

МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина

ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра «Сети связи и системы коммуникаций»

## **УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к выполнению практических работ  
по дисциплине «Планирование сетей мобильной связи»**

Бишкек 2025

**Рецензенты:**

*А.К. Кармышаков*, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой  
«Электроника и инфокоммуникационные технологии»

Кыргызского государственного технического  
университета им. И. Раззакова,

*М.Ж. Жумабаев*, канд. техн. наук, доцент кафедры  
«Электроника и инфокоммуникационные технологии»

Кыргызского государственного технического  
университета им. И. Раззакова,

*С.М. Токтогонов*, канд. техн. наук, декан факультета  
физики и электроники Кыргызского национального  
университета им. Жусупа Баласагына

**Составители:**

*М.О. Оконов*, канд. техн. наук, доцент,

*А.С. Курманкожоева*

Рекомендовано к изданию Ученым советом  
естественно-технического факультета КРСУ им. Б.Н. Ельцина

У 91 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к выполнению прак-  
тических работ по дисциплине «Планирование сетей мобильной  
связи» / сост.: М.О. Оконов, А.С. Курманкожоева. – Бишкек: Изда-  
тельский дом КРСУ, 2025. – 56 с.

Данные учебно-методические указания включают подробный план проведения практических занятий по курсу «Планирование сетей мобильной связи». Структурированный вид проведения практических занятий, изложенный в данных указаниях, позволит студентам улучшить подготовку к практическим занятиям, что повысит эффективность учебного процесса. Предоставлен теоретический материал курса, охватывающий обширный круг актуальных вопросов по системам подвижной связи.

Учебно-методические указания к выполнению практических работ предназначены для магистрантов, обучающихся в магистратуре Кыргыско-Российского Славянского университета по направлению подготовки 690300 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи, профиль подготовки «Сети связи».

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Методические указания к выполнению практических работ .....	5
<b>Практическая работа 1. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ И СПОСОБОВ ИХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ .....</b>	<b>8</b>
Краткие теоретические сведения.....	8
Практическое задание и методические указания к выполнению работы..	17
<b>Практическая работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ .....</b>	<b>19</b>
Краткие теоретические сведения.....	19
Практическое задание и методические указания к выполнению работы ....	25
<b>Практическая работа 3. ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН.....</b>	<b>27</b>
Краткие теоретические сведения.....	27
Практическое задание и методические указания к выполнению работы ....	34
<b>Практическая работа 4. РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ.....</b>	<b>36</b>
Краткие теоретические сведения.....	37
Практическое задание и методические указания к выполнению работы ....	44
<b>Практическая работа 5. ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОЙ СОТОВОЙ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА GSM .....</b>	<b>46</b>
Краткие теоретические сведения.....	46
Практическое задание и методические указания к выполнению работы ....	53
ЛИТЕРАТУРА .....	54

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях плотной городской застройки (с дополнительными требованиями к ёмкости системы) необходимо создание систем массовой радиосвязи с большим числом подвижных абонентов, большой пропускной способностью и высоким качеством приема сообщений, что возможно только при использовании сотового принципа построения системы связи. В настоящее время ведется интенсивное внедрение сотовых сетей связи (ССС) общего пользования. Соответственно, возрастает роль систем связи, требования к качеству передачи информации, пропускной способности, надежности работы.

Свое название СССР получили в соответствии с сотовым принципом организации связи, согласно которому зона обслуживания делится на большое число малых рабочих зон (условно – сот в виде шестиугольников), и с помощью статистических законов распространения радиоволн определяются их допустимые размеры и расстояние до других зон, в пределах которых выполняются условия допустимого взаимного влияния.

Расстояние до ячеек, в которых могут быть использованы одни и те же рабочие частоты, зависит от условий распространения радиоволн, допустимого уровня помех и числа радиостанций, расположенных вокруг данной ячейки. Считается допустимым, чтобы в сотовой структуре частоты повторялись через две ячейки, иначе могут возникнуть проблемы с необходимой мощностью сигнала. В этом случае ёмкость и покрытие могут быть специально подобраны для обеспечения уникальных требований по трафику путем использования иерархических сотовых структур (ИСС). Иерархические сотовые структуры позволяют комбинировать макро-, микро- и пикобазовые станции в одной и той же области для достижения большей ёмкости и непрерывного покрытия во всей сети.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

Методические указания предназначены для магистрантов, обучающихся в магистратуре по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», в рамках которого на кафедре реализуется программа «Сети связи».

Мобильные сети связи с подвижными объектами базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений современных телекоммуникационных технологий.

Основными задачами практического занятия дисциплины являются:

- получение общих представлений о частотно-территориальном планировании (ЧТП) сетей связи с подвижными объектами и общих технических характеристиках систем связи с подвижными объектами (ССПО);
- получение навыков определения количественных оценок параметров ЧТП и общих технических характеристик ССПО;
- изучение способов формирования технических характеристик ССПО и их применения на примере цифровой сотовой ССПО стандарта GSM;
- рассмотрение структурных схем, особенностей построения аппаратуры, интерфейсов, терминального оборудования, способов формирования сигналов в стандарте GSM

Данные методические указания включают подробный план проведения практических занятий по курсу «Сети связи». Структурированный вид проведения практических занятий, изложенный в данных указаниях, позволит студентам улучшить подготовку к практическим занятиям, что повысит эффективность учебного процесса.

Теоретический материал курса «Сети сотовой связи» охватывает обширный круг актуальных вопросов по системам подвижной связи.

Методические указания позволяют улучшить усвоение учебного материала, пройденного на лекционных занятиях. Обучающиеся смогут овладеть и свободно оперировать в области телекоммуникаций. Решение практических задач, сформированных в данных методических указаниях, позволит студентам укрепить знания теоретического материала по указанной дисциплине.

### **Требования к знаниям и умениям при выполнении практических работ**

В результате выполнения практических работ, предусмотренных программой по данной специальности, обучающийся:

#### ***Должен знать:***

- общие основы теории связи;
- основные технико-экономические показатели работы сетей сотовой связи и ее структурных показателей;
- направления эффективной эксплуатации и проектирования систем сотовой связи.

#### ***Уметь:***

- рассчитывать технические показатели сетей мобильной связи;
- определять экономическую эффективность от внедрения организационно-технических мероприятий;
- использовать в работе техническую, нормативную документацию и справочный материал;
- использовать компьютерную технику в режиме пользователя.

Практические работы рассчитаны на выполнение в течение учебного семестра.

Правила выполнения практических работ, следующие:

1. Обучающийся должен прийти на практическое занятие подготовленным к выполнению работы. Обучающийся, не подготовленный к работе, не может быть допущен к ее выполнению.

2. Каждый обучающийся после выполнения работы должен представить отчет о проделанной работе с анализом полученных результатов и выводом по работе.
3. Отчет о проделанной работе следует делать в тетради для практических работ.
4. Таблицы и рисунки следует выполнять с помощью чертежных инструментов (линейки, циркули и т. д.), карандашом с соблюдением ЕСКД.
5. В заголовках граф таблиц обязательно проводить буквенные обозначения величин и единицы измерения в соответствии с ЕСКД.
6. Расчет следует проводить с точностью до двух значащих цифр.
7. Исправления выполняют на полях рабочей тетради. При мелких исправлениях неправильное слово (буква, число и т. п.) аккуратно зачеркивают и над ним пишут правильное пропущенное слово (букву, число).
8. Вспомогательные расчеты можно выполнить на отдельных листах.
9. Если обучающийся не выполнил практическую работу или часть работы, он может выполнить работу или оставшуюся часть во внеурочное время, согласованное с преподавателем.
10. Оценку по практической работе обучающийся получает, с учетом срока выполнения работы, если:
  - расчеты выполнены правильно и в полном объеме;
  - сделан анализ проделанной работы и вывод по результатам работы;
  - студент может пояснить выполнение любого этапа работы;
  - отчет выполнен в соответствии с требованиями к выполнению работы.

Зачет с оценкой по практическим работам магистрант получает при условии выполнения всех предусмотренной программой работ после сдачи отчетов по работам при удовлетворительных оценках за опросы и контрольные вопросы во время практических занятий.

## Практическая работа 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ И СПОСОБОВ ИХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

#### *Цель работы:*

1. Ознакомление с содержанием частотно-территориального планирования (ЧТП) сетей связи с подвижными объектами, общими техническими характеристиками систем связи с подвижными объектами (ССПО) и способами их обеспечения.
2. Расчет основных технических характеристик ССПО.
3. Получение навыков оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) аппаратуры ССПО с использованием основных технических характеристик.
4. *Задание.*
5. Изучить основные теоретические сведения по теме.
6. Рассчитать основные параметры ЧТП сети связи и технические характеристики ССПО.
7. Порядок выполнения работы.
8. Изучить технические требования к ССПО различных стандартов.
9. Выделить основные частотные параметры ССПО, задаваемые стандартом.

Для защиты лабораторной работы должен быть представлен отчет, оформленный с соблюдением требований ЕСКД в рукописном или печатном виде.

#### Краткие теоретические сведения

Главные элементы системы связи с подвижными объектами (ССПО):

- центр коммутации подвижной службы (ЦКПС);



- базовые и абонентские станции (центр коммутации подвижной службы и БС и АС);
- стационарные линии связи (кабельные, радиорелейные и др.) БС со своим ЦКПС;
- стационарные линии связи ЦКПС сети с транзитными коммутаторами;
- ТфОП и обмена информацией по общему каналу сигнализации ОКС 7.

Сота – это территория, обслуживаемая одной БС при всенаправленных антеннах. В зависимости от радиуса  $r$  соты подразделяют на макросоты  $cr \geq 0,5$  км, микросоты с  $r \leq 0,5$  км и пикосоты радиусом несколько десятков метров. Каждая БС поддерживает радиосвязь с АС, находящимися в своей соте. Во избежание взаимных помех соседние БС работают на разных частотах. Каждой соте присваивается частотная группа и для всей ССПО составляется частотно-территориальный план (ЧТП).

Частотно-территориальное планирование сетей ССПО предусматривает выбор структуры (конфигурации) сети, места установки БС, выбор типа, высоты и ориентации антенн, распределение частот между БС. Для уменьшения капитальных затрат должна осуществляться оптимизация частотно-территориального плана, т. е. необходимо разрабатывать план, обеспечивающий заданную зону обслуживания, емкость сети, требуемое качество обслуживания при минимальном числе базовых станций и используемых частот.

Планирование должно обеспечивать внутрисистемную и межсистемную электромагнитную совместимость (ЭМС) радиосредств. В первом случае обеспечивается ЭМС между радиостанциями проектируемой сети, во втором – между радиосредствами проектируемой сети и радиосредствами других систем, работающими в общих и смежных полосах частот и являющимися потенциальными источниками помех.

