

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»  
(СПбГУТ)**

---

**С. С. Владимиров**

**БЕСПРОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ  
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

**Расчет потерь на трассе радиоканала**

**Практикум**

**СПб ГУТ)))**

**Санкт-Петербург  
2020**

УДК 621.396.2 (076)

ББК 32.884.1 я73

В 57

Рецензент

профессор кафедры сетей связи и передачи данных,

доктор технических наук, профессор

*О. С. Когновицкий*

*Рекомендован к печати редакционно-издательским советом СПбГУТ*

**Владимиров, С. С.**

В 57 Беспроводные системы передачи данных. Расчет потерь на трассе радиоканала : практикум / С. С. Владимиров ; СПбГУТ. — СПб, 2020. — 32 с.

Призван ознакомить студентов старших курсов с методами расчета потерь на трассе радиоканала, применяемыми при моделировании и планировании беспроводных систем передачи данных. Представленный материал служит справочным и методическим пособием при выполнении практических работ по дисциплинам «Беспроводные системы передачи данных» и «Передача данных в беспроводных сетях».

Предназначен для студентов, обучающихся по направлениям 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

**УДК 621.396.2 (076)**

**ББК 32.884.1 я73**

© Владимиров С. С., 2020

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2020

## *Содержание*

Практическая работа 1. Расчет радиуса зоны Френеля для беспроводного канала.....	4
Практическая работа 2. Расчет потерь на трассе радиоканала по модели Хата .....	7
Практическая работа 3. Расчет потерь на трассе радиоканала по моделям Уолфиша–Икегами и Кся–Бертони .....	12
Практическая работа 4. Оценка потерь на трассе радиоканала в случае дифракции на клине при одном препятствии .....	18
Практическая работа 5. Оценка потерь на трассе радиоканала в случае дифракции на клине при двух препятствиях .....	24
Практическая работа 6. Оценка потерь на трассе радиоканала в случае дифракции на цилиндре .....	28

# Практическая работа 1

## Расчет радиуса зоны Френеля для беспроводного канала

### 1.1. Цель работы

Ознакомиться с понятием зоны Френеля, научиться рассчитывать радиус зоны Френеля и оценивать требуемую высоту размещения приемопередающего оборудования.

### 1.2. Теоретические сведения

Для эффективной связи с помощью высокочастотных волн требуется обеспечить беспрепятственную линию прямой видимости между передатчиком и приемником. При этом, вокруг прямого тракта (прямого луча) между передатчиком и приемником должно быть определенное расстояние, свободное от преград (рис. 1.1). Необходимость этого расстояния происходит от принципа Гюйгенса, согласно которому каждая точка среды, до которой доходит возмущение, сама становится источником вторичных волн, и поле излучения может рассматриваться как суперпозиция всех вторичных волн. На основе этого принципа можно показать, что объекты, лежащие внутри концентрических окружностей, проведенных вокруг линии прямой видимости двух трансиверов, могут влиять на качество как положительно, так и отрицательно. Эти концентрические окружности получили название *зон Френеля*. Все препятствия, попадающие внутрь первой окружности, первой зоны Френеля, оказывают наиболее негативное влияние.

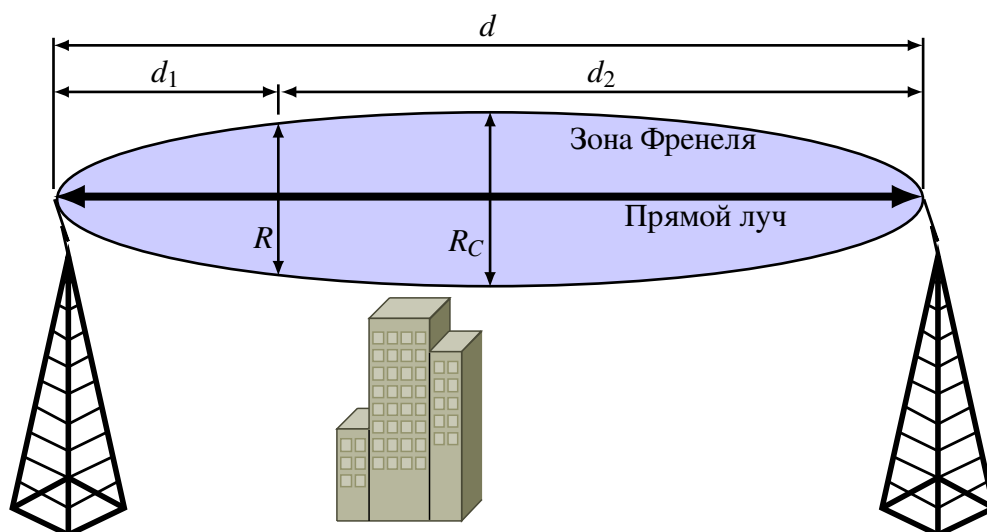


Рис. 1.1. Примерный вид зоны Френеля

Для расчета радиуса первой зоны Френеля в центральной точке между приемником и передатчиком необходимо знать расстояние между ними и частоту (длину волны), на которой работает система связи. Формула для рас-

чета имеет следующий вид:

$$R_C[\text{м}] = 17,31 \cdot \sqrt{\frac{d}{4 \cdot f}}, \quad (1.1)$$

где  $d$  — расстояние между приемником и передатчиком (км);  $f$  — рабочая частота системы (ГГц).

Если же необходимо рассчитать радиус зоны Френеля в произвольной точке на прямой между приемником и передатчиком, то формула приобретает вид

$$R[\text{м}] = 17,31 \cdot \sqrt{\frac{1}{f} \cdot \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}, \quad (1.2)$$

где  $d_1$  — расстояние от первой антенны до нужной точки (км);  $d_2$  — расстояние от второй антенны до нужной точки (км);  $f$  — рабочая частота (ГГц).

Считается, что в случае отсутствия каких-либо препятствий в области, соответствующей 0,6 радиуса первой зоны Френеля, вносимыми ими помехами можно пренебречь.

Таким образом, высота размещения антенн приемопередатчиков должна обеспечивать расстояние не менее  $0,6R$  от прямой между антеннами до ближайших к ней препятствий.

При рассмотрении беспроводных каналов большой дальности при определении высоты размещения антенн необходимо дополнительно учитывать радиус кривизны земной поверхности. В среднем он составляет  $R_3 = 6371$  км. При этом необходимо нарисовать элементарный эскиз (рис. 1.2) и провести расчет по элементарным геометрическим формулам.

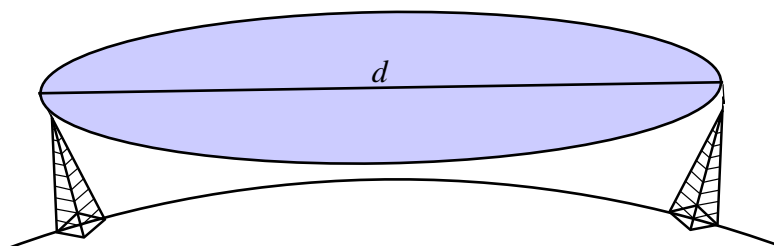


Рис. 1.2. Элементарный эскиз для расчета высоты подвеса антенн приемопередатчиков

### **Список использованных источников**

1. Recommendation ITU-R P.526-15 [Electronic resource]: Propagation by diffraction. — 2019. — 45 p. — URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526/> (Accessed date: 20.05.2020).

2. Фуштей, Н. Что такое зона Френеля и CCQ (Client Connection Quality) или фундаментальные факторы качественного беспроводного моста [Электронный ресурс] / Н. Фуштей // Хабр: [сайт]. — 2019. — URL: <https://habr.com/ru/post/480964/> (дата обращения: 20.05.2020).

### 1.3. Порядок выполнения задания

1. Выбрать из табл. 1.1 согласно своему номеру варианта исходные данные для расчета.

Таблица 1.1

*Исходные данные для расчета  
(указаны согласно номеру студента в журнале)*

№	$f_1$ ГГц	$f_2$ ГГц	$d$ км	№	$f_1$ ГГц	$f_2$ ГГц	$d$ км	№	$f_1$ ГГц	$f_2$ ГГц	$d$ км
1	2,4	5,1	40	11	0,4	2,4	70	21	5,1	2,1	50
2	3,7	2,1	50	12	2,1	0,8	60	22	0,8	1,6	40
3	0,9	1,9	30	13	1,9	3,3	40	23	3,3	0,7	30
4	5	1,6	80	14	4,2	1,6	50	24	1,6	4,7	80
5	0,5	2,5	40	15	3,6	2,5	50	25	2,5	0,8	70
6	1,2	4,7	30	16	1,3	5,2	40	26	4,7	1,9	90
7	3,4	5,2	60	17	5,3	0,6	30	27	5,2	2,1	70
8	2	0,6	90	18	4,8	1,6	90	28	0,6	1,7	60
9	1,7	3,9	50	19	3,2	5,1	80	29	1,5	4,6	50
10	5,5	1,7	80	20	0,7	2,5	60	30	3,9	2,1	40

2. Рассчитать радиус зоны Френеля для частоты  $f_1$  в центральной точке и в 9–10 точках (равномерно) от центра до каждой из антенн (по 9–10 точек до каждой антенны).

