

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ  
КОММУНИКАЦИЙ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Кафедра телекоммуникационных систем и вычислительных средств  
(ТС и ВС)

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*

*И.А. Иванов*

Предподаватель:  
*Заведующая кафедрой ТВ и ВС*

*В.Г Дроздова*

Новосибирск 2025 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ .....	4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	5
1.1 Бюджет канала .....	5
1.2 Параметры модели .....	5
1.2.1 FEEDER_LOSS .....	6
1.3 Расчет бюджета восходящего канала .....	6
1.3.1 Расчет бюджета нисходящего канала .....	7
1.4 Виды моделей распространения сигнала .....	10
1.4.1 FSPM (Free Space Path Model) .....	10
1.4.2 Модель UMinLOS (Urban Micro Non-Line-of-Sight).....	10
1.4.3 Модель Окумура-Хата и ее модификация COST231.....	10
1.4.4 Выбор нужной модели .....	11
1.4.5 Расчет радиуса соты .....	12
1.4.6 Вычисление площади, покрываемой базовой станцией.	12
1.5 Исходные данные .....	13
1.5.1 Параметры модели.....	13
2 ПРАКТИКА .....	14
2.1 Расчет бюджета UL канала .....	14
2.1.1 Расчет моделей распространения .....	15
2.1.2 Визуализация моделей распространения .....	16
2.2 Определение радиуса соты .....	18
2.2.1 Код определения радиуса .....	18
2.2.2 Нахождение радиусов пересечения.....	18
2.2.3 Вычисление площади покрытия базовой станции .....	20
2.3 Вычисление количества базовых станций .....	20
3 РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ .....	21
3.1 Основные результаты .....	21
3.2 Выводы по результатам .....	21
4 ВЫВОД .....	23

5	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	24
5.1	1. Почему при расчете бюджета канала необходимо учитывать как UL, так и DL направления? .....	24
5.2	2. Какие факторы влияют на выбор модели распространения сигнала?.....	24
5.3	3. Как MIMO технология влияет на бюджет канала? .....	24
5.4	4. Почему радиус покрытия для UL канала меньше, чем для DL? .....	25
6	ССЫЛКА НА РЕПОЗИТОРИЙ .....	26

## 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. Выполнить 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 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. Составить отчет.

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

## 1.1 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.

## 1.2 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 препятствия (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)

##### 1.2.1 **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-фидерном тракте в среднем потеряется 2.9db мощности. При этом MIMO с двумя передающими антеннами позволяет усилить сигнал на 3db или в 2 раза (MIMO Gain). 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.

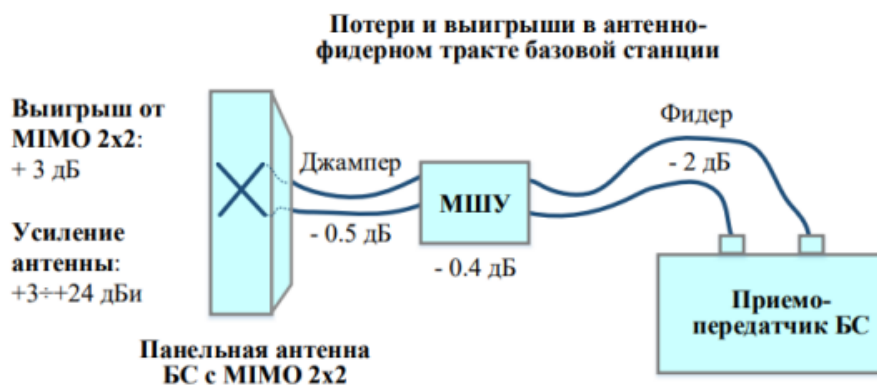


Рис. 2.4. Усиление и ослабление сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции.

