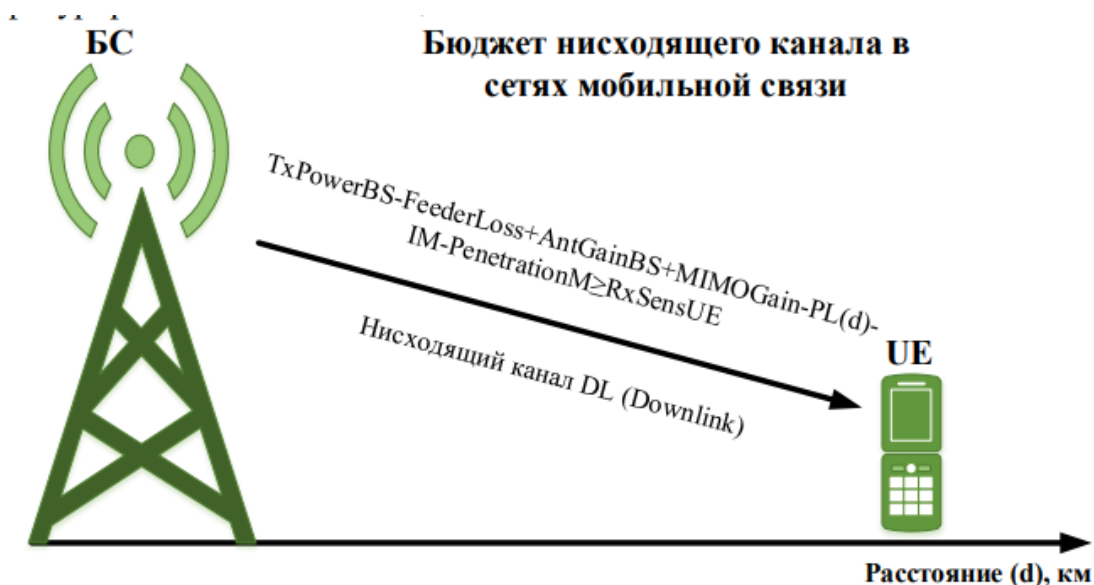
TxPowerBS – Мощность передатчика базовой станции BS, дБм
FeederLoss – Уровень потерь сигнала при прохождении через фидер или джампер, дБ
AntGainBS – коэффициент усиления приемо-передающей антенны базовой станции, дБи
MIMOGain – выигрыш за счет использования MIMO, дБ
PL(d) – уровень потерь радиосигнала 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

Рисунок 2 — Формула для расчета бюджета восходящего канала

Расчет бюджета нисходящего канала

Расчеты для DL канала во многом схожи с расчетами для UL канала, за тем исключением, что теперь сигнал идет от базовой станции к абоненту, соответственно UE_POWER заменится на BS_POWER, а rx_bs_sens на rx_ue_sens



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

Рисунок 3 — Формула для расчета бюджета нисходящего канала

Виды моделей распространения сигнала

FSPM

Расчитывается по формуле $(\frac{4\pi d}{\lambda})^2$, где d - расстояние в метрах, λ - длина волны сигнала. Идеализированная модель, где сигнал не встречает никаких шумов, и потери зависят только от расстояния. Не используется в расчетах покрытия.

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

Расчитывается по формуле $PL(d) = 26 \cdot \log_{10}(f_{ГГц}) + 22.7 + 36.7 \cdot \log_{10}(d_m)$. Применяется в условиях размещения точек доступа/небольших сот в помещениях (Indoor).

Модель Окумура-Хата и ее модификация COST231

Эмпирическая модель распространения сигнала, широко применяемая в сотовых и других беспроводных системах в диапазоне 150–2000 МГц. Была разработана в 1960–1970-х годах японским инженером Ёсио Окумурой на основе большого количества измерений в Токио и окрестностях. В 1980 году Масахару Хата обобщил данные Окумуры, получив формулу, пригодную для расчётов — модель Окумура–Хата. Эта модель стала стандартом для проектирования систем мобильной связи. 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.