3. Повторить расчет для частоты  $f_2$ .

4. По полученным данным построить графики зависимости радиуса зоны Френеля от расстояния до первой антенны.

5. Для частоты  $f_1$  определить минимально возможную высоту подвеса антенн приемопередатчиков, на которой можно пренебречь помехами, вносимыми препятствиями. Принять, что единственным препятствием, мешающим распространению радиосигнала, является земная поверхность. При расчетах по элементарному эскизу (рис. 1.2) считать Землю идеальным шаром.

6. Сделать выводы по результатам расчетов.

### 1.4. Контрольные вопросы

1. Понятие зоны Френеля.
2. Расчет радиуса первой зоны Френеля.
3. Расчет высоты подвеса антенн приемопередатчиков.

## **Практическая работа 2**

### ***Расчет потерь на трассе радиоканала по модели Хата***

#### **2.1. Цель работы**

Ознакомиться с принципами расчета потерь в радиоканале согласно моделям Хата и COST231–Хата.

#### **2.2. Теоретические сведения**

Одним из известных методов моделирования потерь в радиоканале является метод кусочно-линейной аппроксимации затухания, соотнесенного с логарифмом расстояния. Обычно такую модель получают на основе эмпирических измерений, а затем применяют к другим сходным условиям окружающей среды.

Существует большое количество подобных параметрических моделей, частично адаптированных под тот или иной частотный диапазон и имеющих нормированные отклонения по точности, для упрощения расчетов в дальних и ближних радиополях. Такие модели с достаточным уровнем точности позволяют проводить моделирование трасс и точек размещения оборудования радиосетей. Позволяют строить горизонтальные и вертикальные эпюры уровней радиополей. Все эти модели используют схожие подходы, отличаясь преимущественно весовыми параметрами с учетом различных характеристик поля.

Большинство существующих программных продуктов, предназначенных для моделирования радиосетей, используют ту или иную модель прогнозирования затухания радиосигнала в зависимости от моделируемой ситуации. В данной работе будут рассмотрены модели Окамура, Хата и COST231–Хата, широко используемые для моделирования мобильных беспроводных сетей среднего и большого радиуса действия, таких как сети 802-16e (мобильный WiMAX) и сотовые сети.

##### ***2.2.1. Модель Окамуры***

Модель Окамуры является одной из наиболее распространенных моделей для прогнозирования радиосигнала в городских условиях. Эта модель часто применяется для расстояний 1–100 км и частотного диапазона 150–1920 МГц, а также хорошо экстраполируется для диапазона до 3 ГГц. Окамура использовал измерения затухания сигнала при передаче от базовой станции к мобильной для получения ряда кривых, дающих среднее затухание относительно данных о распространении сигнала в свободном пространстве на территории с неровной поверхностью Земли. Сами измерения проводились Окамурой в Токио. Высоты базовых станций при этих измерениях были от 30

до 100 м, что превышает обычную высоту базовых станций, используемых в настоящее время.

Формула Окамуры для расчета среднего значения потерь распространения на трассе в дБ имеет вид

$$L_{cp}[\text{дБ}] = L_f + A_{cp}(f, d) - G(h_{bs}) - G(h_{ms}) - G_{oc}, \quad (2.1)$$

где  $d$  — расстояние между передатчиком и приемником (км);  $L_f$  — потери в свободном пространстве (дБ);  $A_{cp}$  — среднее затухание по отношению к затуханию в свободном пространстве (дБ);  $G(h_{bs})$  — высотный множитель, учитывающий высоту антенны базовой станции (дБ);  $G(h_{ms})$  — высотный множитель антенны мобильной станции (дБ);  $G_{oc}$  — коэффициент, учитывающий тип окружающей среды (дБ). Значения  $A_{cp}$  и  $G_{oc}$  получают из эмпирических графиков Окамуры, представленных на рис. 2.1. Высотные множители рассчитываются по формулам:

$$G(h_{bs}) = 20 \lg \left( \frac{h_{bs}}{200} \right), \quad 10 \text{ м} < h_{bs} < 1000 \text{ м};$$

$$G(h_{ms}) = \begin{cases} 10 \lg \left( \frac{h_{ms}}{3} \right), & h_{ms} < 3 \text{ м}; \\ 20 \lg \left( \frac{h_{ms}}{3} \right), & 3 \text{ м} < h_{ms} < 10 \text{ м}. \end{cases} \quad (2.2)$$

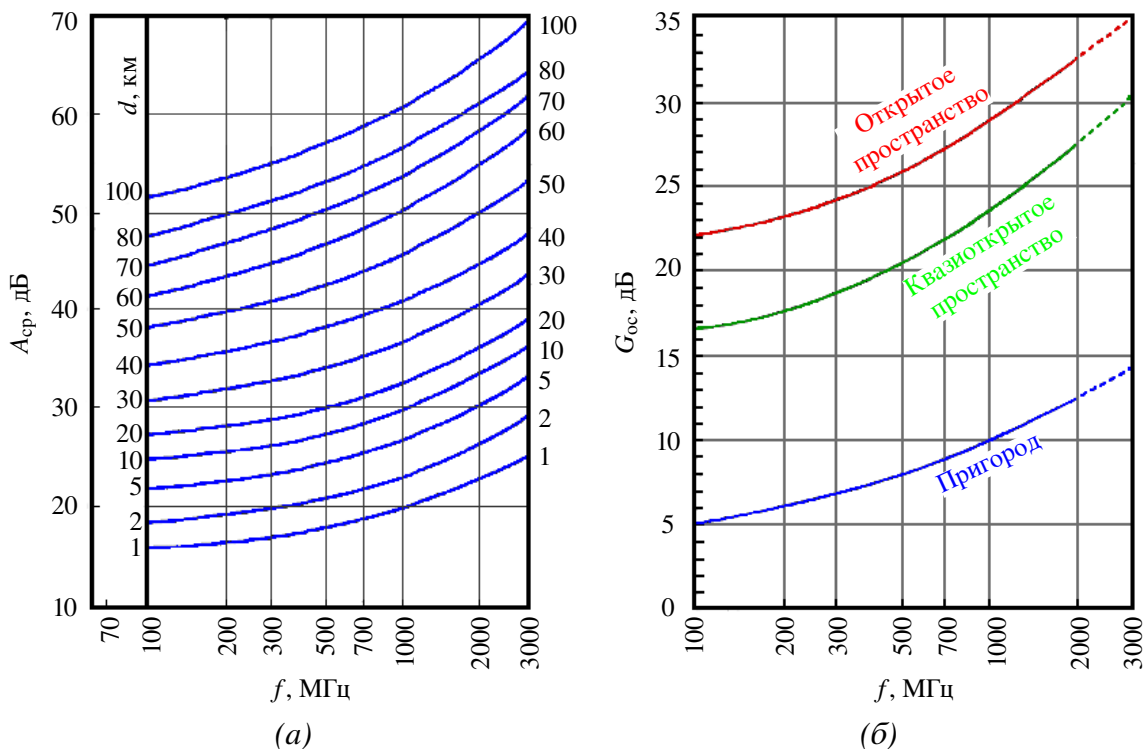


Рис. 2.1. Эмпирические графики Окамуры для  $A_{cp}$  (а) и  $G_{oc}$  (б)

Потери в свободном пространстве считаются по формуле

$$L_f[\text{дБ}] = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (2.3)$$



Имеются также поправочные коэффициенты, учитывающие характер местности и обеспечивающие повышение точности модели. Модель Окамуры обычно дает отклонение на 10–14 дБ между потерями на трассе, прогнозируемыми согласно модели, и фактическими данными измерений в городских и пригородных сотовых сетях.

### 2.2.2. Модель Хата

Модель Хата является эмпирическим представлением графических данных о потерях на трассе, приводимых Окамурой, и справедлива для диапазона частот 150–1500 МГц. Часто ее называют моделью Окамура–Хата. Суть этой модели заключается в аппроксимации графиков Окамуры специально подобранными формулами для различных территориальных зон, которые условно классифицируются на большой город, средний и малый города, пригород, сельскую местность, открытую местность. Стандартная формула для средних потерь на трассе в городской среде в соответствии с моделью Хата имеет вид

$$L_{\text{Город}}[\text{дБ}] = 69,55 + 26,16 \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 13,83 \lg(h_{bs[\text{М}]}) + \\ + [44,9 - 6,55 \lg(h_{bs[\text{М}]})] \lg(d_{[\text{км}]}) - a(h_{ms[\text{М}]}) \quad (2.4)$$

Параметры этой модели такие же, что и в модели Окамуры, а  $a(h_{ms})$  — поправочный коэффициент для высоты антенны мобильной станции, учитывающий зону охвата.

