

Министерство цифрового развития ФГБОУ ВО “СибГУТИ”

Основы систем мобильной связи

Отчет

Практическое занятие 1

Вариант 1

Проектирование радиопокрытия
мобильных сетей.

Модели распространения сигналов.
Бюджеты каналов.

Выполнил студент группы ИА-231
Готфрид Матвей

г. Новосибирск

1. Цель занятия

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

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. Очевидно, что его мощности в

какой-то момент (на каком-то удалении от передатчика) станет недостаточно

для того, чтобы корректно осуществлять сеанс передачи данных.

Предельное

расстояние, на котором возможна успешная передача данных между пользователями и базовой станцией называется радиусом соты.

Радиус соты

зависит от:

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

Для сигнала, распространяющегося в свободном пространстве, можно

определить зависимость величины потерь мощности радиосигнала PL (Path

Loss) от расстояния между приемником и передатчиком d как (2.1-2.2)

$$PL_{\text{разы}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi d f}{c}\right)^2 \quad (2.1)$$

$$PL_{\text{дБ}} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d f}{c}\right) \quad (2.2)$$

где f – это частота сигнала, а λ – длина волны. Эта модель называется моделью

распространения сигнала в свободном пространстве – FSPM (Free Space

Propagation Model). При этом очевидно, что в данной оценке величина потерь (в

разах или дБ) зависит лишь от частоты сигнала и расстояния между приемником и передатчиком. Такие модели не используют при расчете покрытия/радиуса соты в реальных сетях, так как они не учитывают многочисленные факторы, влияющие на величину потерь в радиотракте. Для более точной оценки затуханий, как правило, операторы мобильных сетей используют эмпирические модели распространения радиосигналов в пространстве.

2.2 Модели распространения радиосигналов PL

Существует множество моделей, которые предсказывают затухание радиосигнала на определенном расстоянии от передатчика для самых различных радиоусловий. Это могут быть аналитические модели, например,

2

модель свободного пространства, представленная выше (2.1-2.2), не учитывающая факторы воздействия внешней среды на сигнал, а также эмпирические, полученные опытным путем для самых разных условий и типов приемопередающих устройств (например, модели Walfish-Ikegami, Knife-Edge, Okumura, Hata, и пр.).

Рассмотрим наиболее часто используемые модели распространения сигналов для современных сетей мобильной связи. Базовые станции могут устанавливаются практически где угодно: на зданиях, в бизнес-центрах, в аэропортах, вдоль железных дорог и пр.

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

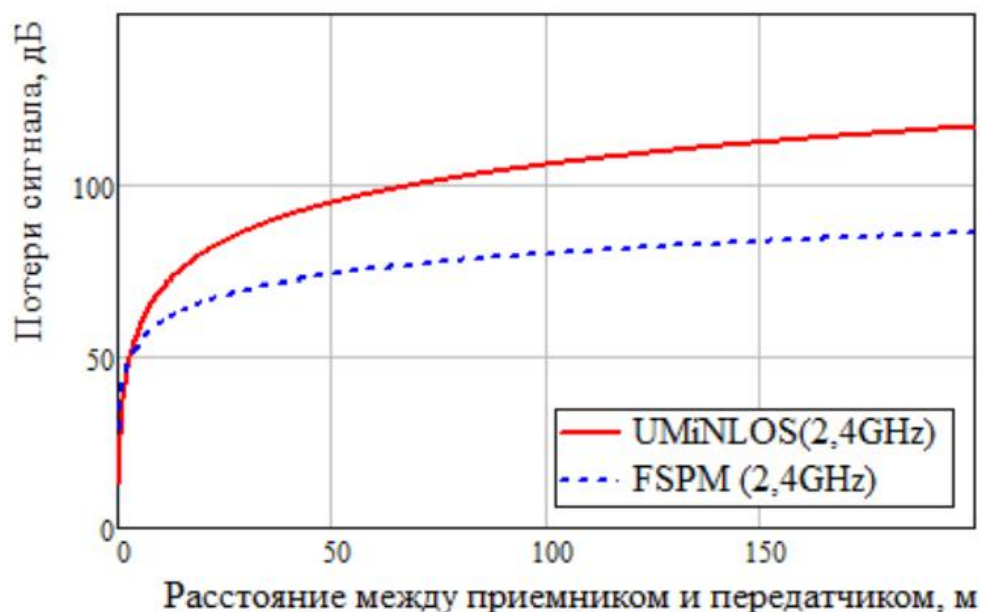
Данная модель также применяется в условиях размещения точек доступа/небольших сот в помещениях (Indoor).