ЧТП ССПО условно можно разделить на две части (рисунок 1.1):

- 1) частотный план – распределение частот приема и передачи между каналами, присвоенное стандарту;

- 2) территориальный план – привязка частотного плана к конкретной территории, в котором указывается:
- размерность кластера;
  - распределение частотных групп между сотами;
  - число каналов в каждой частотной группе, присвоенной соте;
  - номинальные значения частот каналов в такой группе.

В ССПО используется принцип многократного повторного использования частот связи: одни и те же частоты предоставляются различным пользователям на всей территории, обслуживаемой системой. Принцип построения предполагает работу многих БС на совпадающих частотах (рисунок 1.2) БС центральной соты и БС M1 – M6).

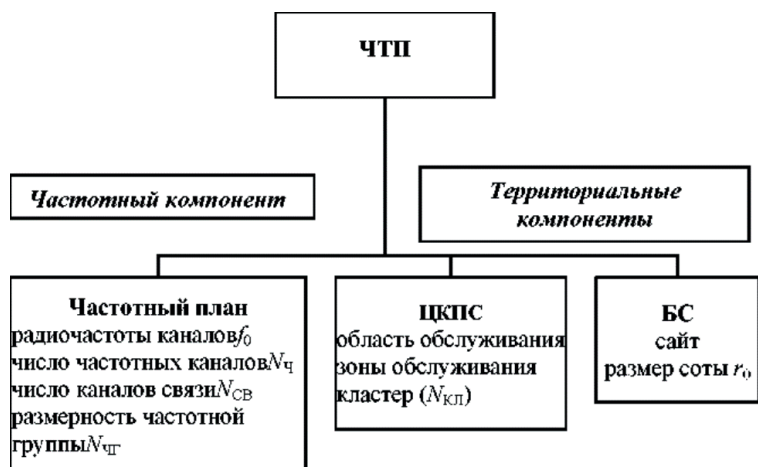


Рисунок 1.1 – Основные параметры ЧТП

Интерференционная помеха от таких БС рассматривается как внутрисистемная помеха, определяющая их электромагнитную совместимость (ЭМС), и именно эта помеха определяет такой параметр структуры, как размерность кластера НКЛ. На основе геометрии однородной модели ССПО, размеры сот в которой постоянны, расстояние между БС, работающими на совпадающих частотах, определяется соотношением

$$d_{\text{кл}} = qr_0 \quad (1.1)$$

где  $q = \frac{E_c(r_0)}{E_{\text{и}}(d_{\text{кл}})} \approx \sqrt{3 * N_{\text{кл}}}$ ; – коэффициент ослабления интерференционной помехи (коэффициент ЭМС-сети);

$-E_c r_0$ ,  $E_{\text{и}}(d_{\text{кл}})$  напряженности поля сигнала от АС и интерференционной помехи в точке расположения БС центральной соты.

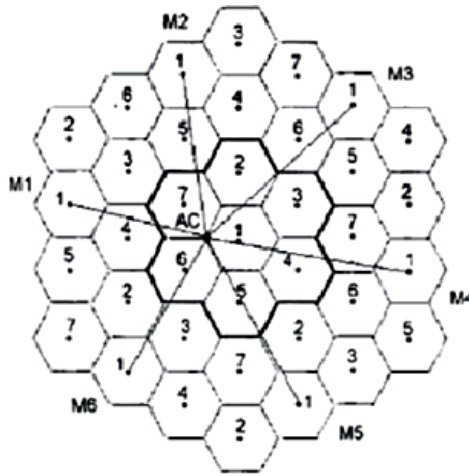


Рисунок 1.2 – Фрагмент ЧТП при  $N_{\text{кл}} = 7$  М1 – М6 БС, работающих на совпадающих частотах и создающих интерференционные помехи

Для одного мешающего сигнала отношение мощностей «сигнал – интерференционная помеха» на границе соты равно

$$Q_{\text{с-и}} = \left( \frac{d_{\text{кл}}}{r_0} \right)^{-n}, \quad (1.2)$$

где  $n$  – показатель затухания при распространении сигналов: в зависимости от условий распространения сигнала принимает значения  $n = 2 \dots 4$ . Подставив (1.1) в (1.2) и учитывая, что в однородной модели на одной частоте наблюдаются примерно одинаковые мешающие

сигналы от шести БС, для допустимого отношения «сигнал – интерференция» на входе приемника при  $n = 4$  запишем

$$Q_{C-И}^* = \frac{1}{6} \left( \frac{d_{кл}}{r_0} \right)^4 = 1.6 (3N_{кл})^2 = \frac{3}{2} N_{кл}^2. \quad (1.3)$$

Соотношение (3) позволяет определить размерность кластера

$$N_{кл} = \sqrt{\left( \frac{2}{3} \right) Q_{C-И}^*} \quad (1.4)$$

$$Q_{C-И}^* = 10^{0,1q_{C-И}^*}, \quad (1.5)$$

где  $q_{C-И}^*$  – допустимое отношение «сигнал – интерференция» (в дБ) в однородной модели, которое определяется стандартом ССПО.

$$q_{C-И}^* = \begin{cases} 9 \text{ дБ} - \text{для системы GSM} \\ 15 \text{ дБ} - \text{для системы GSM} \\ 16 \text{ дБ} - \text{для системы GSM} \end{cases}.$$

Поэтому в цифровых системах можно использовать кластеры с меньшей размерностью, что, в свою очередь, повышает частотную эффективность цифровых систем.

Следовательно, в цифровой системе GSM допустимая мощность интерференционной помехи на входе приемника больше, чем в аналоговой системе NMT-450.

Число каналов в соте (канальная эффективность, радиоемкость соты)

$$N_{чг} = N_{чг} / N_{кл}. \quad (1.6)$$

ССПО обычно работают в диапазоне ультравысоких частот (УВЧ) (дециметровых волн). Максимальный радиус соты имеет место при отсутствии неровностей рельефа и ограничивается кризисной земной поверхностью. Такая линия радиосвязи называется открытой. Ее протяженность определяется расстоянием прямой видимости

$$d_{пв} = 3.57 \sqrt{h_1 + h_2}. \quad (1.7)$$

здесь  $d_{пв}$  выражено в километрах,  $h_1$ ,  $h_2$  – высоты расположения (подвеса) антенн БС и АС – в метрах).

При распространении радиосигнала на открытых трассах могут быть использованы следующие параметры радиоволн:

1. Действующее значение напряженности электрического поля в свободном пространстве для направленной передающей антенны с коэффициентом усиления  $G_1$ , к которому подведена мощность  $P_1$ :

$$E_0 = \sqrt{\frac{30P_1G_1}{d}} \text{ [В/м]}. \quad (1.8)$$

2. Плотность потока мощности (мощность, приходящаяся на единицу поверхности):

$$W = P_1 / 4\pi d^2 \text{ [Вт/м}^2\text{]}. \quad (1.9)$$

3. Мощность сигнала от БС на входе приемника АС зависит от протяженности  $d$  трассы и частоты (длины волны)

$$P_{\text{С ВХ}}(f, d) = P_1 G_1 G_2 \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 10^{-(a_1 + a_2)} \quad (1.10)$$

или уровень мощности (в дБ) сигнала от БС на входе приемника АС

$$p_{\text{С ВХ}} = 10 \lg P_{\text{С ВХ}} = p_0(f, d), \quad (1.11)$$

где  $p_0(f, d)$  – уровень мощности сигнала в точке приема при распространении в свободном пространстве:

$$p_0(f, d) = p_{\Pi} + g_1 + g_2 - (a_{\text{СВ}} + a_1 + a_2), \quad (1.12)$$

где  $p_{\Pi}$  – уровень мощности передатчика;

$g_1, g_2$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно, выраженные в децибелах;

$a_1, a_2$  – потери в фидере передающей и приемной антенн, соответственно;

$a_{\text{св}} = 20 \lg(4\pi d/\lambda)$  – ослабление свободного пространства;  $d$  – протяженность трассы;

$\lambda$  – рабочая длина волны.

Для более простого расчета, где мощность, принятая приемной антенной усилением,  $G_2$  которая излучается антенной передатчика мощностью  $P_1$  с коэффициентом усиления  $G_1$  на длине волны  $\lambda$

на расстоянии  $d$  на открытом неограниченном пространстве, применяют формулу

$$P_{\text{с вх}}(f, d) = P_1 G_1 G_2 \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (1.13)$$

Коэффициент усиления антенны определяется следующим образом

$$G = \frac{4\pi \cdot A_3}{\lambda^2}, \quad (1.14)$$

где  $A_3$  – эффективная площадь поверхности антенны, м<sup>2</sup>;

Длина волны связана с несущей частотой соотношением

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (1.15)$$

Принимаемая антенной мощность в соответствии с (1.13) убывает с  $\frac{1}{d^2}$  ростом расстояния  $d$  со скоростью 20 дБ в декаду, т. е. пропорционально множителю.

Потери передачи в радиоканале (отношение принятой  $P_2$  и излученной мощностей  $P_1$ )

$$PL = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} = -10 \cdot \lg \left[ G_1 G_2 \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right]. \quad (1.16)$$

Для изотропных антенн (коэффициент усиления каждой из них

$$PL = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} = -10 \cdot \lg \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right]. \quad (1.17)$$

Предыдущие выражения верны только для дальней зоны (или зоны Фраунгофера). Граница дальней зоны определяется условием

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (1.18)$$

где  $D$  – наибольший размер антенны. Дополнительным условием дальней зоны должно быть выполнение соотношений

$$d_f \gg D;$$

$$d_f \gg \lambda.$$

На больших расстояниях при расчете напряженности поля в точке приема иногда используют значение принимаемой мощности на некотором фиксированном расстоянии  $d_0$ . Тогда на ином расстоянии  $d$

$$P_2(d) = P_2(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2, \quad d \geq d_0 \geq d_f. \quad (1.19)$$

Так как изменение уровня принимаемой мощности от расстояния очень велико, используют отсчет мощности в дБмВт (дБ по отношению к 1 милливатту) и дБВт (дБ по отношению к 1 ватт)

$$P_2(d)[\text{дБмВт}] = 10 \cdot \lg \left[ \frac{P_2(d_0)}{1 \text{ мВт}} \right] + 20 \cdot \lg \left( \frac{d_0}{d} \right), \quad d \geq d_0 \geq d_f, \quad (1.20)$$

где  $P_2(d_0)$  подставляется в Вт

$$P_2(d)[\text{дБВт}] = 10 \cdot \lg \left[ \frac{P_2(d_0)}{1 \text{ Вт}} \right] + 20 \cdot \lg \left( \frac{d_0}{d} \right). \quad (1.21)$$

Опорное расстояние  $d_0$  обычно выбирается равным 100 м или 1 км для связи вне зданий. Для радиоканалов внутри зданий типичное значение опорного расстояния  $d_0 = 1$  м. Иногда в расчетах используется параметр – эффективная излучаемая мощность (эквивалентная изотропная излучаемая мощность)  $P_{\text{эф}}$ , которая показывает, во сколько раз плотность потока мощности в точке расположения приемной антенны при излучении мощности  $P_1$  будет больше при использовании антенны с коэффициентом усиления  $G_1$  по сравнению с изотропной антенной. Выражение

$$P_{\text{эф}} = P_1 G_1 \quad (1.22)$$

показывает максимальную излучаемую мощность в направлении максимального излучения.