Для крупных городов:

$$a(h_{ms})[\text{дБ}] = \begin{cases} 8,29[\lg(1,54h_{ms})]^2 - 1,1, & f < 300 \text{ МГц}; \\ 3,2[\lg(11,75h_{ms})]^2 - 4,97, & f \geq 300 \text{ МГц}. \end{cases} \quad (2.5)$$

Для малых и средних городов:

$$a(h_{ms})[\text{дБ}] = (1,1 \lg(f) - 0,7)h_{ms} - (1,56 \lg(f) - 0,8). \quad (2.6)$$

Для пригородных районов расчет производится относительно среднего города:

$$L_{\text{приг}}[\text{дБ}] = L_{\text{Город}} - 2 \left( \lg \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4. \quad (2.7)$$

Для сельской местности расчет производится относительно среднего города:

$$L_{\text{сел}}[\text{дБ}] = L_{\text{Город}} - 4,78 (\lg(f))^2 + 18,33 \lg(f) - 40,94. \quad (2.8)$$

Хотя формулы Хата не позволяют учесть все специфические поправки, которые доступны в методе Окамура, они имеют существенное практическое

значение. Расчеты по формулам Хата совпадают с данными модели Окамура для дальностей более 1 км. Таким образом, она хороша для первого поколения сотовых систем, но не позволяет моделировать с достаточным качеством современные сотовые системы с меньшим размером ячеек.

### 2.2.3. Модель COST231–Хата

Модель Хата была расширена на диапазон 1,5–2 ГГц на основе проведенных научно-технических исследований в рамках проекта Европейского союза COST — Cooperation for Scientific and Technical Research. Эта модель получила название модифицированная модель Хата или модель COST231–Хата:

$$L_{\text{Город}}[\text{дБ}] = 46,3 + 33,9 \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 13,82 \lg(h_{bs[\text{М}]}) + \\ + [44,9 - 6,55 \lg(h_{bs[\text{М}]})] \lg(d_{[\text{км}]}) - a(h_{ms[\text{М}]}) + C, \quad (2.9)$$

где  $C = 0$  дБ для городов среднего размера и пригородов; для больших городов  $C = 3$  дБ. Корректировки для пригородных районов не используются. Для сельской местности поправки те же, что и в модели Хата (2.8).

Формально модели Окамура–Хата и COST231–Хата можно использовать только для высоты антенны базовой станции, превышающей 30 м, однако их применение возможно и для более низких высот при условии, что соседние строения значительно ниже антенны.

Модель COST231–Хата не подходит для оценки затухания сигнала при расстояниях между подвижной и базовой станциями менее 1 км. В этом случае затухание сильно зависит от топографии местности, в которой происходит распространение сигнала. Эту модель также нельзя использовать для оценки распространения сигнала по улицам с высокими строениями (по так называемым уличным каньонам).

### Список использованных источников

1. Абилов, А. В. Распространение радиоволн в сетях подвижной связи: теоретический материал и задачи для практических занятий / А. В. Абилов. — Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2001. — 24 с.
2. Виноградов, Е. М. Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств : учебное пособие / Е. М. Виноградов. — СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. — 301 с.
3. Милютин, Е. Р. Модели расчета потерь мощности сигнала в сотовых системах связи / Е. Р. Милютин // Мобильные телекоммуникации. — № 4 (80). — 2008.

### 2.3. Порядок выполнения задания

1. Выбрать из табл. 2.1 согласно своему номеру варианта исходные данные для расчета.

Таблица 2.1

Исходные данные для расчета  
(указаны согласно номеру студента в журнале)

№	$f_1$ МГц	$f_2$ МГц	$h_{bs}$ м	$h_{ms}$ м	№	$f_1$ МГц	$f_2$ МГц	$h_{bs}$ м	$h_{ms}$ м
1	100	1500	30	1,5	16	125	1550	95	8,5
2	150	1600	40	2	17	175	1650	85	8
3	200	1700	50	2,5	18	225	1750	75	7,5
4	250	1800	60	3	19	275	1850	65	7
5	300	1900	70	3,5	20	350	1950	55	6,5
6	400	1550	80	4	21	450	2000	45	6
7	500	1650	90	4,5	22	550	1500	35	5,5
8	600	1750	100	5	23	650	1600	30	5
9	700	1850	35	5,5	24	750	1700	40	4,5
10	800	1950	45	6	25	850	1800	50	4
11	900	1525	55	6,5	26	950	1900	60	3,5
12	1000	1625	65	7	27	1050	1875	70	3
13	1100	1725	75	7,5	28	1150	1575	80	2,5
14	1200	1825	85	8	29	1250	1675	90	2
15	1300	2000	95	8,5	30	1350	1775	100	1,5

2. Для частоты  $f_1$  рассчитать по модели Хата и построить графики зависимости величины потерь в дБ от расстояния (диапазон 1–10 км, точки через 1 км) для крупного города, малого города, пригорода и сельской местности. Графики строить на одном рисунке.

3. Для частоты  $f_2$  рассчитать по модели COST231–Хата и построить графики зависимости величины потерь в дБ от расстояния (диапазон 1–10 км, точки через 1 км) для крупного города, среднего города и сельской местности. Графики строить на одном рисунке.

4. Сделать выводы по результатам расчетов.

5. Сформировать в электронном виде (формат PDF) отчет по работе, в который включить: процедуру расчетов (если считали в программе или скрипте, приложить их к отчету), таблицы результатов, графики, выводы по результатам расчетов.

### 2.4. Контрольные вопросы

1. Модель Окамура.
2. Модель Хата.
3. Модель COST231–Хата.

# Практическая работа 3

## Расчет потерь на трассе радиоканала по моделям Уолфиша–Икегами и Кся–Бертони

### 3.1. Цель работы

Ознакомиться с принципами расчета потерь в радиоканале согласно моделям Уолфиша–Икегами и Кся–Бертони.

### 3.2. Теоретические сведения

Ранее рассмотренные модели Окамура, Хата и COST231–Хата предназначены для расчета потерь на расстояниях более 1 км от базовой станции (БС) и требуют размещения антенны БС выше ближайших строений. В этих моделях не учитывается влияние зданий, окружающих антенны БС и мобильной станции (МС), что не позволяет применять эти модели для расчета малых сот. От этих ограничений свободны модели Уолфиша–Икегами (Walfisch–Ikegami) и Кся–Бертони (Xia–Bertoni).

#### 3.2.1. Модель Уолфиша–Икегами

Модель Уолфиша–Икегами предназначена для расчета уровня сигнала в малых сотах (рис. 3.1).

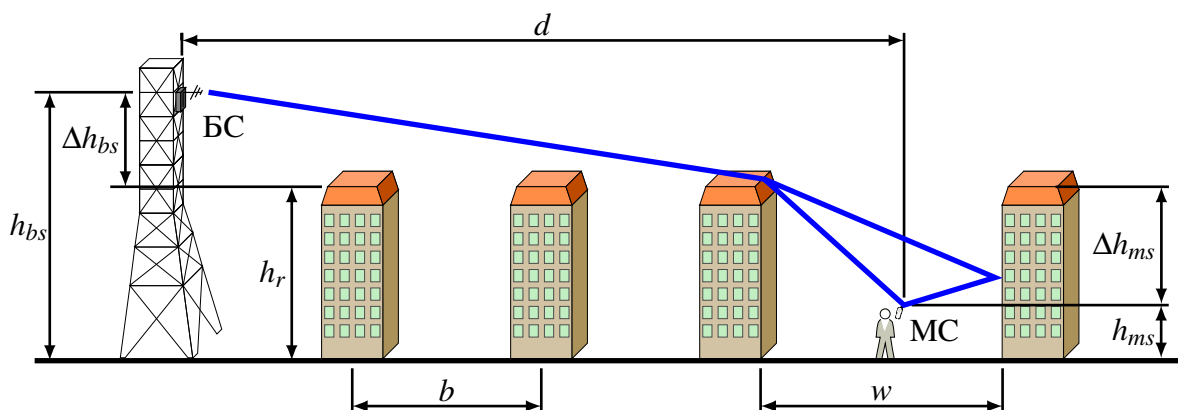


Рис. 3.1. Основной путь распространения радиосигнала и параметры модели Уолфиша–Икегами

Эта модель основана на физическом представлении поля в точке приема в виде двух составляющих: когерентной и отраженной. Когерентная составляющая определяется волной, дифрагирующей вокруг строений вдоль трассы распространения со стороны БС. Отраженный компонент создают волны, которые образуются в результате переизлучения стенами строений падающей на них волны от БС. Отраженный компонент приходит с направлений, не совпадающих с направлением на БС и даже противоположных этому направлению. Модель утверждает, что в условиях города с относительно невысокой,

но плотной застройкой основной трассой распространения радиосигнала (при отсутствии прямой видимости между узлами) является трасса, образованная лучом многократно переотразившимся от строений, которые могут быть описаны как серии последовательных экранов. В данной части будем рассматривать модифицированную модель COST231–Уолфиша–Икегами.