Рисунок 1 — Антенно-фидерный тракт

### 1.3 Расчет бюджета восходящего канала

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

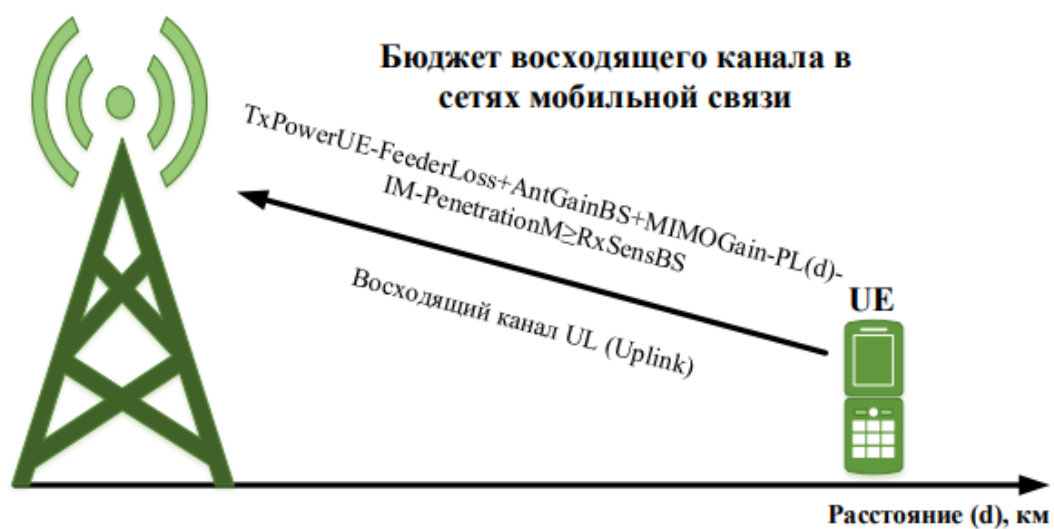
Сигнал излучается абонентским терминалом с мощностью  $UE\_POWER$ , далее сигнал попадает в радиоканал, где он будет нести потери мощности из-за  $PENETRATION$ ,  $IM$ ,  $BS\_FEEDER\_LOSS$ ,  $PL(d)$  (затухание из-за расстояния), но усилится на базовой станции за счет  $BS\_MIMO\_GAIN$  и  $BS\_ANTENNA\_GAIN$ . 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 этого 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 RXsens - минимальный требуемый уровень радиосигнала, при котором возможно успешное декодирование битов данных. RXsens 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 RXsens. 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.

### 1.3.1 Расчет бюджета нисходящего канала

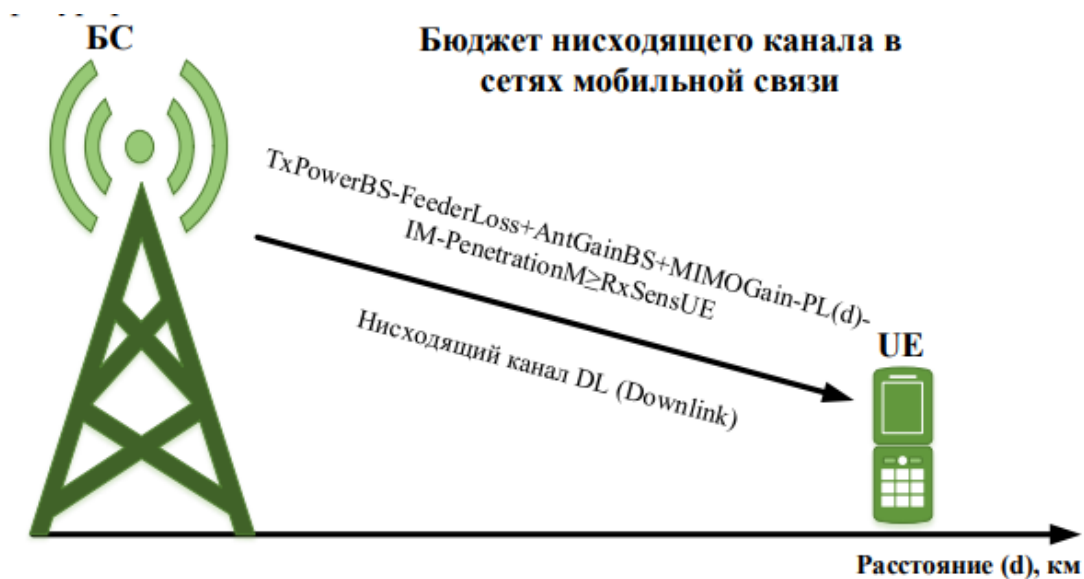
Расчеты для DL канала во многом схожи с расчетами для UL канала, за тем исключением, что теперь сигнал идет от базовой станции к абоненту, соответственно  $UE\_POWER$  заменится на  $BS\_POWER$ , а  $rx\_bs\_sens$  на  $rx\_ue\_sens$ .



