

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІІ РЕ, ФРЕТ

(повне найменування інституту, назва факультету)

радіотехніка та телекомунікації

(повна назва кафедри)

## Пояснювальна записка

до магістерської роботи

Магістр

(рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему Моделювання просторового покриття мережі базових станцій

Виконав: студент 6 курсу, групи РІЗ-213м  
спеціальності (напряму підготовки)

172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

ОПП Радіотехніка

Яценко Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Моршавка С.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Субботін С.О.

(прізвище та ініціали)

д.т.н., проф.

м. Запоріжжя

2018 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Запорізький національний технічний університет**  
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет IIRE, ФРЕТ  
 Кафедра радіотехніки та телекомунікацій  
 Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр  
 Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
 (код і назва)  
 Напрямок підготовки ОПП Радіотехніка  
 (код і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри *С. Моршавка*

“ ” 20 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Яценко Дмитру Григоровичу  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання просторового покриття мережі базових станцій

керівник роботи Моршавка Сергій Володимирович, к.т.н., доцент,  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “31” 10 2018 року №303

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2018

3. Вихідні дані до роботи Належить розробити ГІС додаток для оцінювання втрат у покритті мережою при переході від 2G до 3G технології стільникового зв'язку. При розрахунках слід враховувати територіальну належність (сільська забудова, пригород, сільська територія) та відмінність частотних діапазонів, що використовуються у стільникових мережах.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Слід провести огляд існуючих методів оцінки зон покриття та одержати найкращий, що придатний для застосування у сучасних ГІС додатках. Провести оцінювання зміни зон покриття на прикладі с. Коларівка (Болгарка) Приморського району Запорізької області за допомогою розробленого додатку та надати рекомендації щодо покращення покриття.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Методи оцінювання зон покриття

2. ГІС-технології

3. Приклад розрахунку зони покриття для с. Коларівка (Болгарка) Приморського району Запорізької області.



## РЕФЕРАТ

ПЗ: 112 с, 26 рис., 17 табл., 15 источников.

Объект исследования – пространственное покрытие сети базовых станций.

Цель работы – Анализ и моделирование пространственного покрытия сети базовых станций на примере с. Коларовка (Болгарка) Приморского района Запорожской области.

Метод исследования – использован метод анализа и экспериментальный метод.

В первом разделе излагается материал о основных понятиях в мобильных технология, видах антенн. Во втором разделе приводится методы расчета напряженности поля базовых станций, приводится сравнительный анализ методов. В третьем разделе рассказывается о ГИС-технология и требованиям, необходимые для частотно-территориального планирования. В четвертом разделе проводятся расчеты и моделирование пространственного покрытия сети базовых станций. Пятый раздел дает экономическую оценку проделанной научно исследовательской работы. Шестой раздел посвящен вопросам охраны труда и безопасности жизнедеятельности.

GSM, БАЗОВАЯ СТАНЦИЯ, ПЕРЕДАТЧИК, ПРИЕМНИК, АНТЕННА, АБОНЕНТСКАЯ СТАНЦИЯ, НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ, ЗАТУХАНИЕ, ГИС, ЧАСТОТА

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ.....	7
ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 КАРТЫ ПОКРЫТИЯ GSM.....	11
1.1 Организация сотовой сети мобильной связи СТАНДАРТА GSM .....	11
1.1.1 Принципы организации сотовой сети мобильной связи .....	11
1.1.2 Полосы частот сотовой мобильной связи .....	15
1.1.3 Общая характеристика цифровых систем связи стандарта 3G.....	18
1.1.4 Антенны в системах сотовой мобильной связи .....	30
1.1.5 Антенны мобильных станций .....	43
1.2 Особенности распространения радиоволн .....	48
2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ.....	53
2.1 Модель распространения радиосигнала в свободном пространстве .....	53
3 ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КАРТЫ ПОКРЫТИЯ.....	70
3.1 Понятие геоинформационных систем (ГИС).....	70
3.2 Принципы построения и функциональные возможности системы частотно-территориального планирования.....	76
3.3 Требования к картографической информации и геоинформационным базам данных при планировании радиосвязи .....	81
4 РАСЧЕТ КАРТЫ ПОКРЫТИЯ С. КОЛАРОВКА (БОЛГАРКА) ПРИМОРСКОГО РАЙОНА ЗАПОРОЖСКОЙ ОБЛАСТИ.....	84
5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА .....	89
5.1 Расчет сметы затрат на реализацию проекта .....	89
5.2 Бальная оценка экономической эффективности проекта .....	91
6 ОХРАНА ТРУДА И БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ	95
6.1 Анализ потенциальных опасностей.....	95
6.2 Мероприятия по технике безопасности .....	95
6.3 Мероприятия по производственной санитарии и гигиене труда .....	99

6.4 Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности .....	104
6.5 Мероприятия по обеспечению безопасности в чрезвычайной ситуации ...	106
ВЫВОДЫ .....	110
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....	111

## **ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ**

GSM – Global System for Mobile communications

ГИС – Геоинформационная система

БС – Базовая станция

АС – Абонентская станция

БД – База данных

## ВВЕДЕНИЕ

Системы мобильной связи, особенно системы сотовой мобильной связи, наряду с космическими, телевизионными и компьютерными системами, являются одними из важнейших достижений человечества в XX веке в области информационных систем и технологий. Сотовая мобильная связь, появившаяся на уровне идеи в проектах компании Bell System в конце 40-х годов и к 1978 году реализованная в виде первой опытной сети (Chicago, 2000 абонентов), к 2004 году лавинообразно завоевала одну из ключевых позиций в области информационных технологий: на 2004 год во всем мире сотовой мобильной связью было охвачено свыше 1,5 миллиарда пользователей.

Столь бурное развитие систем сотовой мобильной связи можно объяснить следующими причинами.

а) Развитие микроэлектроники позволило создать малогабаритные, универсальные, относительно дешевые устройства, обеспечивающие высокое качество, надежность и защищенность передаваемой информации.

б) Потребности широких слоев населения в использовании широкого набора услуг:

1) высококачественная передача речи и компьютерных данных между абонентами, перемещающимися в пространстве, в том числе и с выходом на стационарные телефонные сети;

2) поиск подвижных абонентов и установление с ними связи в пределах города, страны и в мировом масштабе;

3) возможность подключения к сетям ISDN, PSTN, Интернет;

4) идентификация подлинности абонента;

5) автоматическая регистрация сеанса связи и начисление оплаты и т.п.

Согласно обобщенным прогнозам на ближайшие 10-15 лет обеспеченность населения планеты средствами мобильной телефонной связи в промышленно развитых странах может достигнуть от 50 до 80%. Это значит, что мобильный теле-

фон станет не менее распространенным, чем обычный стационарный проводной телефонный аппарат.

Глобальная система мобильной связи (англ. Global System for Mobile Communications, ранее фр. Groupe Spécial Mobile, GSM) – международный стандарт для мобильной цифровой сотовой связи с разделением канала по принципу TDMA и высокой степенью безопасности за счет шифрования с открытым ключом. Стандарт был разработан под патронатом Европейского института стандартизации электросвязи (ETSI) в конце 1980-х годов.

GSM был принят в 1987 году как Европейский стандарт цифровой мобильной технологии и относится к сетям второго поколения. Залогом его успеха стало высокое качество передачи голоса, несложная система международного роуминга и поддержка новых сервисов, таких как SMS и Интернет. Первый звонок в стандарте мобильной сотовой связи GSM был осуществлен 1 июля 1991 премьер-министром Финляндии Гарри Холкери к вице-мэра города Тампере Каарина Суон, они обсудили преимущества новой технологии GSM. Одной из главных тезисов того разговора стала превосходное качество передачи голоса и безопасность коммуникации.

Первая сеть в этом стандарте построили компании Telenokia и Siemens. Сегодня это одна компания - Nokia Siemens Networks.

GSM является самым распространенным стандартом в мире. За 10 лет количество пользователей сетей GSM достигла 500 000 000, а через двадцать лет их уже более 4,4 миллиарда. Причем их ежедневный прирост составляет 1000000. По состоянию на 2011 в мире работает 838 GSM-сетей в 234 странах.

Сейчас с GSM активно конкурируют другие сети EDGE, 3G и LTE. Они позволяют передавать гораздо большие объемы информации.

#### Технические сведения

Большинство сетей GSM работают в диапазоне 900 МГц или 1800 МГц. Некоторые страны Америки используют диапазоны 850 МГц и 1900 МГц, поскольку стандартные диапазоны 900 и 1800 МГц заняты другими системами.

Диапазоны 400 и 450 МГц используются в некоторых странах (включая страны Скандинавии и некоторые островные страны).

При работе в стандартном диапазоне 900 МГц используются диапазон 890-915 МГц для связи от терминала к базовой станции, и 935-960 МГц для связи от базовой станции к терминалу. В некоторых странах диапазон частот GSM-900 был расширен до 880-915 МГц (MS → BTS) и 925-960 МГц (MS ← BTS), благодаря чему максимальное количество каналов связи увеличилось на 50, такая модификация была названа E-GSM (extended GSM).

Полоса в 25 МГц делится на 124 канала (несущие), каждый шириной в 200 кГц. Временное разделение каналов (TDMA) позволяет в каждом канале размещать восемь полноскоростных (full-rate) или шестнадцать полускоростные (half-rate) голосовых каналов.

Стандарт GSM использует несколько голосовых кодеков, позволяющих передавать голосовой канал шириной 3,1 кГц на скоростях от 5,6 до 13 кбит/с.

Услуги, которые могут предоставляться сетями GSM:

- передача голосовой информации;
- услуга передачи данных (синхронный и асинхронный обмен данными, в том числе пакетная передача данных – GPRS);
- передача коротких сообщений (SMS);
- передача мультимедийных сообщений (MMS);
- передача текстовых информационных сообщений (Cell Broadcast);
- передача факсов.

# 1 КАРТЫ ПОКРЫТИЯ GSM

## 1.1 Организация сотовой сети мобильной связи СТАНДАРТА GSM

### 1.1.1 Принципы организации сотовой сети мобильной связи

Первые системы наземной мобильной связи с автоматической коммутацией и маршрутизацией соединений были разработаны и внедрены в 60-х годах XX столетия.

На этом этапе развития сотовых сетей автоматической телефонной связи функции подключения мобильных абонентов к средствам стационарной телефонной сети выполняла одна базовая станция BSS (Base Station System).

Как показано на рис. 1.1, мобильные абоненты, перемещаясь в пространстве, окружающем BSS (с определенным максимальным радиусом действия), осуществляют связь с BSS по радиоканалам посредством имеющихся у них мобильных радиостанций MS (Mobile Station).

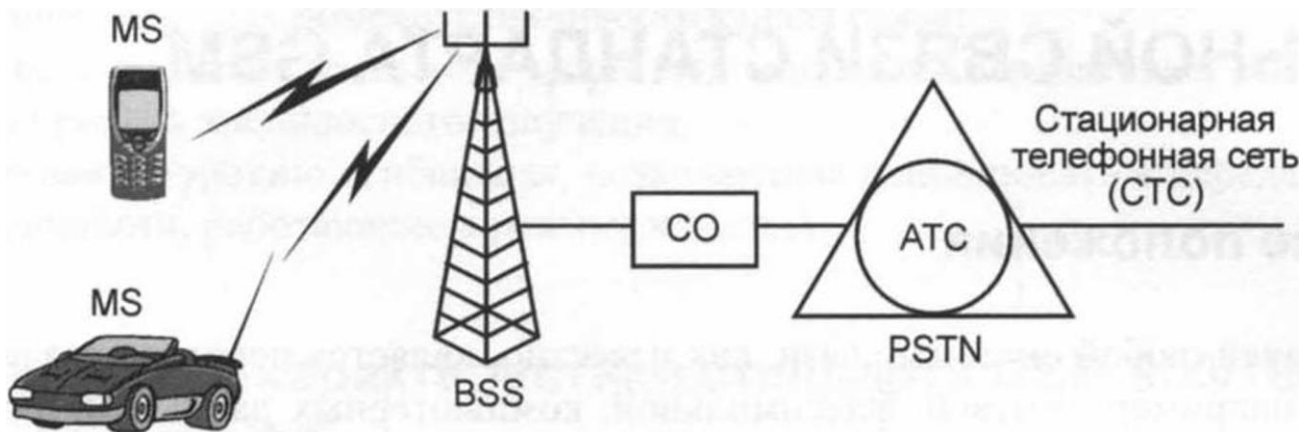


Рисунок 1.1 – Связь мобильных станций со стационарной сетью через одну ВЭБ:  
СО – стационарное оборудование ВЭЭ; АТС – автоматическая телефонная станция

Далее, BSS подключала мобильные абоненты к стационарной телефонной сети.