Плотность потока мощности на расстоянии  $d$  от передающей антенны

$$P_d = \frac{P_{\text{эф}}}{4\pi \cdot d^2} = \frac{P_1 G_1}{4\pi \cdot d^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|E|^2}{120\pi \text{ м}^2}, \quad (1.23)$$

где 120 Ом – характеристическое сопротивление свободного пространства.  $E$  – амплитуда электрического поля на расстоянии  $d$ , В/м.

Принимаемая мощность (мощность, перехватываемая приемной антенной из падающей плоской волны)

$$P_2(d) = P_d \cdot A_э = \frac{1}{2} \cdot \frac{|E|^2}{120\pi} \cdot A_э = P_1 G_1 G_2 \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \text{ Вт}, \quad (1.24)$$

где  $A_э$  – эффективная площадь поверхности антенны, м<sup>2</sup>. Эквивалентная схема приемной антенны, включенной на вход приемника, показана на рисунке 1.3. При условии согласования входного сопротивления антенны и приемника напряжение на входе последнего будет равно половине ЭДС антенны. Действующее напряжение с принятой мощностью описывается выражением

$$P_2(d) = \left( \frac{U}{2 \cdot R_a} \right)^2 = \frac{U^2}{4 \cdot R_a^2} \quad (1.25)$$

и приемника ( $R_a = R_{пр}$ ) напряжение на входе последнего будет равно половине ЭДС антенны. Действующее напряжение  $U$  с принятой мощностью описывается выражением

$$P_2(d) = \left( \frac{U}{2 \cdot R_a} \right)^2 = \frac{U^2}{4 \cdot R_a^2}. \quad (1.25)$$

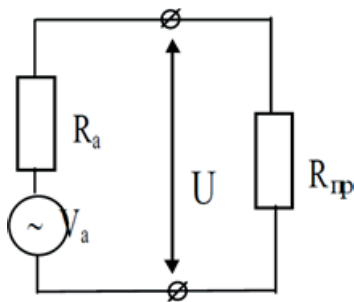


Рисунок 1.3 – Эквивалентная схема приемной антенны, включенной на вход приемника

Напряжение на входе приемника определяется по формуле

$$U = 2\sqrt{P_2(d) \cdot R_a}, \text{ В}. \quad (1.26)$$



**Практическое задание**  
**и методические указания к выполнению работы**

Таблица 1.1 – Параметры для расчета

Параметры	1	2	3	4
Излученная мощность $P_1$ , Вт	20	19	15	22
Частота $f$ , МГц	1880	5600	2460	930
Коэффициент усиления антенны $G_1$ , дБ	15	17	20	19
Коэффициент усиления антенны $G_2$ , дБ	2	1,8	1,5	3
Размерность кластера $N_{\text{КЛ}}$	9	6	7	5
Показатель затухания, $n$	2	3	4	3
Радиус соты $r_0$ , км	1,5	0,8	2	3,5
Протяженность трассы $d$	$r_0$	$r_0$	$r_0$	$r_0$
Потери в фидере, передающей и приемной антенн $a_1 = a_2$ , дБ	0,5	0,3	0,6	0,7
Высота расположения антенны БС $h_1$ , м	5	11	8	7
Высота расположения антенны АС $h_2$ , м	30	25	33	40

1. Рассчитать длину волны  $\lambda$  по варианту из таблицы 1.1, заданному преподавателем. Для нахождения длины волны нужно воспользоваться соотношением (1:15).

Найти границу дальней зоны антенны с максимальным размером  $D = 1$  м.

Для этого необходимо воспользоваться формулой (1.18).

Выбрать приемлемое значение опорного расстояния  $d_0$ .

2. Передатчик излучает мощность  $P_1$ , заданную в таблице 1.1.
  - выразить излучаемую мощность в дБВт, воспользовавшись выражением (1.21);
  - выразить излучаемую мощность в дБмВт, воспользовавшись выражением (1.20);
  - рассчитать принятую мощность  $P_2$  по формуле (1.13);

- при условии, что излучается мощность  $P_1$ , вычислить принимаемую мощность  $P_2$  в дБмВт (1.20) в свободном пространстве на расстоянии  $d_0$ ;
  - применяя формулу (1.19), рассчитать мощность на выходе приемной антенны при использовании данных предыдущего пункта на расстоянии 10 км от передающей антенны.
3. Излученная мощность  $P_1$  задана в таблице 1.1. Приемник расположен на расстоянии  $d$  от передатчика, несущая частота равна  $f$ . Считать, что обе антенны имеют коэффициенты усиления  $G_1$ ,  $G_2$ . Данные для вычисления находятся в таблице 1.1.
    - найти мощность на выходе приемной антенны  $P_2$  по формуле (1.16);
    - выразить амплитуду электрического поля  $|E|$  вблизи приемной антенны из выражения (1.24) и вычислить ее;
    - по формуле (1.26) найти напряжение сигнала  $U$ , приложенное ко входу приемника, если выходное сопротивление антенны 50 Ом, и она согласована с приемником.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение понятию «интерференционная помеха».
2. Что такое зона освещенности?
3. На какие элементы можно разделить системы связи с подвижными объектами?
4. Что такое сота?
5. Проиллюстрируйте прохождение лучей от передающей до приемной антенны в области освещенности.
6. От чего зависит ослабление свободного пространства?
7. Каким образом напряжение на входе приемника зависит от принятой мощности?
8. По какой формуле рассчитывается мощность сигнала от БС на входе приемника АС?
9. Назовите основные параметры частотно-территориального планирования.

## Практическая работа 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

#### ***Цель работы:***

1. Ознакомление с методами исследования энергетических показателей ССПО при высокоподнятых антеннах.
- Расчет энергетических показателей ССПО при высокоподнятых антеннах.

#### ***2. Задание:***

- Изучить в процессе самостоятельной подготовки основные теоретические сведения по теме данной работы.
- Выполнить необходимые предварительные расчеты.

#### ***3. Порядок выполнения работы.***

- Изучить материалы лекции.
- Изучить методические указания к данной работе.
- Получить у преподавателя задание на выполнения работы.
- Ответить на контрольные вопросы.

Для защиты лабораторной работы должен быть представлен отчет, оформленный с соблюдением требований ЕСКД в рукописном или печатном виде.

### Краткие теоретические сведения

ССПО обычно работают в диапазоне ультравысоких частот (УВЧ).

Оценка энергетических показателей ССПО заключается в расчете уровня мощности сигнала на входе приемника при различных условиях распространения радиоволн при высокоподнятых антеннах:

- для открытой линии радиосвязи в пределах зоны освещенности (прямой видимости);

- с учетом кривизны земной поверхности, ограничивающей радиовидимость, без отражения радиоволн от земной поверхности и для двухлучевой трассы с интерференции лучей.

Высокоподнятыми считаются передающая и приемная антенны при выполнении условия

$$h_1 \gg \lambda; \quad h_2 \gg \lambda, \quad (2.1)$$

где,  $h_1, h_2$  – высоты антенн;  $\lambda$  – рабочая длина волны.

На открытых трассах в зоне освещенности уровень мощности  $p_C$  ВХ =  $p_0(f, d)$  (в дБ) сигнала от БС на входе приемника АС, определяемый формулой (1.12) (см. практическое занятие 1), зависит от протяженности  $d$  трассы и частоты.

На трассах с ограничением радиовидимости уровень мощности сигнала на входе приемника (в дБ) равен

$$p_C \text{ ВХ} = p_0(f, R) + v(d, t), \quad (2.2)$$

где  $v(d, t)$  – множитель ослабления поля, позволяющий учесть влияние земной поверхности и тропосферы на поле в точке приема.

Влияние земной поверхности может проявляться следующим образом:

- может появляться отраженная волна;
- неровности рельефа могут экранировать поле прямой волны;
- кривизна земной поверхности и неровности рельефа ограничивают расстояние прямой видимости (границы зоны освещенности, дальность радиогоризонта), которое определяется выражением (1.7) (см. занятие 1).

Для расчета множителя ослабления поля  $v(d, t)$  строят профиль пролета (рисунок 2.1) в следующей последовательности:

- наносят линию прямой видимости  $AB$ ;
- определяют самую высокую точку профиля  $C$  и ее координату  $d_C$ ;
- находят просвет  $H_C$  – расстояние от самой высокой точки профиля до линии прямой видимости. Пунктиром на рисунке 2.1 нанесена линия земной поверхности. Величина просвета  $H_C$  зависит как от рельефа местности, так и от состояния тропосферы.

Влияние тропосферы проявляется по следующим причинам:

- слоистые неоднородности тропосферы могут создавать отраженную волну;
- изменение диэлектрической проницаемости тропосферы по высоте может вызывать искривление (рефракцию) траектории прямой волны;
- на частотах выше 10 ГГц энергия сигнала поглощается и рассеивается гидрометеорами (частицами воды, каплями дождя в воздухе).

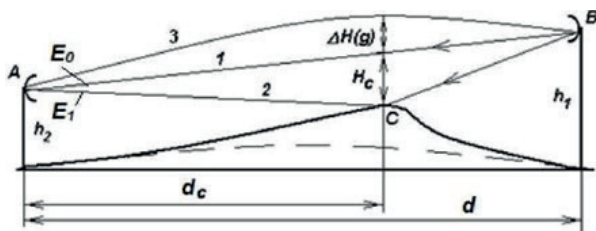


Рисунок 2.1 – Профиль пролета

Изменение просвета на трассе под воздействием атмосферной рефракции связано с прохождением радиоволны по траектории 3 и оценивается величиной приращения просвета

$$\Delta H(q) = -0.25d^2qk(1 - k), \quad (2.3)$$

где  $k = d_C/d$  – относительная координата точки C;  $q = d\varepsilon/dh$  – градиент диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  воздуха ( $q \approx -10 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$ ).

Градиент диэлектрической проницаемости  $q$  – величина случайная и имеет гауссовское распределение. Численные значения величин среднего значения  $q$  и стандартного отклонения  $\sigma_q$  для различных климатических районов мира приведены в справочной литературе.

С учетом атмосферной рефракции просвет равен

$$H(q) = H_C + \Delta H(q). \quad (2.4)$$

Для классификации видов трасс используют относительный просвет

$$p(q) = H(q)/H_0, \quad (2.5)$$

где  $H_0$  – радиус первой полузоны Френеля.

$$H_0 = [d\lambda k(1 - k)/3]^{0.5}. \quad (2.6)$$

По величине относительного просвета  $p(q)$  различают следующие виды трасс:

- закрытые при  $p(q) < 0$ ;
- полуоткрытые при  $0 < p(q) < 1$ ;
- открытые при  $p(q) > 1$ .