**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

Рисунок 2 — Формула для расчета бюджета восходящего канала





**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

Рисунок 3 — Формула для расчета бюджета нисходящего канала

## 1.4 Виды моделей распространения сигнала

### 1.4.1 FSPM (Free Space Path Model)

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

### 1.4.2 Модель UMinLOS (Urban Micro Non-Line-of-Sight)

Рассчитывается по формуле:

$$PL(d) = 26 \cdot \log_{10}(f) + 22.7 + 36.7 \cdot \log_{10}(d)$$

Применяется в условиях размещения точек доступа/небольших сот в помещениях (Indoor).

### 1.4.3 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.

Рассчитывается 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, зависящие от частоты, высоты базовой станции 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 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 свободном пространстве
- Потери сигнала за счет переотражений от стен зданий
- Потери сигнала за счет переотражений от крыш зданий
- Зависимость от  $\phi$  - среднего угла между направлением распространения сигнала и улицей

#### **1.4.4 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 выбрана модель COST231. Для второго случая выбрана модель UMiNLOS, поскольку она рассчитана для плотной застройки,

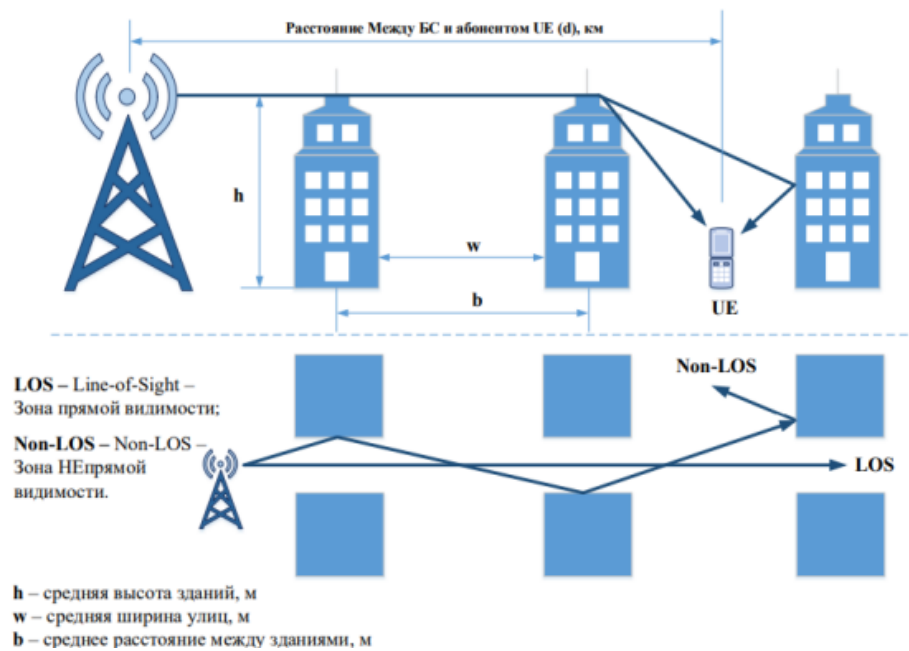


Рисунок 4 — Walfish-Ikegami model

где зачастую нет прямой видимости между БС и АТ, а также для небольших сот.