Формула для расчета затуханий имеет вид (2.3):

$$PL(d) = 26 \cdot \log_{10}(f[\text{ГГц}]) + 22.7 + 36.7 \cdot \log_{10}(d[\text{м}]), \quad (2.3)$$

На рисунке 2.1 представлены полученные с помощью описанных выше моделей распространения сигнала зависимости потерь мощности радиосигнала

от расстояния между приемником и передатчиком.



2.2.2 Модель Окумура-Хата и ее модификация COST231

Данная модель распространения сигнала является одной из наиболее часто используемых моделей при проектировании покрытия макросот, например, для сетей LTE. Она применима для сетей, работающих в частотных диапазонах от 150 МГц до 2 ГГц при высоте подвеса антенны базовой станции от 30 до 200 м, высоте антенны мобильного устройства от 1 до 10 м и радиусе соты от 1 до 20 км.

3

Формула для расчета затуханий имеет вид (2.14):

$$PL(d) = A + B \cdot \log_{10}(f) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_{BS}) - a + s \cdot \log_{10}(d) + L_{clutter}, \quad (2.4)$$

где f – это несущая частота сигнала в МГц, d – расстояние между приемником и передатчиком в км, h_{BS} – высота подвеса антенны БС, $L_{clutter}$ 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

Параметр a зависит от высоты антенны мобильной станции hms , от несущей частоты f , а также от типа местности (или клаттера) и определяется по формуле (2.5):

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

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

Последняя составляющая в выражении (2.4) – это $Lclutter$, зависящая от несущей частоты f и от типа местности, определяется как (2.6):

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

Составляющая s зависит от высоты базовой станции hBS , от несущей частоты f и от расстояния между абонентом и базовой станцией d и определяется как (2.7):

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

2.2.3 Модель Walfish-Ikegami

Данная модель распространения сигнала используется при проектировании покрытия макросот в условиях городской застройки с

«манхэттенской» grid-образной архитектурой (рисунок 2.2). Она применима для

сетей, работающих в частотных диапазонах от 800 МГц до 2 ГГц (частота в

МГц в формулах) при высоте подвеса антенны базовой станции от 4 до 50 м,

высоте антенны мобильного устройства от 1 до 3 м и радиусе соты от 30 м до 6

км.