Расчитывается по формуле $PL(d) = A + B \cdot \log_{10}(f) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_{BS}) - a + s \cdot \log_{10}(d) + L_{clutter}$, где f – несущая частота сигнала (МГц), d – расстояние между приёмником и передатчиком (км), h_{BS} – высота подвеса антенны базовой станции (м), $L_{clutter}$, A , B – константы. Константы зависят от частоты, от высоты базовой станции h_{BS} и типа местности.

Учитываемые типы местности:

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

Модель 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. Учитывает как наличие прямой видимости между UE и BS, так и ее отсутствие. В случае отсутствия прямой видимости модель учитывает потери сигнала в сво-

бодном пространстве, потери сигнала за счет переотражений от стен зданий, потери сигнала за счет переотражений от крыш зданий, которые зависят от ϕ - среднего угла между направлением распространения сигнала и улицей и некоторых других параметров.

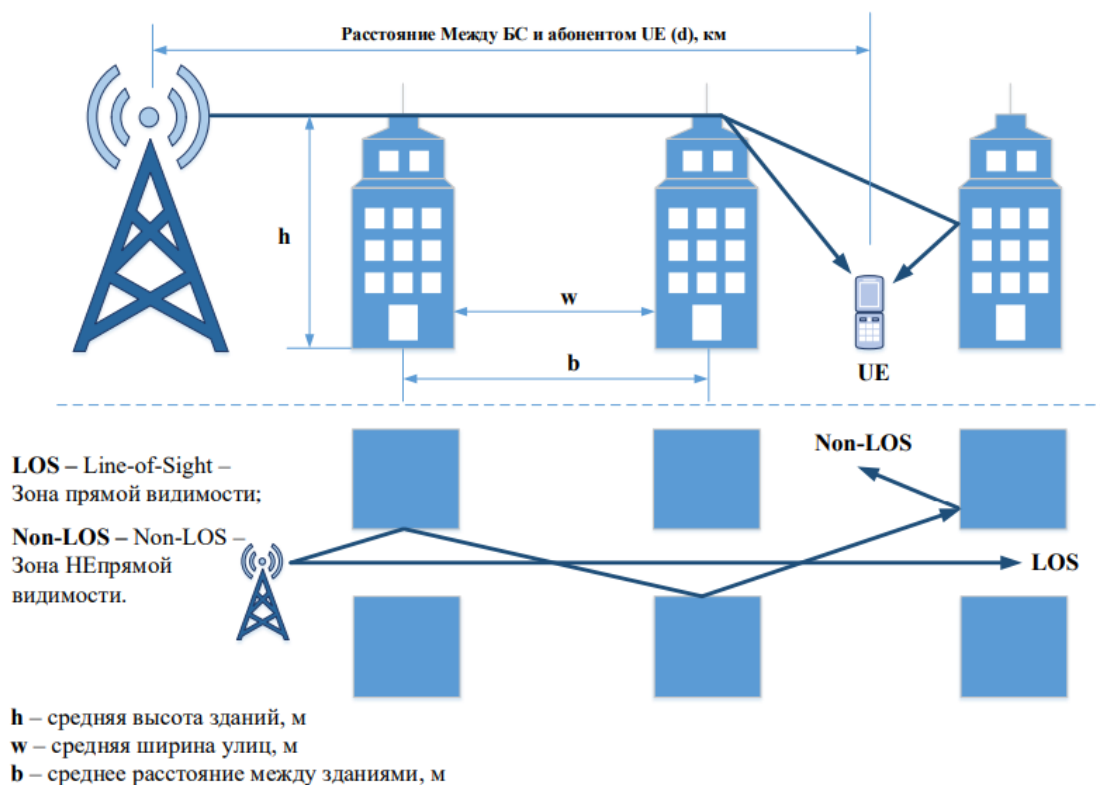


Рисунок 4 — Walfish-Ikegami model

Выбор нужной модели

В задании даны две различные территории для расчетов покрытия:

1. Площадь территории, на которой требуется спроектировать сеть: 100 кв.км.
2. Площадь торговых и бизнес центров, где требуется спроектировать сеть на базе микро- и фемтосот: 4 кв.км.