Данная простейшая сеть мобильной связи, предполагающая по сути одну соту (ячейку) для взаимодействия MS  $\Leftrightarrow$  BSS, имела следующие существенные недостатки:

- зависимость качества связи от расстояния между MS и BSS (для сохранения высокого качества радиосвязи необходимо было применять радиостанции с регулируемой выходной мощностью передатчика в широком диапазоне уровней в зависимости от расстояния между MS и BSS, что было в то время достаточно сложно реализовать);
- ограниченное число подключаемых мобильных станций MS из-за ограниченного числа радиоканалов (ограниченное число выделенных рабочих частот/длин волн).

В процессе развития сотовых сетей мобильной связи эти недостатки были устранены путем замены одной мощной BSS несколькими BTS (Base Transceiver Station), имеющими меньшие мощности передатчиков и свои индивидуальные зоны обслуживания (рис. 1.2). При этом сотовые сети мобильной связи строятся в виде совокупности сот (cells – сот, ячеек) схематично изображаемых в виде равновеликих правильных шестиугольников, что имеет сходство с пчелиными сотами и поэтому сеть мобильной связи была названа сотовой или ячеечной (cellular). В центре каждой  $i$ -й соты находится BTS, обслуживающая все MS в пределах своей соты.

При реализации такой сети сразу же возникает техническая проблема – как переключать движущегося абонента MS от одной соты в другую. Для решения этой проблемы в сотовой сети мобильной связи предусмотрен центр коммутации мобильных станций MSC (Mobile Services Switching Center), обеспечивающий переключение установленного разговорного тракта при перемещении мобильного абонента из одной соты в другую, а также подключение абонентов стационарной телефонной сети к конкретной BTS, в зоне действия которой находится данный мобильный абонент.

При создании сети, изображенной на рис. 1.2, возникла необходимость контроля за перемещением (roaming – блужданием) мобильной станции MS, находящейся как в свободном (с точки зрения связи) состоянии, так и в состоянии занятости. Следует отметить, что при использовании сети стационарная телефонная сеть освобождается от обслуживания вызовов, поступающих от одного мобильного абонента к другому. Такие соединения устанавливаются через центр коммутации МБС.

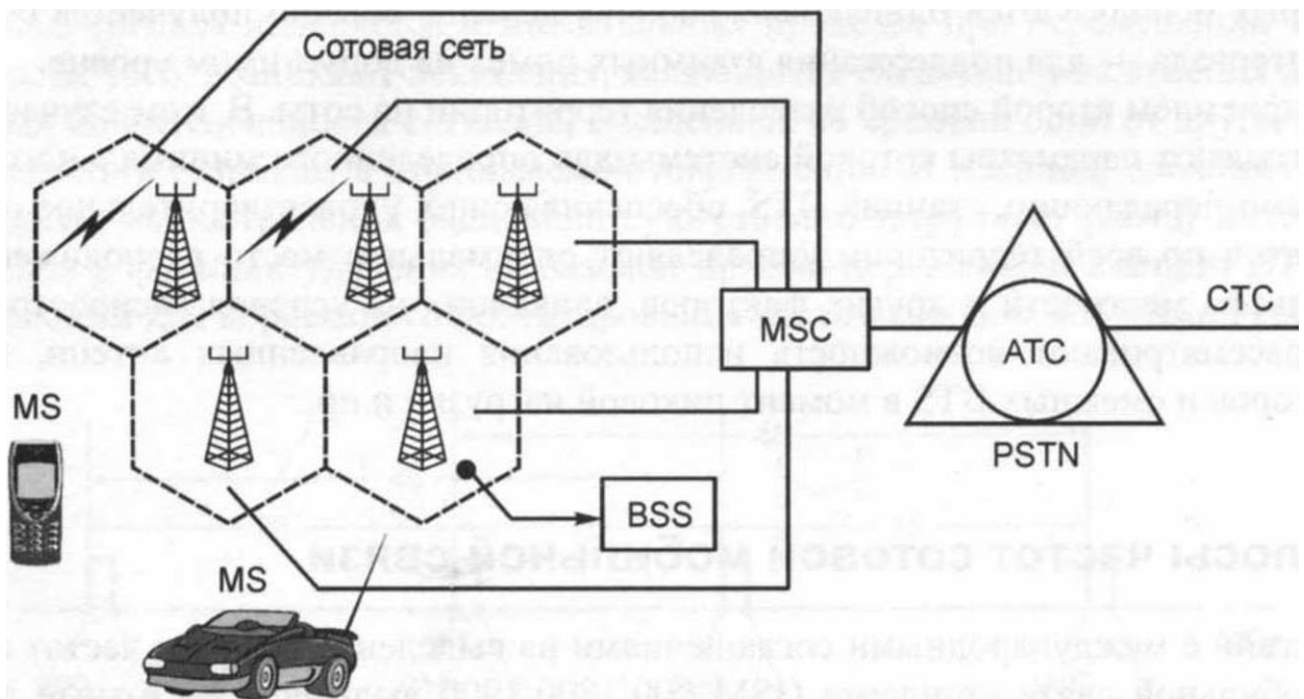


Рисунок 1.2 – Сотовая сеть мобильной связи

В современной сотовой мобильной сети обычно функционирует несколько коммутационных центров MSC, в каждый из которых включается несколько BSS.

Рассмотрим особенности деления обслуживаемой мобильной связью территории на соты. Разделить обслуживаемую территорию на соты можно двумя основными способами:

- первый, основан на измерении статистических характеристик распространения радиосигналов в данной системе связи;

– второй, основан на измерении или расчете параметров распространения радиосигнала для конкретного района.

При реализации первого способа вся обслуживаемая территория разделяется на одинаковые по форме соты (ячейки) и с помощью методов статистической радиотехники определяются их допустимые размеры и расстояния до других сот, в пределах которых выполняются условия допустимого взаимного влияния.

Для получения оптимального (то есть без перекрытия или пропусков участков) разделения территории на соты могут быть использованы только три геометрические фигуры – треугольник, квадрат и правильный шестиугольник. Наиболее подходящей фигурой является шестиугольник, так как, если антенну с круговой диаграммой направленности BTS устанавливать в его центре, то будет обеспечен доступ почти к всем участкам соты.

В действительности соты никогда не бывают строгой геометрической формы.

Реально границы сот имеют вид неправильных кривых, зависящих от условий распространения и затухания радиоволн, то есть от рельефа местности, характера и плотности растительности, застройки зданиями и многих других факторов.

Более того, границы сот вообще не являются четко определенными, так как на рубеже передачи обслуживания мобильной станции от одной соты в соседнюю эти границы могут в некоторых пределах смещаться с изменением условий распространения радиоволн и в зависимости от направления движения мобильной станции. Точно так же и положение базовой приемо-передающей станции BTS лишь приближенно совпадает с центром соты, который к тому же не так просто определить однозначно, если сота имеет неправильную форму. Если же на BTS используются направленные антенны, то BTS в реальных случаях могут фактически оказаться на границах сот.

При использовании первого способа деления территории на соты интервал между сотами, в которых используются одинаковые рабочие каналы, обычно по-

лучается больше требуемого интервала – для поддержания взаимных помех на допустимом уровне.

Более приемлем второй способ разделения территории на соты. В этом случае измеряют или рассчитывают параметры сотовой системы для определенного минимального числа базовых приемо-передающих станций BTS, обеспечивающих удовлетворительное обслуживание абонентов по всей территории, определяют оптимальное место расположения BTS с учетом рельефа местности и других факторов, влияющих на условия распространения радиоволн, рассматривают возможность использования направленных антенн, пассивных ретрансляторов и смежных BTS в момент пиковой нагрузки и пр.

### 1.1.2 Полосы частот сотовой мобильной связи

В соответствии с международными соглашениями на выделение рабочих частот в системах сотовой мобильной связи стандарта GSM 900/1800/1900 выделены частотные диапазоны, представленные в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Рабочие частоты и длины рабочих волн в системах сотовой мобильной связи стандарта GSM 900/1800/1900

Стандарт GSM	Частота, МГц		Длина волны, см	
	MS => BTS	BTS => MS	MS => BTS	BTS => MS
GSM 900	890-915	935-960	32,8-33,7	31,2-32,1
GSM 1800	1710-1785	1805-1880	16,8-17,6	16,0-16,6
GSM 1900	1850-1910	1930-1990	15,7-16,2	15,1-15,6

Из табл. 1.1 следует:

– жесткая ограниченность выделенных полос частот, вмещающих небольшое число частотных каналов, что вызывает естественное стремление к наиболее рациональному использованию выделенного частотного диапазона, к

оптимизации его использования и соответственно к повышению емкости системы мобильной связи;

– используемые в сотовой мобильной связи стандарта GSM полосы частот относятся к дециметровому диапазону радиоволн, которые распространяются в основном в пределах прямой видимости, дифракционные явления на этих частотах выражены слабо, а поглощение в гидрометеорах (дождь, снег, туман) и молекулярное поглощение практически отсутствуют.

Однако близость подстилающей поверхности и наличие препятствий (растительность, строения), при организации мобильной связи в условиях города, приводят к появлению отраженных сигналов, интерферирующих между собой и с основным сигналом, распространяющимся по прямому пути. Это явление называют многолучевым распространением сигналов. Отражения от подстилающей поверхности при определенных условиях приводят к тому, что мощность принимаемого сигнала убывает пропорционально не второй степени расстояния между передатчиком BTS и приемником MS ( $1/r^2$ ), как при распространении в свободном пространстве (однолучевая модель), а обратно пропорционально четвертой степени этого расстояния (то есть  $\sim 1/r^4$ ), а в общем случае –  $1/r^2$ . Интерференция нескольких сигналов, прошедших различными путями, вызывает своеобразное явление замираний результирующего сигнала, так называемый – фединг (fading), при котором интенсивность принимаемого сигнала изменяется в значительных пределах при перемещении мобильной станции. Кроме того, возникают искажения, являющиеся следствием наложения нескольких соизмеримых по интенсивности сигналов, смещенных во времени один от другого, которые могут приводить к ошибкам в принимаемой информации. И наконец, сложность картины многолучевого распространения радиоволн существенно затрудняет расчет интенсивности радиосигналов в функции удаления от базовой приемо-передающей станции BTS, а такой расчет необходим для корректного проектирования систем сотовой мобильной связи.

Следует отметить, что в соответствии со стандартом GSM 900/1800/1900:

– разнос между частотами в направлении мобильная станция => базовая станция – (MS => BTS) и в направлении базовая станция => мобильная станция – (BTS => MS) составляет (рис. 1.3, а):

- 1) для GSM 900:  $935 - 890 = 960 - 915 = 45$  МГц;
- 2) для GSM 1800:  $1805 - 1710 = 1880 - 1785 = 95$  МГц;
- 3) для GSM 1900:  $1930 - 1850 = 1990 - 1910 = 80$  МГц;

– отведенная для приема/передачи полоса частот шириной:

- 1) для GSM 900:  $960 - 935 = 915 - 890 = 25$  МГц;
- 2) для GSM 1800:  $1785 - 1710 = 1880 - 1805 = 75$  МГц;
- 3) для GSM 1900:  $1910 - 1850 = 1990 - 1930 = 60$  МГц;

– разнос дуплексных речевых каналов на частоте 900 МГц для GSM 900 – 200 кГц (рис. 1.3,б);

– эквивалентная полоса частот на один физический речевой канал:

- 1) для GSM 900: 25 кГц;
- 2) для GSM 1800/1900: 12,5 кГц;

– число физических речевых радиоканалов в дуплексном радиоканале для GSM:  $200/25 = 8$  каналов (рис. 1.3, б);

– число дуплексных речевых каналов – 124 (рис. 1.3, в).