На открытых трассах для расчета радиоканала, как правило, применяют двухлучевую модель. В таком случае поле в точке приема определяется интерференцией двух лучей (см. рисунок 2.1): прямого 1 и отраженного 2 от точки С. Множитель ослабления при  $p(q) \geq 1$  (открытые трассы) определяется интерференционной формулой

$$V(d, t) = \{1 + \Phi^2 - 2\Phi \cos[p^2(q)\pi/3]\}^{0.5} = 10^{0.05 v(d,t)}, \quad (2.7)$$

где  $\Phi$  – модуль коэффициента отражения радиоволн от земной поверхности.

Величина множителя ослабления изменяется случайным образом при изменении диэлектрической проницаемости земной поверхности от максимального значения  $V_{max} = (1 + \Phi)$ , когда прямая и отраженная волны складываются по фазе, до минимального значения  $V_{min} = (1 - \Phi)$  при  $p(q) = (6n)^{0.5}$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ , когда эти волны противофазны. При этом возникают быстрые замирания (фединг) сигнала, которые называются интерференционными.

При отражении от гладкой плоской поверхности модуль коэффициента отражения  $\Phi \rightarrow 1$ . Неровная поверхность в зоне формирования отраженного луча (например, лес) определяет диффузный характер отражения, т. е.  $\Phi \approx 0$ , и отраженный от земной поверхности луч практически отсутствует.

При увеличении градиента диэлектрической проницаемости просвет на трассе уменьшается, и трасса может стать полуоткрытой и даже закрытой ( $q < 0$ ). Препятствие экранирует поле

основной волны. Множитель ослабления уменьшается. Возникают рефракционные замирания из-за экранирующего действия препятствия. Это медленные замирания (фединг).

В беспроводной связи замирание (фединг) – это изменение замирания сигнала в соответствии с различными параметрами (время, географическое положение, радиочастота и др.). Замирание может быть вызвано многолучевым распространением, погодой (особенно дождем) или затенением от препятствий, влияющих на распространение волны.

Существует довольно сильная зависимость замирания от высоты пути над уровнем моря:

- на больших высотах меньше атмосферы, и поэтому эффект атмосферного замирания меньше;
- при постепенном увеличении высоты на 1 километр необходимый запас замирания уменьшается на 10 дБ.

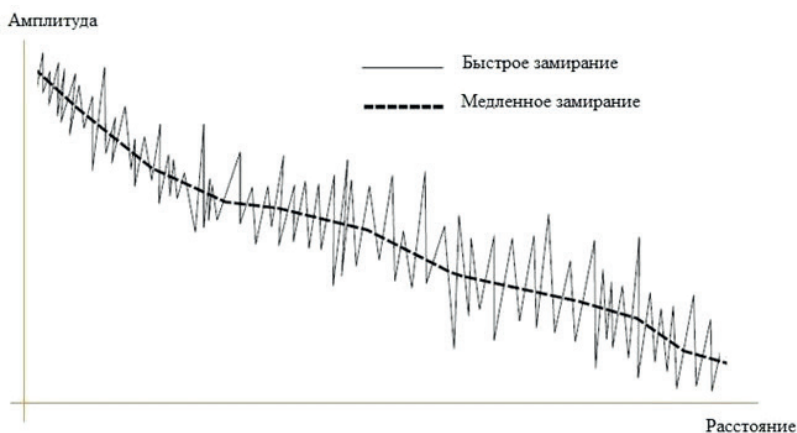


Рисунок 2.2 – Диаграмма зависимости амплитуды от расстояния для медленного и быстрого замирания

Рассмотрим различные виды замирания (рисунок 2.2):

**Быстрое замирание** – замирание, происходящее в тот момент, когда время когерентности канала мало по сравнению с ограничением задержки канала. Быстрое замирание вызывает быстрые

колебания амплитуды и фазы сигнала, если присутствуют изменения в радиосвязи (например, проезжающий мимо автомобиль). Если передатчик или приемник движется, то колебания происходят в пределах нескольких длин волн. Из-за его короткого расстояния быстрое замирание считается мелкомасштабным замиранием.

**Медленное замирание** – замирание, происходящее в тот момент, когда время когерентности канала велико относительно ограничения задержки канала. Медленное затухание происходит из-за геометрии профиля пути. Это приводит к ситуации, в которой сигнал постепенно становится слабее или сильнее.

**Плоское замирание** – происходит, когда рабочая полоса когерентности канала больше, чем рабочая полоса сигнала.

**Селективное замирание** – происходит, когда рабочая полоса когерентности канала меньше рабочей полосы сигнала.

**Замирание Рэля** – замирание, при котором величина сигнала, прошедшего через канал связи, будет изменяться случайным образом.

**Замирание Накагами** – происходит при многолучевом рассеянии с относительно большими временными задержками и с различными группами отраженных волн.

**Замирание Вейбулла** – рассматривает сигнал, состоящий из групп одной многолучевой волны, каждая из которых распространяется в неоднородной среде.



## Практическое задание и методические указания к выполнению работы

Таблица 2.1 – Параметры для расчета

Параметры	1	2	3	4
Просвет $H_C$ , м	3	0,5	7	5
Частота $f$ , МГц	1880	5600	2460	930
Координата самой высокой точки профиля $d_C$	$0,7d$	$0,6d$	$0,8d$	$0,75d$
Модуль коэффициента отражения радиоволн от земной поверхности $\Phi$	0,2	0,8	0,5	0,7
Высота расположения антенны БС $h_1$ , м	5	11	8	7
Высота расположения антенны АС $h_2$ , м	30	25	33	40
Излученная мощность $P_1$ , Вт	20	19	15	22
Коэффициент усиления антенны $G_1$ , дБ	15	17	20	19
Коэффициент усиления антенны $G_2$ , дБ	2	1,8	1,5	3
Радиус соты $r_0$ , км	1,5	0,8	2	3,5
Протяженность трассы $d$	$r_0$	$r_0$	$r_0$	$r_0$
Потери в фидере передающей и приемной антенн $a_1 = a_2$ , дБ	0.5	0,3	0,6	0,7

### 1. Выполнить предварительные расчеты:

- зависимости расстояния прямой видимости  $d_{ПВ}$  в соответствии с формулой (1.7) (см. лабораторное занятие 1) от высот антенн  $h_1, h_2$ . Параметры для расчета заданы в таблице 2.1;
- зависимость мощности  $P_C$  ВХ и уровня мощности  $p_C$  ВХ =  $p_0(f, d)$  (в дБ) сигнала от БС на входе приемника АС

для открытой трассы от протяженности  $0 < d < d_{\text{ПВ}}$  трассы и частоты, определяемую формулами (1.10), (1.11). Для этого необходимо взять значения параметров из таблицы 2.1;

- определить значения относительного просвета  $p(g)$  (2.5).

Для вычисления  $p(g)$  необходимо изначально рассчитать радиус первой полузоны Френеля  $H_0$  (2.6) и просвет с учетом атмосферной рефракции  $H(q)$  (2.4), где  $k = d_C/d$  – относительная координата точки С;  $q = d\varepsilon/dh$  – градиент диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  воздуха ( $q \approx -10 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$ ). Протяженность трассы  $d$  и координату самой высокой точки профиля  $d_C$  взять из таблицы 2.1. Для вычисления формулы (2.4) нужно найти приращение просвета  $\Delta H(q)$  (2.3);

- определить экстремумы интерференционного множителя (2.7), зная значения относительного просвета  $p(g)$ . Модуль коэффициента отражения радиоволн от земной поверхности  $\Phi$  взять из таблицы 2.1.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение понятию «интерференция».
2. Что такое зона освещенности?
3. Проиллюстрируйте прохождение лучей от передающей до приемной антенны в области освещенности.
4. Какие виды трасс различают по величине относительного просвета?
5. Как проявляется влияние земной поверхности?
6. Каким образом строится профиль пролета?
7. От чего зависит радиус первой полузоны Френеля?
8. Поясните понятие: замирание (фединг).
9. Какие существуют виды замираний?

## Практическая работа 3

### ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

#### ***Цель работы:***

#### ***Изучение студентами:***

1. Изучение основных способов распространения радиоволн.
2. Ознакомление с методикой расчета дифракции на клиновидном препятствии.

#### ***Техническое обеспечение работы.***

Для выполнения работы имеются:

1. Доступ в Интернет.
2. Персональный компьютер с приложениями.
3. Плакаты, чертежи.

#### ***Порядок выполнения лабораторной работы.***

1. Изучить материалы лекции.
2. Изучить методические указания к данной работе.
3. Получить у преподавателя задание на выполнения работы.
4. Ответить на контрольные вопросы.

### Краткие теоретические сведения

1. ***Отражение*** – имеет место при падении волны на объекты с размерами много больше длины волны. Наблюдаются, например, отражения от земли, стен зданий и т. п.
2. ***Дифракция*** – явление возникновения вторичных волн при падении радиоволны на препятствие с острыми кромками. Дифракцией обусловлено наличие поля за препятствиями в зоне геометрической тени. На высоких частотах дифракция, как и отражение, существенно зависит от геометрии объекта, а также амплитуды, фазы и поляризации поля.

3. **Рассеяние** – имеет место при распространении волны в среде с мелкими объектами (меньше длины волны).

### **Дифракция радиоволн**

Явление дифракции позволяет радиоволнам распространяться вокруг сферической земной поверхности за горизонт и за различные препятствия. Несмотря на перекрытие прямой видимости и существенное уменьшение уровня сигнала, он все-таки остается достаточным для приема. Феномен дифракции объясняется принципом Гюйгенса. Это означает, что каждая точка на сферическом волновом фронте может рассматриваться как источник вторичного фронта волны с различной фазой (зон Френеля). Даже если сразу за препятствием будет находиться зона геометрической тени, волна будет рассеиваться вокруг препятствия и начнет заполнять пустоту.

Дифракция более выражена, когда препятствие становится острее и больше похоже на «лезвие ножа». Для радиоволны дифракция зависит от частоты и, следовательно, длины волны сигнала.

Для низкочастотных сигналов достаточно острым может служить горный хребет. Более округлый холм не произведет такого заметного эффекта. Стоит отметить, что низкочастотные сигналы более подвержены дифракции, чем высокочастотные. Именно по этой причине сигналы в длинноволновой полосе способны обеспечить покрытие даже в холмистой или гористой местности, где сигналы на УКВ и выше этого не сделали бы (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Дифракция радиоволн

### Геометрия зон Френеля

Пусть между излучателем и приемником расположено препятствие – экран высотой  $h$  бесконечных размеров в поперечном сечении. Расстояние от экрана до излучателя –  $d_1$ , до приемника –  $d_2$  (рисунок 3.2).