Основные параметры, используемые в модели:

- $f$  — частота передачи (МГц);
- $h_{bs}$  — высота передающей антенны БС (м);
- $h_{ms}$  — высота приемной антенны МС (м);
- $d$  — расстояние между БС и МС (км);
- $h_r$  — средняя высота зданий (м);
- $w$  — средняя ширина улиц (м), обычно  $w = 15$  м;
- $b$  — расстояние между зданиями (м), обычно  $b = 40$  м.

Энергия принимаемого сигнала зависит от того, где находится БС по отношению к МС.

Расчетные формулы для модели Уолфиша–Икегами получены при параметрах: расстояние между БС и МС  $d = 0,02–5$  км в диапазоне частот 800–2000 МГц, высота антенн БС  $h_{bs} = 4–50$  м, высота антенн МС  $h_{ms} = 1–3$  м; высота близлежащих к БС зданий  $h_r \leq 60$  м.

В зоне прямой видимости («line of sight», LOS) для вычисления величины потерь при распространении используется формула

$$L_{LOS}[\text{дБ}] = 42,6 + 26\lg(d_{[\text{км}]}) + 20\lg(f_{[\text{МГц}]}) \quad (3.1)$$

Случай расположения БС и МС вне зоны прямой видимости («none line of sight», NLOS) более сложен. Значение, на которое уменьшается мощность принимаемого сигнала при прохождении трассы от БС к МС, задается формулой

$$L_{NLOS}[\text{дБ}] = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd}, & L_{rts} + L_{msd} > 0; \\ L_0, & L_{rts} + L_{msd} \leq 0. \end{cases} \quad (3.2)$$

$L_0$  — потери при распространении в свободном пространстве (без препятствий):

$$L_0[\text{дБ}] = 32,44 + 20\lg(d_{[\text{км}]}) + 20\lg(f_{[\text{МГц}]}) \quad (3.3)$$

$L_{rts}$  — потери на стороне МС, вызванные рассеиванием радиосигнала при отражении от поверхности зданий улицы, на которой находится МС:

$$L_{rts}[\text{дБ}] = -16,9 - 10\lg(w_{[\text{м}]}) + 10\lg(f_{[\text{МГц}]}) + 20\lg(\Delta h_{ms[\text{м}]}) + L_{ori}, \quad (3.4)$$

где  $\Delta h_{ms} = h_r - h_{ms}$  — разница между высотой зданий и высотой размещения МС (м);  $L_{ori}$  — составляющая потерь, зависящая от ориентации улиц относи-

тельно направления прихода сигнала (дБ):

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\phi, & \text{при } 0^\circ \leq \phi < 35^\circ; \\ 2,5 + 0,075(\phi - 35^\circ), & \text{при } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ; \\ 4,0 + 0,114(\phi - 35^\circ), & \text{при } 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ; \end{cases} \quad (3.5)$$

где  $\phi$  — ориентация улицы по отношению к трассе распространения сигнала (в градусах). Диапазон изменения значений потерь от ориентации улиц составляет не более 14 дБ.

$L_{msd}$  — оценка величины потерь, вызываемых многократным переотражением и рассеиванием радиосигнала от крыш домов (впервые опубликована Уолфишем и Бартони):

$$L_{msd}[\text{дБ}] = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \lg(d_{[\text{км}]}) + k_f \cdot \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 9 \lg(b_{[\text{м}]}) \quad (3.6)$$

где  $d$  — расстояние между МС и БС (км).

Составляющая  $L_{bsh}$  определяется высотой подвеса БС относительно крыш окружающих зданий:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \lg(1 + \Delta h_{bs}), & \text{при } h_{bs} > h_r; \\ 0, & \text{при } h_{bs} \leq h_r; \end{cases} \quad (3.7)$$

где  $\Delta h_{bs} = h_{bs} - h_r$  — разность высот антенны БС и среднего уровня крыш соответственно (м).

Параметр  $k_a$  задает увеличение потерь при уменьшении высоты антенны по отношению к средней высоте окружающих зданий:

$$k_a = \begin{cases} 54, & \text{при } h_{bs} > h_r; \\ 54 - 0,8\Delta h_{bs}, & \text{при } d \geq 0,5 \text{ км и } h_{bs} \leq h_r; \\ 54 - 1,6\Delta h_{bs} \cdot d, & \text{при } d < 0,5 \text{ км и } h_{bs} \leq h_r. \end{cases} \quad (3.8)$$

Параметры  $k_d$  и  $k_f$  определяют зависимость величины потерь при распространении от частоты сигнала, а также от рассеивания и отражения при прохождении через последовательные экраны:

$$k_d = \begin{cases} 18, & \text{при } h_{bs} \geq h_r; \\ 18 - 15 \cdot \frac{\Delta h_{bs}}{h_r}, & \text{при } h_{bs} < h_r; \end{cases} \quad (3.9)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \cdot \left( \frac{f}{925} - 1 \right), & \text{для города средних размеров и пригорода;} \\ -4 + 1,5 \cdot \left( \frac{f}{925} - 1 \right), & \text{для города с плотной застройкой.} \end{cases} \quad (3.10)$$

В приведенных формулах следует подставлять частоту в мегагерцах, протяженность трассы — в километрах, остальные параметры модели — в метрах. Эти формулы позволяют определить медианные (средние) потери, как для трасс, на которых антенна БС расположена над городской застройкой, так и для трасс, на которых антенна БС расположена на уровне крыш или ниже этого уровня.

При проектировании малых сот необходимы сведения о конкретных участках городских трасс. В ряде случаев можно воспользоваться статистическими данными для города. Районы современной городской застройки: плотность застройки 90 зданий на 1 км; средняя длина здания 80–105 м; ширина 15 м; этажность от 9 до 14; просветы между зданиями 15–20 м; средняя дальность прямой видимости в слое городской застройки 170 м. Застройку можно считать однородной для районов, где нет больших площадей и парков.

### 3.2.2. Модель Кся–Бертони

Модель Кся–Бертони построена на основе уравнений волновой оптики и, так же как и модель Уолфиша–Икегами, рассматривает различные механизмы распространения радиоволн в условиях городской застройки: распространение в свободном пространстве, дифракцию на кромках крыш зданий, отражение от стен зданий. Когда антенна БС расположена выше среднего уровня крыш зданий с БС на МС приходят два луча: один — в результате дифракции на кромке крыши здания, другой — после переотражения от стены. Величина средних потерь в этом случае:

$$L[\text{дБ}] = -10 \cdot \lg \left( \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right) - 10 \cdot \lg \left( \frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right) - 10 \cdot \lg \left( 2,35^2 \cdot \left( \frac{\Delta h_{bs}}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{1,8} \right), \quad (3.11)$$

где  $\lambda = \frac{c}{f}$  — длина волны (м);  $c$  — скорость света;

$d$  — расстояние между БС и МС (м);

$\Delta h_{bs} = (h_{bs} - h_r)$  — разность высот антенны БС и среднего уровня крыш соответственно (м);

$\theta = \arctg(\Delta h_{ms}/x)$  — угол падения преломленного луча на антенну МС (рад);

$\Delta h_{ms} = (h_r - h_{ms})$  — разность высот среднего уровня крыш и антенны МС соответственно (м);

$x$  — расстояние в метрах по горизонтали между МС и кромкой крыши, на которой дифрагирует волна, обычно  $x = \frac{w}{2}$ ;  
 $w$  — средняя ширина улиц, обычно  $w = 15$  м;  
 $b$  — средний интервал между кварталами, обычно  $b = 40$  м;  
 $r = \sqrt{\Delta h_{ms}^2 + x^2}$  — расстояние от точки преломления луча до антенны МС (м).

### Список использованных источников

1. Бабков, В. Ю. Сотовые системы мобильной радиосвязи / В. Ю. Бабков, И. А. Цикин. — СПб. : БХВ-Петербург. — 432 с.
2. Виноградов, Е. М. Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств : учебное пособие / Е. М. Виноградов. — СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. — 301 с.
3. Утц, В. А. Исследование потерь при распространении радиосигнала сотовой связи на основе статистических моделей / В. А. Утц // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. — № 5. — 2011. — С. 44–49.

### 3.3. Порядок выполнения задания

1. Выбрать из табл. 3.1 согласно своему номеру варианта исходные данные для расчета.

