

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 дисциплине  
*«Основы систем мобильной связи»*

по теме:  
ЗАНЯТИЕ №2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОПОКРЫТИЯ МОБИЛЬНЫХ  
СЕТЕЙ. МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ. БЮДЖЕТЫ  
КАНАЛОВ.

Студент:  
*Группа № ИА331*

*В.А. Павлова*

Предподаватель:  
*В.Г. Дроздова*

Новосибирск 2025 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1	ЗАНЯТИЕ №2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОПОКРЫТИЯ МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ. МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ. БЮДЖЕТЫ КАНАЛОВ .....	4
1.1	Цель работы .....	4
1.2	Задачи лабораторной работы .....	4
2	КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	6
2.1	Понятие радиуса соты и потерь мощности сигнала .....	6
2.1.1	Модель распространения в свободном пространстве (FSPM) .....	6
2.2	Модели распространения радиосигналов PL .....	6
2.2.1	Модель UMiNLOS (Urban Micro Non-Line-of-Sight) .....	6
2.2.2	Модель Окумура-Хата (COST231) .....	7
2.2.3	Модель Walfish-Ikegami .....	7
2.3	Особенности проектирования радиопокрытия .....	8
2.3.1	Чувствительность приемника .....	8
2.3.2	Бюджет нисходящего канала (DL) .....	8
2.3.3	Бюджет восходящего канала (UL) .....	8
2.4	Расчет радиуса и площади соты .....	9
2.4.1	Площадь покрытия базовой станции .....	9
3	ХОД РАБОТЫ .....	10
3.1	Расчёт бюджета восходящего канала (UL) .....	10
3.2	Расчёт бюджета нисходящего канала (DL) .....	11
4	ХОД РАБОТЫ .....	13
4.1	Расчёт бюджета восходящего канала (UL) .....	13
4.2	Расчёт бюджета нисходящего канала (DL) .....	14
4.3	Построение зависимостей потерь радиосигнала от расстояния .....	15
4.3.1	Исходные параметры .....	15
4.3.2	Результаты расчётов .....	16
4.4	Расчет радиуса соты .....	17

4.4.1	Расчет площади покрытия и количества базовых станций .....	18
5	ВЫВОДЫ И ОТВЕТЫ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	20
5.1	Выводы по практиктивной работе .....	20
5.2	Ответы на контрольные вопросы .....	20
6	СКРИПТЫ MATLAB .....	23
6.1	Скрипт 1 - реализация сигналов .....	23

# **1 ЗАНЯТИЕ №2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОПОКРЫТИЯ МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ. МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ. БЮДЖЕТЫ КАНАЛОВ**

## **1.1 Цель работы**

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

## **1.2 Задачи лабораторной работы**

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 потерь радиосигнала от расстояния между приемником и передатчиком по моделям распространения сигнала. Выбрать подходящую 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 вычислить требуемое количество базовых станций (сайтов) для обеспечения непрерывного покрытия на заданной территории
5. Составить отчет, содержащий:
  - титульный лист
  - содержание
  - цель и задачи работы
  - теоретические сведения
  - исходные данные
  - этапы выполнения работы со скриншотами и графиками
  - результирующие таблицы

- ответы на контрольные вопросы
- заключение
- QR-код с ссылкой на репозиторий с кодом (git)

## 2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### 2.1 Понятие радиуса соты и потерь мощности сигнала

Сигнал, формируемый базовой станцией сети мобильной связи, распространяется в пространстве и затухает пропорционально увеличению расстояния между передатчиком и приемником. 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.

#### 2.1.1 Модель распространения в свободном пространстве (FSPM)

Зависимость величины потерь мощности радиосигнала  $PL$  (Path Loss) от расстояния между приемником и передатчиком  $d$ :

$$PL_{\text{разы}} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (1)$$

$$PL_{\text{дБ}} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi df}{c} \right) \quad (2)$$

где  $f$  – частота сигнала,  $\lambda$  – длина волны.

### 2.2 Модели распространения радиосигналов PL

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

Применяется для точек доступа в помещениях (Indoor):

$$PL(d) = 26 \cdot \log_{10}(f[\text{ГГц}]) + 22.7 + 36.7 \cdot \log_{10}(d[\text{м}]) \quad (3)$$

### 2.2.2 Модель Окумура-Хата (COST231)

Используется для проектирования покрытия макросот в сетях LTE:

$$PL(d) = A + B \cdot \log_{10}(f) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_{BS}) - a + s \cdot \log_{10}(d) + L_{clutter} \quad (4)$$

где:

- $f$  – несущая частота в МГц
- $d$  – расстояние в км
- $h_{BS}$  – высота антенны БС