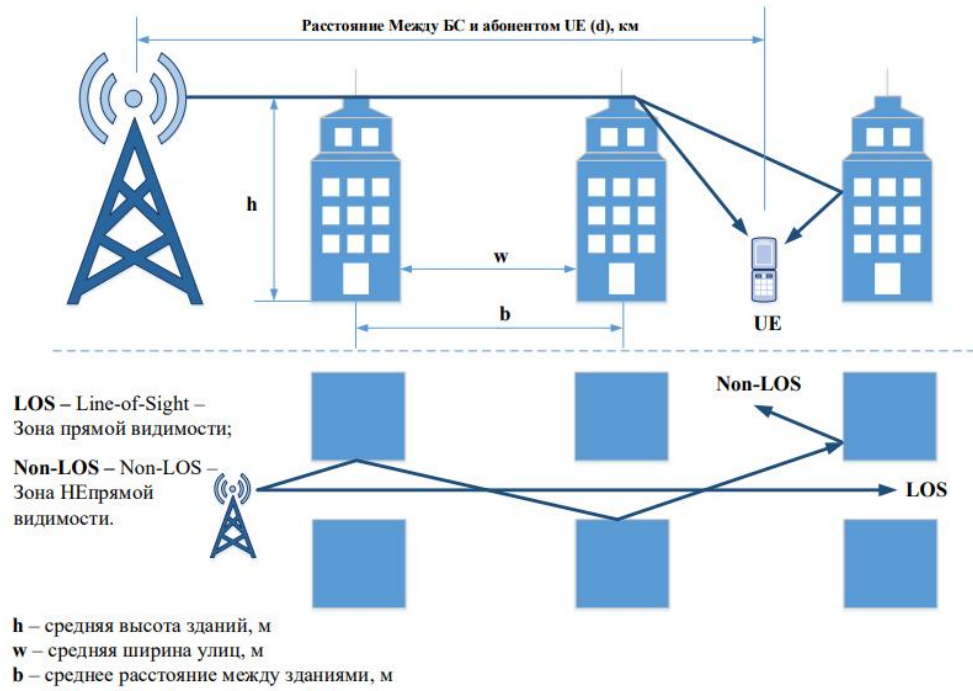


Рис. 2.2. Применение модели Walfish-Ikegami для расчета покрытия

Потери мощности радиосигнала, если абонент находится в зоне прямой видимости базовой станции (LOS) рассчитываются как (2.8):

$$L_{LOS} = 42.6 + 20\log_{10}(f) + 26\log_{10}(d). \quad (2.8)$$

При отсутствии прямой видимости между абонентом и BS, потери определяются как (2.9)-(2.16):

$$L_{NLOS} = \begin{cases} L_0 + L_1 + L_2, & \text{если } L_1 + L_2 > 0 \\ L_0, & \text{если } L_1 + L_2 \leq 0 \end{cases}, \quad (2.9)$$

где L_0 – потери сигнала в свободном пространстве, L_1 – потери сигнала за счет переотражений от стен зданий, L_2 – потери сигнала за счет переотражений от крыш зданий.

$$L_0 = 32.44 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d). \quad (2.10)$$

$$L_1 = -16.9 - 10\log_{10}(w) + 10\log_{10}(f) + 20\log_{10}(\Delta h - h_{ms}) + \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & 0 \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075\varphi & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ, \\ 4.0 - 0.114\varphi & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases}$$

(2.11)

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

$$L_2 = L_{11} + k_a + k_d\log_{10}(d) + k_f\log_{10}(f) - 9\log_{10}(b). \quad (2.12)$$

$$L_{1_1} = \begin{cases} -18\log_{10}(1 + hBS - \Delta h), & \text{если } hBS > \Delta h \\ 0, & \text{если } hBS \leq \Delta h \end{cases}. \quad (2.13)$$

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

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

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

2.3 Особенности проектирования радиопокрытия мобильных сетей

В рамках данной работы нас будут интересовать принципы расчета радиуса действия одной соты в сетях мобильной связи. При расчете радиопокрытия беспроводных точек доступа или базовых станций, нужно учитывать физические факторы, ограничивающие зону действия. Прежде всего, это чувствительность приемного устройства *RxSens* (приемника базовой станции или пользовательского терминала UE), которая вычисляется по формуле (2.17):

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

где *NoiseFigure* – коэффициент шума, который обычно указывается производителем оборудования; *RequiredSINR* – требуемое отношение мощности сигнала к мощности шумов и интерференции, зависящее от используемых схем модуляции и кодирования MCS, а также от механизмов, позволяющих снизить это значение; *ThermalNoise* – тепловой шум приемника, определяемый по формуле (2.18):

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

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

Значение *RxSens*, получаемое из выражения (2.17) – это минимальный требуемый уровень радиосигнала, при котором возможно успешное декодирование битов данных.