Таблица 3.1

Исходные данные для расчета  
(указаны согласно номеру студента в журнале)

№	$f$ МГц	$h_r$ м	$h_{bs1}$ м	$h_{bs2}$ м	$h_{ms}$ м	$\phi$ град
1	800	15	30	9	1,2	20
2	900	20	25	16	1,3	30
3	1000	25	32	22	1,4	40
4	1100	30	37	14	1,5	20
5	1200	35	43	26	1,6	60
6	1300	40	49	35	1,7	40
7	1400	18	30	11	1,8	80
8	1500	21	31	10	1,9	45
9	1600	24	28	21	2,0	25
10	1700	27	45	20	2,1	50
11	1800	33	39	19	2,2	30
12	1900	36	46	31	2,3	60
13	2000	39	47	30	2,4	45
14	850	42	48	22	2,5	65
15	950	45	50	34	2,6	50
16	1050	15	17	11	2,7	70



Исходные данные для расчета  
(указаны согласно номеру студента в журнале)

№	$f$ МГц	$h_r$ м	$h_{bs1}$ м	$h_{bs2}$ м	$h_{ms}$ м	$\phi$ град
17	1150	20	26	13	2,8	60
18	1250	25	44	17	2,9	75
19	1350	30	38	28	3,0	65
20	1450	35	49	31	1,4	55
21	1550	40	50	32	1,5	75
22	1650	18	29	13	1,6	80
23	1750	21	41	19	1,7	85
24	1850	24	32	21	1,8	90
25	1950	27	38	20	1,9	15
26	875	33	42	32	2,0	85
27	975	36	50	31	2,1	10
28	1075	39	46	34	2,2	25
29	1175	42	44	31	2,3	5
30	1275	45	49	39	2,4	30

2. Для заданной частоты  $f$  рассчитать и построить графики зависимости величины потерь в дБ от расстояния (диапазон 200–1500 м, точки через 100 м) для нижеуказанных вариантов. Графики строить на одном рисунке.

а) Модель Уолфиша–Икегами. В зоне прямой видимости.

б) Модель Уолфиша–Икегами. Вне зоны прямой видимости. Высота БС  $h_{bs1}$ . Город средних размеров.

в) Модель Уолфиша–Икегами. Вне зоны прямой видимости. Высота БС  $h_{bs1}$ . Город с плотной застройкой.

г) Модель Уолфиша–Икегами. Вне зоны прямой видимости. Высота БС  $h_{bs2}$ . Город средних размеров.

д) Модель Уолфиша–Икегами. Вне зоны прямой видимости. Высота БС  $h_{bs2}$ . Город с плотной застройкой.

е) Модель Кся–Бертони. Высота БС  $h_{bs1}$ .

3. Сделать выводы по результатам расчетов.

4. Сформировать в электронном виде (формат PDF) отчет по работе, в который включить: процедуру расчетов (если считали в программе или скрипте, приложить их к отчету), таблицы результатов, графики, выводы по результатам расчетов.

### 3.4. Контрольные вопросы

1. Модель Уолфиша–Икегами.
2. Модель Кся–Бертони.

## **Практическая работа 4**

### ***Оценка потерь на трассе радиоканала в случае дифракции на клине при одном препятствии***

#### **4.1. Цель работы**

Целью данной работы является ознакомление с механизмом дифракции радиосигнала на клине при одном препятствии, а также принципами оценки величины потерь, вызываемых данным типом дифракции.

#### **4.2. Теоретические сведения**

Явление дифракции состоит в огибании радиоволнами препятствий, встречающихся на пути их распространения. При этом потери сигнала на трассе распространения возрастают. Как правило, потери на дифракцию оценивают отдельно в децибелах относительно свободного пространства, как например, в модели Уолфиша–Икегами, в которой рассматривается случай множественной дифракции в условиях города. Однако достаточно часто встречаются ситуации, когда на трассе распространения электромагнитной волны присутствует незначительное число препятствий, которые могут вызвать явление дифракции — например высокий холм, расположенный между двумя вышками радиорелейной связи. В этом случае обычно ограничиваются оценкой потерь на дифракцию, вызванных одним или двумя препятствиями.

На трассе выделяют одно или два наиболее значительных препятствия и аппроксимируют их геометрическими телами (клином или цилиндром), для которых на основе общей теории дифракции получены математические выражения, позволяющие оценить потери на дифракцию на телах соответствующей формы. Используя эти выражения, выполняют оценку потерь на дифракцию. Модели, определяющие потери на дифракцию, являются детерминистскими. При оценке полных потерь на трассе распространения потери на дифракцию суммируют с другими видами потерь, полученных по другим моделям и для других факторов, влияющих на распространение радиоволн.

##### ***4.2.1. Дифракция на клине***

При оценке потерь на дифракцию первоначально в прямоугольной системе координат с помощью картографической базы данных строят топографический профиль трассы, используя информацию о высотах соответствующих точек местности над дугой земной поверхности (уровнем моря) (рис. 4.1).

Уравнение для дуги земной поверхности соответствует уравнению параболы, которая между точками расположения передатчика и приемника имеет форму, близкую к окружности, и при нормальной рефракции атмосферы

записывается в виде:

$$h_0(x) = \frac{x(d-x)}{17}, \quad (4.1)$$

где  $x$  и  $d$  выражены в километрах, а  $h_0$  — в метрах.

Высота дуги, соответствующая  $x = d/2$  (максимальная высота дуги), равна

$$H = \frac{d^2}{68}, \quad (4.2)$$

где  $H$  выражена в метрах, а  $d$  — в километрах.

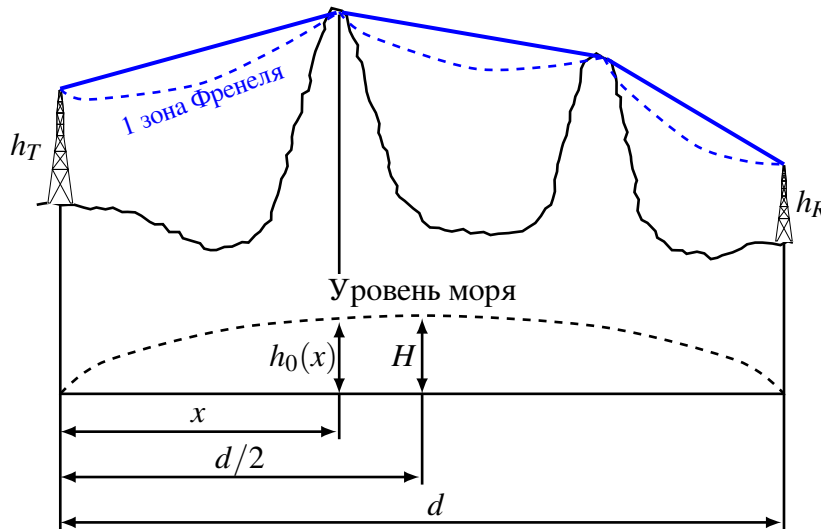


Рис. 4.1. Профиль трассы

Далее препятствия заменяют телами в форме клина. При этом обычно выдвигается требование, чтобы максимальная ширина препятствия не превышала  $d/20$ . Реальная трасса заменяется моделью (рис. 4.2), при построении которой учитывают значение  $h_0$ . Например, высота первого препятствия  $H_1$  на рис. 4.2 равна сумме его высоты над уровнем моря  $H'_1$  и высоты уровня моря  $h_0(a)$ . Также должно соблюдаться требование, чтобы в модели при оценке дифракционных потерь на трассе между передатчиком (или приемником) и клиновидным препятствием (или между клиновидными препятствиями) первая зона Френеля не перекрывалась.

Радиус первой зоны Френеля  $r(x)$  (рис. 4.2) на трассе сигнала между передатчиком и первым препятствием рассчитывают по формуле

$$r(x) = \sqrt{\frac{\lambda x(a-x)}{a}} = 550 \cdot \sqrt{\frac{x(a-x)}{af}}, \quad 0 \leq x \leq a, \quad (4.3)$$

где  $r(x)$  — радиус первой зоны Френеля (м);  $x$  и  $a$  — расстояния (км);  $f$  — частота (МГц).

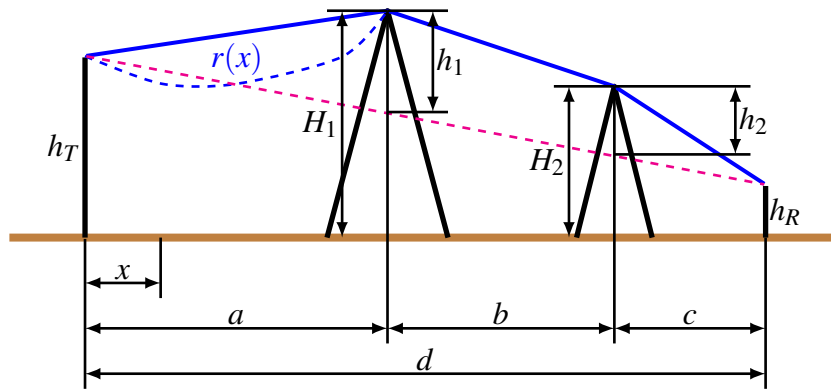


Рис. 4.2. Модель трассы

Аналогичные выражения могут быть записаны для других участков трассы с заменой  $a$  на  $b$  или  $c$  соответственно.

Процедура расчета дифракции изменяется в зависимости от числа клиновидных препятствий на трассе.

#### 4.2.2. Расчет дифракции на клине при одном препятствии

Случай одного препятствия изображен на рис. 4.3, где представлены возможные положения препятствия на трассе между передатчиком и приемником.