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

Таблица 1 — Коэффициенты А и В для модели COST231

**Параметр а:**

$$a(h_{ms}) = \begin{cases} 3.2 \cdot [\log_{10}(11.75 \cdot h_{ms})]^2 - 4.97 & \text{для DU и U} \\ [1.1 \cdot \log_{10}(f)] \cdot h_{ms} - [1.56 \cdot \log_{10}(f) - 0.8] & \text{для SU, RURAL, ROAD} \end{cases} \quad (5)$$

**Параметр  $L_{clutter}$ :**

$$L_{clutter} = \begin{cases} 3 & \text{для DU} \\ 0 & \text{для U} \\ -(2 \cdot [\log_{10}(\frac{f}{28})]^2 + 5.4) & \text{для SU} \\ -(4.78 \cdot [\log_{10}(f)]^2 - 18.33 \cdot \log_{10}(f) + 40.94) & \text{для RURAL} \\ -(4.78 \cdot [\log_{10}(f)]^2 - 18.33 \cdot \log_{10}(f) + 35.94) & \text{для ROAD} \end{cases} \quad (6)$$

### 2.2.3 Модель Walfish-Ikegami

Используется для городской застройки с ”манхэттенской” архитектурой.

**Для зоны прямой видимости (LOS):**

$$L_{LOS} = 42.6 + 20 \log_{10}(f) + 26 \log_{10}(d) \quad (7)$$

**Для зоны не прямой видимости (NLOS):**

$$L_{NLOS} = \begin{cases} L_0 + L_1 + L_2, & \text{если } L_1 + L_2 > 0 \\ L_0, & \text{если } L_1 + L_2 \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

где:

$$L_0 = 32.44 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) \quad (9)$$

$$L_2 = -16.9 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(\Delta h - h_{ms}) + \quad (10)$$

$$\begin{cases} -10 + 0.354\varphi & 0 \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075\varphi & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114\varphi & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (11)$$

## 2.3 Особенности проектирования радиопокрытия

### 2.3.1 Чувствительность приемника

$$RxSens = NoiseFigure + ThermalNoise + RequiredSINR \quad (12)$$

$$ThermalNoise = -174 + 10 \cdot \log_{10}(BW) \quad (13)$$

где  $BW$  – ширина полосы частот в Гц.

### 2.3.2 Бюджет нисходящего канала (DL)

$$\begin{aligned} TxPowerBS - FeederLoss + AntGainBS + MIMOGain \\ - MAPL_{DL} - IM - PenetrationM = RxSensUE \end{aligned} \quad (14)$$

### 2.3.3 Бюджет восходящего канала (UL)

$$\begin{aligned} TxPowerUE - FeederLoss + AntGainBS + MIMOGain \\ - MAPL_{UL} - IM - PenetrationM = RxSensBS \end{aligned} \quad (15)$$



## 2.4 Расчет радиуса и площади соты

Для определения радиуса соты необходимо найти точки пересечения  $MAPL_{UL}$  и  $MAPL_{DL}$  с кривой  $PL(d)$ . При проектировании всегда берется меньшая из величин  $d_{UL}$  и  $d_{DL}$ .

### 2.4.1 Площадь покрытия базовой станции

- 2-секторная БС:  $S = 1.73R^2$
- 3-секторная БС:  $S = 1.95R^2$
- 6-секторная БС:  $S = 2.6R^2$

### 3 ХОД РАБОТЫ

#### 3.1 Расчёт бюджета восходящего канала (UL)

Цель - определение максимально допустимые потери сигнала от абонентского устройства (UE) к базовой станции (BS).

$$\text{MAPL}_{\text{UL}} = P_{\text{UE}} - L_{\text{feeder}} + G_{\text{BS}} + G_{\text{MIMO}} - M_{\text{IM}} - M_{\text{pen}} - RxSens_{\text{BS}},$$

где:

- $P_{\text{UE}}$  — мощность передатчика абонентского устройства (UE), дБм;
- $L_{\text{feeder}}$  — потери в фидерной линии базовой станции (кабель, разъёмы), дБ;
- $G_{\text{BS}}$  — коэффициент усиления антенны базовой станции, дБи;
- $G_{\text{MIMO}}$  — выигрыш от использования пространственного разнесения (MIMO), дБ;
- $M_{\text{IM}}$  — запас на межсотовую и внутрисотовую интерференцию, дБ;
- $M_{\text{pen}}$  — запас на проникновение сигнала внутрь зданий, дБ;
- $RxSens_{\text{BS}}$  — чувствительность приёмника базовой станции, дБм.