Для того чтобы определить, какой должен быть максимальный уровень допустимых потерь радиосигнала MAPL (Maximum Allowed Path loss), при котором будет возможно успешно декодировать данные, составляется и рассчитывается так называемый бюджет восходящего (от пользователя к точке доступа UL) и нисходящего (от точки доступа к пользователю DL) каналов.

а) Бюджет нисходящего канала (DL Link Budget)

На рисунке 2.3 показано из каких компонентов составляется бюджет нисходящего канала DL.

В неравенстве, показанном на рисунке 2.3, все входные параметры за исключением *PL(d)* являются константами. В левой части этого неравенства стоят составляющие, характеризующие реальный уровень сигнала в зависимости от расстояния *d*, в правой же – требования к уровню такого

сигнала, при котором декодирование будет осуществимо. Если приравнять левую и правую часть неравенства, мы получим уравнение (2.19), где $PL(d)$ можно заменить на $MAPL_DL$ – уже независимые от расстояния максимально допустимые потери радиосигнала, которые удовлетворяют минимальным требованиям успешного приема данных.

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

На рисунке 2.4 показано, что происходит с сигналом при прохождении через антенно-фидерный тракт. Потери сигнала во многом зависят от того, как сконфигурирована базовая станция.



TxPowerBS – Мощность передатчика базовой станции BS, дБм
FeederLoss – Уровень потерь сигнала при прохождении через фидер или джампер, дБ
AntGainBS – коэффициент усиления приемо-передающей антенны базовой станции, дБи
MIMOGain – выигрыш за счет использования MIMO, дБ
PL(d) – уровень потерь радиосигнала в зависимости от удаленности пользователя, определяемый моделью распространения сигнала, дБ
IM – запас мощности на интерференцию (Interference Margin), дБ
PenetrationM – запас сигнала на проникновение сквозь стены, дБ
RxSensUser – чувствительность приемника пользователя, дБм

Рис. 2.3. Бюджет нисходящего канала DL в сетях мобильной связи

В случае использования фидера, как правило, фидер доходит до малошумящего усилителя (МШУ), который монтируется максимально близко к антенне, а затем, с помощью соединительного джампера сигнал передается на антенну, где происходит его усиление за счет конфигурации антенны и MIMO

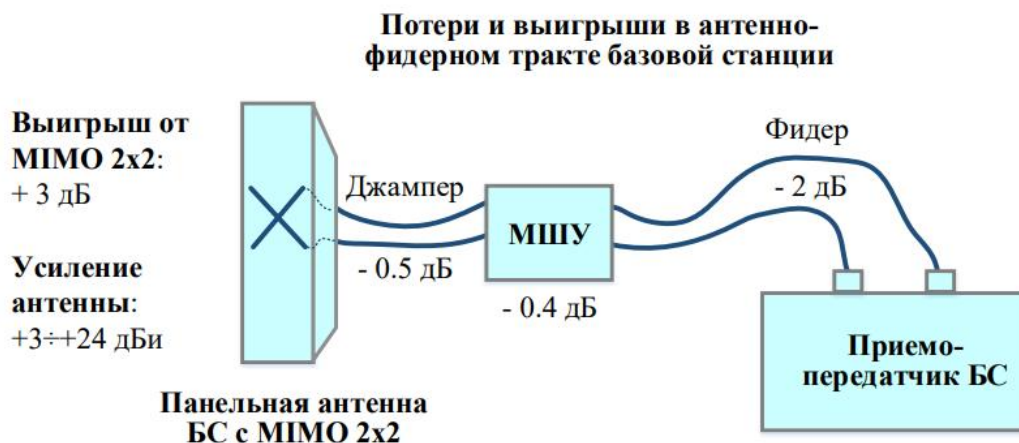
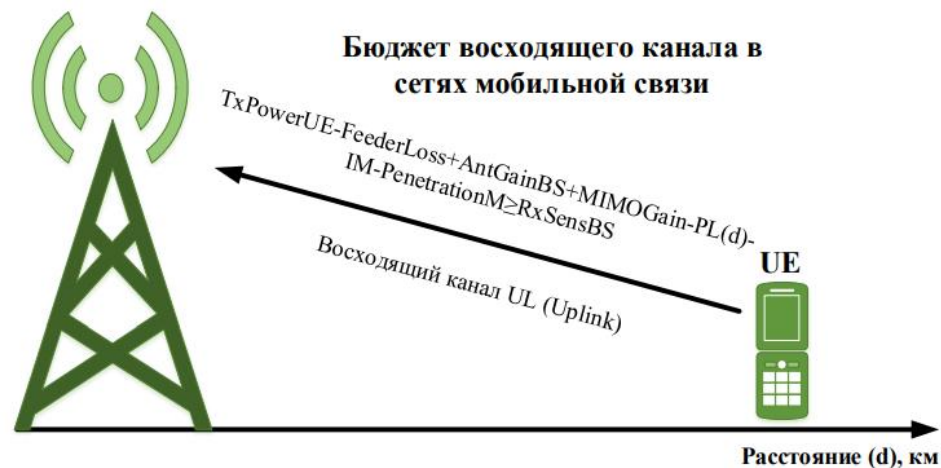