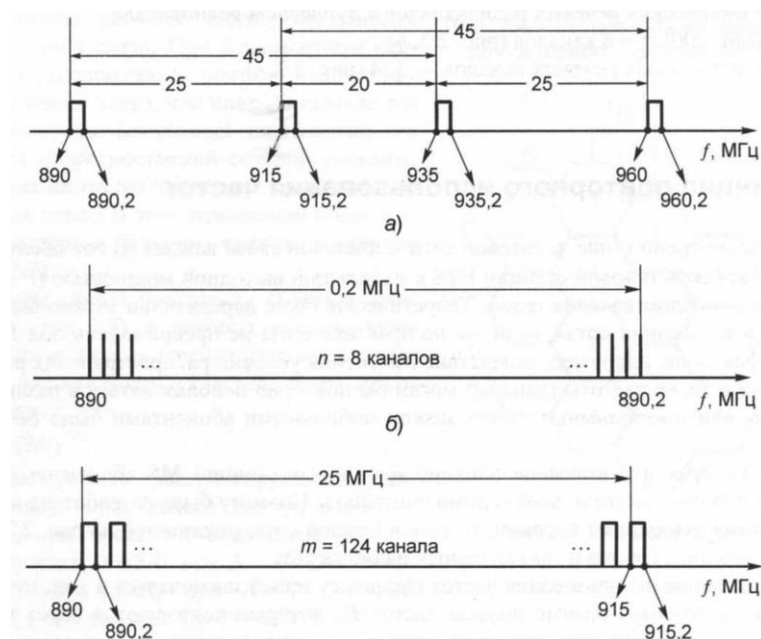


Рис. 1.3 Характеристика полос частот стандарта GSM

где а) разнос между частотами в направлении мобильная станция => базовая станция – (MS => BTS) и в направлении базовая станция => мобильная станция – (BTS => MS);

б) число физических речевых радиоканалов в дуплексном радиоканале в отведенной для приема/передачи полосе частот для GSM 900 шириной в 25 МГц размещается  $[(25/0,2) - 1] = 124$  дуплексных речевых каналов;

в) число физических дуплексных речевых радиоканалов

### 1.1.3 Общая характеристика цифровых систем связи стандарта 3G

Мобильная связь третьего поколения строится на основе пакетной передачи данных. Для реализации систем третьего поколения разработаны рекомендации по глобальным унифицированным стандартам мобильной связи:

- обеспечение качества передачи речи, сравнимого с качеством передачи в проводных сетях связи;
- обеспечение безопасности, сравнимой с безопасностью в проводных сетях;
- обеспечение национального и международного роуминга;
- поддержка нескольких местных и международных операторов;
- эффективное использование спектра частот;
- пакетная и канальная коммутация;
- поддержка многоуровневых сотовых структур;
- взаимодействие с системами спутниковой связи;
- поэтапное наращивание скорости передачи данных вплоть до 10 Мбит/с.

Несмотря на то, что конечная цель для всей индустрии телекоммуникаций – создать единую всемирную среду мобильной связи, поддерживающую широкополосные системы и обеспечивающую глобальную мобильность, в результате, скорее всего, возникнет некоторое семейство стандартов, обеспечивающее услуги третьего поколения.

Основным плюсом сетей 3G является большая скорость передачи больших объемов данных по радиоканалу. Самая быстрая на сегодня в сетях 2-2,5G технология EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) обеспечивает передачу данных на скорости до 473,6 Кбит/с (на практике – вдвое-втрое ниже). В сетях третьего поколения для передачи данных используется технология HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access), скорость работы которой измеряется уже мегабитами.

Сети третьего поколения 3G работают на частотах дециметрового диапазона около 2 ГГц, передавая данные со скоростью 2 Мбит/с. Они позволяют организовывать видеотелефонную связь, смотреть на мобильном телефоне фильмы и телепрограммы и т. д. В мире сосуществуют два стандарта 3G: UMTS (или W-CDMA) и CDMA2000. UMTS распространён в основном в Европе, CDMA2000 – в Азии и США.

3G стандарт был разработан Международным Союзом Электросвязи (International Telecommunication Union, ITU) и носит название IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000). Основная цель создания стандарта – синхронизация систем третьего поколения для обеспечения глобального роуминга. Реализация сети предполагает дальнейшее слияние сотовой связи с информационными и компьютерными технологиями, радикальное обновление оборудования, и, как следствие, расширение спектра предоставляемых услуг, включая услуги высокоскоростной передачи информации, глобального роуминга и мультимедиа, независимо от местоположения абонента и скорости его передвижения. Мобильный телефон становится персональным коммуникатором, пользователь которого будет обладать практически неограниченными возможностями доступа ко всемирным информационным ресурсам, в том числе через сеть Интернет. Услуги систем 3-го поколения представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Услуги систем 3-го поколения

Виды услуги	Скорость передачи кБит/с	Средняя длительность сообщения, с	Режим работы	Услуги
Голосовая связь	4-32	60	Коммутация каналов	Речь, голосовая почта
Низкоскоростной обмен данными	9,6-14,4	30	Коммутация пакетов	SMS, определение местоположения
Передача к коммутируемым данным (ISDN)	до 64	156	Коммутация каналов	Услуги сетей ISDN
Интерактивный обмен мультимедиа данными	128-134	144	Коммутация каналов	Видеотелефонная связь, передача изображений и больших объёмов информации
Асимметричная передача мультимедиа данных	384-2048	14-53	Коммутация пакетов	Работа с сетями Internet и интрасетями

Для решения вопроса последней мили, т.е. организации связи с операторскими базовыми станциями, необходимы технические решения, позволяющие сохранить скорости и качество передачи информации; в противном случае теряется одна из главных идей создания нового поколения мобильной сети. Основными техническими средствами для решения этой задачи являются оптоволоконные, радиорелейные и атмосферные оптические системы. У тех и у других есть свои преимущества и недостатки.

Программа IMT-2000 базируется на ряде признаков, определяющих принципы построения систем 3-го поколения и их архитектуру. Уже на первом этапе развертывания они должны обеспечивать определенные значения скорости передачи для различных степеней мобильности абонента (т. е. разных скоростей его движения) в зависимости от величины зоны покрытия:

- до 2,048 Мбит/с при низкой мобильности (скорость менее 3 км/ч) и локальной зоне покрытия;
- до 144 кбит/с при высокой мобильности (до 120 км/ч) и широкой зоне покрытия;

– до 64 (144) кбит/с при глобальном покрытии (спутниковая связь).

В рамках концепции ИМТ-2000 допустимы две стратегии перехода к 3G-системам: постепенное (эволюционное) и "одномоментное" (революционное) (Табл.1.3).

Таблица 1.3 – Две стратегии внедрения услуг 3-го поколения мобильной связи

Определяющий фактор	Эволюционный подход	Революционный подход
Метод использования частотного ресурса	Работа в старых диапазонах	Освоение новых диапазонов
Принцип предоставления услуг	Постепенно расширяемый ассортимент услуг	Новые услуги с начала развертывания
Пропускная способность	Постепенно наращиваемая	Изначально высокая
Стратегия создания сетевой инфраструктуры	Медленный и постепенный переход от 2G к 3G по мере появления спроса на услуги	Создание опытных районов ("островков") с полным набором услуг
Технологический уровень	Новые технологии в отдельных элементах	Все технологии - новейшие
Архитектура сети	Максимальное использование существующей инфраструктуры	Новая
Коммерческий риск	Низкий	Высокий
Состав операторов	В основном те же, что и в 2G	Операторы, купившие лицензии на услуги 3G
Глобальный роуминг	С ограничениями	Без ограничений
Капитальные затраты	Незначительные	Значительные

При революционном подходе предполагается внедрение всех новейших технологий и новых интерфейсов и полная замена существующего оборудования и ПО, что сопряжено с большими капитальными затратами и определенным коммерческим риском. Для отработки данной стратегии в разных районах мира, в том числе и в Украине, созданы экспериментальные сети.

Один из важнейших признаков, принципиально отличающих два подхода, способы освоения частотного ресурса. При революционном сценарии требуется

новый частотный ресурс. Япония и Европа намерены пойти по этому пути и выделить для систем 3-го поколения "индивидуальные" полосы радиочастот.

В США подход абсолютно иной – там спектр, выделенный для ИМТ-2000, уже занят службой PCS и 3G-системы будут работать в старых полосах частот вместе с существующими сетями стандартов TDMA/AMPS.

Эволюционное внедрение требует меньших капитальных затрат и предполагает плавную замену оборудования в зависимости от спроса на конкретные виды услуг. Такой подход позволяет максимально использовать существующую инфраструктуру сети связи, внедряя новые сетевые элементы в процессе последовательной модернизации.

Естественно, что операторы систем двух наиболее массовых технологий – TDMA/AMPS и GSM – стали сторонниками эволюционного пути развития. Сегодня эти системы имеют ограниченные возможности по наращиванию пропускной способности и видам услуг в рамках выделенного частотного диапазона. Рост их емкости без дополнительного расширения радиочастотного спектра возможен лишь за счет перехода на полускоростные каналы (GSM), введения многосекторных антенн или использования спектрально-эффективных методов модуляции (8PSK и др.).

Согласно концепции ИМТ-2000, система нового поколения подразделяется на две составные части: сети радиодоступа и магистральную базовую сеть. Подходы к их проектированию принципиально различны. Характеристики радиointерфейсов для ИМТ-2000 представлены в таблице 1.4.

Эффективность сетей радиодоступа в значительной степени зависит от новизны технологий, которые в них используются. Смена поколений, как правило, означает и смену идеологии построения этих сетей. Магистральные сети более "инерционны". В них инвестированы значительные средства, которые операторы желают сохранить при переходе к 3-му поколению. Кроме того, существующие базовые сети не являются сдерживающим фактором для внедрения современных 3G-услуг. Поэтому их инфраструктура будет развиваться эволюционным путем,

опираясь на существующие сети GSM, TDMA (IS-136), IP, IN и ISDN, что подтверждают и исследования, проведенные в рамках IMT-2000.

Таблица 1.4 – Характеристики радиointерфейсов для IMT-2000

Показатель	IMT-DS	IMT-MC	IMT-TC	IMT-SC	IMT-FT
Авторы технических спецификаций	3GPP, ARIB, ETSI	3GPP2, TTA, TR-45.3	3GPP, ETSI,	3GPP2, UWCC, CWTS	ETSI TTA TR-45.3 DECT EP
Базовая технология	WCDMA	cdma2000	UTRA TDD TD	UWC-136, TDMA	MC-TDMA
Метод доступа	UTRA	MC- CDMA	SCDMATDMA/CDMA	FDD	FDD/TDD
Чиповая скорость, Мчип/с	3,84DS-CDMA	3,6884	3,84 (UTRA) 1,28 (SCDMA)	Н/д	Н/д
Скорость передачи, кбит/с	Н/д	Н/д	Н/д	384; 2048	1152; 2304; 3456
Вид модуляции	QPSK/BPSK HPSK*	QPSK/BPSK	QPSK/BPSK HPSK*	BOQAM QOQAM	GFSK; p/2-DPSK p/4-DQPSK p/8-D8PSK
Длина кадра, мс	10	5 и 20	10	4,6	10

Сегодня в качестве магистральных предполагается использовать сеть, базирующуюся на IP-технологии, а также усовершенствованные опорные сети GSM MAP и ANSI-41, которые развернуты для наиболее развитых стандартов мобильной связи 2-го поколения – европейского GSM и североамериканских TDMA (IS-136) и CDMA (IS-95). Взаимодействие между тремя магистральными сетями - GSM MAP, ANSI-41 и базовой IP-сетью – будет осуществляться через межсетевой интерфейс NNI (Network-to-Network Interface).

Стандартный модуль идентификации пользователя UIM (User Identity Module) обеспечит глобальный роуминг независимо от метода радиодоступа или типа транспортной сети в том или ином географическом регионе.

В настоящее время важнее всего дать возможность всем операторам действующих сетей использовать существующую инфраструктуру при реализации

набора новых услуг IMT-2000. В связи с этим МСЭ считает необходимым начать разработки единого протокола NNI, обеспечивающего глобальный роуминг в рамках 3G-систем.

Транспортная сеть должна обеспечить межсетевое взаимодействие и "прозрачность" доступа к услугам независимо от местонахождения абонентов. Чтобы реализовать это требование на практике, предусматривается создание специального конвертора, или шлюза, IWG (Interworking Gateway), который и будет поддерживать глобальный роуминг при любом протоколе радиодоступа.

Сегодня уже очевидно, что окончательному внедрению систем 3-го поколения будет предшествовать очень продолжительный период их совместного существования с системами 2-го поколения. Благодаря различиям в наборе и стоимости предоставляемых услуг новые технологии будут не конкурировать со старыми, а дополнять их.

#### Архитектура сети радиодоступа

Система UMTS состоит из ряда логических элементов сети, каждый из которых выполняет определенные функции. Элементы сети могут группироваться на основе близости выполняемых функций или на основе подсети, к которой они принадлежат.

По своим функциям элементы сети группируются в сеть радиодоступа (RAN, UMTS территориального уровня = UTRAN), которая оперирует всеми функциями, относящимися к радиосвязи, и в базовую сеть (CN), которая обеспечивает коммутацию и маршрутизацию вызовов и каналы передачи данных во внешние сети. Чтобы завершить систему, определяются оборудование пользователя (UE), которое взаимодействует с ним, и радиоинтерфейс (Uu).

С точки зрения спецификации и стандартизации, как UE, так и UTRAN содержат полностью новые протоколы, построение которых основано на потребностях новой технологии радиосвязи WCDMA. И наоборот, построение CN взято из GSM. Это дает системе с новой технологией радиосвязи глобальную базу из известной и испытанной технологии CN, что способствует ускорению ее внедрения

и позволяет использовать такое замечательное преимущество, как глобальный роуминг. Архитектура системы UMTS высокого уровня представлена на рис. 1.4.

