

Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики» (СибГУТИ)

Кафедра телекоммуникационных систем и вычислительных средств

Практическое задание № 2

Проектирование радиопокрытия мобильных сетей. Модели распространения
сигналов. Бюджеты каналов.

Выполнил: студент 3 курса

гр. ИА-331

Помелова А.В.

Новосибирск 2025

ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ

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

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.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Радиус соты - предельное расстояние между базовой станцией (БС) и пользовательским оборудованием (UE), на котором возможна успешная передача данных с требуемым качеством.

Радиус соты зависит от:

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

Базовая станция (БС) - стационарный передатчик, обеспечивающий связь в пределах определенной территории (соты).

Пользовательское оборудование (UE) - мобильные устройства (телефоны, модемы), принимающие и передающие сигнал.

Path Loss (PL) - затухание мощности радиосигнала при распространении от передатчика к приемнику.

Факторы, влияющие на радиус соты:

- Мощность передатчика (TxPower)
- Несущая частота сигнала (f)
- Коэффициент усиления антенн (AntGain)
- Чувствительность приемника (RxSens)
- Уровень помех и интерференции
- Характер местности и препятствия

Модели распространения радиосигналов

1. FSPM (Free Space Propagation Model) - модель распространения в свободном пространстве. Не учитывает влияние среды, используется как теоретическая основа.
2. UMiNLOS (Urban Micro Non-Line-of-Sight) - модель для городских микросот и помещений без прямой видимости.
3. Окумура-Хата/COST231 - эмпирическая модель для макросот, учитывающая тип местности:
 - DU (Dense Urban) - плотная городская застройка
 - U (Urban) - город
 - SU (Suburban) - пригород
 - RURAL - сельская местность
4. Walfish-Ikegami - модель для городской застройки с регулярной планировкой, разделяет расчет для:
 - LOS (Line-of-Sight) - прямая видимость
 - NLOS (Non-Line-of-Sight) - непрямая видимость

Бюджет канала - расчет баланса мощности в системе связи, определяющий максимально допустимые потери сигнала. По сути, это оценка того, насколько сильный сигнал дойдет от передатчика к приемнику.

MAPL (Maximum Allowed Path Loss) - максимально допустимые потери радиосигнала, при которых еще возможен успешный прием.

Нисходящий канал (DL) - направление от БС к UE:

$$\text{TxPowerBS} - \text{FeederLoss} + \text{AntGainBS} + \text{MIMOGain} - \text{MAPL_DL} - \text{IM} - \text{PenetrationM} = \text{RxSensUE}$$

Восходящий канал (UL) - направление от UE к БС:

$$\text{TxPowerUE} - \text{FeederLoss} + \text{AntGainBS} + \text{MIMOGain} - \text{MAPL_UL} - \text{IM} - \text{PenetrationM} = \text{RxSensBS}$$

Определения ключевых параметров:

1. TxPower - мощность передатчика [дБм]
2. FeederLoss - потери в антенно-фидерном тракте [дБ]
3. AntGain - коэффициент усиления антенны [дБи]
4. MIMOGain - выигрыш от использования MIMO-технологий [дБ]
5. IM (Interference Margin) - запас мощности на интерференцию [дБ]
6. PenetrationM - запас сигнала на проникновение через препятствия [дБ]

7. RxSens - чувствительность приемника [дБм], рассчитывается как:

- $RxSens = NoiseFigure + ThermalNoise + RequiredSINR$

8. ThermalNoise - тепловой шум приемника:

- $ThermalNoise = K * BW * T = -174 + 10 * \log_{10}(BW)$

K - постоянная Больцмана $1,38 * 10^{-23}$

(-174 дБм – уровень шума на 1 Гц полосы частот при температуре 20С)

Алгоритм определения радиуса соты:

1. Расчет MAPL_DL и MAPL_UL через бюджеты каналов
2. Определение расстояний d_DL и d_UL по выбранной модели распространения
3. Выбор минимального значения: $R = \min(d_DL, d_UL)$

Площадь покрытия базовой станции зависит от количества секторов:

2 сектора: $S \approx 1,73 * R^2$

3 сектора: $S \approx 1,95 * R^2$

6 секторов: $S \approx 2,60 * R^2$

Критерий проектирования: радиус соты всегда ограничивается направлением с меньшей дальностью связи, обычно восходящим каналом (UL).

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.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 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).