Рис. 2.4. Усиление и ослабление сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции.

Если с выхода базовой станции сигнал попадает в фидер, то там он ослабляется примерно на 2 дБ. Точное значение ослабления зависит от типа и длины фидера. Затем сигнала попадает на МШУ, где ослабляется еще на 0.4 дБ, после чего в джампере до антенны он затухает еще на 0.5 дБ. Если базовая станция сконфигурирована без фидера (приемо-передатчик близко с антенной), то потерями в антенно-фидерном тракте будут считаться только потери 0.5 дБ в джампере между приемо-передатчиком и антенной. МІМО с двумя передающими антеннами позволяет усилить сигнал на 3 дБ или в 2 раза (MIMOGain). В настоящее время бывают базовые станции и с четырьмя, и с восьмью передающими антеннами, что в свою очередь еще больше усиливает сигнал. Запас (margin) мощности сигнала на проникновения PenetrationM включает в себя не только возможные затухания сигнала при прохождении через такие препятствия как стены зданий, но и затухания в теле человека (Body penetration) при телефонном разговоре (учитывается только для голосовых сервисов). Решив уравнение (2.19), можно определить допустимые потери уровня

сигнала MAPL_DL в нисходящем канале, однако, расстояние, на котором сигнал затухнет на эту величину все еще неизвестно. Для того чтобы это выяснить, необходимо подобрать подходящую модель распространения радиосигнала (см.раздел 2.2).



TxPowerUE – Мощность передатчика абонентской станции UE, дБм
FeederLoss – Уровень потерь сигнала при прохождении через фидер или джампер, дБ
AntGainBS – коэффициент усиления приемо-передающей антенны базовой станции, дБи
MIMOGain – выигрыш за счет использования MIMO, дБ
PL(d) – уровень потерь радиосигнала в зависимости от удаленности пользователя, определяемый моделью распространения сигнала, дБ
IM – запас мощности на интерференцию (Interference Margin), дБ
PenetrationM – запас сигнала на проникновение сквозь стены, дБ
RxSensBS – чувствительность приемника BS, дБм

Рис. 2.5. Бюджет нисходящего канала UL сети мобильной связи.