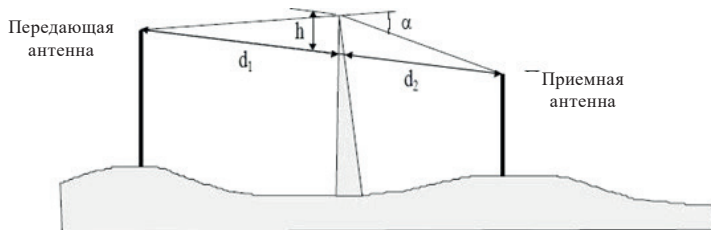


Рисунок 3.2 – Дифракция радиоволн на клиновидном препятствии

Ясно, что путь через кромку препятствия больше прямого. Полагая, что

$h \ll d_1, d_2$  и  $h \gg \lambda$ , разность хода прямого и через кромку лучей будет

$$\Delta \approx \frac{h^2}{2} \cdot \frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2}. \quad (3.1)$$

Соответствующая ему разность фаз

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{h^2}{2} \cdot \frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2}, \quad (3.2)$$

где используется приближение для малого аргумента  $tg(x) \approx x$ , а угол  $\alpha$  аппроксимирован выражением

$$\alpha = h \cdot \frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2}. \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) может быть аппроксимировано с использованием безразмерного дифракционного параметра Френеля – Кирхгофа

$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot d_1 \cdot d_2}{\lambda \cdot (d_1 + d_2)}}, \quad (3.4)$$

где  $\alpha$  подставляется в радианах, все остальные параметры в метрах. Таким образом, разность фаз  $\Phi$  может быть вычислена из выражения

$$\Phi = \frac{\pi}{2} \cdot v^2. \quad (3.5)$$

Из выражения (3.5) следует, что сдвиг фазы между прямым и дифракционным лучами является функцией высоты  $h$  и взаимного расположения препятствия, излучателя и приемника.

Дифракционные потери мощности в радиоканале могут быть объяснены с помощью зон Френеля. Зоны Френеля представляют собой области, разность хода через которые от излучателя до приемника составляет  $n \lambda/2$  по сравнению с прямым лучом ( $\lambda$  – длина волны,  $n$  – целое число).

В мобильной связи обычно наблюдается затенение части зон (источников вторичных волн) и, следовательно, уменьшение доли принятой мощности. В зависимости от геометрии препятствия принятая энергия определяется через векторное суммирование вторичных волн (рисунок 3.3).

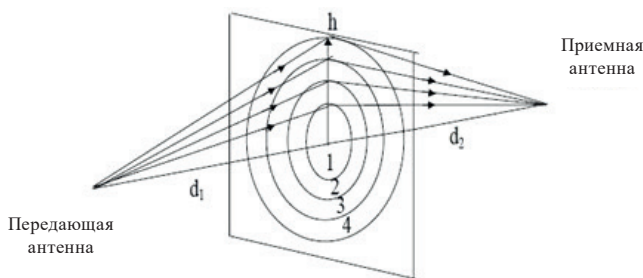


Рисунок 3.3 – Формирование зон Френеля

Если препятствие не затеняет первую зону Френеля, то дифракционные потери минимальны и ими пренебрегают. Используют следующее свойство: если открыто не менее 55 % первой зоны Френеля, то дальнейшее открытие первой зоны Френеля не уменьшает дифракционные потери.

### Модель дифракции радиоволн на одиночном клине

Определение степени ослабления поля холмами и зданиями является достаточно сложной задачей при расчете зон обслуживания. Обычно точный расчет ослабления невозможен, поэтому используют методы расчета поля с необходимыми экспериментальными поправками (рисунок 3.4).

Препятствие в виде одиночного холма или горы может быть обчислено с использованием модели клина. Это простейшая модель препятствия, и быстрый расчет ослабления возможен с использованием классического решения Френеля для дифракции поля на полуплоскости.

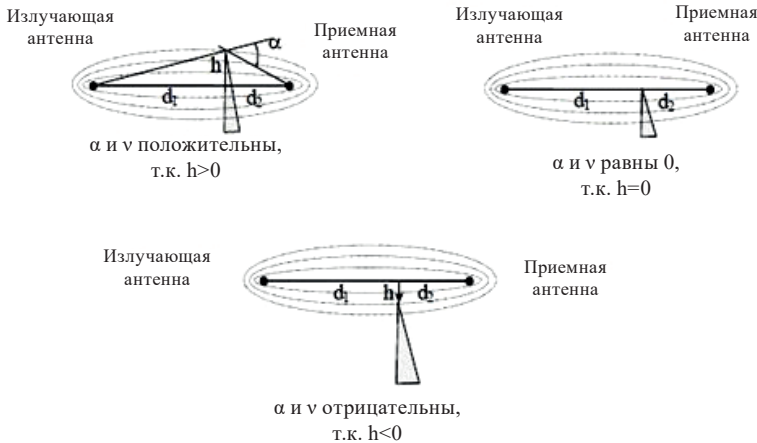


Рисунок 3.4 – Варианты перекрытия видимости антенн препятствием

Напряженность поля в точке расположения приемной антенны определяется векторной суммой вторичных источников, лежащих в плоскости, расположенной над препятствием. Напряженность поля при дифракции на клине определяется выражением

$$\frac{E_d}{E_0} = F(v) = \frac{1+j}{2} \int_v^{\infty} e^{-j\frac{\pi t^2}{2}} dt, \quad (3.6)$$

где  $E_0$  – напряженность поля в точке расположения приемной антенны при отсутствии препятствия и земли, а  $F(v)$  – комплексный интеграл Френеля. Значение интеграла  $F(v)$  определяется из графиков и таблиц.

Коэффициент дифракционного усиления с препятствием (обычно он меньше 1) по сравнению со свободным пространством

$$G_d = 20 \lg |F(v)|. \quad (3.7)$$

График этой функции показан на рисунке 3.5.

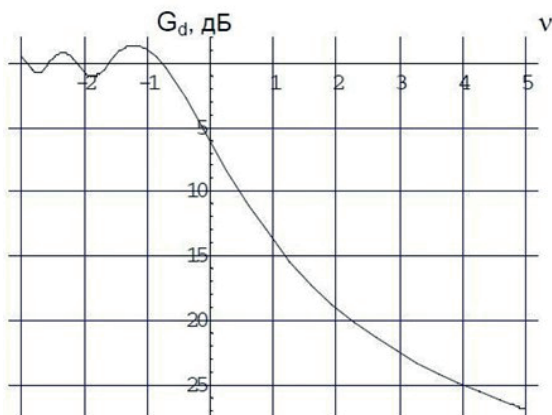


Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента дифракционного усиления от значения параметра дифракции

Пример расчета дифракции системы на клиновидном препятствии (рисунок 3.6):

Вычислим расстояния между координатами точек расположения: излучателя и вершины препятствия  $d_1$  (3.8), приемника и вершины препятствия –  $d_2$  (3.9), излучателя и приемника –  $d$  (3.10), где  $x$  и  $h$  координаты и высоты излучателя, препятствия и приемника, соответственно.

$$d_1 = \sqrt{(x_{\text{нач}} - x_{\text{преп}})^2 + (h_{\text{нач}} - h_{\text{преп}})^2}, \quad (3.8)$$



$$d_2' = \sqrt{(x_{\text{кон}} - x_{\text{преп}})^2 + (h_{\text{кон}} - h_{\text{преп}})^2}, \quad (3.9)$$

$$d = \sqrt{(x_{\text{нач}} - x_{\text{кон}})^2 + (h_{\text{нач}} - h_{\text{кон}})^2}. \quad (3.10)$$

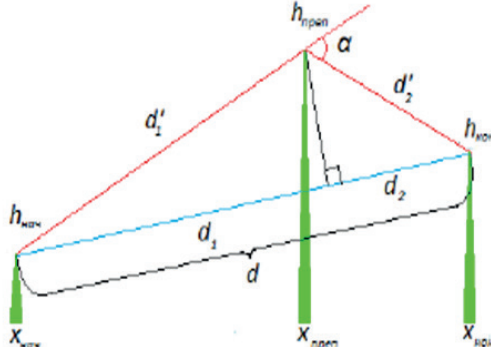


Рисунок 3.6 – Дифракция радиоволн на клиновидном препятствии

Вычислим угол между лучом, проходящим через кромку препятствия, и переизлученным лучом –  $\alpha$  (3.11), расстояние от излучателя до экрана –  $d_1$  (3.12), расстояние от экрана до приемника –  $d_2$  (3.13).

$$\alpha = \pi - \arccos\left(\frac{d_1'^2 + d_2'^2 - d^2}{2d_1'd_2'}\right), \quad (3.11)$$

$$d_1 = \frac{d_1'^2 + d^2 - d_2'^2}{2d}, \quad (3.12)$$

$$d_2 = \frac{d_2'^2 + d^2 - d_1'^2}{2d}. \quad (3.13)$$

Значение параметра дифракции определяется по формуле (3.14).

$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot d_1 \cdot d_2}{\lambda \cdot (d_1 + d_2)}}, \quad (3.14)$$

где  $h$  – высота экрана,  $\lambda$  – длина волны. Коэффициент дифракционного усиления приближенно можно считать

$$G_d = 0 \text{ дБ при } v \leq -1, \quad (3.15a)$$

$$G_d = 20 \lg(0.5 - 0.62v), \text{ дБ при } -1 \leq v \leq 0, \quad (3.15Б)$$

$$G_d = 20 \lg(0.5 \cdot e^{-0.95v}), \text{ дБ при } 0 \leq v \leq 1, \quad (3.15B)$$

$$G_d = 20 \lg\left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1 \cdot v)^2}\right), \text{ дБ при } 1 \leq v \leq 2.4 \quad (3.15Г)$$

$$G_d = 20 \lg\left(\frac{0.225}{v}\right), \text{ дБ при } 2.4 \leq v. \quad (3.15Д)$$

Мощность сигнала определяется по формуле (3.16).

$$P_{\text{с вх}} = P_1 G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot 10^{-(a_1 + a_2)/10} \cdot G_d^2_{\text{общ}}, \quad (3.16)$$

где  $P$  – мощность передатчика,  $G_1$ ,  $G_2$  – коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника,  $a_1$  и  $a_2$  – потери в фидере передающей и приемной антенны.