1. БЮДЖЕТ ВОСХОДЯЩЕГО КАНАЛА(UL Link Budget)

$$TxPowerUE - FeederLoss + AntGainBS + MIMOGain - MAPL_UL - IM - PenetrationM = RxSensBS$$

$TxPowerUE$ (мощность передатчика пользовательского терминала) = 24 дБм

$FeederLoss \approx 2.9$ дБ

$AntGainBS$ (коэффициент усиления антенны) = 21 дБи;

MIMOGain (число приемо-передающих антенн на BS) = 2 = 3дБ

MAPL_UL - ?

IM (запас мощности сигнала на интерференцию) = 1 дБ

PenetrationM (запас мощности сигнала на проникновения сквозь стены) = 15 дБ

BW_UL (полоса частот в UL) = 10 МГц = $10 \cdot 10^6$ Гц

RxSensBS = NoiseFigure_BS + ThermalNoise_UL + RequiredSINR_UL

RequiredSINR_UL (требуемое отношение SINR) = 4 дБ

NoiseFigure_BS (коэффициент шума приемника BS) = 2.4 дБ;

Решение:

$\text{ThermalNoise_UL} = -174 + 10 \cdot \log_{10}(\text{BW_UL}) = -174 + 10 \cdot \log_{10} 10 \cdot 10^6 = -174 + 10 \cdot 7 = -104 \text{ дБм}$

$\text{RxSensBS} = \text{NoiseFigure_BS} + \text{ThermalNoise_UL} + \text{RequiredSINR_UL} = 2.4 \text{ дБ} - 104 \text{ дБм} + 4 \text{ дБ} = -97.6 \text{ дБм}$

Переводим в дБ:

$\text{MIMOGain} = 10 \cdot \log_{10} 2 = 3 \text{ дБ}$

$\text{TxPowerUE} - \text{FeederLoss} + \text{AntGainBS} + \text{MIMOGain} - \text{MAPL_UL} - \text{IM} - \text{PenetrationM} = \text{RxSensBS}$

$24 \text{ дБм} - 2.9 \text{ дБ} + 21 \text{ дБи} + 3 \text{ дБ} - \text{MAPL_UL} - 1 \text{ дБ} - 15 \text{ дБ} = -97.6 \text{ дБм}$

$\text{MAPL_UL} = 126.7 \text{ дБ}$

```
ThermalNoise_UL = -174 + 10* np.log10(BW_UL)
RxSens_BS = Noise_BS + ThermalNoise_UL + SINR_UL
MAPL_UL = Tx_UE - FeederLoss + AntGain_BS + MIMO - IM - Penetration - RxSens_BS
print("MAPL_UL = ", MAPL_UL, " дБ\n")
```

```
MAPL_UL = 126.69999999999999 дБ
```

2. БЮДЖЕТ НИСХОДЯЩЕГО КАНАЛА(DL Link Budget)

$\text{TxPowerBS} - \text{FeederLoss} + \text{AntGainBS} + \text{MIMOGain} - \text{MAPL_DL} - \text{IM} - \text{PenetrationM} = \text{RxSensUE}$

$TxPower_{BS}$ (мощность передатчиков BS) = 46 дБм

$FeederLoss \approx 2$ дБ

$AntGain_{BS}$ (коэффициент усиления антенны BS) = 21 дБи

$MIMOGain = 2 = 3$ дБ

$MAPL_{DL}$ -?

IM (запас мощности сигнала на интерференцию) = 1 дБ

$PenetrationM$ (запас мощности сигнала на проникновения сквозь стены) = 15 дБ

$RxSens_{UE}$ - ?

BW_{DL} (полоса частот в DL) = 20 МГц

$NoiseFigure_{UE}$ (коэффициент шума приемника пользователя) = 6 дБ

$RequiredSINR_{DL}$ (требуемое отношение SINR для DL) = 2 дБ

Решение:

$ThermalNoise_{DL} = -174 + 10 * \log_{10}(BW_{UL}) = -174 + 10 * \log_{10} 20 * 10^6 = -174 + 10 * 7.3 = -101$ дБм

$RxSens_{UE} = NoiseFigure_{UE} + ThermalNoise_{DL} + RequiredSINR_{DL} = 6$ дБ – 101 дБм + 2 дБ = -93 дБм

$TxPower_{BS} - FeederLoss + AntGain_{BS} + MIMOGain - MAPL_{DL} - IM - PenetrationM = RxSens_{UE}$