Выполнение работы

```
% Параметры передатчиков и шумов
TxPowerBS = 46; % дБм, мощность передатчика BS
TxPowerUE = 24; % дБм, мощность передатчика пользователя UE
AntGainBS = 21; % дБи, коэффициент усиления антенны BS
PenetrationM = 15; % дБ, запас мощности сигнала на проникновение
IM = 1; % дБ, запас мощности на интерференцию
FR = 1.8; % ГГц, диапазон частот
BW_UL = 10; % МГц, полоса частот в UL
BW_DL = 20; % МГц, полоса частот в DL
NoiseFigure_BS = 2.4; % дБ, коэффициент шума приемника BS
NoiseFigure_UE = 6; % дБ, коэффициент шума приемника UE
RequiredSINR_DL = 2; % дБ, требуемое SINR для DL
RequiredSINR_UL = 4; % дБ, требуемое SINR для UL
```

Задаем параметры

```
% 1. Расчет бюджета восходящего канала
FeederLoss = 2.9; % дБ, потери в фидере
MIMOGain = 3; % дБ, выигрыш от MIMO
ThermalNoise_UL = -174 + 10 * log10(BW_UL * 1e6); % Тепловой шум в UL
RxSensBS = NoiseFigure_BS + 30 + ThermalNoise_UL + RequiredSINR_UL + 30; % дБм, чувствительность приемника

MAPL_UL = TxPowerUE - FeederLoss + AntGainBS + MIMOGain - IM - PenetrationM - RxSensBS;
fprintf("MAPL_UL: %f\n", MAPL_UL);

% 2. Расчет бюджета нисходящего канала
ThermalNoise_DL = -174 + 10 * log10(BW_DL * 1e6); % Тепловой шум в DL
RxSensUE = NoiseFigure_UE + 30 + ThermalNoise_DL + RequiredSINR_DL + 30; % дБм, чувствительность приемника

MAPL_DL = TxPowerBS - FeederLoss + AntGainBS + MIMOGain - IM - PenetrationM - RxSensUE;
fprintf("MAPL_DL: %f\n", MAPL_DL);
```

Рассчитываем бюджеты DL и UL

```
% 3. Модели потерь сигнала
d = linspace(0, 200, 400); % расстояние
figure;

% Модель UMiNLOS
PL_UMiNLOS = 26 * log10(FR) + 22.7 + 36.7 * log10(d);
subplot(4, 1, 1);
plot(d, PL_UMiNLOS);
xlabel('Расстояние, м');
ylabel('Потери, дБ');
title("Модель UMiNLOS");
grid on;
```

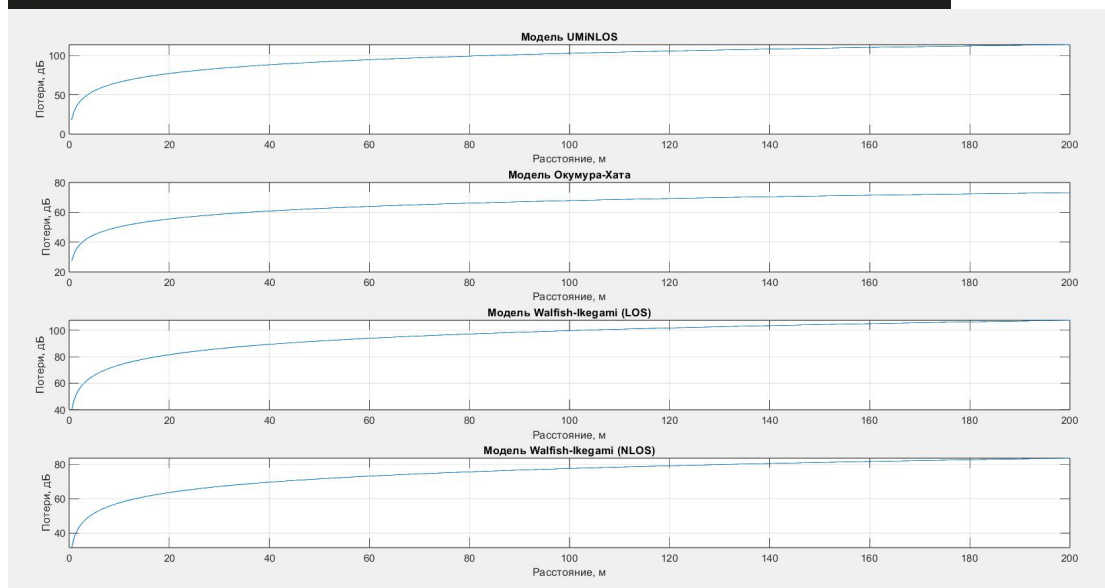
Рассчитываем модели потерь сигнала. Начнем с модели UMiNLOS