### **Практическое задание и методические указания к выполнению работы**

Таблица 3.1 – Исходные данные для выполнения работы

Параметры	1	2	3	4
Частота $f$ , МГц	900	1200	1000	800
Расстояние от излучателя до экрана $d_1$ , км	1	1,2	0,9	1
Расстояние от экрана до приемника $d_2$ , км	1	0,8	1	1,1

1. Вычислить дифракционные потери для 3-х случаев перекрытия препятствием видимости, передающей и приемной антенн (рисунок 3.4):

а)  $h = 25$  м;

б)  $h = 0$  м;

в)  $h = -25$  м;

- по формуле (3.14) вычислить дифракционный параметр по рисунку 3.7 и выражениям аппроксимации (3.15, а) – 3.15, д) определить дифракционные потери;
- рассчитать разность хода прямого и отраженного луча  $\Delta$  по формуле (3.1);
- для определения, в какой зоне Френеля будет верх препятствия, необходимо вычислить параметр  $n$ , который удовлетворяет выражению

$$\Delta = \frac{n \cdot \lambda}{2}.$$

2. Изучить интерференционный принцип формирования общей диаграммы направленности совокупности индивидуальных излучателей электромагнитных волн, объединённых в антенную решётку.
3. Познакомиться со способами активного управления формой общей диаграммы направленности антенной решетки.
4. Выяснить возможность использования интерференционного эффекта формирования общего поля системы излучателей для её адаптации к помехам, сосредоточенным по направлению прихода излучения

### Контрольные вопросы

1. Назовите основные способы распространения радиоволн.
2. Что такое зоны Френеля?
3. Каким образом возможно объяснить дифракционные потери мощности в радиоканале?
4. Какие возможны варианты перекрытия видимости антенн препятствием?

5. Как определяется напряженность поля в точке расположения приемной антенны?
6. Назовите формулу для расчета мощности сигнала. Дайте характеристику каждого параметра.
7. Проиллюстрируйте зависимость коэффициента дифракционного усиления от значения параметра.

## **Практическая работа 4**

# **РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

### **Цель работы:**

#### ***Изучение студентами:***

1. Ознакомление с методами исследования влияния параметров земной поверхности и городской инфраструктуры на энергетические показатели ССПО с использованием моделей предсказания уровня сигнала.
2. Расчет геометрических параметров зоны Френеля для трасс радиосигнала в ССПО с помощью калькулятора сложных периодических расчетов (СПР).

#### ***Техническое обеспечение лабораторной работы.***

#### ***Для выполнения работы имеются:***

1. Доступ в Интернет.
2. Персональный компьютер с приложениями.
3. Плакаты, чертежи.

#### ***Порядок выполнения работы.***

1. Изучить материалы лекции.
2. Изучить методические указания к данной работе.
3. Получить у преподавателя задание на выполнения работы.
4. Ответить на контрольные вопросы.

## **Краткие теоретические сведения**

ССПО обычно работают в диапазоне ультравысоких частот (УВЧ). Параметры радиоканала, определенные при распростране-

нии радиоволн в свободном пространстве, не могут быть полностью использованы для расчета радиолиний, поскольку не учитывают особенности рельефа местности и городской застройки в зоне действия ССПО. Таким образом, расчет производится с использованием моделей прогнозирования уровня принимаемого радиосигнала, которые учитывают параметры рельефа.

Основные характеристики рельефа:

- высота препятствий;
- форма и взаимное расположение препятствий;
- наклон местности;
- характер застройки;
- физические особенности поверхности.

Учет влияния рельефа местности на трассе распространения сигнала между БС и АС на уровень сигнала в точке приема осуществляется с помощью детерминированного и статистического методов (рисунок 4.1)



Рисунок 4.1 – Классификация моделей описания трассы

**Первый метод** позволяет рассчитать ослабление сигнала на открытых трассах в зоне освещенности с конкретным профилем местности и применяется для линии связи по схеме «от точки к точке» (например, между БС и АС).

**Второй метод** часто применяют для ССПО, где БС должна обеспечить связь на территории соты по схеме «от точки к зоне» или «от зоны к зоне», при этом параметры рельефа считаются случайными величинами. Рельеф местности в соте оценивают параметрами, усредненными на участках трассы протяженностью 5...10 км. В точках, которые расположены на границах соты, уровень принимаемого сигнала будет различаться из-за различного влияния застройки и рельефа местности. Таким образом, в ССПО определяют усредненную медианную мощность сигнала (УММС) путем усреднения по двум параметрам: по времени и по местоположению (по числу точек приема). УММС – значение, которое превышает в течение 50 % времени месяца и в 50 % точек приема, находящихся на данном расстоянии от передающей станции.

Существует ряд моделей для прогнозирования уровня радиосигнала в ССПО.

### ***Метод Okumura***

Этот метод является одним из широко используемых методов для расчета радиолиний в условиях города. Он пригоден для диапазона частот 150–2000 МГц и расстояний от 1 до 100 км. Данный метод может быть использован, если эффективная высота подвеса базовой антенны составляет от 30 до 1000 м.

Okumura предложил сетку кривых для расчета среднего ослабления относительно ослабления в свободном пространстве  $A(f, d)$  в условиях города с квазигладким профилем с изотропной передающей антенной, поднятой на эффективную высоту  $h_{1E} = 200$  м и мобильной антенной высотой  $h_{2E} = 3$  м. Графики получены в результате многих измерений с ненаправленными антеннами базовой станции и мобильного приемника и представлены в виде графика для диапазона частот 100–1920 МГц как функция дальности от 1 до 100 км.

Для определения потерь на радиолинии рассчитывается ослабление поля в свободном пространстве, затем по кривым графика (рисунок 4.2) определяется величина  $A(f, d)$  и добавляются к ослаблению в свободном пространстве с корректирующей поправкой, которая зависит от степени неровности профиля трассы:

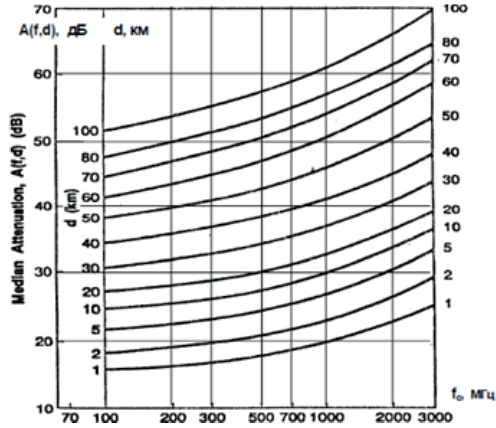


Рисунок 4.2 – Частотная зависимость усредненного ослабления сигнала по отношению к свободному пространству для квазигладкого профиля

Для такой модели уровень УММС определяется соотношением

$$p_M(d) = p_C \text{ ВХ}(d) = p_0(f, d) - A(f, d) + H_1(h_1) + H_2(h_2) - G_{AREA}, \quad (4.1)$$

где  $p_0(f, d)$  – уровень мощности сигнала в точке приема при распространении в свободном пространстве – рассчитывается в соответствии с формулой (1.9);

$A(f, d)$  – дополнительное ослабление сигнала в городе, определенное для квазигладкого городского района при базовых высотах антенн БС и АС;

$H_1(h_1)$  – коэффициент «высота-усиление антенны БС», учитывающий, что высота антенны БС может отличаться от значения 200 м (эффективное усиление передающей антенны);

$H_2(h_2)$  – коэффициент «высота-усиление антенны АС», учитывающий влияние реальной высоты антенны АС 200 м (эффективное усиление приемной антенны).



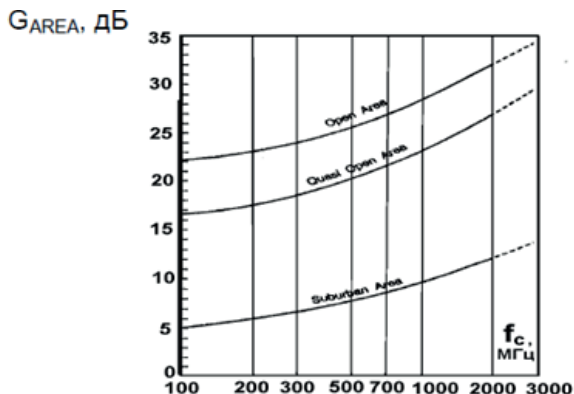


Рисунок 4.3 – Поправочный коэффициент, обусловленный профилем радиотрассы

Кроме того, Окумуга нашел, что величина  $H_1(h_1, d)$  изменяется по закону 20 дБ/декада, а  $H_2(h_2, d)$  для высот менее 3 м – 10 дБ/декада.

$$H_1(h_1) = 20 \lg \left( \frac{h_1}{200} \right), \quad 1000 \text{ м} > h_1 > 10 \text{ м}; \quad (4.a)$$

$$H_2(h_2) = 10 \lg \left( \frac{h_2}{3} \right), \quad h_2 < 3 \text{ м}; \quad (4.б)$$

$$H_2(h_2) = 20 \lg \left( \frac{h_2}{3} \right), \quad 10 \text{ м} > h_2 > 3 \text{ м}. \quad (4.в)$$

Модель Окумуга полностью построена на экспериментальных данных. Модель Окумуга наиболее простая и достаточно точная для расчета потерь в сотовых системах связи и мобильной связи.

Главный недостаток модели – работа с графиками и невозможность полноценно учесть быстроизменяющиеся условия в профиле трассы (рисунок 4.3).

В основном рассмотренный метод применяется для расчета радиолиний в урбанизированных и сверхурбанизированных районах. Разница расчетных и экспериментально измеренных напряженностей поля обычно не превышает 10–13 дБ.

В модели Окамуры – Хата результаты экспериментальных измерений, представленные в модели Окамуры графиками, аппроксимированы аналитическими формулами, которые положены в основу функционирования калькулятора СПР.

### ***Memod Xia – Bertoni***

Модель Xia – Bertoni – физико-статистическая модель распространения, которая описывает распространение сигнала в диапазоне УВЧ (от 300 МГц до 3 ГГц) в городах, где высота передатчиков находится на средней высоте крыши. Модель учитывает профили местности и зданий для оценки потерь распространения. С помощью модели Xia – Bertoni возможно рассчитать дифракционные потери для каждой точки расчета, которые зависят от средней высоты зданий, расположенных между передатчиком и приемником.

Математические формулы, которые используются для модели Xia – Bertoni,

$$L(\text{дБ}) = A + B \cdot \log(d) + C \cdot \log(f) + D \cdot \log(a) + \\ + E \cdot \log(b) + F \cdot \log(r) + G \cdot \log(\beta); \quad (4.3)$$

$$r = \sqrt{h_m^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2}, \quad (4.4)$$

где  $d$  – расстояние между передатчиком и приемником в км,  $f$  – рабочая частота в МГц,  $b$  – среднее расстояние между зданиями,  $h_m$  – высота приемника и  $w$  – средняя ширина улиц.

### ***Memod Walfisch – Ikegami***

Модель Walfisch – Ikegami возникает в результате комбинации модели Walfisch – Bertoni и модели Ikegami. Эта модель предназначена для систем, работающих в диапазоне УВЧ от 800 МГц до 2000 МГц в условиях плотной городской застройки. Модель учитывает высоту зданий, ширину улиц, расстояние между зданиями и направление улиц по отношению к распространению сигнала. Модель различает два различных сценария, к которым она применяет следующие формулы (4.5–4.7):

Потери распространения при наличии прямой видимости вычисляются с помощью

$$L_d(dB) = 42,6 + 26 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f), \quad (4.5)$$

где  $d$  – горизонтальное расстояние между передатчиком и приемником в км,

а  $f$  – несущая частота, выраженная в МГц.