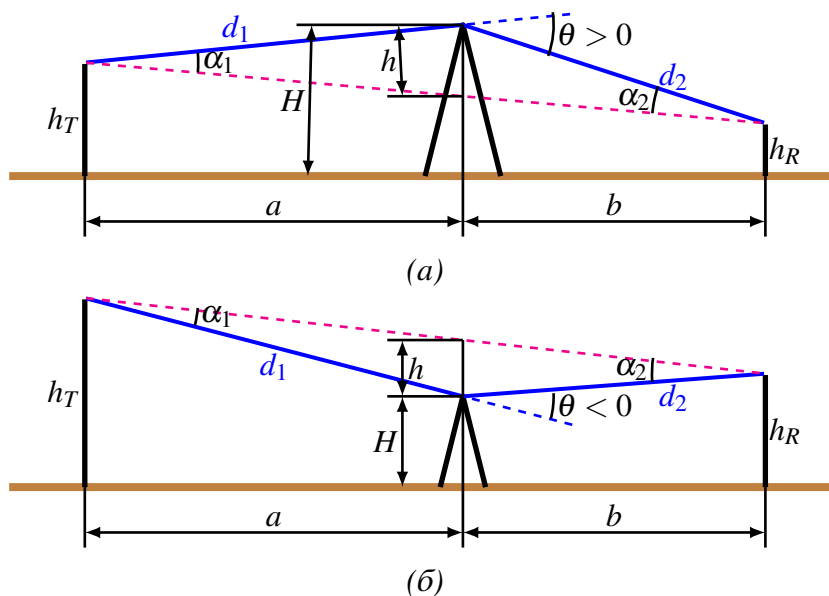


Рис. 4.3. Модель трассы с одним препятствием:  
(а)  $H > h_T$  и  $H > h_R$ ; (б)  $H < h_T$  и  $H < h_R$

Расчет выполняется в следующем порядке:

1. Определяется приведенная высота препятствия, т.е. степень перекрытия трассы препятствием:

$$h = H - \left( h_T + a \cdot \frac{h_R - h_T}{a + b} \right). \quad (4.4)$$

Высоты  $H$ ,  $h_T$  и  $h_R$  измеряются в метрах; расстояния  $a$  и  $b$  — в метрах или километрах.

2. Вычисляется безразмерный параметр  $v$  через геометрические параметры, описывающие взаимное положение передатчика, приемника и препятствия на трассе (рис. 4.3), по одной из следующих формул:

$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}; \quad (4.5)$$

$$v = \theta \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}}; \quad (4.6)$$

$$v = \sqrt{\frac{2h\theta}{\lambda}}, \quad (v \text{ имеет знак } h \text{ и } \theta); \quad (4.7)$$

$$v = \sqrt{\frac{2d\alpha_1\alpha_2}{\lambda}}, \quad (v \text{ имеет знак } \alpha_1 \text{ и } \alpha_2). \quad (4.8)$$

3. Если полученное значение  $v > -0,7$ , то приближенное значение потерь на дифракцию оценивается выражением

$$L_{dif}(v) = 6,9 + 20 \lg \left( \sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right). \quad (4.9)$$

Если  $v \leq -0,7$ , то  $L_{dif}(v) = 0$  дБ.

#### **Список использованных источников**

1. Бабков, В. Ю. Сотовые системы мобильной радиосвязи / В. Ю. Бабков, И. А. Цикин. — СПб. : БХВ-Петербург. — 432 с.

2. Виноградов, Е. М. Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств : учебное пособие / Е. М. Виноградов. — СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. — 301 с.

### 4.3. Порядок выполнения задания

1. Выбрать из табл. 4.1 согласно своему номеру варианта исходные данные для расчета. Принять во внимание, что указана высота препятствия над уровнем моря.

Таблица 4.1

*Исходные данные для расчета*  
(указаны согласно номеру студента в журнале)

№	$f$ МГц	$h_T$ м	$h_R$ м	$a$ км	$b$ км	$H'_1$ м	$H'_2$ м
1	800	45	30	9	15	50	25
2	500	40	20	6	11	45	17
3	600	42	22	7	12	44	20
4	700	44	25	8	13	52	21
5	800	46	28	9	14	50	23
6	900	48	31	10	15	55	28
7	1000	50	34	11	16	58	29
8	1100	30	20	12	17	43	19
9	1200	32	23	13	18	41	22
10	1300	34	26	14	19	39	21
11	1400	36	29	9	11	45	27
12	1500	38	32	6	12	42	29
13	1600	40	35	7	13	47	31
14	1700	31	20	8	14	40	18
15	1800	33	22	9	13	39	19
16	1900	35	24	10	15	41	22
17	2000	37	27	11	16	43	25
18	2100	39	25	12	17	42	22
19	2200	41	29	13	18	50	26
20	2300	43	34	14	19	48	30
21	2400	45	36	8	11	54	32
22	2500	47	35	9	12	51	34
23	2600	49	37	6	13	55	33
24	2700	51	45	7	14	57	40
25	2800	53	41	8	15	58	36
26	2900	34	23	9	16	42	20
27	3000	37	22	10	17	46	20
28	3100	40	28	11	18	46	25
29	3200	43	29	12	19	49	25
30	3300	46	30	13	12	53	25

2. Для заданных частоты  $f$  и расстояния  $b$  рассчитать и построить графики зависимости величины потерь на дифракцию на клине в дБ от расстояния  $d = a + b$  при изменении расстояния  $a$  (диапазон 5–15 км, точки через 1 км) для каждой из высот препятствия  $H'_1$  и  $H'_2$ . Для сравнения привести гра-

фик потерь в свободном пространстве, посчитанный по формуле (3.3) для тех же расстояний  $d$ . Графики строить на одном рисунке.

3. Для заданных частоты  $f$  и расстояния  $a$  рассчитать и построить графики зависимости величины потерь на дифракцию на клине в дБ от расстояния  $d$  при изменении расстояния  $b$  (диапазон 10–20 км, точки через 1 км) для каждой из высот препятствия  $H'_1$  и  $H'_2$ . Для сравнения привести график потерь в свободном пространстве, посчитанный по формуле (3.3) для тех же расстояний  $d$ . Графики строить на одном рисунке.

4. По результатам расчетов сделать выводы о том, какая из составляющих — потери в свободном пространстве или потери на дифракцию — является преобладающей.

5. Сформировать в электронном виде (формат PDF) отчет по работе, в который включить: процедуру расчетов (если считали в программе или скрипте, приложить их к отчету), таблицы результатов, графики, выводы по результатам расчетов.

#### 4.4. Контрольные вопросы

1. Дифракция на клине.
2. Потери на дифракцию на клине при одном препятствии.

# Практическая работа 5

## Оценка потерь на трассе радиоканала в случае дифракции на клине при двух препятствиях

### 5.1. Цель работы

Целью данной работы является ознакомление с механизмом дифракции радиосигнала на клине при двух препятствиях и принципами оценки величины потерь, вызываемых данным типом дифракции.

### 5.2. Теоретические сведения

Модели трассы с двумя клиновидными препятствиями представлены на рис. 5.1. При оценке потерь на трассе с двумя препятствиями одно из препятствий может быть главным или доминантным, т. е. вносить вклад в потери на дифракцию значительно больше, чем второе.

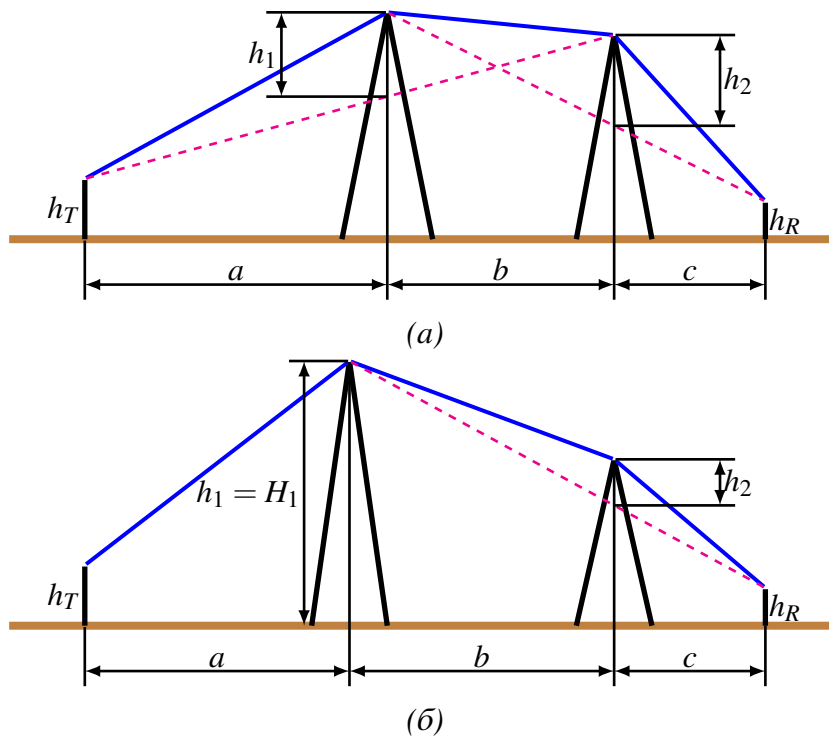


Рис. 5.1. Модель трассы с двумя клиновидными препятствиями:  
(а) вклады препятствий в потери на дифракцию примерно одинаковые;  
(б) вклад в потери на дифракцию одного из препятствий является преобладающим