#### Определение потерь в фидерной линии

По заданию - базовая станция «с фидерами». Вычислим значения потерь:

$$L_{\text{feeder}} = 0.5 \text{ (джампер)} + 0.4 \text{ (малошумящий усилитель)} + 2.0 \text{ (фидер)} = 2.9 \text{ дБ}.$$

#### Расчёт чувствительности приёмника базовой станции $RxSens_{\text{BS}}$

Чувствительность приёмника определяется как минимальный уровень сигнала, при котором возможно корректное декодирование.

$$RxSens_{\text{BS}} = NF_{\text{BS}} + TN_{\text{UL}} + \text{SINR}_{\text{UL}},$$

где:

- $NF_{BS} = 2.4$  дБ — коэффициент шума приёмника базовой станции;
- $TN_{UL}$  — уровень теплового шума в полосе восходящего канала, дБм;
- $SINR_{UL} = 4$  дБ — требуемое отношение «сигнал/помеха + шум» для UL.

Уровень теплового шума определяется по формуле:

$$TN_{UL} = -174 + 10 \log_{10}(BW_{UL}),$$

где:

- $BW_{UL} = 10$  МГц  $= 10 \times 10^6$  Гц — полоса пропускания восходящего канала.

Расчёты:

$$TN_{UL} = -174 + 10 \log_{10}(10 \times 10^6) = -174 + 10 \cdot \log_{10}(10^7) = -174 + 70 = -104 \text{ дБм.}$$

$$RxSens_{BS} = 2.4 + (-104) + 4 = -97.6 \text{ дБм.}$$

При использовании  $N = 2$  приёмных антенн на базовой станции:

$$G_{MIMO} = 10 \log_{10}(N) = 10 \log_{10}(2) \approx 3 \text{ дБ.}$$

### Расчет максимальных потерь

$$MAPL_{UL} = P_{UE} - L_{feeder} + G_{BS} + G_{MIMO} - M_{IM} - M_{pen} - RxSens_{BS}$$

$$MAPL_{UL} = 24 - 2.9 + 21 + 3 - 1 - 15 - (-97.6) = 29.1 + 97.6 = 126.7 \text{ дБ.}$$

$$\boxed{MAPL_{UL} = 126.7 \text{ дБ.}}$$

### 3.2 Расчёт бюджета нисходящего канала (DL)

Аналогично выполняется расчёт для нисходящего канала (от базовой станции к абоненту).

$$MAPL_{DL} = P_{BS} - L_{feeder} + G_{BS} + G_{MIMO} - M_{IM} - M_{pen} - RxSens_{UE},$$

$$TN_{\text{DL}} = -174 + 10 \log_{10}(20 \times 10^6) = -174 + 73 = -101.0 \text{ дБм},$$

$$RxSens_{\text{UE}} = NF_{\text{UE}} + TN_{\text{DL}} + \text{SINR}_{\text{DL}} = 6 + (-101.0) + 2 = -93.0 \text{ дБм}.$$

$$\text{MAPL}_{\text{DL}} = 46 - 2.9 + 21 + 3 - 1 - 15 - (-93.0) = 61.1 + 93.0 = 144.1 \text{ дБ}.$$

$$\boxed{\text{MAPL}_{\text{DL}} = 144.1 \text{ дБ}}.$$

## 4 ХОД РАБОТЫ

### 4.1 Расчёт бюджета восходящего канала (UL)

Цель - определение максимально допустимые потери сигнала от абонентского устройства (UE) к базовой станции (BS).

$$\text{MAPL}_{\text{UL}} = P_{\text{UE}} - L_{\text{feeder}} + G_{\text{BS}} + G_{\text{MIMO}} - M_{\text{IM}} - M_{\text{pen}} - RxSens_{\text{BS}},$$

где:

- $P_{\text{UE}}$  — мощность передатчика абонентского устройства (UE), дБм;
- $L_{\text{feeder}}$  — потери в фидерной линии базовой станции (кабель, разъёмы), дБ;
- $G_{\text{BS}}$  — коэффициент усиления антенны базовой станции, дБи;
- $G_{\text{MIMO}}$  — выигрыш от использования пространственного разнесения (MIMO), дБ;
- $M_{\text{IM}}$  — запас на межсотовую и внутрисотовую интерференцию, дБ;
- $M_{\text{pen}}$  — запас на проникновение сигнала внутрь зданий, дБ;
- $RxSens_{\text{BS}}$  — чувствительность приёмника базовой станции, дБм.