Для первого случая я выбрал модель COST231.

Для второго случая я выбрал модель UMiNLOS, поскольку она рассчитана для плотной застройки, где зачастую нет прямой видимости между БС и АТ, а также для небольших сот.

Расчет радиуса соты

Шаги по вычислению радиуса соты:

1. Составить бюджет для UL и DL канала
2. Найти MAPL для UL и DL канала
3. Посчитать и визуализировать модель распространения сигнала
4. На визуализированной модели по оси Y отложить MAPL UL и DL канала
5. Найти пересечения. Эти точки - радиус соты (по X)
6. Выбрать наименьший результат

Вычисление площади, покрываемой базовой станцией

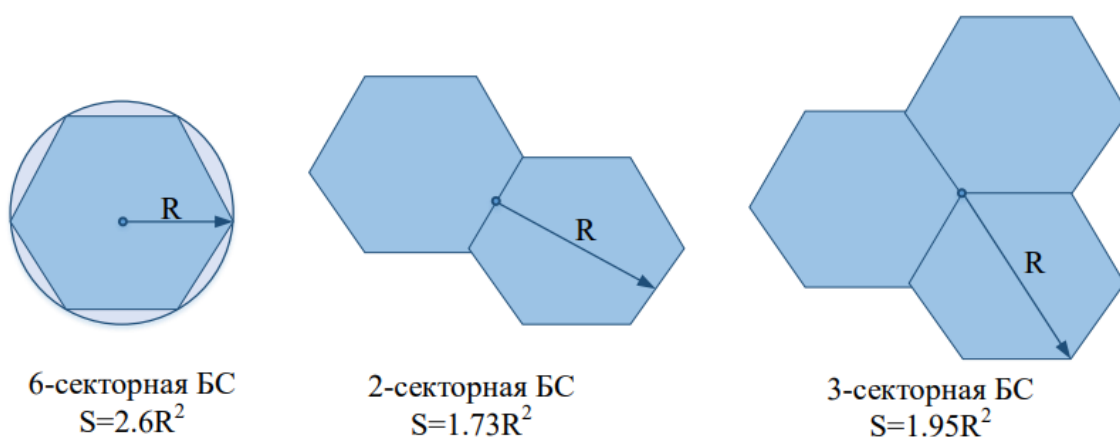


Рис. 2.7. Определение площади сайта (базовой станции) в зависимости от числа сконфигурированных секторов.

Рисунок 5 — Формулы для вычисления площади покрытия базовой станции

В нашем случае базовая станция имеет 3 сектора, поэтому будем использовать формулу номер 3.

РАСЧЕТ РАДИОПОКРЫТИЯ

Расчет бюджета UL канала

Параметры модели

В задании дан список параметров модели, которые участвуют в расчетах бюджета канала:

```
%define model params
BS_POWER = 46; %dbm
SECTORS_BS = 3;
UE_POWER = 24; %dbm
BS_ANTENNA_GAIN = 21; %dbi
PENETRATION = 15; %db
IM = 1; %db
FREQ_RANGE = 1.8; %GHz
UL_BW = 10; %MHz
DL_BW = 20; %MHz
BS_NOISE_COEFF = 2.4; %db
UE_NOISE_COEFF = 6; %db
DL_SINR = 2; %db
UL_SINR = 4; %db
BS_MIMO = 2;
MIMO_GAIN = 3; %db
S = 100; %km^2
S_BLOCKAGE = 4; %km^2
BS_FEEDER\_LOSS = 2 + 0.5 + 0.4; %db
```