#### 1.4.5 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

#### 1.4.6 Вычисление площади, покрываемой базовой станцией

В нашем случае базовая станция имеет 3 сектора, поэтому будем использовать формулу номер 3:  $S = 1.95 \cdot R^2$ .

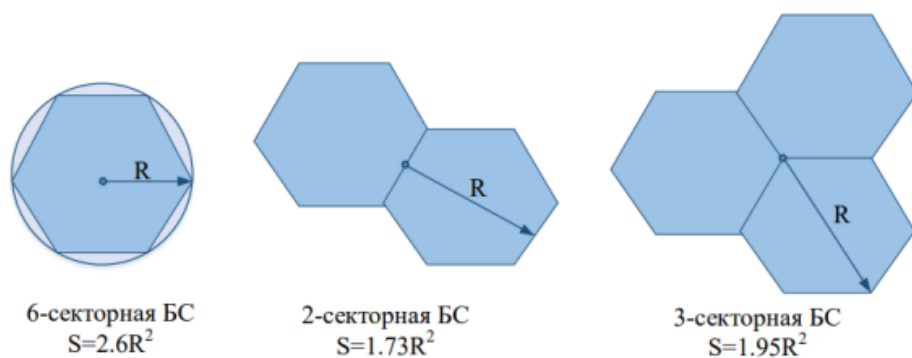


Рисунок 5 — Формулы для вычисления площади покрытия базовой станции

## 1.5 Исходные данные

### 1.5.1 Параметры модели

```

1 # Параметры системы
2 BS_POWER = 46          # дБм
3 SECTORS_BS = 3
4 UE_POWER = 24          # дБм
5 BS_ANTENNA_GAIN = 21   # дБи
6 PENETRATION = 15       # дБ
7 IM = 1                 # дБ
8 FREQ_RANGE = 1.8       # ГГц
9 UL_BW = 10             # МГц
10 DL_BW = 20            # МГц
11 BS_NOISE_COEFF = 2.4   # дБ
12 UE_NOISE_COEFF = 6     # дБ
13 DL_SINR = 2           # дБ
14 UL_SINR = 4           # дБ
15 BS_MIMO = 2
16 MIMO_GAIN = 3         # дБ
17 S = 100               # км² общая (площадь)
18 S_BLOCKAGE = 4        # км² площадь (помещений)
19 BS_FEEDER_LOSS = 2 + 0.5 + 0.4 # дБфидер ( + джампер + МШУ)

```

## ПРАКТИКА

### 2.1 Расчет бюджета UL канала

#### Код расчета

```
1
2 thermal_noise = -174 + 10 * np.log10(UL_BW * 10**6)
3
4 rx_bs_sens = BS_NOISE_COEFF + thermal_noise + UL_SINR
5
6 MAPL_UL = (UE_POWER - IM - PENETRATION + BS_ANTENNA_GAIN +
7            MIMO_GAIN - BS_FEEDER_LOSS - rx_bs_sens)
8
9 print(f"UL параметры:")
10 print(f"Тепловой шум: {thermal_noise:.2 f} дБм")
11 print(f"Чувствительность БС: {rx_bs_sens:.2 f} дБм")
12 print(f"MAPL_UL: {MAPL_UL:.2 f} дБ")
```

#### Расчет бюджета DL канала

```
1 # Расчетбюджетанисходящегооканала
2 rx_ue_sens = UE_NOISE_COEFF + thermal_noise + DL_SINR
3
4 MAPL_DL = (BS_POWER - BS_FEEDER_LOSS + BS_ANTENNA_GAIN +
5            MIMO_GAIN - IM - PENETRATION - rx_ue_sens)
6
7 print(f"DL параметры:")
8 print(f"Тепловой шум: {thermal_noise:.2 f} дБм")
9 print(f"Чувствительность UE: {rx_ue_sens:.2 f} дБм")
10 print(f"MAPL_DL: {MAPL_DL:.2 f} дБ")
```

#### Результаты расчетов MAPL

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,

Параметр	Значение
Тепловой шум (UL)	-104.00 дБм
Чувствительность БС (RxSens_UL)	-97.60 дБм
<b>MAPL_UL</b>	<b>116.60 дБ</b>
Тепловой шум (DL)	-101.00 дБм
Чувствительность UE (RxSens_DL)	-93.00 дБм
<b>MAPL_DL</b>	<b>150.00 дБ</b>

Таблица 1 — Результаты расчета MAPL для UL и DL каналов

нежели телефон, поэтому сигнал от базовой станции может ”позволить”себе больше потерь.