#### Определение потерь в фидерной линии

По заданию - базовая станция «с фидерами». Вычислим значения потерь:

$$L_{\text{feeder}} = 0.5 \text{ (джампер)} + 0.4 \text{ (малошумящий усилитель)} + 2.0 \text{ (фидер)} = 2.9 \text{ дБ.}$$

#### Расчёт чувствительности приёмника базовой станции $RxSens_{\text{BS}}$

Чувствительность приёмника определяется как минимальный уровень сигнала, при котором возможно корректное декодирование.

$$RxSens_{\text{BS}} = NF_{\text{BS}} + TN_{\text{UL}} + \text{SINR}_{\text{UL}},$$

где:

- $NF_{BS} = 2.4$  дБ — коэффициент шума приёмника базовой станции;
- $TN_{UL}$  — уровень теплового шума в полосе восходящего канала, дБм;
- $SINR_{UL} = 4$  дБ — требуемое отношение «сигнал/помеха + шум» для UL.

Уровень теплового шума определяется по формуле:

$$TN_{UL} = -174 + 10 \log_{10}(BW_{UL}),$$

где:

- $BW_{UL} = 10$  МГц  $= 10 \times 10^6$  Гц — полоса пропускания восходящего канала.

Расчёты:

$$TN_{UL} = -174 + 10 \log_{10}(10 \times 10^6) = -174 + 10 \cdot \log_{10}(10^7) = -174 + 70 = -104 \text{ дБм.}$$

$$RxSens_{BS} = 2.4 + (-104) + 4 = -97.6 \text{ дБм.}$$

При использовании  $N = 2$  приёмных антенн на базовой станции:

$$G_{MIMO} = 10 \log_{10}(N) = 10 \log_{10}(2) \approx 3 \text{ дБ.}$$

## Расчет максимальных потерь

$$MAPL_{UL} = P_{UE} - L_{feeder} + G_{BS} + G_{MIMO} - M_{IM} - M_{pen} - RxSens_{BS}$$

$$MAPL_{UL} = 24 - 2.9 + 21 + 3 - 1 - 15 - (-97.6) = 29.1 + 97.6 = 126.7 \text{ дБ.}$$

$$\boxed{MAPL_{UL} = 126.7 \text{ дБ.}}$$

## 4.2 Расчёт бюджета нисходящего канала (DL)

Аналогично выполняется расчёт для нисходящего канала (от базовой станции к абоненту).

$$MAPL_{DL} = P_{BS} - L_{feeder} + G_{BS} + G_{MIMO} - M_{IM} - M_{pen} - RxSens_{UE},$$

$$TN_{DL} = -174 + 10 \log_{10}(20 \times 10^6) = -174 + 73 = -101.0 \text{ дБм},$$

$$RxSens_{UE} = NF_{UE} + TN_{DL} + SINR_{DL} = 6 + (-101.0) + 2 = -93.0 \text{ дБм}.$$

$$MAPL_{DL} = 46 - 2.9 + 21 + 3 - 1 - 15 - (-93.0) = 61.1 + 93.0 = 144.1 \text{ дБ}.$$

$$\boxed{MAPL_{DL} = 144.1 \text{ дБ}}.$$

### 4.3 Построение зависимостей потерь радиосигнала от расстояния

Для анализа распространения радиосигнала в заданных условиях построим зависимости величины потерь от расстояния по трём моделям: UMiNLOS, COST231 Hata и Walfish-Ikegami.

#### 4.3.1 Исходные параметры

- Частота:  $f = 1,8 \text{ ГГц}$
- Высота антенны БС:  $h_{BS} = 30 \text{ м}$
- Высота антенны UE:  $h_{MS} = 1,5 \text{ м}$
- Тип местности: городская застройка (Urban)
- Параметры для модели Walfish-Ikegami:
  - Высота зданий:  $h = 20 \text{ м}$
  - Ширина улиц:  $w = 20 \text{ м}$
  - Расстояние между зданиями:  $b = 50 \text{ м}$
  - Угол:  $\varphi = 90^\circ$

### Расчёт потерь для различных моделей

#### Модель UMiNLOS

Формула для расчёта потерь в модели UMiNLOS:

$$PL_{UMi}(d) = 26 \cdot \log_{10}(f_{\text{ГГц}}) + 22,7 + 36,7 \cdot \log_{10}(d_m)$$

## Модель COST231 Hata

Для городской местности на частоте 1800 МГц используем формулу:

$$PL_{\text{Hata}}(d) = 46,3 + 33,9 \cdot \log_{10}(f) - 13,82 \cdot \log_{10}(h_{BS}) - a(h_{MS}) + [44,9 - 6,55 \cdot \log_{10}(h_{BS})] \cdot 1$$

Рассчитываем поправочный коэффициент  $a(h_{MS})$ :

$$a(h_{MS}) = (1,1 \cdot \log_{10}(f) - 0,7) \cdot h_{MS} - (1,56 \cdot \log_{10}(f) - 0,8)$$

$$a(h_{MS}) = (1,1 \cdot \log_{10}(1800) - 0,7) \cdot 1,5 - (1,56 \cdot \log_{10}(1800) - 0,8) = 0,044$$

## Модель Walfish-Ikegami

Для условий с прямой видимостью используем формулу:

$$PL_{\text{WI}}(d) = 42,6 + 20 \cdot \log_{10}(f) + 26 \cdot \log_{10}(d)$$

### 4.3.2 Результаты расчётов

На основе выполненных расчётов построена зависимость потерь радиосигнала от расстояния для трёх моделей распространения (рис. ??).