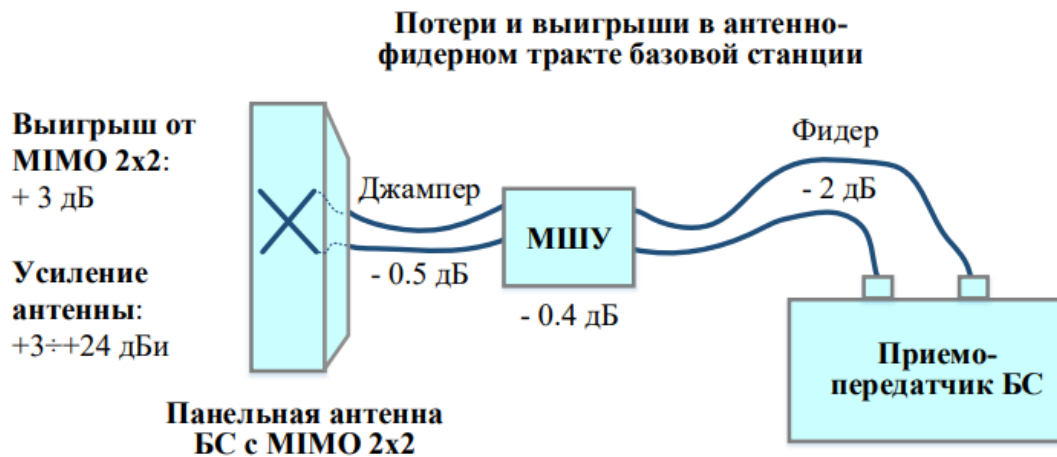


Рис. 2.4. Усиление и ослабление сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции.

Рисунок 6 — Антенно-фидерный тракт

Расчет бюджета восходящего канала

```
%compute UL budget and UL_MAPL

%compute thermal noise
thermal_noise = -174 + 10 * log10(UL_BW * 10^6);

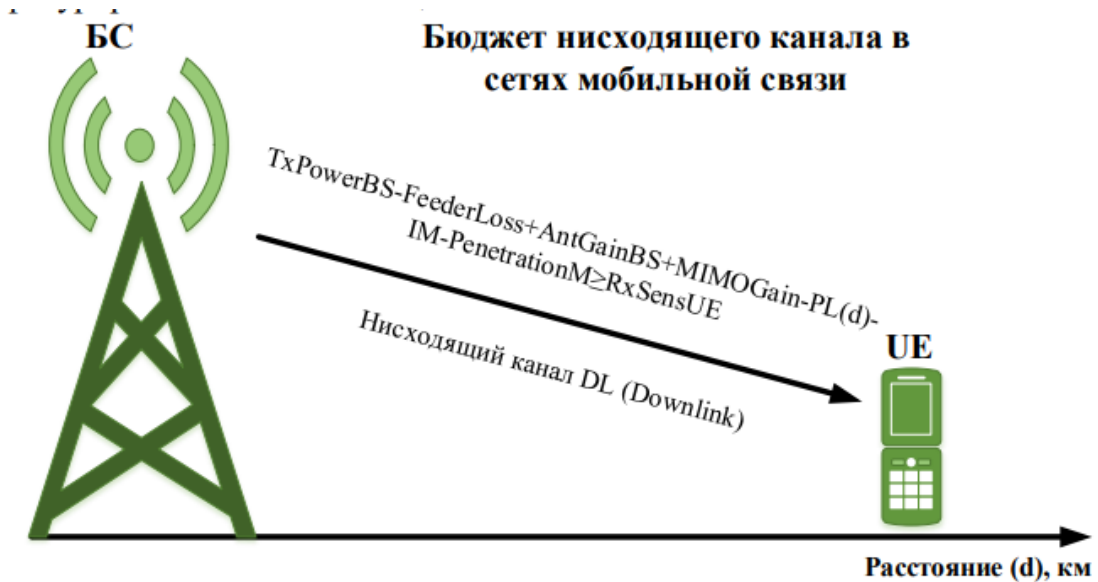
%UL budget
rx_bs_sens = BS_FIGURE_NOISE + thermal_noise + UL_SINR;
MAPL_UL = UE_POWER - IM - PENETRATION - + BS_ANTENNA_GAIN +
    MIMO_GAIN - FEEDER_LOSS - rx_bs_sens;

fprintf("UL\_PARAMS: Thermal noise: %f \t rx\_sens = %f \t MAPL
    = %f\n", thermal\_noise, rx\_bs\_sens, MAPL\_UL);
```