### 2.1.1 Расчет моделей распространения

#### FSPM модель

```

1 d = np.arange(0, 15001, 1) # расстояниеот 0 до 15000 м
2 lambda_val = (3*10**8) / (FREQ_RANGE * 10**9) # длинаволны
3
4 pl_FSPM_func = lambda d, lam: 10 * np.log10((4 * np.pi * d /
    lam)**2)
5 pl_FSPM = pl_FSPM_func(d, lambda_val)

```

#### UMiNLOS модель

```

1 pl_UMiNLOS_func = lambda d: 26 * np.log10(FREQ_RANGE) + 22.7 +
    36.7 * np.log10(d)
2 pl_UMiNLOS = pl_UMiNLOS_func(d)

```

#### COST231 модель

```

1 hBS = 100 # метров
2 hMS = 1 # метров
3 A = 46.3
4 B = 33.9
5 a = 3.2 * (np.log10(11.75 * hMS))**2 - 4.97
6 Lclutter = 0 # длягородскойсреды

```

```

7
8 def s_param(d_km, hBS, freq_GHz):
9     if d_km >= 1:
10         return 44.9 - 6.55 * np.log10(freq_GHz * 10**3)
11     else:
12         return (47.88 + 13.9 * np.log10(freq_GHz * 10**3) -
13                 13.9 * np.log10(hBS)) / np.log10(50)
14
15 pl_COST_func = lambda d: (A + B * np.log10(FREQ_RANGE * 10**3) -
16                             13.82 * np.log10(hBS) - a +
17                             s_param(d/1000, hBS, FREQ_RANGE) *
18                             np.log10(d/1000) +
19                             Lclutter)
20 pl_COST = pl_COST_func(d)

```

## Walfish-Ikegami модель

```

1 def pl_WI_func(freq_GHz, d):
2     w = 24.5          # средняя длина улиц
3     dh = 30           # средняя разница между высотой БС и крыш
4     phi = 45          # угол между улицей и направлением сигнала
5     b = 60            # среднее расстояние между зданиями
6
7     d_km = d / 1000
8     L0 = 32.44 + 20 * np.log10(freq_GHz * 10**3) + 20 *
9         np.log10(d_km)
10    L1 = (-16.9 - 10 * np.log10(w) + 10 * np.log10(freq_GHz *
11        10**3) +
12        20 * np.log10(dh) + 2.5 * 0.075 * phi)
13    L2 = (-18 * np.log10(1 + dh) + 54 + 18 * np.log10(d_km) +
14        (-4 + 0.7 * ((freq_GHz * 10**3) / 925 - 1)) *
15        np.log10(freq_GHz * 10**3) - 9 * np.log10(b))
16
17    return L0 + L1 + L2
18
19 pl_WI = pl_WI_func(FREQ_RANGE, d)

```

## 2.1.2 Визуализация моделей распространения

```

1 # Построение графика моделей распространения

```



```

2 plt.figure(figsize=(12, 8))
3 plt.plot(d/1000, pl_FSPM, 'b-', label='FSPM модель', linewidth=1)
4 plt.plot(d/1000, pl_UMiNLOS, 'g-', label='UMiNLOS модель',
5         linewidth=2)
6 plt.plot(d/1000, pl_COST, 'r-', label='COST231 модель',
7         linewidth=2)
8 plt.plot(d/1000, pl_WI, 'm-', label='Walfish-Ikegami модель',
9         linewidth=2)
10
11 plt.xlabel('Расстояние, км')
12 plt.ylabel('Потери сигнала, дБ')
13 plt.title('Модели распространения сигналов')
14 plt.grid(True, alpha=0.3)
15 plt.legend()
16 plt.xlim(0, 15)
17 plt.ylim(60, 180)
18 plt.show()