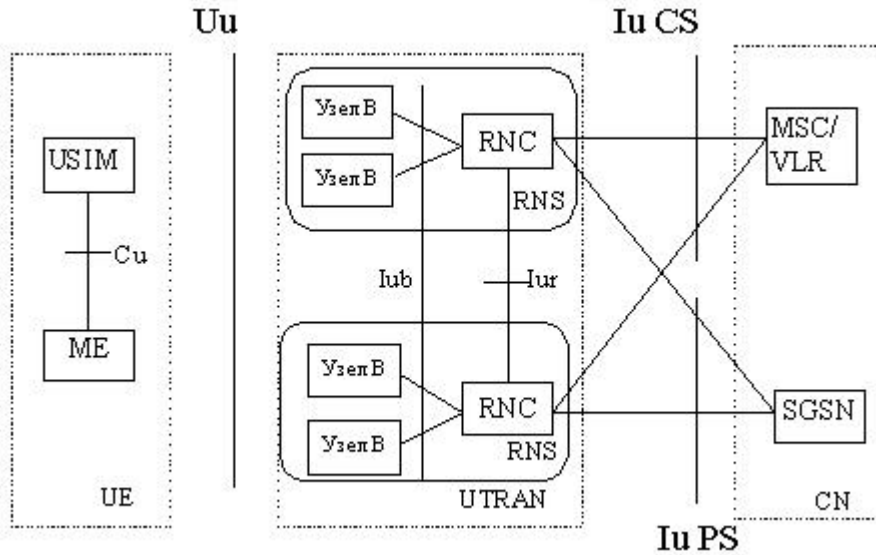


Рисунок 1.4 – Архитектура системы UMTS высокого уровня

Возможность иметь несколько объектов одного и того же типа позволяет делить систему UMTS на подсети, работающие либо самостоятельно, либо вместе с другими подсетями, и которые являются тождественными друг другу. Такая сеть называется UMTS PLMN (наземная мобильная сеть общего пользования). Обычно одна PLMN эксплуатируется одним оператором и соединяется с другими PLMNs также, как и с другими типами сетей, например, ISDN, PSTN, Интернет и т.д. Элементы сети в PLMN представлены на рис. 1.5.

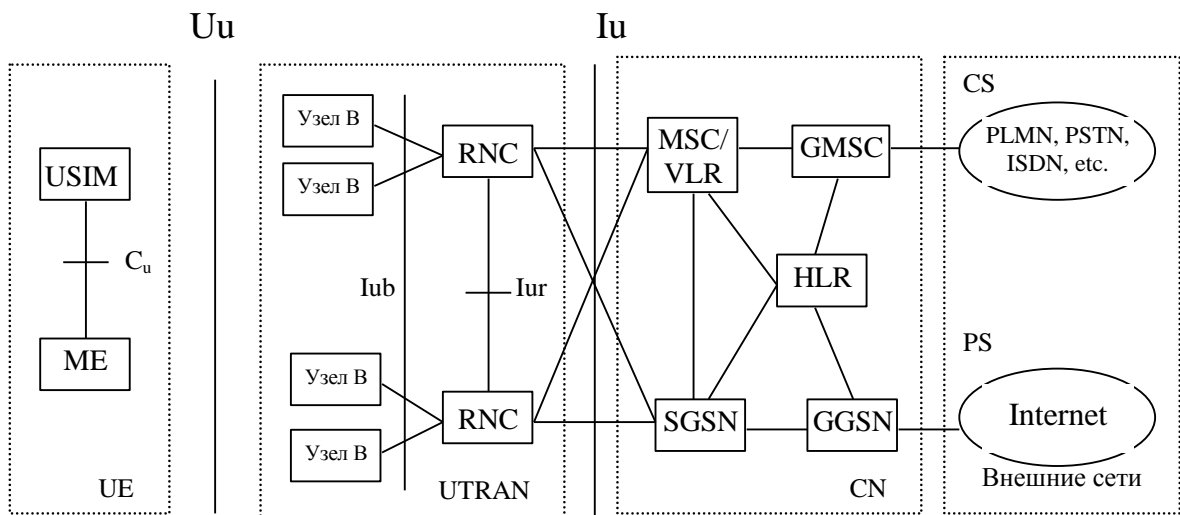


Рисунок 1.5 – Элементы сети в PLMN

UE состоит из двух частей:

Подвижное оборудование (ME) – радиотерминал, используемый для радиосвязи через интерфейс Uu.

Модуль идентификации абонента UMTS (USIM), представляющий собой интеллектуальную плату, которая служит идентификатором абонента, выполняет алгоритм аутентификации и шифрования и некоторые данные об услугах, которыми имеет право пользоваться абонент, необходимые при использовании терминалом.

UTRAN также состоит из двух элементов:

Узел B преобразует поток данных между интерфейсами Iub и Uu. Он также участвует в управлении радиоресурсами.

Контроллер радиосети (RNC) владеет и управляет радиоресурсами в своей области (к ней подключены узлы B). RNC представляет собой точку доступа к сервису для всех услуг, которые UTRAN предоставляет CN, например, управление соединениями с UE.

Основными элементами базовой сети GSM являются следующие:

HLR (регистр домашнего местонахождения, по месту регистрации) – это база данных, помещаемая в домашнюю систему абонента, которая хранит в памяти основной экземпляр профиля обслуживания абонента. Профиль обслуживания содержит, например, информацию о предоставляемых ему услугах, запрещенных районах роуминга и дополнительную сервисную информацию, например, о возможности переключения телефонного вызова и номера телефона, на который производится переадресация. Профиль обслуживания создается, когда новый абонент прописывается в системе, и остается в памяти до тех пор, пока сохраняется эта прописка. Для маршрутизации входящих сообщений к UE (т.е. вызовов или коротких сообщений) HLR также записывает данные о местоположении UE на уровне MSC/VLR (узла по обеспечению услуг и/или SGSN), т. е. на уровне системы обслуживания.

MSC/VLR – это коммутатор (MSC) и база данных (VLR), которые предоставляют услуги по текущему местоположению UE по коммутации каналов (CS).

Функция MSC используется для коммутации сообщений CS, и функция VLR сохраняет экземпляр профиля обслуживания гостевого пользователя, а также более точную информацию о местоположении UE в системе обслуживания. Часть сети, к которой обеспечивается доступ через MSC/VLR, часто называют областью обслуживания CS.

GMSC (шлюзовой MSC) – это коммутатор в точке, где UMTS PLMN соединяются с внешними сетями CS. Все входящие и исходящие соединения CS проходят через GMSC.

Функции SGSN (узла по обеспечению услуг GPRS) подобны функциям MSC/VLR, но обычно используются для услуг с коммутацией пакетов (PS). Часть сети, к которой обеспечивается доступ через MSC/VLR, часто называют областью обслуживания CS.

GGSN (узел по обеспечению межсетевого перехода GPRS) функционально близок к GMSC, но связан с предоставлением услуг PS.

Внешние сети можно разделить на две группы:

Сети CS. Они обеспечивают соединения с коммутацией каналов, как это имеет место в существующей в настоящее время телефонной связи.

Сети PS. Они обеспечивают соединения с коммутацией пакетов данных. Одним из примеров сети PS служит Интернет.

Стандарты UMTS построены таким образом, что функции внутри элементов сети подробно не определяются. Вместо этого определены интерфейсы между логическими элементами сети. Определены следующие основные открытые интерфейсы:

Интерфейс Ci. Это электрический интерфейс между интеллектуальной платой (смарт-карточкой) USIM (модуля идентификации абонента сети UMTS) и ME. Интерфейс удовлетворяет формату стандарта для смарт-карточек.

Интерфейс Uu. Это радиоинтерфейс WCDMA, который служит предметом рассмотрения в данной книге. Интерфейс Uu – это интерфейс, через который UE получает доступ к стационарной части системы, и поэтому, возможно самый важ-

ный интерфейс в UMTS. Представляется, что изготовителей UE будет гораздо больше, чем изготовителей элементов стационарной сети.

Интерфейс Iu. Он соединяет UTRAN с CN. Подобно соответствующим интерфейсам в GSM, A (для коммутации каналов) и Gb (для коммутации пакетов), открытый интерфейс Iu дает операторам UMTS возможность производить закупку UTRAN и CN у разных производителей. Создание конкуренции в этой области явилось одним из факторов, обусловивших успех GSM.

Интерфейс Iur. Открытый интерфейс Iur позволяет осуществлять мягкий хэндовер между RNCs от различных производителей, и поэтому он дополняет открытый интерфейс Iu.

Интерфейс Iub. Iub соединяет узел В и RNC. UMTS является первой коммерческой системой подвижной телефонной связи, где интерфейс контроллер-базовая станция стандартизован как полностью открытый интерфейс. Ожидается, что подобно другим открытым интерфейсам, открытый интерфейс Iub будет стимулировать конкуренцию между производителями оборудования в этой области. Вероятно, что на рынке появятся новые производители, сосредоточивающие усилия исключительно на изготовлении узлов В.

Архитектура UTRAN представлена на рис. 1.6.

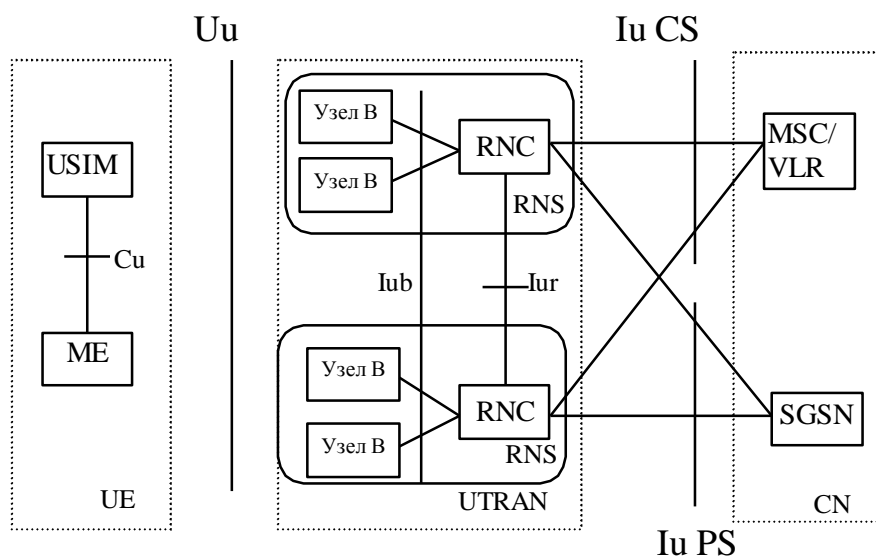


Рисунок 1.6 – Архитектура UTRAN.

UTRAN включает в себя одну или несколько подсистем радиосети (RNS). RNS – это подсеть в UTRAN, состоящая из контроллера радиосети (RNC) и одного или нескольких узлов В. RNC могут соединяться друг с другом через интерфейс Iur. RNC и узлы В соединяются с помощью интерфейса Iub.

Приведем основные характеристики UTRAN, которые в свое время определили основные требования для построения архитектуры UTRAN, ее функций и протоколов. В кратком виде они могут быть представлены в следующих пунктах:

Поддержка UTRA и всех относящихся к нему функций. В частности, основное воздействие на построение UTRAN оказало требование обеспечения мягкого хэндовера (один терминал подключается к сети с участием двух или большего числа активных ячеек) и ориентированных на WCDMA алгоритмов управления радиоресурсами.

Максимизация унификации при обработке данных с коммутацией пакетов и с коммутацией каналов при использовании уникального пакета протоколов воздушного интерфейса и при использовании одного и того же интерфейса для соединения UTRAN с областями обслуживания (доменами) как PS, так и CS базовой сети.

Максимизация, по возможности, общности с GSM.

Использование транспортного протокола АТМ в качестве основного транспортного механизма в UTRAN.

Контроллер радиосети

RNC (контроллер радиосети) представляет собой элемент, обеспечивающий управление радиоресурсами в UTRAN. Он сопрягается с CN (обычно с одним MSC и одним SGSN), а также реализует протокол RRC (управления радиоресурсами), который определяет сообщения и процедуры между подвижной станцией и UTRAN. Логически он соответствует BSC (контроллеру базовой станции) в GSM.

Узел В (Базовая станция)

Основная функция узла В состоит в осуществлении обработки на уровне L1 в воздушном интерфейсе (канальное кодирование и перемежение, адаптация

скорости, расширение спектра и т.д.). Кроме того, узел В выполняет одну из основных операций по управлению радиоресурсами – управление мощностью в внутреннем контуре. Логически он соответствует базовой станции в системе GSM.

#### 1.1.4 Антенны в системах сотовой мобильной связи

Так как в системах сотовой мобильной связи используется дециметровый диапазон длин волн, то обычно в качестве антенн применяют электрические вибраторные антенны.