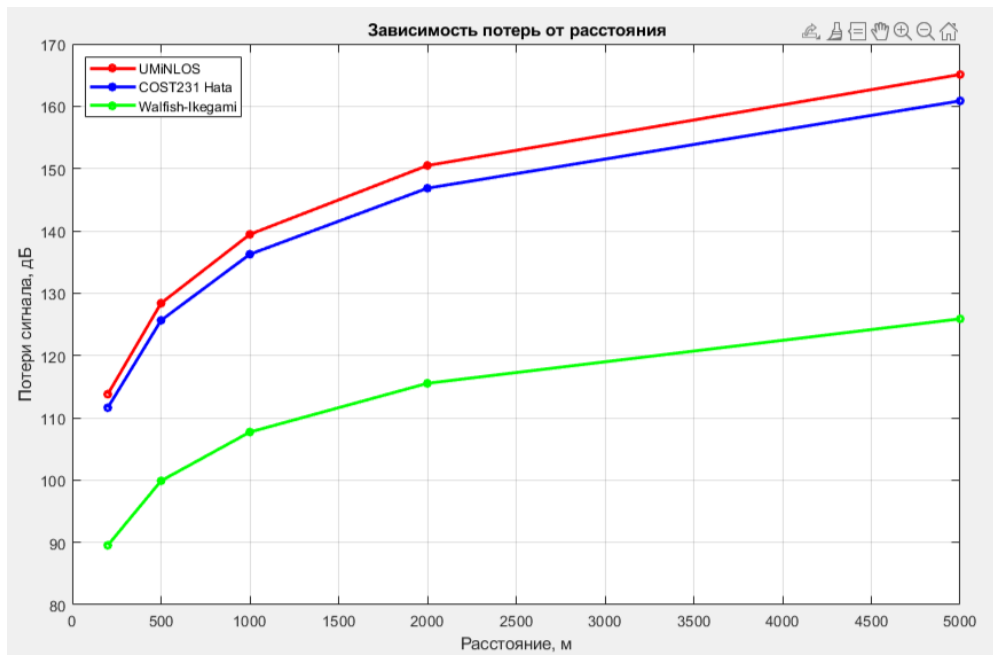


Рисунок 1 — Зависимость потерь радиосигнала от расстояния для различных моделей распространения



MAPL_DL = 144.09 дБ			
MAPL_UL = 126.70 дБ			
Зависимость потерь радиосигнала от расстояния			
Расстояние (м)	UMiNLOS (дБ)	COST231 Hata (дБ)	Walfish-Ikegami (дБ)
200	113.8	111.6	89.5
500	128.4	125.6	99.9
1000	139.4	136.2	107.7
2000	150.5	146.8	115.5
5000	165.1	160.9	125.9

Рисунок 2 — Зависимость потерь радиосигнала от расстояния для различных моделей распространения

## Выбор моделей для заданных условий

Модель UMiNLOS не подходит, потому что она рассчитана на небольшие соты в городе — например, когда антенны висят на фонарях или стенах зданий, а абоненты находятся в пределах 100–500 метров. В нашем случае речь идёт о макросотах (обычные вышки), которые покрывают большие территории — до нескольких километров, и основная зона — 100 км<sup>2</sup>. Это совсем другой масштаб.

Модель Walfish-Ikegami тоже не подходит: она считает потери так, будто между антеннами — пустота, без зданий, деревьев и холмов. В реальности сигнал всегда ослабляется сильнее, особенно в городе. Поэтому для расчёта покрытия макросот на частоте 1.8 ГГц правильно использовать модель COST 231 Hata — она специально создана для таких условий и даёт реалистичные результаты.

### 4.4 Расчет радиуса соты

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, можно найти радиусы сот. Точки пересечения MAPL\_UL и MAPL\_DL с кривой PL(d) покажут радиусы сот в UL и DL направлениях ( $d_{UL}$  и  $d_{DL}$ ). При проектировании радиопокрытия всегда берется меньшая из величин  $d_{UL}$  и  $d_{DL}$ .

Рассчитав максимально допустимые потери сигнала в обоих направлениях, получаем радиус соты в восходящем канале 550 м и в нисходящем канале 1740 м. В результате, зона действия соты ограничена радиусом 550 м.