```

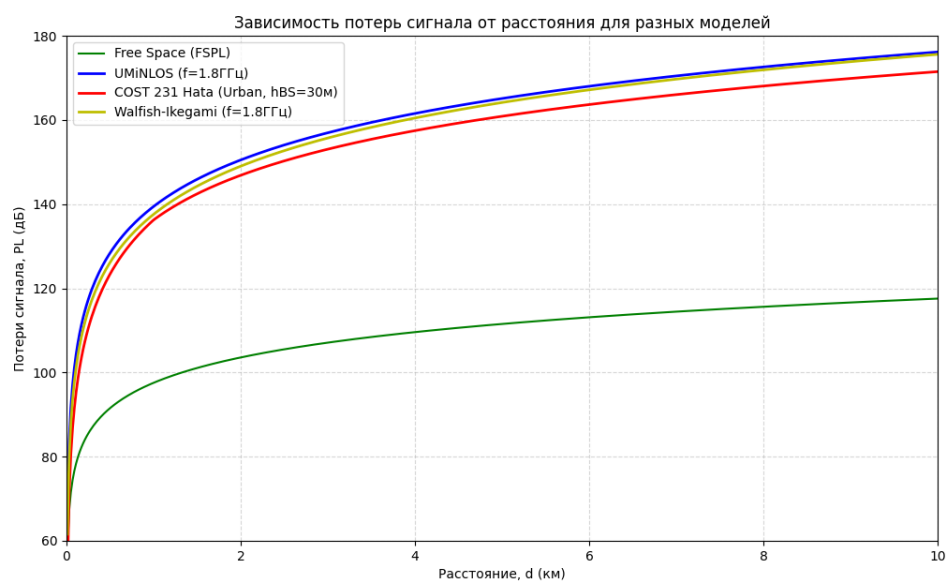


Рисунок 6 — Сравнение моделей

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.

## 2.2 Определение радиуса соты

### 2.2.1 Код определения радиуса

```
1 # Построение графика линиями MAPL
2 plt.figure(figsize=(12, 8))
3 plt.plot(d/1000, pl_UMiNLOS, 'g-', label='UMiNLOS модель',
4         linewidth=2)
5
6 # Линии MAPL
7 plt.axhline(y=MAPL_UL, color='blue', linestyle='--',
8             label=f'MAPL_UL = {MAPL_UL:.1f} дБ', linewidth=2)
9 plt.axhline(y=MAPL_DL, color='orange', linestyle='--',
10            label=f'MAPL_DL = {MAPL_DL:.1f} дБ', linewidth=2)
11
12 plt.xlabel('Расстояние, км')
13 plt.ylabel('Потери сигнала, дБ')
14 plt.title('Определение радиуса соты по MAPL')
15 plt.grid(True, alpha=0.3)
16 plt.legend()
17 plt.xlim(0, 10)
18 plt.ylim(80, 180)
19 plt.show()
```

### 2.2.2 Нахождение радиусов пересечения

```
1 from scipy.interpolate import interp1d
2
3 # Для COST231 модели
4 f_cost = interp1d(pl_COST, d/1000)
5 R_COST_UL = f_cost(MAPL_UL)
6 R_COST_DL = f_cost(MAPL_DL)
7
8 # Для UMiNLOS модели
```