Для понимания особенностей конструкций и параметров таких антенн необходимо четкое представление о параметрах передачи и приема элементарного электрического вибратора (диполя), что упростит знакомство читателя с конкретными антеннами базовых и мобильных станций, а также явится основой для понимания методов расчета электромагнитного поля, излучаемого антеннами MS и BTS.

Излучение электромагнитного поля элементарным электрическим диполем

Под элементарным электрическим диполем понимают электрический излучатель, размеры которого  $l$  намного меньше длины волны:  $l \ll \lambda$ , а гармонический ток в диполе  $I = I_m \exp(j\omega t)$  распределен вдоль его длины примерно равномерно.

Свяжем с точкой  $O$  (точка  $O$  – середина диполя) сферическую систему координат и определим распределение проекций векторов электрического  $E$  и магнитного  $H$  поля в произвольной точке пространства, то есть:

$$\mathbf{E} = E_r(r, \theta, \varphi)\mathbf{e}_r + E_\theta(r, \theta, \varphi)\mathbf{e}_\theta + E_\varphi(r, \theta, \varphi)\mathbf{e}_\varphi, \quad (1.1)$$

$$\mathbf{H} = H_r(r, \theta, \varphi)\mathbf{e}_r + H_\theta(r, \theta, \varphi)\mathbf{e}_\theta + H_\varphi(r, \theta, \varphi)\mathbf{e}_\varphi, \quad (1.2)$$

где  $r, \theta, \varphi$  – сферические координаты,  $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\varphi$  – единичные орты.

Решение задачи реализуется в соответствии со следующим алгоритмом.

Вводится понятие о векторном магнитном потенциале  $A$ , для которого справедливо соотношение:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \text{rot} \mathbf{A} . \quad (1.3)$$

В уравнения Максвелла подставляется выражение (1.3) в виде:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} , \quad (1.4)$$

$$\text{rot} \mathbf{H} = \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right) = J_{\text{np}} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \text{rot} \mathbf{A} . \quad (1.6)$$

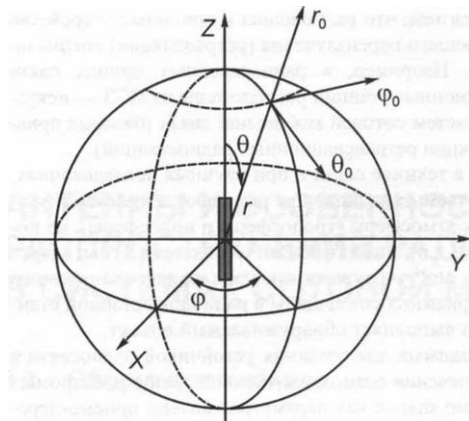


Рисунок 1.7 – Излучение электромагнитного поля диполем

Уравнения Максвелла приводятся к уравнениям Д'Аламбера (неоднородным дифференциальным линейным уравнениям второго порядка в частных производных), решения которых для проекций комплексных векторов электрического и магнитного поля запишутся в виде:

$$\dot{E}_r(r, \theta, \varphi) = -j \frac{2I_m l k^3}{4\pi\omega\varepsilon_0} \left[ \frac{1}{(kr)^3} + j \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{j(\omega t - kr)} \cdot \cos \theta , \quad (1.7)$$

$$\dot{E}_\theta(r, \theta, \varphi) = -j \frac{I_m l k^3}{4\pi\omega\varepsilon_0} \left[ \frac{1}{(kr)^3} + j \frac{1}{(kr)^2} - \frac{1}{kr} \right] e^{j(\omega t - kr)} \cdot \sin \theta , \quad (1.8)$$

$$\dot{E}_\varphi(r, \theta, \varphi) = 0 , \quad (1.9)$$

$$\dot{H}_r(r, \theta, \varphi) = 0, \quad (1.10)$$

$$\dot{H}_\theta(r, \theta, \varphi) = 0, \quad (1.11)$$

$$\dot{H}_\varphi(r, \theta, \varphi) = \frac{I_m l k^2}{4\pi} \left[ \frac{1}{(kr)^2} + j \frac{1}{kr} \right] e^{j(\omega t - kr)} \cdot \sin \theta, \quad (1.12)$$

где  $I_m$  – амплитудное значение тока;

$l$  – длина диполя;

$k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;

$\epsilon_0 = [1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^9)]$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума;

$\omega = 2\pi f$  – рабочая частота.

Выражения (1.7 – 1.12) получены в предположении, что излучается монохроматическая электромагнитная волна в пространство, заполненное вакуумом.

Проведем анализ данных выражений.

Зависимость проекций векторов  $E$  и  $H$  от координат:

– проекции  $\dot{E}_\varphi, \dot{H}_r, \dot{H}_\theta$  равны нулю, то есть отсутствуют в электромагнитном поле диполя;

– проекции  $\dot{H}_\varphi, \dot{E}_r, \dot{E}_\theta$  зависят от расстояния  $r$  по закону:  $e^{-jkr}/(kr)^n$ , где  $n = 1, 2, 3$  – для составляющей  $\dot{E}_\theta$  и  $n = 1, 2$  для составляющих  $\dot{E}_r$  и  $\dot{H}_\varphi$ ;

– проекции  $\dot{H}_\varphi, \dot{E}_r, \dot{E}_\theta$  зависят от меридиального угла  $\theta$ :  $\dot{E}_r \sim \cos\theta$ ,  $\dot{E}_\theta \sim \sin\theta$ ,  $\dot{H}_\varphi \sim \sin\theta$ , то есть значения проекций меняются с изменением угла  $\theta$  следующим образом: при  $\theta = 0$ :  $\dot{E}_r \sim 1$ ,  $\dot{E}_\theta \sim 0$ ,  $\dot{H}_\varphi \sim 0$ ; при  $\theta = \pi/2$ :  $\dot{E}_r \sim 0$ ,  $\dot{E}_\theta \sim 1$ ,  $\dot{H}_\varphi \sim 1$ , то есть максимальные значения  $\dot{E}_\theta$  и  $\dot{H}_\varphi$  будут в направлении перпендикулярном оси диполя;

– проекции векторов  $E$  и  $H$  от азимутального угла  $\varphi$  не зависят.

Зоны излучения

Рассмотрим более детально зависимость проекций  $\dot{H}_\varphi, \dot{E}_r, \dot{E}_\theta$  от радиуса-вектора  $r$ . Анализ поведения проекций в зависимости от расстояния до точки, в

которой исследуется электромагнитное поле, показывает, что существуют три характерных области излучения диполя.

Ближняя зона – называемая также зоной индукции, где значения проекций векторов  $E$  и  $H$  изменяются по законам:

$$\dot{E}_r = -j \frac{2I_m l k^3}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[ \frac{1}{(kr)^3} + j \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \cdot e^{j\omega t} \cdot \cos \theta, \quad (1.13)$$

$$\dot{E}_\theta = -j \frac{I_m l k^3}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[ \frac{1}{(kr)^3} + j \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \cdot e^{j\omega t} \cdot \sin \theta, \quad (1.14)$$

$$\dot{H}_\varphi = \frac{I_m l k^2}{4\pi} \left[ \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \cdot e^{j\omega t} \cdot \sin \theta, \quad (1.15)$$

то есть проекции напряженностей электрического и магнитного полей изменяются от расстояния по закону:

$$e^{-jkr}/(kr)^n, \text{ при } n = 2 \text{ и } 3. \quad (1.16)$$

Рассмотрим особенности ближней зоны излучения электрического диполя.

Для ближней зоны должно выполняться условие:

$$kr \ll 1, \text{ то есть } 2\pi r/\lambda \ll 1 \text{ или } r \ll \lambda/2\pi, \quad (1.17)$$

где  $r_g = \lambda/2\pi$  — граничное расстояние.

Например, для стандарта GSM 900: рабочая длина волны равна  $\lambda = 33,3$  см, граничное расстояние  $r_g = \lambda/2\pi = 5,3$  см, и если антенну MS представить в виде диполя, то область, для которой  $r \ll 5,3$  см, будет являться ближней зоной излучения.

Если учесть, что  $kr \ll 1$ , то  $e^{-jkr} \rightarrow 1$ , а  $1/(kr)^2 \ll 1/(kr)^3$ , и выражения (1.13) – (1.15) еще более упрощаются и могут быть записаны в виде:

$$\dot{E}_r(r, \theta, \varphi) = \frac{2I_m l k^3}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[ \frac{1}{(kr)^3} \right] \cdot \cos \theta \cdot \sin \omega t, \quad (1.19)$$

$$\dot{E}_\theta(r, \theta, \varphi) = \frac{I_m l k^3}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[ \frac{1}{(kr)^3} \right] \cdot \sin \theta \cdot \sin \omega t, \quad (1.20)$$

$$\dot{H}_\varphi(r, \theta, \varphi) = \frac{I_m l k^2}{4\pi} \left[ \frac{1}{(kr)^2} \right] \cdot \sin \theta \cdot \cos \omega t, \quad (1.21)$$

то есть напряженность магнитного поля в ближней зоне относительно напряженности электрического поля сдвинута на  $90^\circ$  по фазе.

Поэтому плотность потока мощности (вектор Умова-Пойнтинга) представляется в виде:

$$\dot{\Pi} = \dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^* = (\dot{E}_r + \dot{E}_\theta) \times \dot{H}_\varphi^* = \dot{\Pi}_\theta + \dot{\Pi}_r, \quad (1.22)$$

То есть

$$\dot{\Pi}_r = -j \frac{I_m^2 l^2 k^5}{(4\pi)^2 \omega \epsilon_0} \cdot \frac{1}{(kr)^5} \cdot \sin^2 \theta, \quad (1.23)$$

$$\dot{\Pi}_\theta = j \frac{I_m^2 l^2 k^5}{(4\pi)^2 \omega \epsilon_0} \cdot \frac{1}{(kr)^5} \cdot \sin 2\theta. \quad (1.24)$$

Это значит, что в ближней зоне в идеальном случае отсутствует излучение, так как составляющие вектора Умова-Пойнтинга оказываются чисто комплексными.

Реально в ближней зоне существует большое реактивное поле, а поле излучения (распространяющееся от излучателя-диполя в окружающее пространство) чрезвычайно мало (так как значения  $1/(kr)^2$  значительно больше  $1/(kr)$ ) по сравнению с реактивным полем.

Таким образом, в ближней зоне возникает реактивное электромагнитное поле, причем плотность потока мощности значительно больше, чем в дальней зоне – зоне излучения. Промежуточная зона является переходной от ближней зоны к дальней, когда значение

$$kr \sim 1 \text{ (то есть } r \sim r_g = \lambda/2\pi), \quad (1.25)$$

то есть ни одним из слагаемых  $1/(kr)^n$  в выражениях для проекций  $\dot{H}_\varphi, \dot{E}_r, \dot{E}_\theta$  пренебречь нельзя, как это было сделано для ближней зоны. Это приводит к тому, что в промежуточной зоне поле излучения и реактивное поле оказываются почти одного порядка. Выражения для  $\dot{H}_\varphi, \dot{E}_r, \dot{E}_\theta$  для промежуточной зоны позволяют исследовать структуру электромагнитного поля электрического диполя. При этом необходимо отметить следующее:

- в промежуточной зоне, называемой также зоной френелевской дифракции, на монотонное убывание составляющих от расстояния по закону  $1/r$  накладывается осциллирующее, затухающее поле реактивного характера;
- модули проекций векторов  $E$  и  $H$  с различными законами изменения  $1/r^n$  имеют в промежуточной зоне близкие величины;
- электромагнитная энергия, излучаемая диполем, сложным образом распределяется в пространстве, окружающем электрический диполь, и зависит как от времени, так и пространственных координат.

Кроме излучаемой энергии, в промежуточной зоне возникает колебательный режим (энергия то «уходит», то «возвращается» к диполю), что приводит к увеличению и уменьшению плотности потока мощности на различных расстояниях от излучателя, то есть возникает в пространстве режим смешанных электромагнитных волн.