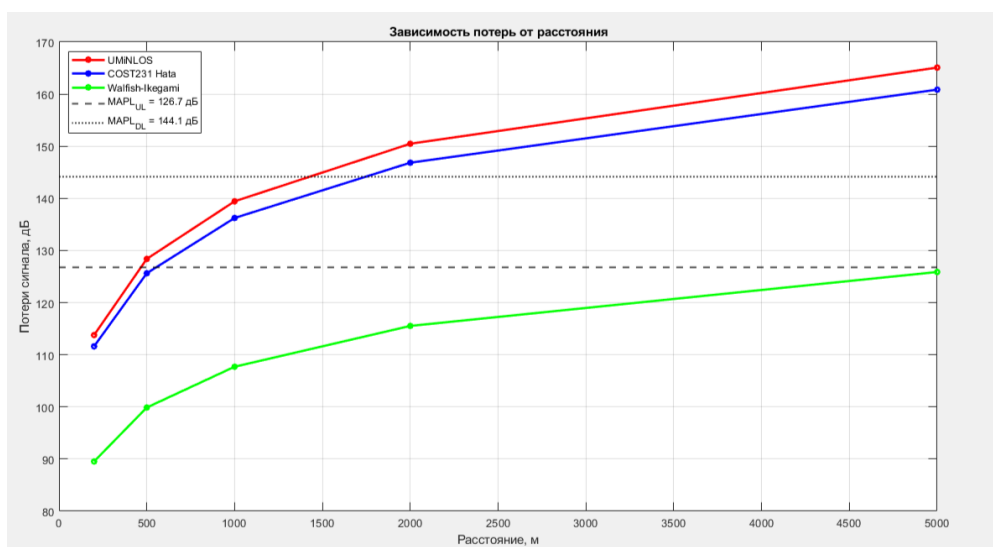


Рисунок 3 — Зависимость потерь радиосигнала от расстояния для различных моделей распространения

#### 4.4.1 Расчет площади покрытия и количества базовых станций

Так как базовая станция у нас 3-секторная, рассчитываем площадь покрытия одной базовой станции по формуле:

$$S_{\text{site}} = 1.95 \cdot R^2$$

где  $R = 0.55$  км (радиус соты).

$$S_{\text{site}} = 1.95 \cdot (0.55)^2 = 1.95 \cdot 0.3025 = 0.590 \text{ км}^2$$

Исходные данные:

– Общая площадь территории:  $S_{\text{total}} = 100 \text{ км}^2$

- Площадь микрозоны (торговые и бизнес центры):  $S_{\text{micro}} = 4 \text{ км}^2$
- Площадь макрозоны:  $S_{\text{macro}} = S_{\text{total}} - S_{\text{micro}} = 96 \text{ км}^2$

Расчет количества базовых станций:

- Количество БС для микрозоны:

$$N_{\text{micro}} = \left\lceil \frac{S_{\text{micro}}}{S_{\text{site}}} \right\rceil = \left\lceil \frac{4}{0.590} \right\rceil = \lceil 6.78 \rceil = 7$$

- Количество БС для макрозоны:

$$N_{\text{macro}} = \left\lceil \frac{S_{\text{macro}}}{S_{\text{site}}} \right\rceil = \left\lceil \frac{96}{0.590} \right\rceil = \lceil 162.71 \rceil = 163$$

- Общее количество базовых станций:

$$N_{\text{total}} = N_{\text{micro}} + N_{\text{macro}} = 7 + 163 = 170$$

Параметр	Значение
Радиус соты UL, м	550
Радиус соты DL, м	1740
Итоговый радиус соты, м	550
Площадь покрытия одной БС, км <sup>2</sup>	0.590
Площадь территории, км <sup>2</sup>	100
Площадь микрозоны, км <sup>2</sup>	4
Количество БС для микрозоны	7
Количество БС для макрозоны	163
Общее количество БС	170

Таблица 2 — Результаты расчета параметров сети

**Вывод:** Для обеспечения непрерывного покрытия территории площадью 100 км<sup>2</sup> с учетом микрозоны площадью 4 км<sup>2</sup> требуется 170 базовых станций.

## 5 ВЫВОДЫ И ОТВЕТЫ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

### 5.1 Выводы по практиктивной работе

В ходе выполнения работы был проведён расчёт бюджета радиолинии для восходящего (UL) и нисходящего (DL) каналов с учётом заданных параметров оборудования, частот, шумов, запасов на проникновение и интерференцию. Были получены значения максимально допустимых потерь сигнала:  $MAPL_{UL} = 126.7$  дБ,  $MAPL_{DL} = 144.1$  дБ.