46 дБм – 2.9 дБ + 21 дБи + 3 дБ - $MAPL_{DL}$ – 1 дБ - 15 дБ = -93 дБм

$MAPL_{DL} = 144.1$ дБ

```
ThermalNoise_DL = -174 + 10* np.log10(BW_DL)
RxSens_UE = Noise_UE + ThermalNoise_DL + SINR_DL
MAPL_DL = Tx_BS - FeederLoss + AntGain_BS + MIMO - IM - Penetration - RxSens_UE
print("MAPL_DL = ", MAPL_DL, " дБ\n")
```

$MAPL_{DL} = 144.08970004336018$ дБ

$MAPL_{DL}$ больше чем $MAPL_{UL}$. При проектировании мобильных сетей приоритет отдается скачиванию, так как большинство пользователей

потребляют больше данных, чем отправляют. Сеть спроектирована так, чтобы обеспечить более высокую пропускную способность для скачивания.

3. ГРАФИКИ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Модели:

1. UMiNLOS
2. Окумура-Хата и ее модификация COST231
3. Walfish-Ikegami

Модель UMiNLOS (для микро/фемтосот):

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

$$PL_UMiNLOS = 26 * \log_{10} f + 22.7 + 36.7 * \log_{10} d$$

```
# UMi NLOS
PL_UMiNLOS = 26 * np.log10(f / 1e9) + 22.7 + 36.7 * np.log10(d * 1000)
```

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.

$$PL_WI = 42.6 + 20 * \log_{10} f + 26 * \log_{10} d$$

```
#прямая видимость у БС
PL_WI_LOS = 42.6 + 26 * np.log10(d) + 20 * np.log10(f / 1e6)
```

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.


```

#отсутствия прямой видимость БС
b = 50 #расстояние между зданиями
phi = 45 #угол
w = 20 #ширина улицы
delta_h = 20 - 1.5 #разность между высотой зданий и абонентом
L0 = 32.44 + 20*np.log10(f/1e6) + 20*np.log10(d)

if hBS > delta_h:
    L11 = -18 * np.log10(1 + (hBS - delta_h))
else:
    L11 = 0

if hBS > delta_h:
    ka = 54
elif d > 0.5:
    ka = 54 - 0.8 * (hBS - delta_h)
else:
    ka = 54 - 0.8 * (hBS - delta_h) * (d / 0.5)

if hBS > delta_h:
    kd = 18
else:
    kd = 18 - 15 * ((hBS - delta_h) / delta_h)

kf = -4 + 0.7 * (f/1e6 / 925 - 1)

L1 = L11 + ka + kd* np.log10(d) + kf*np.log10(f/1e9) - 9*np.log10(b)

if 0 <= phi < 35:
    L2_term = -10 + 0.354 * phi
elif 35 <= phi < 55:
    L2_term = 2.5 + 0.075 * (phi - 35)
elif 55 <= phi < 90:
    L2_term = 4.0 - 0.114 * (phi - 55)
else:
    L2_term = 4.0

L2 = -16.9 - 10 * np.log10(w) + 10 * np.log10(f/1e9) + 20 * np.log10(delta_h) + L2_term

PL_WI_NLOS = L0 + L1 + L2
#PL_WI_NLOS = np.where(L1 + L2 > 0, L0 + L1 + L2, L0)

```

Модель COST231 Hata:

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

$A = 46.3$

$B = 33.9$

$f = 1800$ МГц

$hBS = 30$ м (высота для макросоты)

$hUE = 1.5$ м (высота пользовательского терминала)