Дальняя зона, называемая часто волновой зоной или зоной излучения, характеризуется условием:

$$kr \gg 1, \text{ то есть } r \gg r_g = \lambda/2\pi. \quad (1.26)$$

Для дальней зоны в проекциях векторов  $E$  и  $H$  можно пренебречь составляющими, пропорциональными  $1/r^n$  (где  $n = 2$  и  $3$ ), то есть для дальней зоны проекции векторов электрического и магнитного поля запишутся в виде:

$$\dot{E}_r(r, \theta, \varphi) \Rightarrow 0, \quad (1.27)$$

$$\dot{E}_\theta = j \frac{I_m k^3}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[ \frac{1}{(kr)} \right] e^{j(\omega t - kr)} \sin \theta, \quad (1.28)$$

$$\dot{H}_\varphi = j \frac{I_m k^2}{4\pi} \left[ \frac{1}{(kr)} \right] e^{j(\omega t - kr)} \cdot \sin \theta. \quad (1.29)$$

Учитывая, что волновое число равно

$$k = 2\pi/\lambda = \sqrt{2\pi\omega\sqrt{\epsilon_a\mu_a}/\lambda} \quad (1.30)$$

выражения (1.28) и (1.29) запишем в виде (при  $\epsilon_r = 1, \mu_r = 1$ ):

$$\dot{E}_\theta = j \frac{I_m l}{2\lambda r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} e^{j(\omega t - kr)} \sin \theta, \quad (1.31)$$

$$\dot{H}_\varphi = j \frac{I_m l}{2\lambda r} e^{j(\omega t - kr)} \sin \theta. \quad (3.32)$$

Таким образом, в дальней зоне напряженность электрического поля имеет только одну составляющую  $\dot{E}_\theta$ , а напряженность магнитного поля – составляющую  $\dot{H}_\varphi$ , причем они синфазны, но ортогональны в пространстве. Фазы векторов электромагнитного поля определяются расстоянием  $r$  от центра диполя до точки, в которой они вычисляются:

$$\psi = \omega t - kr. \quad (1.33)$$

Поверхности равных фаз образуют концентрические сферы с центром в начале координат, то есть если в момент времени  $t = t_0$  фаза на расстоянии  $r_0$  будет равна

$$\psi_0 = \omega t_0 - kr_0, \quad (1.34)$$

а в момент времени  $t_1 = t_0 + \Delta t$  она изменится:

$$\psi_1 = \omega t_1 - kr_0 = \omega t_0 + \omega \Delta t - kr_0 = \omega t_0 + kr_1, \quad (1.35)$$

где  $r_1 = r_0 + \Delta r$ , (1.36)

а  $\Delta r = \frac{\omega}{k} \Delta t$  – расстояние, на которое распространится волна за время  $\Delta t$ .

Скорость распространения поверхности равной фазы (фазовая скорость) определяется по формуле:

$$V_\phi = V_\phi \mathbf{e}_r = \mathbf{e}_r \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \mathbf{e}_r \frac{\omega}{k} = \frac{\mathbf{e}_r}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}}. \quad (1.37)$$

Таким образом, в дальней зоне электромагнитное поле элементарного электрического диполя (иногда говорят электрического вибратора) представляет сферическую волну, распространяющуюся со скоростью  $V_\phi$ , равной скорости света в данной среде, амплитуды составляющих электромагнитного поля убывают по закону  $1/r$ , вектора  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  взаимно перпендикулярны друг другу, а направление распространения совпадает с направлением радиуса-вектора.

Плоскость YOZ, в которой лежит вектор E, обычно называют плоскостью поляризации, при этом вектор H лежит в плоскости XOY ортогональной плоскости поляризации.

Между амплитудами проекций векторов E и H в дальней зоне существует простая связь:

$$E_{\theta_m} / H_{\varphi_m} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} = Z_B, \quad (1.38)$$

где  $Z_B$  – волновое сопротивление среды распространения, для вакуума:

$$\mu_a = \mu_0 \cdot 1 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}, \quad \epsilon_a = \epsilon_0 \cdot 1 = 1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^9) \text{ Ф/м}$$

и значение волнового сопротивления вакуума:  $Z_{B0} = 120\pi \approx 377 \text{ Ом}$ .

Мощность и сопротивление излучения

Распространение электромагнитных волн (ЭМВ) в дальней зоне сопровождается переносом энергии и связанного с ней плотности потока мощности.

Средний за период вектор плотности потока мощности (вектор Умова-Пойнтинга) равен:

$$\Pi_{cp} = \text{Re } \dot{\Pi}, \quad (1.39)$$

то есть определяется вещественной частью комплексного вектора плотности потока мощности, который для дальней зоны излучения электрического диполя найдется в виде:

$$\text{Re } \dot{\Pi} = \Pi_{cp} = e_r \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{I_m l}{2\lambda r} \right)^2 \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \sin^2 \theta. \quad (1.40)$$

Из данного выражения следует, что излучение потока мощности происходит:

- вдоль радиуса-вектора ( $e_r$  – орт);
- пропорционально квадрату амплитуды тока в диполе  $I_m$
- пропорционально квадрату отношения длины диполя к длине волны  $(l/\lambda)^2$ ;
- обратно пропорционально квадрату расстояния  $(1/r^2)$ ;

– изменяется в зависимости от меридианального угла  $\theta$ , пропорционально  $\sin^2\theta$ , то есть при  $\theta = n\pi$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) —  $\Pi_{\text{cp}}(\theta) = 0$ , при  $\theta = (2n - 1)\pi/2$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) —  $\Pi_{\text{cp}} = (\Pi_{\text{cp}})_{\text{max}}$ ;

– величина  $\Pi_{\text{cp}}$  связана с  $E_{\theta_m}$  и  $H_{\varphi_m}$  простым соотношением:

$$\Pi_{\text{cp}} = \frac{E_{\theta_m}^2}{2Z_B} = \frac{1}{2} H_{\varphi_m}^2 Z_B. \quad (1.42)$$

Определим мощность излучения электрического диполя следующим образом: средняя мощность, излучаемая в пространство элементарным электрическим диполем (при условии, что его окружающая среда не имеет потерь), равна среднему потоку мощности через замкнутую поверхность  $S$ , окружающую диполь, то есть:

$$P_{\Sigma_{\text{cp}}} = \operatorname{Re} \oint_S \Pi ds, \quad (1.43)$$

при этом, если в качестве поверхности выбрать сферическую поверхность, то формула (1.43) приобретет следующий простой вид:

$$P_{\Sigma_{\text{cp}}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2} \left( \frac{I_m l}{2\lambda} \right)^2 Z_B \frac{1}{r^2} r^2 \sin^2 \theta \cdot \sin \theta d\theta d\varphi = 40\pi^2 \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2 I_m^2, \quad (1.44)$$

при волновом сопротивлении равном  $Z_B = 120\pi$  (Ом).

Таким образом, средняя мощность излучения электрического диполя пропорциональна квадратам амплитуды тока  $I_m^2$  и относительной длины диполя  $(l/\lambda)^2$ .

Сопротивление излучения при этом определится:

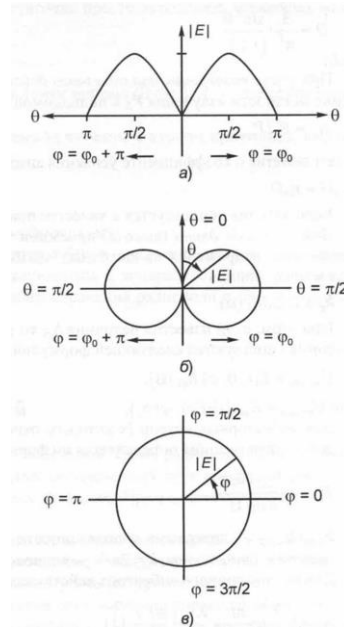
$$R_\Sigma = \frac{P_{\Sigma_{\text{cp}}}}{\frac{1}{2} I_m^2} = 80\pi^2 \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2, \quad (1.45)$$

как величина, равная отношению средней мощности излучения к квадрату действующего значения тока ( $I_g^2 = 1/2 I_m^2$ ) в диполе.

Направленные свойства электрического диполя

Для более наглядного представления о характере излучения диполя (а в общем случае и для вибраторных антенн, используемых в дециметровом диапа-

зоне в MS и BTS) обычно строят графики зависимости амплитуды напряженности электромагнитного поля (то есть  $E_{\theta}(\theta, \varphi)$  или  $H_{\varphi}(\theta, \varphi)$ ) или плотности потока мощности  $\Pi_r(\theta, \varphi)$  от направления к точке наблюдения при постоянном радиусе  $r = \text{const}$ , либо в декартовой – рис. 1.8, а, либо в полярной системах координат.



- а) декартовой системе координат;
- б) в полярной системе координат;
- в) в азимутальной плоскости

Рисунок 1.8 – Диаграмма направленности по напряженности поля в различных системах координат

На рис. 1.8 б и в показаны зависимости нормированных значений напряженности электрического поля, излучаемого диполем, от соответствующих угловых координат, называемые диаграммами направленности в полярной системе координат меридианальной плоскости (рис. 1.8 б):

$$F(\theta) = \frac{E_{\theta}(\theta)}{E_{\theta \max}} = \sin \theta, \quad (1.46)$$

$F(\varphi) = 1$  — в азимутальной плоскости (рис. 1.8 в).

Как видно из рисунков, диаграмма направленности диполя в вертикальной (меридианальной) плоскости представляет собой восьмерку, то есть максимальное излучение диполем происходит в направлении  $\theta = \pi/2$  (перпендикулярно оси

диполя), в горизонтальной плоскости излучение равномерное (диаграмма направленности – окружность  $F(\varphi) = 1$ , [то есть происходит всенаправленное излучение (прием), при этом антенны, имеющие такие диаграммы направленности, называют изотропными (всенаправленными) – omnidirectional или omni антеннами.

Пространственная диаграмма направленности электрического диполя представляет собой поверхность тора.

Диаграмма направленности по мощности пропорциональна квадрату диаграммы направленности по напряженности:

$$F_{\Pi}(\theta, \varphi) = F^2(\theta, \varphi). \quad (1.47)$$

Ширина диаграммы направленности обычно определяется на уровнях:

- половинной мощности —  $0,5 P_{\max}$ ;
- по напряженности —  $0,707 E_{0\max}, 0,707 H_{\varphi\max}$ ;
- 3 дБ по напряженности/мощности поля, так как  $(3\text{дБ} = |20 \lg 0,707| = |10 \lg 0,5|)$ .

Кроме диаграммы направленности, для оценки направленных свойств антенн используют другой параметр, а именно коэффициент направленного действия (КНД) D-антенны, под которым понимают величину, показывающую во сколько раз нужно было бы увеличить мощность излучения антенны в случае использования всенаправленной антенны вместо данной направленной, чтобы интенсивность излучения в точке приема осталась неизменной. Для электрических вибраторных антенн КНД определяется по формуле:

$$D = \frac{120F^2(\theta, \varphi)}{R_{\Sigma\Pi}}, \quad (1.48)$$

где  $R_{\Sigma\Pi}$  —сопротивление излучения антенны.

Для электрического диполя из формулы (1.48) КНД определится в виде:

$$D = \frac{3}{\pi^2} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{(l/\lambda)^2}. \quad (1.49)$$

При учете коэффициента полезного действия (КПД) антенны, определяемого как отношение мощности излучения  $P_{\Sigma}$  к подводимой по фидеру от передатчика мощности  $P_{\text{прд}}$ :

$$\eta_A = P_{\Sigma} / P_{\text{прд}}, \quad (1.50)$$

вводят понятие о коэффициенте усиления антенны, как произведения КНД на КПД антенны:

$$G = \eta_A D. \quad (1.51)$$

Если антенна используется в качестве приемной, вводят следующие параметры. Действующая длина (высота) приемной электрической антенны, которая определяется отношением напряжения на выходных зажимах антенны к напряженности электрического поля в точке приема:

$$h_g = U_{\text{вых}} / E, \text{ (м)}. \quad (1.52)$$

При этом, если известна величина ИИ, то для определения напряжения сигнала на входе приемника пользуются следующей формулой:

$$U_{\text{вх прм}} = E(r, \theta, \varphi) \cdot h_g; \text{ (В)}, \quad (1.53)$$

$$[\text{или } U_{\text{вх прм}} = E_{\text{max}}(r) \cdot F(\theta, \varphi) \cdot h_g]$$

Для вибраторных антенн (к которым относится и электрический диполь) в общем случае действующая длина определяется по формуле:

$$h_g = \frac{\lambda F_{\text{max}}(\theta, \varphi)}{\pi \sin kl}, \quad (1.54)$$

где  $F_{\text{max}}(\theta, \varphi)$  – диаграмма направленности вибратора в направлении максимума приема;  $\lambda$  – рабочая длина волны,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $l$  – длина вибратора.

Для симметричного вибратора действующая длина  $h_g$  определяется в виде:

$$h_g = l_g \frac{\lambda}{\pi} \text{tg} \frac{\pi l}{2\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \text{tg} \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{l}{\lambda} \right) \right]. \quad (1.55)$$

При этом для несимметричного четвертьволнового вибратора малой длины:  $h_g \cong \lambda/8$ . Таким образом, если напряженность электрического поля в точке приема равна  $E = 10$  мкВ/м, а действующая длина вибраторной антенны  $h_g \cong \lambda/8 = 4,3$  см, при  $F(\theta, \varphi) = 0,4$ , значение напряжения на выходных зажимах антенны будет равно:  $U_{\text{вых}} = 0,172$  мкВ.