Для анализа распространения радиоволн была выбрана модель COST 231 Hata для макросот в городских условиях на частоте 1.8 ГГц. На основе данной модели определены радиусы покрытия:

- Радиус восходящего канала: 550 м
- Радиус нисходящего канала: 1740 м

С учётом того, что базовая станция имеет 3 сектора, площадь, обслуживаемая одной БС, составила  $0.590 \text{ км}^2$ . Для обеспечения непрерывного покрытия на общей территории  $100 \text{ км}^2$  требуется 170 базовых станций. При этом на зону микросот площадью  $4 \text{ км}^2$  приходится 7 базовых станций.

Анализ показал, что в сотовых сетях восходящий канал чаще всего является ограничивающим из-за ограниченной мощности передатчика абонентского устройства, что подтверждает важность учёта параметров UE при проектировании сети.

### 5.2 Ответы на контрольные вопросы

#### 1. Какие модели распространения сигналов используются для расчёта радиопокрытия сетей мобильной связи?

Для расчёта радиопокрытия используются следующие модели распространения сигналов:

- **Модель свободного пространства (FSPM)** - теоретическая модель, учитывающая только расстояние и частоту
- **Модель UMiNLOS** - для микросот и фемтосот в городских условиях без прямой видимости

- **Модель Окумура-Хата (COST231)** - для макросот в городских и пригородных условиях
- **Модель Walfish-Ikegami** - для городской застройки

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

**Бюджет нисходящего канала (DL):**

$$MAPL_{DL} = P_{BS} - L_{feeder} + G_{BS} + G_{MIMO} - M_{IM} - M_{pen} - RxSens_{UE},$$

**Бюджет восходящего канала (UL):**

$$MAPL_{UL} = P_{UE} - L_{feeder} + G_{BS} + G_{MIMO} - M_{IM} - M_{pen} - RxSens_{BS},$$

Основные составляющие: мощность передатчика, потери в фидере, усиление антенны, выигрыш MIMO, максимально допустимые потери, запас на интерференцию и проникновение, чувствительность приемника.

**3. Чем отличается чувствительность приемника базовой станции BS и пользовательского терминала UE?**

Чувствительность приемника определяется по формуле:

$$RxSens = NoiseFigure + ThermalNoise + RequiredSINR$$

Отличия обусловлены:

- **Коэффициентом шума:** у BS 2.4 дБ, у UE 6 дБ (оборудование BS качественнее)
- **Тепловым шумом:** зависит от полосы частот (разная для UL и DL)
- **Требуемым SINR:** разный для UL (4 дБ) и DL (2 дБ) из-за различных схем модуляции и кодирования

**4. Что такое тепловой шум и как он определяется?**

Тепловой шум - это случайные электромагнитные колебания, вызванные тепловым движением заряженных частиц в проводниках и компонентах приемника.

Определяется по формуле:

$$ThermalNoise = -174 + 10 \cdot \log_{10}(BW) \quad [\text{дБм}]$$

где  $-174$  дБм/Гц - спектральная плотность мощности шума при комнатной температуре,  $BW$  - ширина полосы частот в Гц.

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

**В нисходящем канале (DL)** ограничивается мощностью передатчика базовой станции и чувствительностью приемника пользовательского терминала.

**В восходящем канале (UL)** ограничивается мощностью передатчика пользовательского терминала (значительно меньшей, чем у BS) и чувствительностью приемника базовой станции.

Как правило, восходящий канал является ограничивающим, поскольку мощность UE (24 дБм) значительно меньше мощности BS (46 дБм).

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

Потери в антенно-фидерном тракте BS составляют:

- **Потери в фидере:** 2.0 дБ (зависит от типа и длины кабеля)
- **Потери в МШУ (малошумящем усилителе):** 0.4 дБ
- **Потери в джампере:** 0.5 дБ (соединительный кабель)

При конфигурации без фидера потери сокращаются до 0.5 дБ (только джампер).