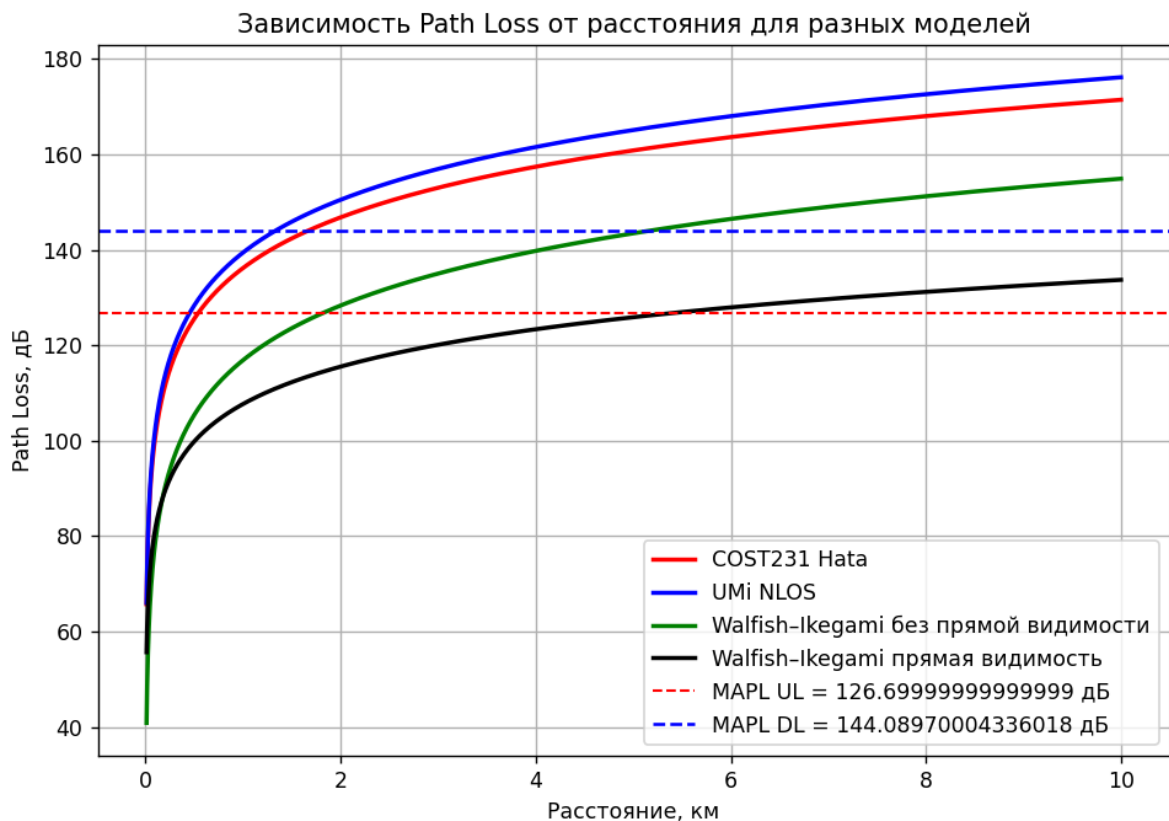
$a(hUE) = (1.1 \cdot \log_{10}(f) - 0.7) \cdot hUE - (1.56 \cdot \log_{10}(f) - 0.8) \approx 0.018$ дБ

$Lclutter = 0$ дБ пригорода, 3 дБ для города

$PL_COST231 = A + B \cdot \log_{10} f - 13.82 \cdot \log_{10} hBs - a(hUE) + s \cdot \log_{10} d + Lclutter$

```
# COST231 Hata
a = 46.3
b = 33.9
hBS = 30
hMS = 1.5
a_hms = (1.1 * np.log10(f / 1e6) - 0.7) * hMS - (1.56 * np.log10(f / 1e6) - 0.8)
Lclutter = 0
s = 44.9 - 6.55 * np.log10(hBS)
PL_COST231 = a + b * np.log10(f / 1e6) - 13.82 * np.log10(hBS) - a_hms + s * np.log10(d) + Lclutter
```

График:



Построенные зависимости потерь радиосигнала от расстояния показали, что с увеличением дистанции уровень потерь возрастает логарифмически.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА ПОКРЫТИЯ И КОЛИЧЕСТВА БС

В соответствии с исходными данными:

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 расчетов 1 выбрана модель COST231 Hata, так как она применяется для базовых станций в городских и пригородных условиях при частоте 1.8 ГГц. А для 2 – модель UMiNLOS.

Ранее были получены значения:

MAPL_UL=126.7 дБ

MAPL_DL=144.1 дБ

Находим радиусы сот для UL и DL моделей COST231 и UMiNLOS.

Ищем, между какими точками в массиве PL_model находится MAPL_value, вычисляем соответствующее расстояние из массива d

```
def find_distance(PL_model, d, MAPL_value):
    if MAPL_value < np.min(PL_model) or MAPL_value > np.max(PL_model):
        return np.nan
    return np.interp(MAPL_value, PL_model, d)  #интерполяция

#радиусы
d_UL_COST231 = find_distance(PL_COST231, d, MAPL_UL)
d_DL_COST231 = find_distance(PL_COST231, d, MAPL_DL)

d_UL_UMI = find_distance(PL_UMiNLOS, d, MAPL_UL)
d_DL_UMI = find_distance(PL_UMiNLOS, d, MAPL_DL)

R_COST231 = min(d_UL_COST231, d_DL_COST231)
R_UMI = min(d_UL_UMI, d_DL_UMI)
```