Для начала нужно вычислить термический шум. Он вычисляется как $P = kTB$, где k - постоянная Больцмана, T - температура окружающей среды в кельвинах, B - ширина полосы частот для UL канала (не забываем переводить в Hz). Чтобы не переводить цельсии в кельвины и не знать наизусть постоянную Больцмана, эту величину заменяют на -174db/Hz, т.е шум в db на 1 Hz при температуре 20 градусов цельсия (т.к эта температура комфортна для человека, и он стремится в ней находиться). Далее идет расчет чувствительности базовой станции и самого MAPL_UL по указанным выше формулам.

Расчет бюджета UL канала

Расчеты для DL канала во многом схожи с расчетами для UL канала, за тем исключением, что теперь сигнал идет от базовой станции к абоненту, соответственно UE_POWER заменится на BS_POWER, а rx_bs_sens на rx_ue_sens :



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

Рисунок 7 — Формула для расчета бюджета нисходящего канала

Реализация в коде:

```
rx_ue_sens = UE_FIGURE_NOISE + thermal_noise + DL_SINR;  
MAPL_DL = BS_POWER - FEEDER_LOSS + BS_ANTENNA_GAIN + MIMO_GAIN  
          - IM - PENETRATION - rx_ue_sens;  
  
fprintf("DL_PARAMS: Thermal noise: %f \t rx_sens = %f \t MAPL =  
        %f\n", thermal_noise, rx_ue_sens, MAPL_DL);
```

Результат расчетов MAPL для UL и DL каналов

```
>> Lab2
UL_PARAMS: Thermal noise: -104.000000    rx_sens = -97.600000    MAPL = 126.700000
DL_PARAMS: Thermal noise: -104.000000    rx_sens = -96.000000    MAPL = 147.100000
```

Рисунок 8 — Вычисленные MAPL для UL и DL

Можем заметить, что MAPL DL канала больше, чем MAPL UL канала. Это связано с тем, что в DL канале сигнал идет от базовой станции к абоненту и логично, что базовая станция излучает сигнал с более высокой мощностью, нежели телефон, поэтому сигнал от базовой станции может "позволить" себе больше потерь.

Расчет моделей распространения

FSPM

```
d = 0 : 1 : 15000;

%FSPM PL

lambda = (3*10^8) / (FREQ_RANGE * 10 ^ 9);
pl_FSPM_func = @(d, lambda) 10*log10((4 * pi .* d ./ lambda) .^
    2);
pl_FSPM = pl_FSPM_func(d, lambda);
```

Задаем расстояние d в метрах (будет использоваться и в других моделях), вычисляем длину волны λ как $\frac{3 \cdot 10^8}{f}$. pl_FSPM хранит значение затухания в каждой точке вектора d .

UMiNLOS

```
%UMiNLOS PL

pl_ULOS_func = @(d) 26 * log10(FREQ_RANGE) + 22.7 + 36.7 *
    log10(d);
pl_ULOS = pl_ULOS_func(d);
```

COST231

```
hBS = 100; %meters
hMS = 1;   %meters
A = 46.3;
B = 33.9;

a = 3.2 * log10(11.75 * hMS)^2 - 4.97;

Lclutter = 0;

pl_COST_func = @(d, A, B, FREQ_RANGE, hBS, a, s, Lclutter) A + B
    * log10(FREQ_RANGE * 10^3) - 13.82 * log10(hBS) - a + s .*
    log10(d/1000) + Lclutter;

function s = s(d, hBS, FREQ_RANGE)
    if(d >= 1000)
        s = 44.9 - 6.55 * log10(FREQ_RANGE * 10 ^ 3);
    else
        s = (47.88 + 13.9 * log10(FREQ_RANGE * 10 ^ 3) - 13.9 *
            log10(hBS)) * 1 / (log10(50));
    end
end
```

Можем видеть, что эта модель выглядит сложнее и интереснее предыдущих, потому что она учитывает множество факторов, а не только расстояние. Здесь A и B - коэффициенты, зависящие от BW, a - коэффициент учитывающий высоту базовой станции. Lclutter учитывает тип местности (я выбрал Urban, поэтому этот коэффициент равен нулю). Также есть коэффициент s, который меняет логику затухания в зависимости от расстояния (больше или меньше 1км).