## 6 СКРИПТЫ MATLAB

### 6.1 Скрипт 1 - реализация сигналов

```
1 TxPowerBS = 46;           % дБм, мощность передатчика BS
2 TxPowerUE = 24;           % дБм, мощность передатчика UE
3 AntGainBS = 21;           % дБи, коэффициент усиления антенны BS
4 PenetrationM = 15;        % дБ, запас на проникновение
5 IM = 1;                   % дБ, запас на интерференцию
6 f = 1.8;                  % ГГц, частота
7 BW_UL = 10e6;             % Гц, полоса UL
8 BW_DL = 20e6;             % Гц, полоса DL
9 NF_BS = 2.4;              % дБ, коэффициент шума BS
10 NF_UE = 6;               % дБ, коэффициент шума UE
11 SINR_DL = 2;             % дБ, требуемое SINR для DL
12 SINR_UL = 4;             % дБ, требуемое SINR для UL
13 MIMO = 2;                % количество антенн MIMO
14 MIMOGain = 3;            % MIMO = 2 ант усилит сигнал на дБ3 или в 2 раза
15 S = 100;                 % квкм., общая площадь
16 S_trk = 4;               % квкм., площадь помещений
17
18 % Тепловой шум
19 TN_UL = -174 + 10*log10(BW_UL);
20 TN_DL = -174 + 10*log10(BW_DL);
21 % (UL)
22 RxSensBS = NF_BS + TN_UL + SINR_UL;
23 % (DL)
24 RxSensUE = NF_UE + TN_DL + SINR_DL;
25
26 feederLoss = 0.5 + 0.4 + 2;
27
28 % Бюджет DL
29 MAPL_DL = TxPowerBS - feederLoss + AntGainBS + MIMOGain - IM -
    PenetrationM - RxSensUE;
30
31 % Бюджет UL
32 MAPL_UL = TxPowerUE - feederLoss + AntGainBS + MIMOGain - IM -
    PenetrationM - RxSensBS;
33
34 fprintf('MAPL_DL = %.2f дБ\nMAPL_UL = %.2f дБ\n', MAPL_DL, MAPL_UL);
35
36 % Диапазон расстояний
```

```

37 d_m = [200, 500, 1000, 2000, 5000]; % расстояния в метрах
38 d_km = d_m / 1000;
39
40 % Параметры для моделей
41 h_BS = 30; % м, высота антенны BS
42 h_MS = 1.5; % м, высота антенны MS
43
44 % Коэффициенты для диапазона 1500-2000 МГц
45 A = 46.3;
46 B = 33.9;
47
48 % UMinLOS микросоты()
49 PL_umi = 26*log10(f) + 22.7 + 36.7*log10(d_m); % f в ГГц, d в м
50
51 %COST231
52 a_hMS = 3.2*(log10(11.75*h_MS))^2 - 4.97; % для городской местности
53 L_clutter = 0; % для городской местности
54 s = 44.9 - 6.55*log10(h_BS); % для d >= км1
55
56 PL_cost231 = A + B*log10(f*1000) - 13.82*log10(h_BS) - a_hMS + s*log10(
    d_km) + L_clutter;
57
58 % Walfish-Ikegami
59 PL_WI = 42.6 + 20 * log10(f*1000) + 26 * log10(d_km);
60
61 r_UL = 550;
62 r_DL = 1740;
63 R = min(r_UL, r_DL); % в м
64 S_site = 1.95 * (R/1000)^2;
65 site_trk = ceil(S_trk / S_site);
66 site_o = ceil(S / S_site);
67
68 fprintf('Радиус соты: %.1f м\n', R);
69 fprintf('Площадь сайта: %.3f км²\n', S_site);
70 fprintf('Общее число БС: %d\n', site_o);
71 fprintf('Число БС для микрзоны: %d\n', site_trk);
72 %% Вывод результатов в таблицу
73 fprintf('Зависимость потерь радиосигнала от расстояния\n');
74 fprintf('Расстояние | UMinLOS | COST231 Hata | Walfish-Ikegami\n');
75 fprintf(' м() | дБ() | дБ() | дБ() \n');
76 fprintf('-----|-----|-----|-----\n');
77
78 for i = 1:length(d_m)
79     fprintf(' %4d | %7.1f | %12.1f | %14.1f\n', ...

```



```

80         d_m(i), PL_umi(i), PL_cost231(i), PL_WI(i));
81 end
82
83 % Построение графика
84 figure('Position', [200, 200, 1000, 600]);
85
86 % График потерь с радиусами
87
88 plot(d_m, PL_umi, 'r-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 4, 'DisplayName'
      , 'UMiNLOS');
89 hold on;
90 plot(d_m, PL_cost231, 'b-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 4, '
      DisplayName', 'COST231 Hata');
91 plot(d_m, PL_WI, 'g-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 4, 'DisplayName',
      'Walfish-Ikegami');
92
93 % Линии MAPL
94 yline(MAPL_UL, 'k--', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', sprintf('MAPL_{
      UL} = %.1f дБ', MAPL_UL));
95 yline(MAPL_DL, 'k:', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', sprintf('MAPL_{DL
      } = %.1f дБ', MAPL_DL));
96 grid on;
97 xlabel('Расстояние, м');
98 ylabel('Потери сигнала, дБ');
99 title('Зависимость потерь от расстояния');
100 legend('Location', 'northwest');

```

Листинг 6.1 — Код лабораторной работы на MATLAB