Выбираем меньшее из значений для каждой модели (обычно это UL)

Площадь покрытия одной трёхсекторной базовой станции рассчитывается по формуле:

$$S=1.95 \cdot R^2$$

```
#площади покрытия БС
S_COST231 = 1.95 * R_COST231**2
S_UMI = 1.95 * R_UMI**2
```

Количество базовых станций:

```
S_1 = 100  # км^2
S_2 = 4     #км^2
N_BS_COST231 = math.ceil(S_1 / S_COST231)
N_BS_UMI = math.ceil(S_2 / S_UMI)
```

```
Ограничивающий радиус соты COST231 = 0.5375152876111945 км
Ограничивающий радиус соты UMiNLOS = 0.4497183462511456 км
Площадь одной БС COST231 = 0.5633992346107031 км^2
Площадь одной БС UMiNLOS = 0.3943808523619873 км^2
Необходимое количество БС COST231 = 178
Необходимое количество БС UMiNLOS = 11
```

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Построить зависимость радиуса соты в UL и DL от температуры окружающей среды и от ширины полосы.

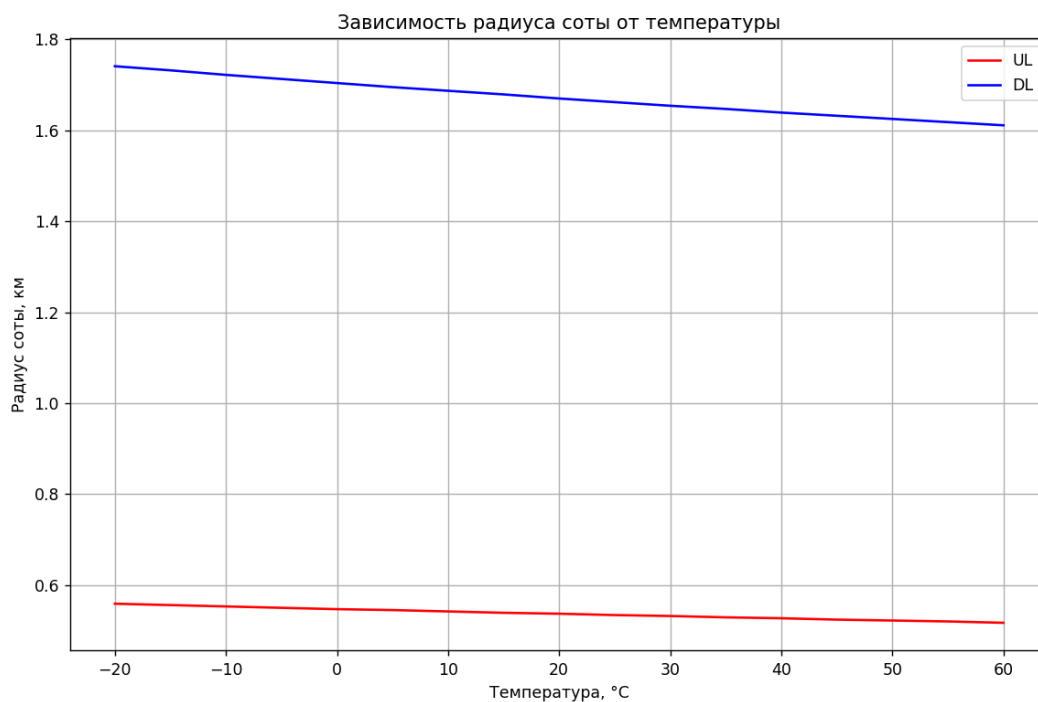
Чувствительность приемника:

$$RxSens = NoiseFigure + ThermalNoise + SINR$$

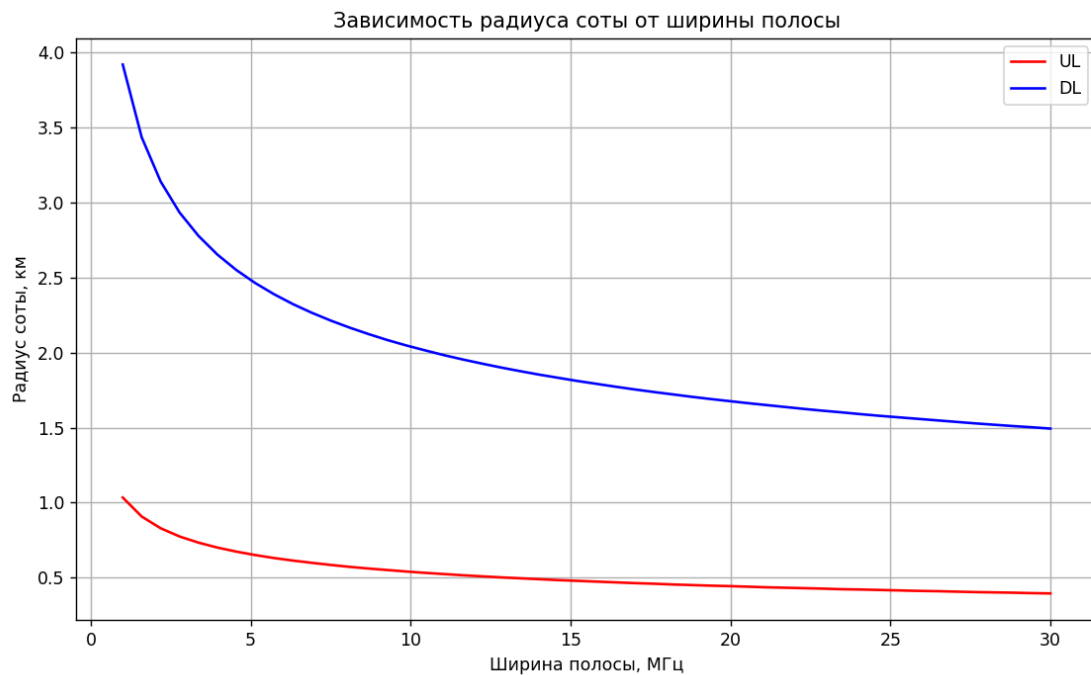
$$ThermalNoise = k * T * Bw = 10 * \log_{10}(k * T * Bw) + 30$$

(+ 30 для перевода с dbw в dbm)

Нужно определить минимальное расстояние, при котором потери впервые превышают допустимый уровень - это расстояние и есть радиус покрытия базовой станции. И смотреть значения при разной температуре/ширине полосы.



Из графика видно, что при увеличении температуры окружающей среды радиус соты уменьшается. Это связано с ростом теплового шума приёмника: повышение температуры увеличивает уровень собственных шумов, из-за чего ухудшается чувствительность ($RxSens$ становится выше), $MAPL$ уменьшается, и сигнал быстрее затухает.



При увеличении ширины полосы частот также наблюдается уменьшение радиуса соты. Чем шире полоса, тем больше суммарная мощность теплового шума и тем выше чувствительность приёмника. В результате MAPL уменьшается, а радиус покрытия сокращается.

ВЫВОДЫ

В ходе лабораторной работы были рассчитаны максимально допустимые потери сигнала (MAPL) в восходящем и нисходящем каналах, построены зависимости потерь радиосигнала от расстояния для трёх моделей распространения: UMi NLOS, Walfish-Ikegami и COST231 Hata.

На основе выбранной модели определены радиусы соты в uplink и downlink, рассчитана площадь покрытия одной базовой станции и количество базовых станций, необходимое для обеспечения непрерывного покрытия заданной территории.

Также исследовано влияние температуры и ширины полосы частот на радиус покрытия. Выявлено, что при увеличении температуры или расширении полосы частот тепловой шум возрастает, что приводит к снижению чувствительности приёмников и уменьшению радиуса соты.

КОД

Ссылка на [github](#)



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

Free Space Path Model (FSPM), Okumura–Hata, её модификация COST231 Hata, а также Walfish–Ikegami и UMi LOS/NLOS для микро- и фемтосот.

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

Мощность передатчика, потери фидера, усиление антенн, потери на проникновение и интерференцию, чувствительность приёмника, MIMO-усиление.

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

У базовой станции ниже коэффициент шума и выше усиление антенны, чем у пользовательского устройства.

- 4) Что такое тепловой шум и как он определяется?

Тепловой шум - собственный шум электронных компонентов, определяется как

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

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

Радиус соты определяется направлением с меньшей дальностью передачи. Обычно ограничивающим является восходящий канал (UL), так как мощность передатчика UE меньше, чем у базовой станции, и чувствительность BS играет решающую роль.

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

Потери складываются из затухания в кабелях, соединителях, разъёмах, ответвителях и коммутаторах антенно-фидерной системы.