Используем приведенные в теории формулы и заданные параметры

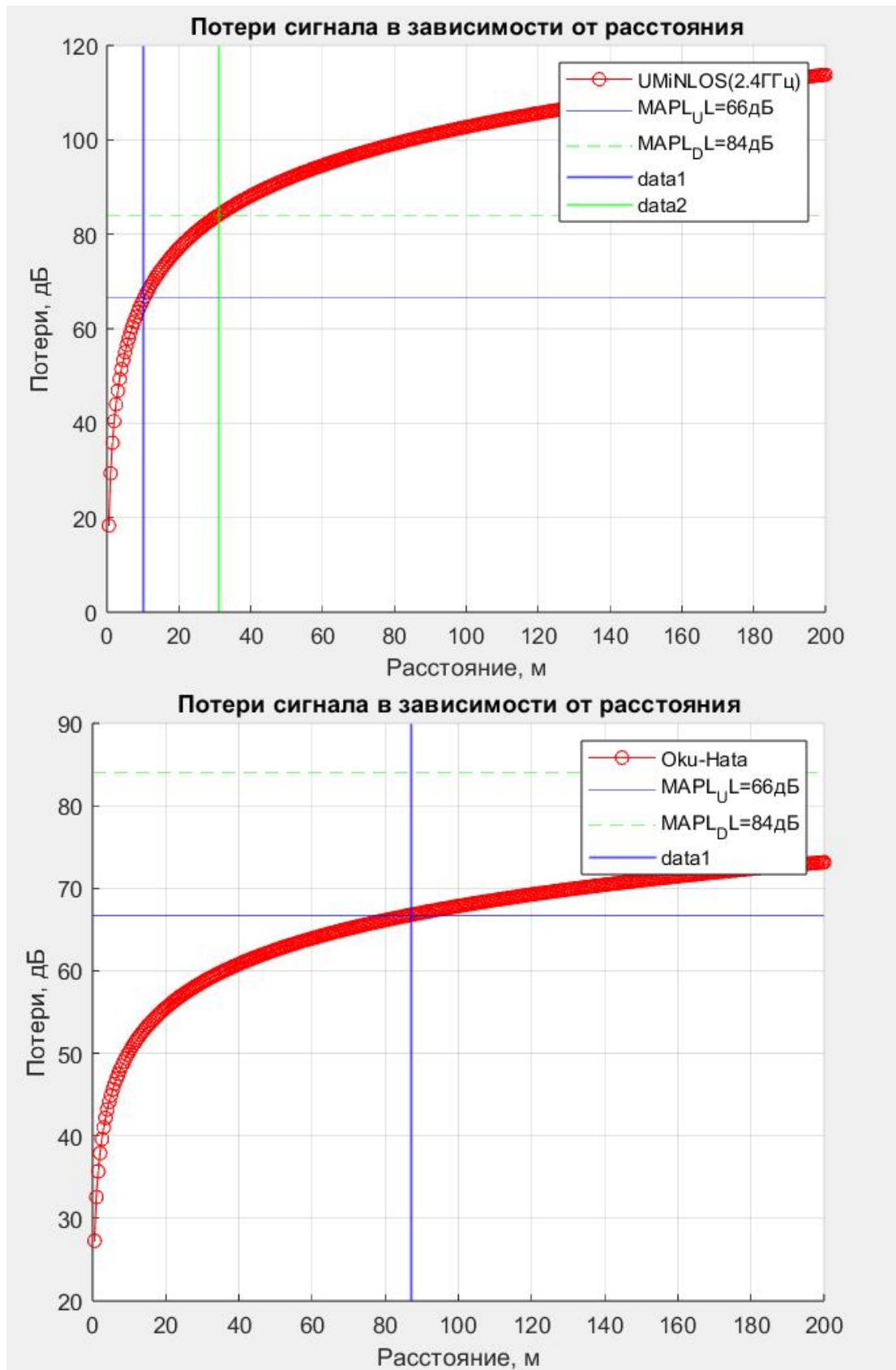
```
% Модель Окумура-Хата
A = 46.3;
B = 33.9;
hBS = 35; % высота антенны BS
hms = 2; % высота антенны пользователя
a = 3.2 * (log10(11.75 * hms))^2 - 4.97; % коэффициент

s = (47.88 + 13.9 * log10(FR) - 13.9 * log10(hBS)) * (1 / log10(50));
PL_Oku_Hata = A + B * log10(FR) - 13.82 * log10(hBS) - a + s * log10(d);
subplot(4, 1, 2);
plot(d, PL_Oku_Hata);
xlabel('Расстояние, м');
ylabel('Потери, дБ');
title("Модель Окумура-Хата");
grid on;
```

```
% Модель Walfish-Ikegami
L_LOS = 42.6 + 20 * log10(FR) + 26 * log10(d);
subplot(4, 1, 3);
plot(d, L_LOS);
xlabel('Расстояние, м');
ylabel('Потери, дБ');
title("Модель Walfish-Ikegami (LOS)");
grid on;
```