Для определения того, является ли какое-либо из препятствий главным, следует вычислить приведенные высоты препятствий  $h_1$  и  $h_2$  (рис. 5.1(а)):

$$\begin{aligned} h_1 &= H_1 - \left( h_T + a \cdot \frac{h_R - h_T}{a + b + c} \right); \\ h_2 &= H_2 - \left( h_T + (a + b) \cdot \frac{h_R - h_T}{a + b + c} \right). \end{aligned} \quad (5.1)$$

Главное препятствие определяется, исходя из выполнения неравенств:

- если  $h_1 \sqrt{(a+b)c} > h_2 \sqrt{(b+c)a}$ , то главное препятствие — первое;
- если  $h_1 \sqrt{(a+b)c} < h_2 \sqrt{(b+c)a}$ , то главное препятствие — второе.

Если левая и правая части неравенств отличаются незначительно, доминантное препятствие отсутствует.

В связи с этим можно выделить две возможные ситуации.

1. Вклады в общие потери на дифракцию, вносимые каждым препятствием, различаются незначительно (примерно одинаковые) (рис. 5.1(а)).

В этом случае, используя методику оценки потерь для одиночного препятствия, рассмотренную выше, рассчитывают потери, вносимые каждым препятствием по отдельности. При этом вершина первого препятствия рассматривается как источник сигнала, который испытывает дифракцию на втором препятствии.

Первая трасса, для которой вычисляются параметр  $\nu$  по одной из формул (4.5)–(4.8) и потери  $L_{dif1}(\nu)$  по (4.9), определяется расстояниями  $a$  и  $b$  и высотой  $h_1$ . Источник сигнала — начало трассы, приемник — вершина второго препятствия.

Вторая трасса, для которой по тем же формулам вычисляют  $\nu$  и  $L_{dif2}(\nu)$ , определяется расстояниями  $b$  и  $c$  и высотой  $h_2$ . Источник сигнала — вершина первого препятствия, приемник — конечная точка трассы.

Если каждый из вкладов  $L_{dif1}$  и  $L_{dif2}$  превышает примерно 15 дБ, то чтобы учесть разнос по расстоянию между клиновидными препятствиями, нужно оценить корректирующий член  $L_c$ , используя формулу:

$$L_c = 10 \lg \left( \frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right). \quad (5.2)$$

Полные потери на дифракцию определяются суммой:

$$L_{dif} = L_{dif1} + L_{dif2} + L_c. \quad (5.3)$$

2. Одно из препятствий является доминантным (главным) (рис. 5.1(б)).

В этом случае оценивают только потери на дифракцию, вносимые каждым препятствием по отдельности. Однако трасса для преобладающего препятствия определяется расстояниями  $a$  и  $(b + c)$  и приведенной высотой  $h_1$ , которая совпадает с реальной высотой главного препятствия (рис. 5.1(б)). Трасса для оценки дифракции на втором препятствии определяется расстояниями  $b$  и  $c$  и приведенной высотой  $h_2$ , которую рассчитывают, используя (4.4). Потери, соответствующие этим трассам, суммируют. Эту сумму принимают за полные потери на дифракцию на трассе. Корректирующий член  $L_c$  (5.2) не рассчитывают и не производят никакой дополнительной коррекции полученного результата.

### Список использованных источников

1. Бабков, В. Ю. Сотовые системы мобильной радиосвязи / В. Ю. Бабков, И. А. Цикин. — СПб. : БХВ-Петербург. — 432 с.
2. Виноградов, Е. М. Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств : учебное пособие / Е. М. Виноградов. — СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. — 301 с.

### 5.3. Порядок выполнения задания

1. Выбрать из табл. 5.1 согласно своему номеру варианта исходные данные для расчета. Принять во внимание, что указана высота препятствия над уровнем моря.

Таблица 5.1

Исходные данные для расчета  
(указаны согласно номеру студента в журнале)

№	$f$ МГц	$h_T$ м	$h_R$ м	$a$ км	$b$ км	$c$ км	$H_1'$ м	$H_2'$ м	$H_2''$ м
1	800	45	30	3	1	10	50	25	42
2	500	40	20	4	2	9	45	17	48
3	600	42	22	5	3	8	44	20	50
4	700	44	25	6	1	7	52	21	39
5	800	46	28	7	2	6	50	23	44
6	900	48	31	8	3	5	55	28	48
7	1000	50	34	3	2	4	58	29	55
8	1100	30	20	5	1	11	43	19	44
9	1200	32	23	7	2	9	41	22	37
10	1300	34	26	9	3	7	39	21	39
11	1400	36	29	2	1	5	45	27	54
12	1500	38	32	4	2	3	42	29	40
13	1600	40	35	6	3	12	47	31	41
14	1700	31	20	8	1	10	40	18	36
15	1800	33	22	10	4	8	39	19	42

Исходные данные для расчета  
(указаны согласно номеру студента в журнале)

№	$f$ МГц	$h_T$ м	$h_R$ м	$a$ км	$b$ км	$c$ км	$H'_1$ м	$H'_2$ м	$H''_2$ м
16	1900	35	24	3	1	6	41	22	34
17	2000	37	27	4	3	4	43	25	37
18	2100	39	25	5	2	11	42	22	38
19	2200	41	29	6	1	10	50	26	47
20	2300	43	34	7	2	9	48	30	41
21	2400	45	36	8	3	8	54	32	50
22	2500	47	35	3	4	7	51	34	46
23	2600	49	37	5	1	6	55	33	51
24	2700	51	45	7	2	5	57	40	52
25	2800	53	41	9	3	4	58	36	54
26	2900	34	23	2	1	5	42	20	44
27	3000	37	22	4	1	6	46	20	41
28	3100	40	28	5	2	7	46	25	43
29	3200	43	29	8	4	8	49	25	47
30	3300	46	30	10	1	5	53	25	55

2. Для заданных частоты  $f$  и расстояний  $b$  и  $c$  рассчитать и построить графики зависимости величины потерь на дифракцию на клине в дБ от расстояния  $a$  (диапазон 1–15 км, точки через 1 км) для каждой из пар высот: 1)  $H'_1$  и  $H'_2$ ; 2)  $H'_1$  и  $H''_2$ . Графики строить на одном рисунке.

3. Для заданных частоты  $f$  и расстояний  $a$  и  $c$  рассчитать и построить графики зависимости величины потерь на дифракцию на клине в дБ от расстояния  $b$  (диапазон 1–15 км, точки через 1 км) для каждой из пар высот: 1)  $H'_1$  и  $H'_2$ ; 2)  $H'_1$  и  $H''_2$ . Графики строить на одном рисунке.

4. Для заданных частоты  $f$  и расстояний  $a$  и  $b$  рассчитать и построить графики зависимости величины потерь на дифракцию на клине в дБ от расстояния  $c$  (диапазон 1–15 км, точки через 1 км) для каждой из пар высот: 1)  $H'_1$  и  $H'_2$ ; 2)  $H'_1$  и  $H''_2$ . Графики строить на одном рисунке.

5. Сделать выводы по результатам расчетов.

6. Сформировать в электронном виде (формат PDF) отчет по работе, в который включить: процедуру расчетов (если считали в программе или скрипте, приложить их к отчету), таблицы результатов, графики, выводы по результатам расчетов.

#### 5.4. Контрольные вопросы

1. Дифракция на клине.
2. Потери на дифракцию на клине при двух препятствиях.

# Практическая работа 6

## Оценка потерь на трассе радиоканала в случае дифракции на цилиндре

### 6.1. Цель работы

Целью данной работы является ознакомление с механизмом дифракции радиосигнала на цилиндре и принципами оценки величины потерь, вызываемых данным типом дифракции.

### 6.2. Теоретические сведения

В большинстве ситуаций препятствия, встречающиеся на местности, не похожи на простой клин и аппроксимация их клином не позволяет в полной мере оценить потери на дифракцию. Существуют различные способы решения этой задачи. Один из них состоит в том, что вершину препятствия моделируют цилиндром радиуса  $r$ , как показано на рис. 6.1.