В случае отсутствия линии прямой видимости по направлению к передатчику потери рассчитываются как

$$L_d = L_0 + \begin{cases} L_{rts} + L_{msd} & \text{при } L_{rts} + L_{msd} > 0; \\ 0 & \text{при } L_{rts} + L_{msd} \leq 0; \end{cases} \quad (4.6)$$

$$L_0 \text{ (дБ)} = 32,4 + 20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f), \quad (4.7)$$

где  $L_0$  – это потери в свободном пространстве,  $d$  – горизонтальное расстояние между передатчиком и приемником в км,  $f$  – несущая частота, выраженная в МГц,  $L_{rts}$  – дифракционные потери, возникающие на крыше последнего здания, по которому распространяется сигнал, а  $L_{msd}$  – дифракционные потери на нескольких углах крыш зданий.

Понятие зоны Френеля позволяет следующим образом оценить размер преграды в окрестности трассы, которая может повлиять на распространение волны: если внутри окружности, проведенной вокруг точки между ПРМ и ПРД, и радиус которой составляет приблизительно  $0,6H_0$ , нет никаких преград, то все другие преграды не будут создавать переотраженной волны и ослаблять сигналы на трассе. Первая зона Френеля представляет собой сфероид (рисунок 4.4), охватывающий передающую (TX) и приемную (RX) антенны, все точки которого соответствуют разности хода прямого 1-го и переотраженного 2-го лучей, равной  $\lambda/2$ .

$H_0$  – радиус первой зоны Френеля (см. занятие 2):

$$H_0 = [d\lambda k(1 - k/3)]^{0.5}. \quad (4.8)$$

Принцип расчета ССПО в целом на основе двухлучевой модели трассы и используемые при этом параметры иллюстрируются на рисунке 4.4.

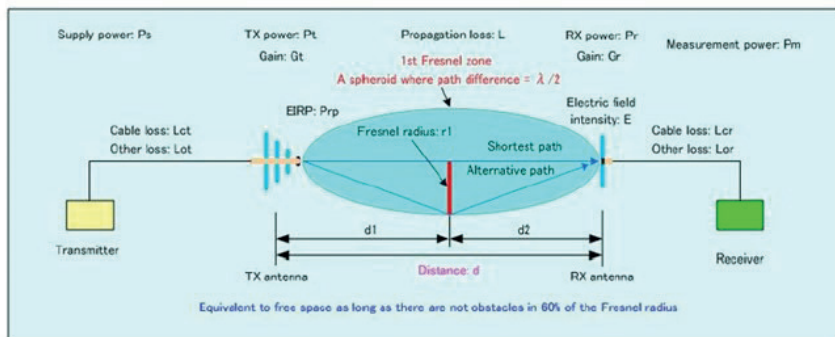


Рисунок 4.4 – Модель ССПО  
с использованием двухлучевой модели трассы

## Практическое задание и методические указания к выполнению работы

Таблица 4.1 – Исходные данные

Параметры	1	2	3	4
Частота $f$ , МГц	1000	3000	2000	700
Координата самой высокой точки профиля $d_C$	$0,7d$	$0,6d$	$0,8d$	$0,75d$
Высота расположения антенны БС $h_1$ , м	35	30	40	50
Высота расположения антенны АС $h_2$ , м	5	9	8	7
Излученная мощность $P_1$ , Вт	20	19	15	22
Коэффициент усиления антенны $G_1$ , дБ	15	17	20	19
Коэффициент усиления антенны $G_2$ , дБ	2	1,8	1,5	3
Радиус соты $r_0$ , км	10	5	20	50
Протяженность трассы $d$	$r_0$	$r_0$	$r_0$	$r_0$
Потери в фидере передающей и приемной антенн $a_1 = a_2$ , дБ	0.5	0,3	0,6	0,7

1. Выполнить предварительные расчеты:
  - зависимости размеров зоны Френеля от расстояния между БС и АС в пределах прямой видимости  $d_{ПВ}$  в соответствии с формулой (4.8) для различных вариантов расположения неровности на трассе;
  - зависимости усредненной медианной мощности сигнала (УММС)  $P_M = P_C ВХ$  (5.1) и уровня мощности  $p_m$  (в дБ) сигнала от БС на входе приемника АС от протяженности трассы  $0 < d < d_{ПВ}$ , высот передающей  $h_1$  и приемной антенн  $h_2$  и частоты для ССПО цифрового стандарта.
2. Найти средние потери с использованием метода Okumura для разнеса передающей и приемной антенн  $d$ , если высота подвеса передающей антенны  $h_1$ , приемной –  $h_2$ , а связь ведется в условиях города. Для этого необходимо:
  - вычислить потери в свободном пространстве по формуле из первой работы (1.17);
  - определить по графикам Okumura (рисунки 4.2, 4.3) дополнительное ослабление сигнала в городе  $A(f, d)$  и поправочный коэффициент  $G_{AREA}$ ;
  - с помощью выражений (4.2а – 4.2в) вычислить коэффициент «высота–усиление антенны БС»  $H_1(h_1)$  и коэффициент «высота – усиление антенны АС»  $H_2(h_2)$ ;
  - по формуле (4.1) вычислить средние потери.

### Контрольные вопросы

1. Что такое зона Френеля?
2. По каким параметрам определяют усредненную медианную мощность сигнала?
3. Какими способами возможно произвести расчет уровня сигнала на входе приемника?
4. Поясните понятие: «квазигладкий» профиль трассы.
5. Для чего предназначена модель Окамуры?
6. Для чего предназначена модель Окамуры – Хата?

## **Практическая работа 5**

### **ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОЙ СОТОВОЙ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА GSM**

***Цель работы:***

***Изучение студентами:***

- Изучение основных технических характеристик, принятых в цифровой сотовой системе подвижной радиосвязи стандарта GSM.
- Ознакомление с функциональным построением и интерфейсом системы

***Техническое обеспечение лабораторной работы.***

***Для выполнения работы имеются:***

1. Доступ в Интернет.
2. Персональный компьютер с приложениями.
3. Плакаты, чертежи.

***Порядок выполнения лабораторной работы.***

- Изучить материалы лекции.
- Изучить методические указания к данной работе.
- Получить у преподавателя задание на выполнения работы.
- Ответить на контрольные вопросы.

### **Краткие теоретические сведения**

GSM (Global System for Mobile communications) – это открытая цифровая сотовая технология, используемая для передачи мобильной голосовой связи и передачи данных. GSM отличается от беспроводных систем первого поколения тем, что использует цифровые технологии и методы передачи данных множественного доступа с временным разделением (TDMA). GSM – это система с коммутацией каналов, которая делит каждый канал 200 кГц на восемь временных интервалов по 25 кГц.

GSM поддерживает скорость передачи данных до 9,6 Кбит/с, что позволяет передавать базовые услуги передачи данных, такие как SMS (Short MessageService). Еще одним важным преимуществом является возможность международного роуминга, позволяющая пользователям получать доступ к тем же услугам во время поездок за границу, что и дома. Это дает потребителям одинаковое количество подключений в более чем 210 странах. Спутниковый роуминг GSM также расширил доступ к услугам в районах, где наземное покрытие недоступно.

GSM-900 использует 890–915 МГц для передачи информации от мобильной станции к базовой приемопередающей станции (восходящая линия связи) и 935–960 МГц для другого направления (нисходящая линия связи), обеспечивая 124 радиочастотных канала (номера каналов от 1 до 124), расположенных на расстоянии 200 кГц. Используется дуплексный интервал 45 МГц. В некоторых странах диапазон GSM-900 был расширен, чтобы охватить более широкий частотный диапазон. Этот «расширенный GSM», E-GSM, использует частотный диапазон 880–915 МГц (восходящая линия связи) и 925–960 МГц (нисходящая линия связи), добавляя 50 каналов (номера каналов от 975 до 1023 и 0) к исходному диапазону GSM-900.

Также используется спецификация GSM для железных дорог, GSM-R, которая использует частотный диапазон 876–915 МГц (восходящая линия связи) и 921–960 МГц (нисходящая линия связи). GSM-R предоставляет дополнительные каналы и специализированные услуги для использования железнодорожным персоналом. Все эти варианты включены в спецификацию GSM-900.

Сотовая связь – это термин, используемый для описания полосы 850 МГц, как оригинальная аналоговая сотовая система мобильной связи была выделена в этом спектре. Провайдеры обычно работают в одном или двух частотных диапазонах.

Метод, выбранный GSM, представляет собой комбинацию множественного доступа с временным и частотным разделением (TDMA/FDMA). Часть FDMA включает в себя деление по частоте (максимальной) полосы пропускания 25 МГц на 124 несущие частоты, расположенные на расстоянии 200 кГц друг от друга.

Каждой базовой станции назначается одна или несколько несущих частот. Каждая из этих несущих частот затем делится во времени, используя схему TDMA. Фундаментальная единица времени в этой схеме TDMA называется периодом всплеска и длится  $15/26$  мс (или приблизительно 0,577 мс). Восемь периодов всплеска сгруппированы в кадр TDMA ( $120/26$  мс, или приблизительно 4,615 мс), который образует базовую единицу для определения логических каналов. Один физический канал – это один период пакета на кадр TDMA.

Множественный доступ с временным разделением (TDMA) – это метод доступа к каналу для сетей с общей средой (обычно радио). Он позволяет нескольким пользователям совместно использовать один и тот же частотный канал, разделяя сигнал на разные временные интервалы. Пользователи передают данные в быстрой последовательности, один за другим, каждый использует свой собственный временной интервал. Это позволяет нескольким станциям совместно использовать одну и ту же среду передачи (например, радиочастотный канал), используя при этом только ту часть ее полосы пропускания, которая им требуется. TDMA используется в цифровых сотовых системах 2G, таких как Global System for Mobile Communications (GSM), IS – 136, Personal Digital Cellular (PDC) и iDEN. Он также широко используется спутниковых системах и системах боевой радиосвязи (рисунки 5.1, 5.2).

TDMA – это тип мультиплексирования с временным разделением каналов, с тем особым моментом, что вместо одного передатчика, подключенного к одному приемнику, есть несколько передатчиков. В случае восходящей линии связи от мобильного телефона к базовой станции это становится особенно сложным, потому что мобильный телефон может перемещаться и варьировать время, необходимое для того, чтобы его передача соответствовала разрыву в передаче от своих знакомых.

В начале 1980-х годов многие страны внедрили сотовые системы первого поколения, основанные на технологии множественного доступа с частотным разделением (FDMA) и аналоговой FM-технологии. В FDMA существует один канал на несущую. Когда мобильная станция обращается к системе, фактически назначаются две несущие (каналы): одна для прямой (с базовой



на мобильную) и одна для обратной (с мобильной на базовую) связи. Разделение прямой и обратной несущих частот необходимо для реализации дуплексера – сложного устройства фильтров, которое изолирует прямой и обратный каналы, тем самым предотвращая помехи самому радиопередатчику (см. рисунок 5.1).