Получаем графики потерь для двух моделей



В данном случае модель OkuHata будет предпочтительнее

```
>> lab2
MAPL_UL: 66.700000
MAPL_DL: 84.089700
Площадь 1: 195.000000
Площадь 2: 14759.550000
```

Контрольные вопросы

1. Для расчета радиопокрытия сетей мобильной связи используются следующие модели распространения сигналов:

- Модель Хатчинсона (Hata Model)
- Модель Okumura-Hata
- Модель COST 231
- Модель Валентино (Valenzuela Model)
- Модель свободного пространства (Free-space model)

2. Основные составляющие бюджета восходящего (UL) и нисходящего (DL) каналов:

- Потери в свободном пространстве (Free Space Loss)
- Потери из-за преград (Diffraction and Scattering Loss)
- Потери в антенно-фидерном тракте (Feeder Loss)
- Чувствительность приемника (Receiver Sensitivity)
- Мощность передатчика (Transmitter Power)

3. Чувствительность приемника базовой станции (E) отличается от чувствительности пользовательского терминала (UE) тем, что:

- E: Обычно имеет более высокую чувствительность, что позволяет ей принимать сигналы на большем расстоянии.
- UE: Обычно имеет меньшую чувствительность из-за ограничений по размеру и потреблению энергии.

4. Тепловой шум – это шум, возникающий из-за тепловых процессов в проводниках. Он определяется температурой и сопротивлением:

$$N = k * T$$

где (N) — мощность шума (Вт), (k) — постоянная Больцмана, (T) — температура (К).

5. Радиус соты мобильных сетей в нисходящем и восходящем каналах ограничивается:

- Потерями сигнала (Signal Loss)
- Зашумленностью канала (Noise Levels)
- Мощностью передатчика (Transmitter Power)
- Чувствительностью приемника (Receiver Sensitivity)

6. Потери сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции (BS) состоят из:

- Потерь в антенне (Antenna Loss)
- Потерь в кабеле (Cable Loss)
- Потерь в соединителях (Connector Loss)
- Потерь от отражений и рассеяния (Reflection and Scattering Loss)