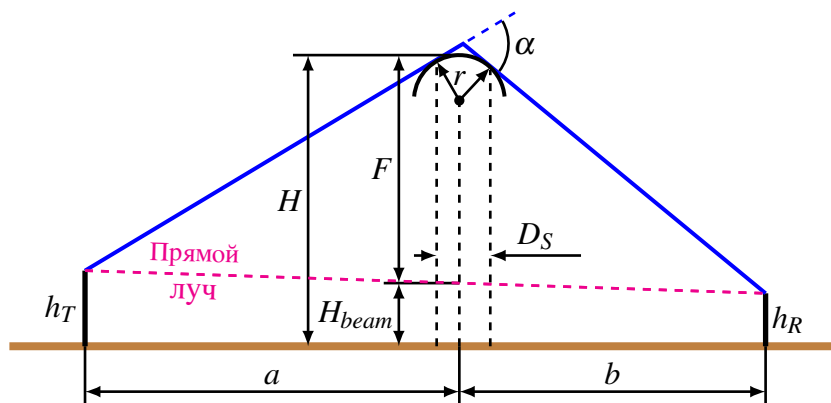


Рис. 6.1. Модель препятствия с закругленной вершиной

#### 6.2.1. Первый вариант оценки потерь на препятствии со скругленной вершиной

Чтобы рассчитать потери, необходимо нарисовать профиль объекта и провести прямые линии из конечных точек линии связи так, чтобы они касались самых высоких частей объекта, которые видны из индивидуальных ракурсов. Затем необходимо оценить параметры  $D_S$ ,  $a$ ,  $b$  и вычислить радиус  $r$  по формуле

$$r_{[M]} = \frac{2D_{S[M]}ab}{\alpha(a^2 + b^2)}, \quad (6.1)$$

где  $\alpha$  измеряется в радианах.

Далее вычисляют потери на дифракцию на клине  $L_{wdg}$ , образованном касательными к препятствию, и дополнительные потери:

$$L_r = 11,7\alpha \sqrt{\frac{\pi r_{[M]}}{\lambda_{[M]}}}. \quad (6.2)$$

При вычислении дополнительных потерь применяется коррекция этих потерь на неровность: если объект, например, холм, вершина которого не гладкая, а покрыта деревьями, то дополнительные потери составят примерно 65% от потерь  $L_r$ , вычисленных согласно (6.2). В общем случае более гладкие объекты дают более высокие потери на дифракцию.

Суммарные потери на дифракцию на препятствии с закругленной вершиной вычисляются как:

$$L_{dif} = L_{wdg} + L_r. \quad (6.3)$$

### **6.2.2. Второй вариант оценки потерь на препятствии со скругленной вершиной**

Дополнительные потери на дифракцию на препятствиях с фиксированным безразмерным показателем кривизны по отношению к потерям на клине пропорциональны разности потерь на дифракцию на гладкой сфере и клине. Для каждого значения коэффициент пропорциональности  $R$  есть величина постоянная и не зависит от отношения  $F/F_1$ , где  $F_1$  — радиус первой зоны Френеля в месте расположения препятствия (м), а  $F$  — величина просвета между линией прямого луча в месте расположения препятствия и высотой этого препятствия, т. е. разница (разность) между высотой линии прямого луча над поверхностью земли ( $H_{beam}$ ) и высотой препятствия ( $H$ ) с учётом кривизны земной поверхности, которая оценивается по формуле (4.1). Коэффициент пропорциональности  $R$  в некоторых источниках называют коэффициентом эквивалентной закругленности.

Дифракция на клине (wedge) соответствует  $R = 0$ , а на гладкой сфере  $R = 1$  (земля без препятствий). Для препятствий, имеющих  $0 < R < 1$ , потери на дифракцию  $L_{dif}$  вычисляют по формуле

$$L_{dif} = L_{wdg} + R \cdot (L_{sph} - L_{wdg}). \quad (6.4)$$

Пусть  $x = F/F_1$ . Тогда граничные кривые, определяющие потери на клине и на гладкой сфере, можно аппроксимировать следующими выражениями:

$$L_{sph} = -38,68x + 21,66; \quad (6.5)$$

$$L_{wdg} = \begin{cases} 1,377x^2 - 11,31x + 6, & \text{для } x \geq -0,5, \\ -50,4/(1,6 - x) + 36, & \text{для } x < -0,5, \end{cases} \quad (6.6)$$

где  $L_{sph}$  и  $L_{wdg}$  соответственно потери на дифракцию на гладкой сфере и на клине по отношению к свободному пространству, дБ, а  $x \leq 0,6$ .

### Список использованных источников

1. Бабков, В. Ю. Сотовые системы мобильной радиосвязи / В. Ю. Бабков, И. А. Цикин. — СПб. : БХВ-Петербург. — 432 с.
2. Виноградов, Е. М. Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств : учебное пособие / Е. М. Виноградов. — СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. — 301 с.

### 6.3. Порядок выполнения задания

1. Выбрать из табл. 6.1 согласно своему номеру варианта исходные данные для расчета. Принять во внимание, что указана высота препятствия над уровнем моря.

Таблица 6.1

Исходные данные для расчета  
(указаны согласно номеру студента в журнале)

№	$f$ МГц	$h_T$ м	$h_R$ м	$a$ км	$b$ км	$H'$ м	$D_S$ м	№	$f$ МГц	$h_T$ м	$h_R$ м	$a$ км	$b$ км	$H'$ м	$D_S$ м
1	800	45	30	3	7	50	25	16	2300	53	43	5	6	61	24
2	900	56	24	4	4	60	20	17	2400	51	30	6	3	60	25
3	1000	58	35	5	5	62	21	18	2500	55	36	2	4	64	24
4	1100	53	31	6	6	70	22	19	2600	49	32	3	5	64	23
5	1200	44	29	3	4	72	23	20	2700	46	36	4	6	65	22
6	1300	49	35	4	5	67	24	21	2800	54	39	5	7	63	21
7	1400	47	34	5	6	58	25	22	2900	56	39	2	8	69	20
8	1500	51	38	6	7	65	24	23	3000	52	41	3	3	71	21
9	1600	50	41	3	6	63	23	24	700	47	32	4	4	59	22
10	1700	48	28	4	5	59	22	25	600	45	36	5	7	58	23
11	1800	46	37	5	4	57	21	26	950	49	37	6	3	67	24
12	1900	44	34	6	3	53	20	27	1150	57	43	3	5	73	25
13	2000	48	30	2	7	67	21	28	1350	48	41	2	3	65	24
14	2100	52	42	3	4	65	22	29	1550	46	36	5	4	64	23
15	2200	48	31	4	5	61	23	30	1650	45	32	4	2	69	22

2. Для заданных частоты  $f$  и расстояния  $b$  рассчитать (двумя способами, для каждого способа считать отдельно для гладкой поверхности с  $R = 1$  и отдельно для неровной  $R = 0,65$ ) и построить графики зависимости величины потерь на дифракцию на цилиндре в дБ от расстояния  $d = d_1 + d_2$  при изменении расстояния  $a$  (диапазон 1–10 км, точки через 1 км) для высоты препятствия  $H = H' + h_0(a)$  (учесть кривизну земной поверхности). Для сравнения привести график потерь в свободном пространстве, посчитанный по форму-

ле (3.3) для тех же расстояний  $d$ . Графики строить на одном рисунке (всего должно получиться пять кривых).

3. Для заданных частоты  $f$  и расстояния  $a$  рассчитать (двумя способами, для каждого способа считать отдельно для гладкой поверхности с  $R = 1$  и отдельно для неровной  $R = 0,65$ ) и построить графики зависимости величины потерь на дифракцию на цилиндре в дБ от расстояния  $d = d_1 + d_2$  при изменении расстояния  $b$  (диапазон 1–10 км, точки через 1 км) для высоты препятствия  $H = H' + h_0(a)$  (учесть кривизну земной поверхности). Для сравнения привести график потерь в свободном пространстве, посчитанный по формуле (3.3) для тех же расстояний  $d$ . Графики строить на одном рисунке (всего должно получиться пять кривых).

4. По результатам расчетов сделать выводы о том, какая из составляющих — потери в свободном пространстве или потери на дифракцию — является преобладающей. А также оценить влияние расстояний  $a$  и  $b$  на величину потерь на дифракцию на цилиндре.

5. Сформировать в электронном виде (формат PDF) отчет по работе, в который включить: процедуру расчетов (если считали в программе или скрипте, приложить их к отчету), таблицы результатов, графики, выводы по результатам расчетов.

#### 6.4. Контрольные вопросы

1. Как рассчитываются потери на препятствии со скругленной вершиной через дифракцию на клине, образованном касательными к препятствию?

2. Как рассчитываются потери на препятствии со скругленной вершиной через радиус первой зоны Френеля и величину просвета между линией прямого луча и высотой препятствия?

**Владимиров Сергей Сергеевич**

**БЕСПРОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.  
РАСЧЕТ ПОТЕРЬ НА ТРАССЕ РАДИОКАНАЛА**

**Практикум**

Редактор *Л. К. Паршина*

План изданий 2020 г., п. 32

Подписано к печати 16.07.2020  
Объем 2,0 печ. л. Тираж 10 экз. Заказ 1094

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ  
193232 СПб., пр. Большевиков, 22  
Отпечатано в СПбГУТ