Walfish-Ikegami

```
%Walfish-Ikegami

pl_WI = pl_WI_func(FREQ_RANGE, d);

function result = pl_WI_func(FREQ_RANGE, d)
    w = 24.5; %avg street len
```



```

dh = 30; %avg h_bs - h_roof
phi = 45; %grad, angle bw street and signal route
b = 60; %avg distance bw building
d = d / 1000;
L0 = 32.44 + 20 * log10(FREQ_RANGE * 10^3) + 20 * log10(d);
L1 = -16.9 - 10*log10(w) + 10 * log10(FREQ_RANGE * 10^3) +
    20 * log10(dh) + 2.5 * 0.075 * phi;
L2 = -18 * log10(1 + dh) + 54 + 18 * log10(d) + (-4 + 0.7 *
    (FREQ_RANGE * 10^3 / 925 - 1)) * log10(FREQ_RANGE*10^3) -
    9 * log10(b);

result = L0 + L1 + L2;
end

```

Тоже сложная и интересная модель, в которой много дополнительных параметров. Например w - средняя длина улиц, dh - средняя разница между высотой БС и крыш зданий, ϕ - угол между направлением улицы и направлением распространения сигнала, b - расстояние между зданиями. Значения w , dh , b брал для города Нью-Йорк, а ϕ выбрал как среднее между 0 и 90 градусов. Итоговое затухание зависит от коэффициентов $L0$ – потери сигнала в свободном пространстве, $L1$ – потери сигнала за счет переотражений от стен зданий, $L2$ – потери сигнала за счет переотражений от крыш зданий. Помимо этого используются дополнительные коэффициенты k_a, k_d, k_f, L_{11} .