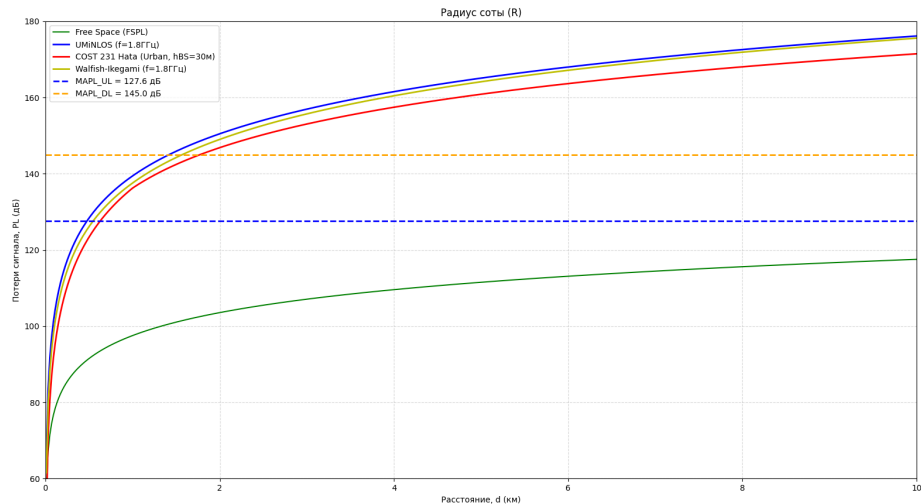


Рисунок 7 — Определение радиуса соты

```

9 f_umi = interp1d(pl_UMiNLOS, d/1000)
10 R_UMiNLOS_UL = f_umi(MAPL_UL)
11 R_UMiNLOS_DL = f_umi(MAPL_DL)
12
13 print(f"Радиусы для COST231 модели:")
14 print(f"  UL: {R_COST_UL:.2 f} км")
15 print(f"  DL: {R_COST_DL:.2 f} км")
16
17 print(f"\Радиусы для UMiNLOS модели:")
18 print(f"  UL: {R_UMiNLOS_UL:.2 f} км")
19 print(f"  DL: {R_UMiNLOS_DL:.2 f} км")
20
21 # Выбор минимальных радиусов
22 R_final_COST = min(R_COST_UL, R_COST_DL)
23 R_final_UMiNLOS = min(R_UMiNLOS_UL, R_UMiNLOS_DL)
24
25 print(f"\Финальные радиусы соты :")
26 print(f" По COST231: {R_final_COST:.2 f} км")
27 print(f" По UMiNLOS: {R_final_UMiNLOS:.2 f} км")

```

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

### 2.2.3 Вычисление площади покрытия базовой станции

```
1 R_ULOS = R_final_UMiNLOS
2 R_COST = R_final_COST
3
4 S_ULOS = 1.95 * R_ULOS**2
5 S_COST = 1.95 * R_COST**2
6
7 print(f"Площадь покрытия одной БС :")
8 print(f"По UMiNLOS модели: {S_ULOS:.6 f} км2")
9 print(f"По COST231 модели: {S_COST:.6 f} км2")
```

После выполнения программы получим  $S\_ULOS = 0.394875 \text{ км}^2$ ,  $S\_COST = 1.248000 \text{ км}^2$ .

### 2.3 Вычисление количества базовых станций

```
1 # Вычисление количества БС
2 S1 = 100 # км2 общая (площадь)
3 S2 = 4 # км2 площадь (помещений)
4
5 countBS_ULOS = np.ceil(S2 / S_ULOS)
6 countBS_COST = np.ceil(S1 / S_COST)
7
8 print(f"Количество БС для покрытия территории :")
9 print(f"Для помещений (4 км2) по UMiNLOS: {int(countBS_ULOS)} шт.")
10 print(f"Для открытой местности (100 км2) по COST231: {int(countBS_COST)} шт.")
```

В результате получим  $\text{countBS\_ULOS} = 11$ ,  $\text{countBS\_COST} = 81$ . Это значит, что для покрытия  $100 \text{ км}^2$  площади городской застройки (неплотной) понадобится примерно 81 базовая станция, если считать по модели COST231. Для покрытия  $4 \text{ км}^2$  площади торговых и бизнес центров понадобится 11 базовых станций, если считать по модели UMiNLOS.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

### 3.1 Основные результаты

Параметр	COST231 модель	UMiNLOS модель
MAPL_UL	116.60 дБ	116.60 дБ
MAPL_DL	150.00 дБ	150.00 дБ
Радиус UL	0.80 км	0.45 км
Радиус DL	5.15 км	1.60 км
Финальный радиус	0.80 км	0.45 км
Площадь одной БС	1.248 км <sup>2</sup>	0.395 км <sup>2</sup>
Кол-во БС для 100 км <sup>2</sup>	81 шт.	-
Кол-во БС для 4 км <sup>2</sup>	-	11 шт.