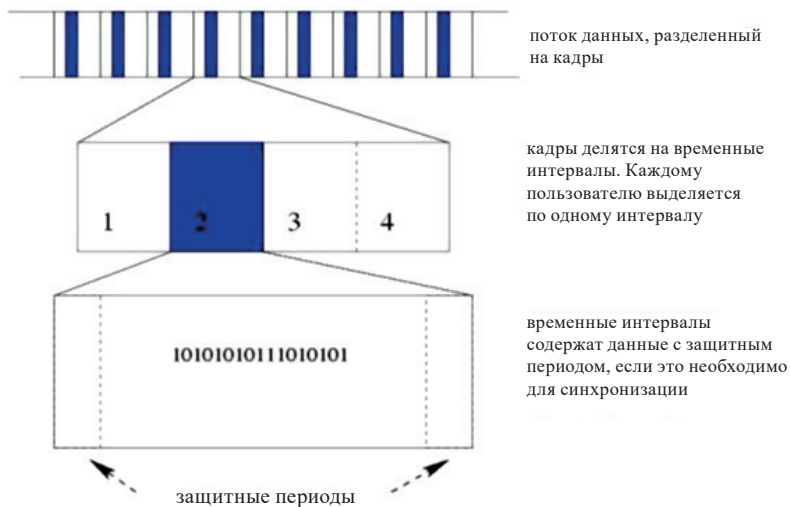


Рисунок 5.1 – Множественный доступ с временным разделением

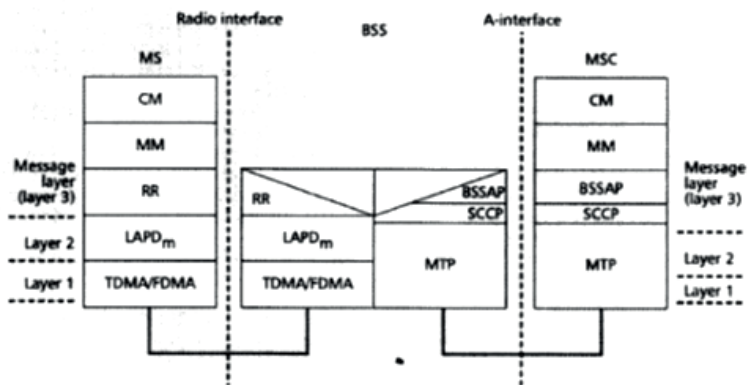


Рисунок 5.2 – Архитектура GSM-протокола

## ***1. Мобильная станция***

Мобильная станция (MS) состоит из мобильного оборудования (терминала) и смарт-карты, называемой модулем идентификации абонента SIM). SIM-карта обеспечивает личную мобильность, так что пользователь может иметь доступ к подписанным услугам независимо от конкретного терминала. Вставив SIM-карту в другой GSM-терминал, пользователь может принимать звонки на этом терминале, совершать звонки с этого терминала и получать другие услуги.

Мобильное оборудование однозначно идентифицируется международным идентификатором мобильного оборудования (IMEI). SIM-карта содержит международный идентификатор мобильного абонента (IMSI), используемый для идентификации абонента системы, секретный ключ для аутентификации и другую информацию. IMEI и IMSI независимы, тем самым организуют личную мобильность. SIM-карта может быть защищена от несанкционированного использования паролем или личным идентификационным номером (см. рисунок 5.2).

## ***2. Мобильный коммутационный центр***

Центральным компонентом сетевой подсистемы является мобильный коммутационный центр (MSC). Он действует как обычный узел коммутации PSTN или ISDN и дополнительно предоставляет все функции, необходимые для обработки мобильного абонента, такие как регистрация, аутентификация, обновление местоположения, передача обслуживания и маршрутизация вызовов абоненту, который находится в роуминге. Эти услуги предоставляются совместно с несколькими функциональными объектами, которые вместе образуют сетевую подсистему. MSC обеспечивает подключение к фиксированным сетям (таким как PSTN или ISDN). Сигнализация между функциональными объектами в сетевой подсистеме использует сигнальную систему № 7 (SS7), которая используется для магистральной сигнализации в ISDN и широко применяется в современных сетях общего пользования.

Регистр домашнего местоположения (HLR) и регистр местоположения посетителя (VLR) вместе с MSC обеспечивают

маршрутизацию вызовов и возможности роуминга GSM. HLR содержит всю административную информацию о каждом абоненте, зарегистрированном в соответствующей сети GSM, а также текущее местоположение мобильного телефона. Местоположение мобильного устройства обычно представляется в виде сигнального адреса VLR, связанного с мобильной станцией.

Регистр местоположения посетителя (VLR) содержит выбранный административную информацию из HLR, необходимую для управления вызовами и предоставления услуг, для каждого мобильного телефона, находящегося в настоящее время в географической зоне, контролируемой VLR. Хотя каждый функциональный объект может быть реализован как самостоятельный блок, все производители коммутационного оборудования на сегодняшний день реализуют VLR вместе с MSC, так что географический район, контролируемый MSC, соответствует тому, что контролируется VLR, что упрощает требуемую сигнализацию. MSC не содержит информации о конкретных мобильных станциях – эта информация хранится в регистрах местоположения.

Два других регистра используются в целях аутентификации и безопасности. Регистр идентификации оборудования (EIR) – это база данных, содержащая список всех допустимых мобильных устройств в сети, где каждая мобильная станция идентифицируется по ее международному идентификатору мобильного оборудования (IMEI). IMEI помечается как недопустимый, если он был объявлен украденным или не утвержден по типу. Идентификационный центр (AuC) защищенная база данных, в которой хранится копия секретного ключа, которая используется для аутентификации и шифрования по радиоканалу.

### ***3. Подсистема базовой станции (BSS)***

Подсистема базовой станции состоит из двух частей: базовой приемопередающей станции (BTS) и контроллера базовой станции (BSC). Они взаимодействуют через стандартизированный интерфейс Abis, позволяя (как и в остальной части системы) работать между компонентами, изготовленными различными поставщиками.

Базовая приемопередающая станция содержит радиопередатчики, которые определяют ячейку и обрабатывают протоколы радиосвязи с мобильной станцией. В большом городском районе потенциально будет развернуто большое количество BSC, поэтому требования к ней: прочность, надежность, мобильность и минимальная стоимость.

Контроллер базовой станции управляет ресурсами радио для одного или нескольких BTS. Он обрабатывает настройку радиоканала, скачкообразную перестройку частоты и передачу обслуживания. BSC – это соединение между мобильной станцией и мобильным сервисным коммутационным центром (MSC). Структура GSM-сети показана на рисунке 5.3.

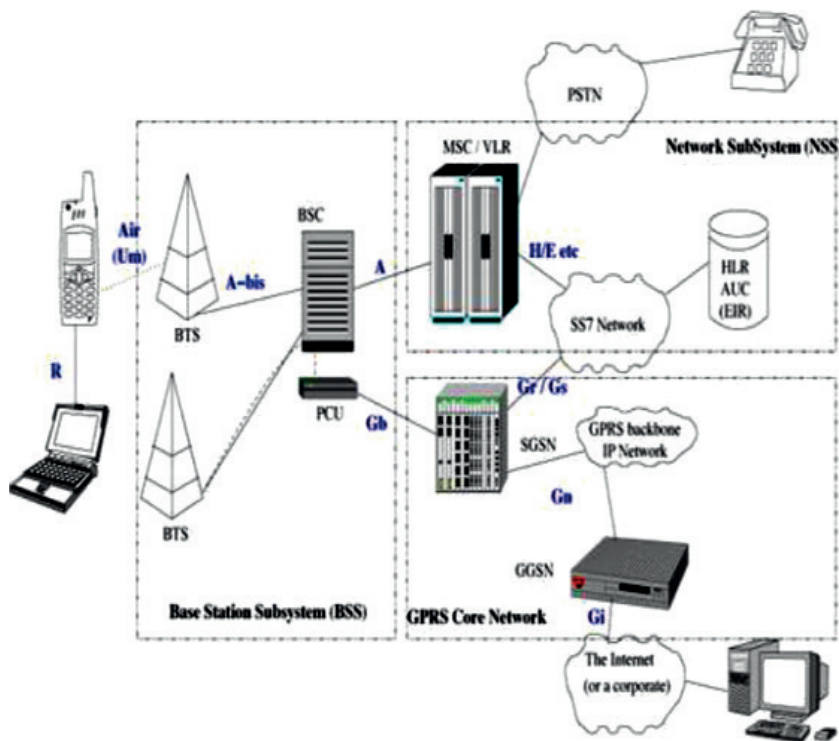


Рисунок 5.3 – Структура GSM-сети

## **Практическое задание и методические указания к выполнению работы**

1. Изучить основные характеристики стандарта GSM.
2. Ознакомиться с функциональной схемой и составом оборудования.
3. Изучить состав мобильной станции, мобильного коммутационного центра и подсистемы базовой станции. Назовите основные технические характеристики стандарта GSM.
2. Какая архитектура GSM-протокола?
3. Назначение и функции, выполняемые MSC.
4. Перечислите состав долговременных данных, хранящихся в регистрах HLR и VLR.
5. Каким образом реализуется процедура проверки сетью подлинности абонента?
6. Какой состав оборудования базовой станции BSS?
7. Расскажите о назначении мобильной станции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Галкин В.А.* Цифровая мобильная радиосвязь: учебное пособие для вузов / В.А. Галкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 592 с.
2. *Маковеева М.М.* Системы связи с подвижными объектами: учебное пособие для вузов / М.М. Маковеева, Ю.С. Шинаков. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
3. *Карташевский В.Г.* Сети подвижной связи / В.Г. Карташевский. – М.: Эко-Трендс, 2001. – 299 с.
4. URL: <https://tstu.ru/book/elib2/pdf/2013/udovikin2.pdf?ysclid=m5gaqltubf670483393>
5. URL: [https://cchgeu.ru/upload/iblock/3a1/bjvz6svjq79c9xkvcbullhcufz3usq3t/Posobie\\_SPR.pdf](https://cchgeu.ru/upload/iblock/3a1/bjvz6svjq79c9xkvcbullhcufz3usq3t/Posobie_SPR.pdf)

Составители:

*Манас Оконович Оконов,  
Айчүрөк Сансызбаевна Курманкожоева*

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению практических работ  
по дисциплине «Планирование сетей мобильной связи»

Редактор *Н.В. Шумкина*  
Компьютерная верстка *А.Ш. Мельниковой*

Подписано в печать 23.12.2025.  
Формат 60 × 84 1/16. Печать офсетная.  
Объем 3,5 п. л. Тираж 100 экз. Заказ 50.

Издательский дом КРСУ  
720048, Бишкек, ул. Анкара, 24к.