Визуализация моделей распространения

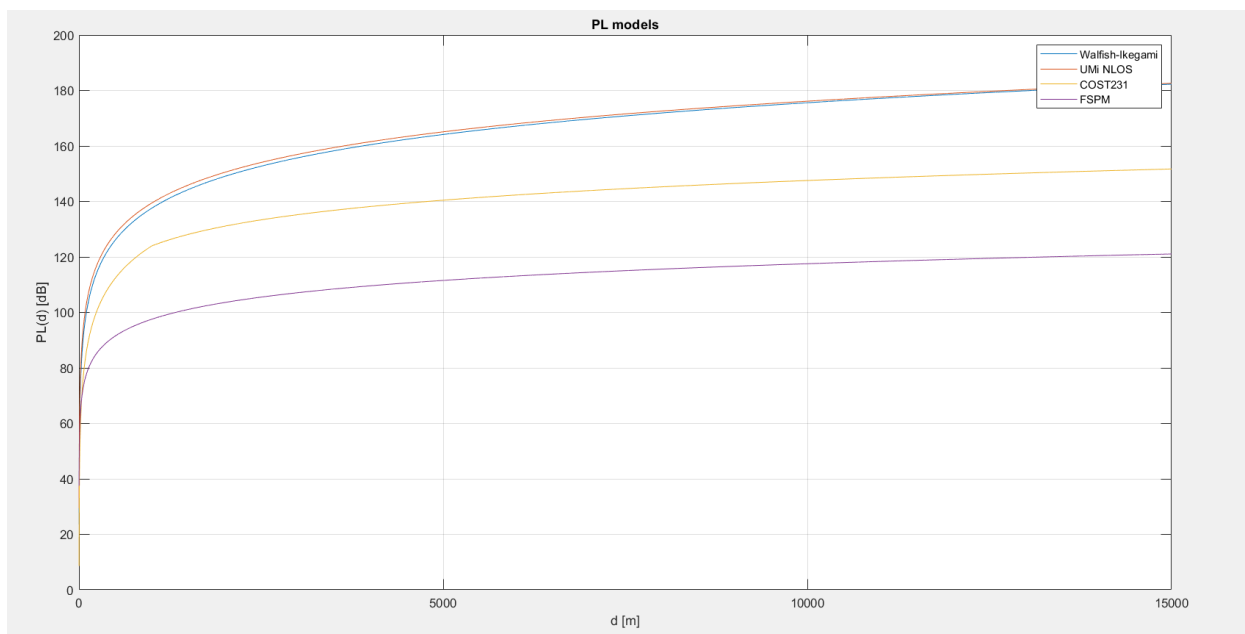


Рисунок 9 — Модели распространения сигналов

Модель FSP показывает ”наилучший” результат, потому что учитывает только затухание сигнала из-за расстояния. Последние места делят UMiNLOS и Walfish-Ikegami, поскольку UMiNLOS предназначен для работы в случае отсутствия прямой видимости. Walfish-Ikegami модель рассчитана тоже для случая отсутствия прямой видимости (хотя есть вариация и для прямой видимости). COST231 выдала что-то среднее между этими двумя крайностями, потому что была рассчитана не для условий плотной городской застройки.