Если чувствительность приемника  $U_{\text{min}} = 0,1$  мкВ, то сигнал будет уверенно принят.

Апертура – эффективная площадь антенны  $A_3$ , то есть площадь, из которой приемная антенна извлекает энергию падающей на нее электромагнитной волны, определяется по формуле:

$$A_3 = \frac{D\lambda^2}{4\pi}, \text{ (м}^2\text{)}. \quad (1.56)$$

Для вибраторных антенн  $A_3$  найдется по формуле:

$$A_3 = \frac{30\pi h_g^2 F^2(\theta, \varphi)}{R_{\text{сп}}}. \quad (1.57)$$

Знание апертуры антенны  $A_3$  позволяет достаточно просто определить мощность на выходе приемной антенны в виде:

$$P_{\text{прм}A} = \Pi(r, \theta, \varphi) \cdot A_3, \quad (1.58)$$

где  $\Pi(r, \theta, \varphi)$  – плотность потока мощности в точке приема (Вт/м<sup>2</sup>);  $A_3$  – апертура антенны (м<sup>2</sup>).

С учетом потерь в фидере, соединяющем выход антенны с входом приемника, выражение (1.58) запишется:

$$P_{\text{прм}} = \Pi \cdot A_3 \cdot e^{\alpha_\phi l_\phi}, \quad (1.59)$$

где  $\alpha_\phi$  (Нп/м) – затухание в фидере,  $l_\phi$  – длина фидера (м).

В заключение следует отметить, что вышеизложенное в дальнейшем будет использовано как для оценки параметров антенн, используемых в аппаратуре систем сотовой мобильной связи, так и при изучении условий распространения радиоволн и приема сигналов мобильными и базовыми станциями.

### 1.1.5 Антенны мобильных станций

Широкое использование в системах сотовой мобильной связи радиоволн дециметрового диапазона (300...3000 МГц) естественно выделяют определенный круг возможных антенных систем, используемых на базовых и мобильных станциях. Прежде всего это вибраторные антенны различной конструкции.

Сложные условия распространения радиоволн в системах сотовой мобильной связи, связанные с многократным их отражением, рассеянием, приводят к тому, что закономерности, справедливые для систем функционирующих в условиях прямой видимости, становятся несправедливыми, и направленные свойства антенн, которые были справедливыми для условий свободного пространства, значительно изменяются. Поэтому при проектировании антенн в системах мобильной связи учитываются статистические характеристики окружающей среды, в которых эти антенны используются, то есть городские условия, растительность, холмы и т.п.

Воспользуемся результатами научных исследований в данной области и рассмотрим конкретно антенны, широко используемые в мобильных станциях.

Особенности функционирования мобильных телефонов приводят к особенностям в требованиях, предъявляемых к используемым в них антеннам:

- очень малые размеры;
  - относительно большая полоса рабочих частот (на частотах 900, 1800 и 1900 МГц);
  - эффективность при передаче и приеме радиоволн при различных пространственных ориентациях мобильных телефонов, при учете многолучевого распространения радиоволн в пределах соты;
  - высокие механические свойства (например, ударопрочность).
- В качестве антенн в мобильных телефонах сотовой связи в настоящее время нашли широкое распространение следующие типы:
- симметричный вибратор с коаксиальным экраном в центральной части (sleeve dipole);

- спиральная антенна (helical antenna);
- четвертьволновый несимметричный диполь (quarter wavelength whip (monopole) antenna);
- комбинированная спиральная антенна (diversity helical antenna system).

Симметричный вибратор с коаксиальным экраном в центральной части

На рис. 1.9 показан мобильный телефон с антенной, представляющей симметричный вибратор с коаксиальным экраном в центральной части (sleeve dipole) и работающий в диапазоне частот (800.. .900) МГц.

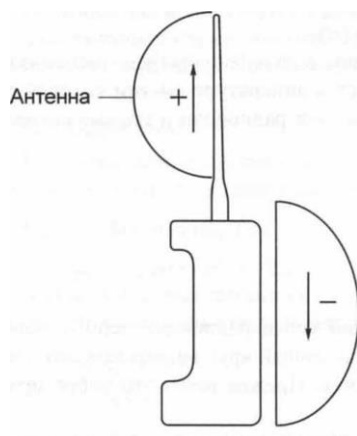


Рисунок 1.9 – Мобильный телефон с антенной

Это, по существу, полуволновый диполь, питаемый с одного конца с помощью коаксиальной линии. Антенна конструктивно представляет собой разнoplечий полуволновый вибратор:

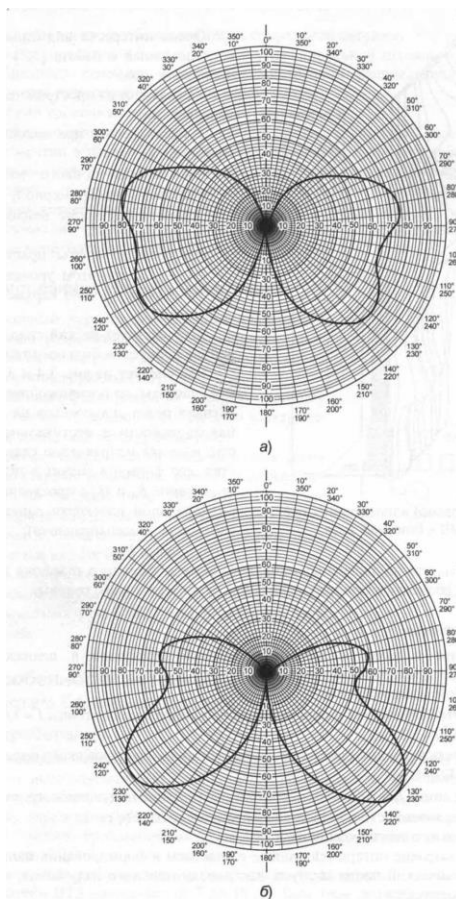
- верхнее плечо, длиной  $l_1 = \lambda/4$ , формируется из тонкой центральной жилы коаксиального фидера;
- нижнее плечо, длиной  $l_2 \geq \lambda/4$ , формируется из металлической муфты (metal sleeve), диэлектрического наполнителя (dielectric insert) с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$  малой величины и коаксиального фидера.

Длина  $l_2$  муфты, равная  $\lambda/4$ , позволяет создать в сечении А-А короткое за-

мыкание, так как в сечении В-В  $Z_{ВХ В-В} = jZ_0 \operatorname{tg} kl = jZ_0 \operatorname{tg} \left( \frac{2\pi \lambda}{\lambda} \frac{\lambda}{4} \right) \Rightarrow \infty$ , что вызывает в сечении А-А на  $l_2 = \lambda/4$  величину  $Z_{ВХ А-А} \Rightarrow 0$ , то есть закорачивает металли-

ческую муфту на оплетку коаксиальной линии в сечении А-А. Таким образом, формируется полуволновый (в реальном случае – разноплечий) излучатель с током  $\dot{I}_1(t)$ . Разноплечий  $\lambda/2$  вибратор позволяет расширить диапазон излучаемых и принимаемых частот. На рис. 3.5, а показана диаграмма направленности вибратора в вертикальной плоскости на частоте резонанса.

При изменении частоты  $f = f_0 \pm 5\% f_0$ , то есть на 5% от несущей  $f_0$ , диаграмма направленности изменяется (рис. 1.10, б), при этом направление главного лепестка опускается вниз.



а) на частоте резонанса;

б) при изменении частоты на 5% от несущей  $f_0$

Рисунок 1.10 – Диаграмма направленности в вертикальной плоскости симметричного вибратора с коаксиальным экраном

Очень интересен вид ближней зоны показанный на рис. 1.11.

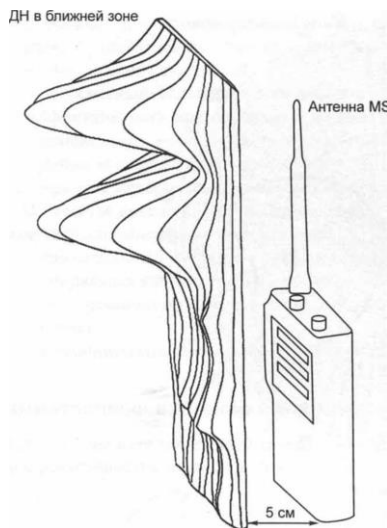


Рисунок 1.11 – Диаграмма направленности антенны MS в ближней зоне

Как следует из пространственной картины рис. 1.11:

а) наблюдаются два максимума в изменении  $E_{\theta}(r, \theta, \varphi)$ :

- 1) в области тонкого излучающего проводника (примерно  $l_1 \sim l_1/2$ ), при этом  $E_{\theta}(\varphi)$  носит ненаправленный характер;
- 2) в области муфты практически на  $l_1 \sim l_2/2, l_1 \sim l_1/2$ , при этом уровень  $E_{\theta}(r, \theta, \varphi)$  близок к уровню верхнего проводника;

б) существует резкий спад  $E_{\theta}(r, \theta, \varphi)$  в районе корпуса мобильного телефона.

Как следует из рис. 1.9 и 1.10, изменение частоты излучаемого/принимаемого сигнала резко сказывается на диаграмме направленности в вертикальной плоскости, изменяя направление главного лепестка, его форму, а значит в целом и распределение  $E_{\theta}$  и  $H_{\varphi}$  в пространстве. В меридианальной плоскости данная антенна изотропна (всенаправлена), при этом  $E_{\theta}(\varphi) = \text{const}$ ,  $F(\theta) = 1$ .

Следует отметить, что на диаграмму направленности мобильного телефона достаточно сильно влияют рука абонента и положение антенны относительно его головы.

Спиральные антенны

Широкое применение в качестве антенн мобильных телефонов в диапазоне 800... 900 МГц нашли также спиральные антенны.

К их достоинствам можно отнести:

- малые габариты (физическая длина укороченной спиральной антенны  $l = \lambda/12$ , то есть при  $\lambda = 33,3$  см,  $l \sim 2,8$  см);
- чувствительность в режиме приема по направленности электрического поля:
  - $E \sim (21 \dots 29)$  дБ/мкВ/м;
  - электрическая длина  $l_E = \lambda/2$ , то есть соответствует длине полуволнового диполя;
  - диаграмма направленности в меридианальной плоскости  $F(\varphi) = 1$ .

К недостаткам таких антенн можно отнести:

- относительно высокие потери (связанные с участием в формировании направленных свойств металлической части корпуса, как дополнительного излучателя, и потери в диэлектрике корпуса);
  - изменение диаграммы направленности с изменением частоты;
  - выполнение требования, чтобы металлическая часть корпуса (radio case) имела длину  $l \sim \lambda/4$ , так как при  $l \gg \lambda/4$  резко меняется диаграмма направленности.

Рассмотрим кратко особенности такой спиральной антенны.

Уровни распределения поля в ближней зоне спиральной антенны и металлического корпуса мобильного телефона изменяются аналогично распределению, показанному на рис. 1.11, то есть на расстоянии  $r = 5$  см наблюдаются:

- высокий уровень излучения самой антенной;
- достаточно высокий уровень излучения корпуса мобильного телефона.

Измерения, проведенные по определению уровня излучения мобильных телефонов, использующих укороченные спиральные антенны, показали, что по сравнению с обычным полуволновым вибратором, излучающим в свободном пространстве, уровень излучения укороченных антенн на 10... 12 дБ ниже.

Использование ударопрочного радиопрозрачного покрытия, позволяет создать условия высоконадежной эксплуатации мобильных телефонов.

Комбинированная спиральная антенна

Альтернативный вариант укороченной спиральной антенны был разработан в виде комбинированной спиральной антенны, представляющей собой следующую конструкцию:

- первичная фиксированная спираль (primary fixed antenna), длиной  $l_1 = 2$  см и по электрической длине соответствующая  $\lambda/4$ ;
- вторичная спиральная антенна на диэлектрическом стержне (collapsible secondary helican antenna on dielectric rod), длиной  $l_2 = 10$  см, по электрической длине соответствующая  $\lambda/2$ ;
- данная антенна может быть съемной или складываться вне корпуса телефона.

Когда вторичная антенна вытянута, она становится главным излучателем, так как свободна от потерь, вызываемых рукой абонента, держащего корпус телефона.

## 1.2 Особенности распространения радиоволн

Как было отмечено выше, в стандарте GSM используются дециметровые волны (900 МГц ( $\lambda = 0,333$  м), 1800 МГц ( $\lambda = 0,167$  м), 1900 МГц ( $\lambda = 0,158$  м)).