Таблица 2 — Сводные результаты расчетов

### 3.2 Выводы по результатам

1. Бюджет канала успешно рассчитан для обоих направлений связи. MAPL\_DL (150.00 дБ) превышает MAPL\_UL (116.60 дБ), что объясняется большей мощностью передачи базовой станции по сравнению с абонентским устройством.
2. Проанализированы четыре модели распространения сигнала: FSPM (идеализированная), UMiNLOS (для помещений), COST231 (для городской среды) и Walfish-Ikegami (для плотной городской застройки).
3. Для проектирования покрытия выбраны:
  - Модель COST231 для открытой территории площадью 100 км<sup>2</sup>
  - Модель UMiNLOS для помещений площадью 4 км<sup>2</sup>
4. Радиус соты лимитируется восходящим каналом (UL), так как мощность передачи абонентских устройств ограничена.
5. Для обеспечения непрерывного покрытия потребуется:

- 81 базовая станция для открытой территории (по модели COST231)
  - 11 базовых станций для помещений (по модели UMiNLOS)
6. Полученные результаты соответствуют теоретическим ожиданиям и могут быть использованы для практического проектирования сетей мобильной связи.

## ВЫВОД

В ходе работы были успешно выполнены все поставленные задачи:

1. Рассчитаны бюджеты восходящего и нисходящего каналов, определены  $MAPL\_UL = 116.60$  дБ и  $MAPL\_DL = 150.00$  дБ.
2. Построены зависимости потерь сигнала от расстояния для четырех моделей распространения.
3. Выбраны соответствующие модели для разных типов территории: COST231 для открытой местности и UMiNLOS для помещений.
4. Определены радиусы покрытия: 0.80 км для COST231 и 0.45 км для UMiNLOS.
5. Рассчитано необходимое количество базовых станций: 81 для открытой территории и 11 для помещений.

Работа позволила получить практические навыки проектирования покрытия сетей мобильной связи, понимания принципов расчета бюджета канала и выбора моделей распространения сигнала в различных условиях.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

### 5.1 1. Почему при расчете бюджета канала необходимо учитывать как UL, так и DL направления?

Необходимость учета обоих направлений связана с тем, что в системах мобильной связи является дуплексной, и качество связи должно обеспечиваться в обоих направлениях. Мощность передачи базовой станции и абонентского устройства различаются, поэтому потери, которые может преодолеть сигнал, также различны. Обычно лимитирующим является uplink, так как мощность мобильного устройства ограничена.

### 5.2 2. Какие факторы влияют на выбор модели распространения сигнала?

- Тип местности (город, пригород, сельская местность)
- Наличие прямой видимости между передатчиком и приемником
- Высота установки антенн
- Частотный диапазон
- Плотность застройки
- Размер покрываемой территории

### 5.3 3. Как MIMO технология влияет на бюджет канала?

MIMO (Multiple Input Multiple Output) технология позволяет:

- Увеличить коэффициент усиления за счет пространственного разнесения
- Компенсировать потери в антенно-фидерном тракте
- Улучшить отношение сигнал/шум
- Повысить пропускную способность канала

В данной работе MIMO обеспечивает усиление 3 дБ, что частично компенсирует потери в фидерном тракте.



#### **5.4 4. Почему радиус покрытия для UL канала меньше, чем для DL?**

Радиус покрытия для UL канала меньше из-за ограниченной мощности передачи мобильных устройств (24 дБм против 46 дБм у базовой станции). Это означает, что сигнал от абонентского устройства быстрее затухает и не может преодолеть такие же расстояния, как сигнал от базовой станции.

## ССЫЛКА НА РЕПОЗИТОРИЙ



Рисунок 8 — Репозиторий