Найдем радиус соты

Для прошлого графика на оси затухания отложим MAPL DL и UL канала

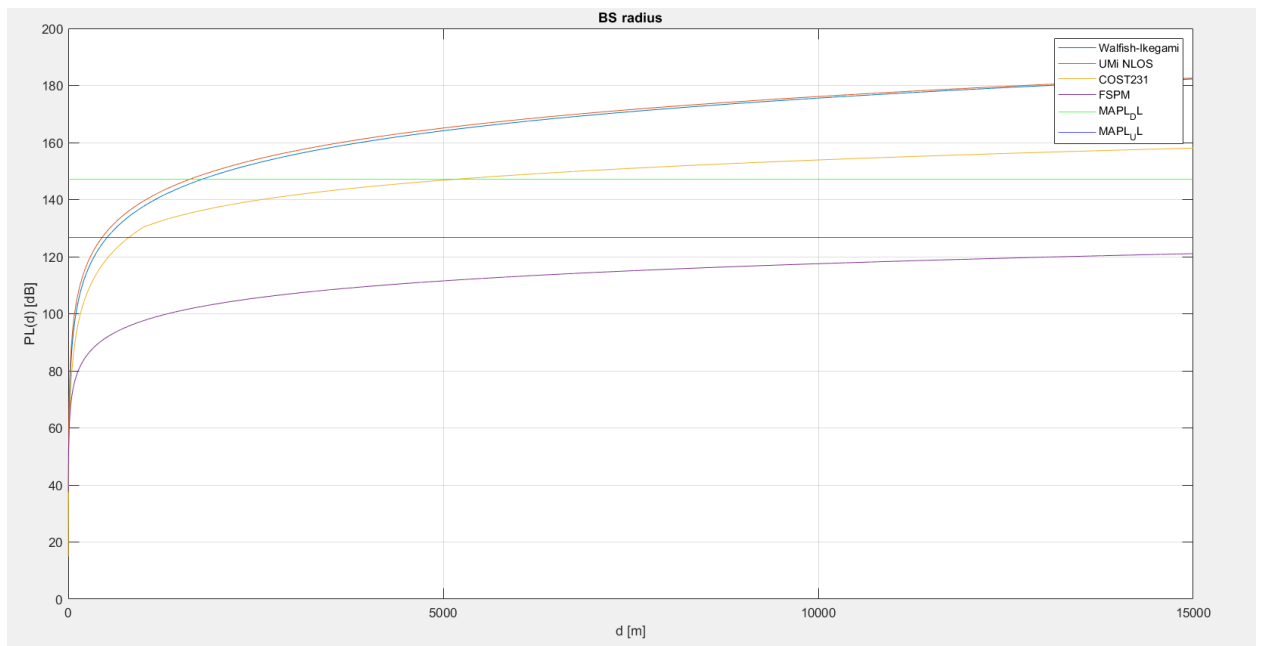


Рисунок 10 — Радиус соты

Отсюда получаем, что для UL канала радиус соты для модели COST231 будет составлять 0.8км, для UMiNLOS 0.45км. Для DL получаем 5.15км и 1.6км соответственно. Выберем значения для UL, т.к они меньше значений DL.

Вычислим площадь покрытия базовой станции

```
%Radius
R_ULOS = 0.45;
R_COST = 0.8;

%Area
S_ULOS = 1.95 * R_ULOS^2;
S_COST = 1.95 * R_COST^2;

fprintf("S_ULOS = %f \t S_COST = %f\n", S_ULOS, S_COST);
```

После выполнения программы получим $S_{ULOS} = 0.394875$, $S_{COST} = 1.248000$.

Вычисление количества базовых станций для покрытия площади

```
S1 = 100;  
S2 = 4;  
  
fprintf("countBS_ULOS = %f \t countBS_COST = %f\n", S2/S_ULOS,  
        S1/S_COST);
```

В результате получим $\text{countBS_ULOS} = 10.129788$, $\text{countBS_COST} = 80.128205$. Это значит, что для покрытия 100 кв. км площади городской застройки (неплотной) понадобится примерно 81 базовая станция, если считать по модели COST231. Для покрытия 4 кв. км площади торговых и бизнес центров понадобится 11 базовых станций, если считать по модели UMiNLOS.

Github

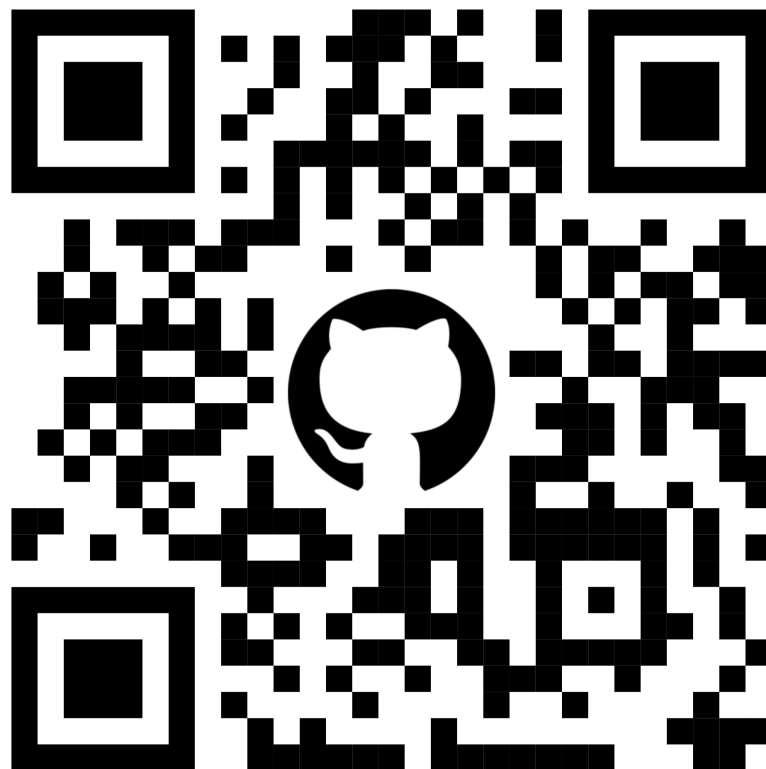


Рисунок 11 — Ссылка на github

ВЫВОД

В ходе работы я научился рассчитывать бюджет канала, находить из него MAPL. Познакомился с различными моделями распространения сигналов. Научился считать радиус соты и площадь покрытия базовой станции.