Следует отметить, что метровые (VHF), дециметровые и сантиметровые (UHF) электромагнитные волны от ионизированных слоев атмосферы практически не отражаются и в них не рассеиваются и, поэтому, как ионосферные волны распространяться не могут. Волны этих диапазонов распространяются в основном в виде земных волн (дифракция таких волн выражена слабо) на небольшие расстояния, а на большие – за счет тропосферного рассеяния на неоднородностях и, в меньшей степени, за счет направленного действия тропосферных волноводов.

Радиоволны дециметрового диапазона почти не преломляются в ионизированных слоях атмосферы и свободно пронизывают их, то есть распространяются как прямые волны и поэтому находят применение в космической связи; практически не испытывают молекулярного поглощения, поглощения в гидрометеорах

(дождь, снег), то есть в земных условиях дециметровые волны могут распространяться лишь прямолинейно в пределах прямой видимости.

Распространяясь в пределах прямой видимости, электромагнитные волны в системах сотовой мобильной связи испытывают многочисленные отражения от окружающих объектов и поглощения в них. Картина многолучевого распространения, показанная на рис. 1.12, свидетельствует о суперпозиции в точке приема MS нескольких, точнее множества сигналов, пришедших по различным путям и имеющим различные амплитуды, фазы, времена распространения, плоскости поляризации и пр.

Результирующий сигнал в точке приема ввиду этого резко меняется и может быть как выше среднего (медианного) уровня, так и ниже, причем замирания сигнала, образующиеся при взаимной компенсации сигналов вследствие неблагоприятного сочетания их амплитуд и фаз, могут быть достаточно глубокими. Искажения результирующего сигнала имеют место в том случае, когда более или менее синфазные составляющие сигналов с соизмеримыми амплитудами имеют настолько отличные разности хода, что символы одного сигнала накладываются на соседние символы другого, при этом возникает межсимвольная интерференция.

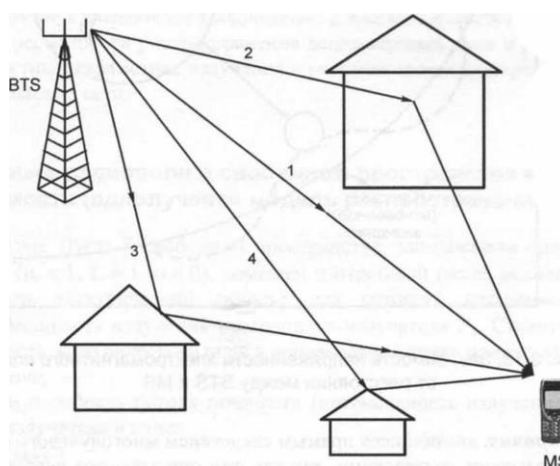


Рисунок 1.12 – Многолучевое распространение радиоволн

Как показано на рис. 1.13, зависимость напряженности поля от расстояния между BTS и MS имеет убывающий характер, при этом напряженность поля име-

ет как быстрые, так и медленные замирания относительно среднего (медианного) значения, то есть среднее значение подвержено затуханию, а мгновенные значения – замираниям.

В частном случае для изотропных передающей и приемной антенн BTS и MS отношение мощности в точке приема  $P_R$  к мощности в точке передачи  $P_T$  (при отсутствии помех) можно записать в виде:

$$P_R/P_T = (\lambda/4\pi r)^2 = (c/4\pi \cdot r \cdot f)^2, \quad (1.60)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость электромагнитных волн в вакууме,  $f$  – рабочая частота,  $r$  – расстояние между BTS и MS. При  $f = 900$  МГц,  $r = 10$  км:  $P_R/P_T = (2,6 \cdot 10^{-6})^2$ ,

$$P_R/P_T \text{ дБ} \sim -50 \text{ дБ}.$$

Таким образом, величина затухания обратно пропорциональна квадрату частоты сигнала и квадрату расстояния между BTS и MS.

В случае направленных антенн необходимо учесть коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, что приводит к следующей формуле:

$$P_R/P_T = G_T G_R (\lambda/4\pi \cdot f \cdot r)^2, \quad (1.61)$$

где  $G_T$  и  $G_R$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн.

Колебания уровней (замирания) принимаемого сигнала имеют две составляющие – быструю и медленную.

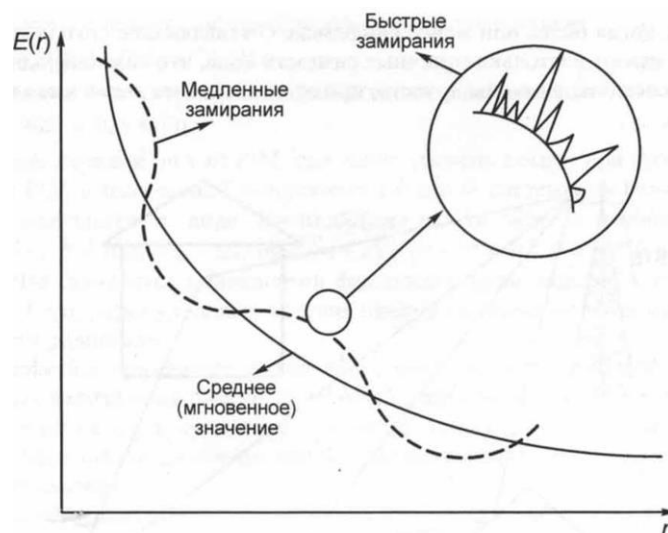


Рисунок 1.13 – Зависимость напряженности электромагнитного поля от расстояния между BTS и MS

Быстрые замирания, являющиеся прямым следствием многолучевого распространения радиоволн, часто называют релеевскими, так как они описываются релеевскими законами распределения. Замирания из-за многолучевости обусловлены сигналами, отраженными от внешних объектов. В результате этого в точке приема возникают условия:

- несколько однотипных сигналов, сдвинутых по фазе, складываются так, что результирующий сигнал ослабляется;
- при одинаковом уровне основного и отраженных сигналов, но их противофазности, результирующий сигнал близок к нулю, что вызывает прерывание связи.

Диапазон изменений уровня сигнала при быстрых замираниях может достигать 40 дБ, из которых – приблизительно 10 дБ – это превышение над средним уровнем и 30 дБ – провалы ниже среднего уровня, причем глубокие провалы встречаются реже, чем менее глубокие. При неподвижной мобильной станции MS интенсивность принимаемого сигнала практически не меняется. При движении MS периодичность флуктуаций в пространстве составляет около полуволны  $\lambda/2$ , то есть порядка 16,5 см (на частоте 900 МГц).

Период флуктуаций зависит от скорости перемещения MS, например, при скорости  $V = 50$  км/час период флуктуаций  $T_{\phi} \sim 10$  мс, а при  $V = 100$  км/ч  $T_{\phi} \sim 5$  мс.

Частота замираний глубиной (30... 10) дБ при скорости  $V = 50$  км/ч составляет 5...50 провалов в секунду, соответственно, а средняя длительность замираний ниже уровня (30... 10) дБ при скорости  $V = 50$  км/ч — порядка (0,2...2) мс.

Медленные замирания обусловлены эффектом тени, который вызывается различными препятствиями (здания, лесные массивы, горы и т.п), нарушающими прямую видимость между BTS и MS. Медленные замирания подчиняются логарифмически нормальному закону распределения. Интенсивность медленных замираний не превышает (5... 10) дБ, а их периодичность соответствует перемещению MS на десятки метров. Фактически медленные замирания представляют со-

бой изменения среднего уровня сигнала при перемещении MS, на которые налагаются быстрые замирания, вследствие многолучевости.

Для борьбы с быстрыми замираниями в стандарте GSM используют скачки по частоте, то есть расширение спектра, при этом для уменьшения межсимвольных искажений применяются эквалайзеры – адаптивные фильтры. Для борьбы с последствиями многолучевого распространения, а именно для устранения ошибок, обусловленными как замиранием сигналов, так и межсимвольной интерференцией, используется помехоустойчивое канальное кодирование: блочное и сверточное кодирование, а также перемежение.

## 2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ

Моделирование распространения радиоволн, основано на предсказании среднего уровня принимаемого сигнала, на заданном расстоянии от излучателя, а также в определении разброса его значений в зависимости от конкретной ситуации на трассе. Расчет радиолинии позволяет определить зону обслуживания передатчика. Моделирование среднего уровня сигнала в зависимости от расстояния между передатчиком и приемником называется крупномасштабным моделированием, поскольку позволяет определить сигнал на большом удалении (несколько сотен и тысяч метров). С другой стороны, иные модели характеризуют быстроменяющиеся значения уровня принимаемого сигнала на малых смещениях (несколько длин волн) или за короткое время (секунды) - они называются мелкомасштабными моделями.

### 2.1 Модель распространения радиосигнала в свободном пространстве

Модель распространения волн в свободном пространстве используется для расчета принятого сигнала в условиях, когда передающая и приемная антенны находятся на открытой незатененной радиолинии. Эта модель применяется для анализа радиоканалов связи через спутники и для наземных радиолиний, работающих в диапазоне сверхвысоких частот (3...30 ГГц).

При распространении радиосигнала в свободном пространстве мощность на выходе приемной антенны удобно выразить как функцию от расстояния до пе-

редающей антенны  $P_r(d)$ :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi d)^2} \cdot \lambda^2,$$

Здесь  $G_r$  и  $G_t$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенны.

При использовании этого уравнения предполагается, что приемная антенна находится от передающей на расстоянии  $d \geq d_0$  которое соответствует дальней зоне (зона Фраунгофера).

Уравнение свободного пространства часто выражается по отношению к точке отсчета  $d_0$ , находящейся в зоне Фраунгофера,  $P_r(d) = P_r(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2$ . Опорное расстояние  $d_0$  обычно выбирается равным 100 м или 1 км для связи на открытой местности.

Одной из важнейших характеристик распространения радиосигнала является его затухание в канале связи. Для свободного пространства затухание (единица измерения дБ) в зоне Фраунгофера определяется из выражения

$$L(d) = 10 \lg \frac{P_t}{P_r} = -10 \lg G_t - 10 \lg G_r - 20 \lg \lambda + 20 \lg(d) + 20 \lg(4\pi) \quad (2.1)$$

Удобна другая форма записи затухания в свободном пространстве:

$$L(d) = 10 \lg \frac{P_t}{P_r} = -10 \lg G_t - 10 \lg G_r + 20 \lg f + 20 \lg(d) + 32,44, \quad (2.2)$$

где  $G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$  – коэффициент усиления антенны;

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

$L(d)$  – затухание сигнала в свободном пространстве;

$P_t$ , и  $P_r$  – уровни мощности передатчика и приемника;

$G_r$  и  $G_t$ , – коэффициенты усиления передающей и приемной антенны соответственно, выраженные в децибелах;

$d$  – расстояние между приемником и передатчиком (в километрах);

$f$  – частота сигнала (в МГц).

Параметры такого описания распространения радиосигнала показаны на рис. 2.1.

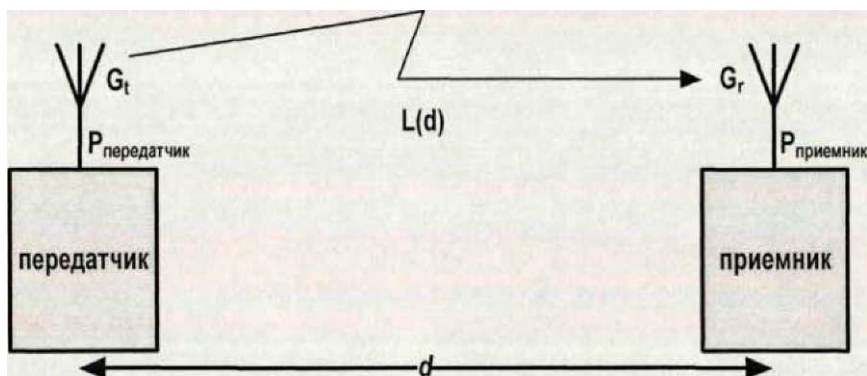


Рисунок 2.1 – Параметры распространения радиосигнала

### Двухлучевая модель распространения радиосигнала

Для подвижных систем связи описание распространения радиосигнала вдоль земной поверхности может быть представлено двухлучевой моделью (рис. 2.2).

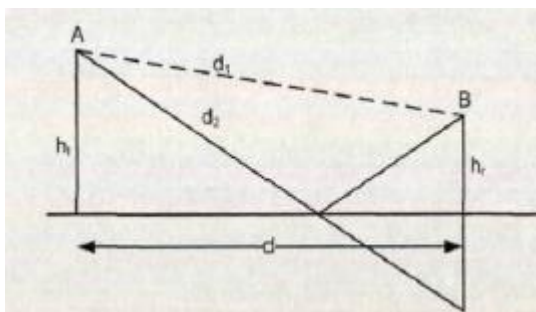


Рисунок 2.2 – Двухлучевая модель распространения сигнала

Если считать, что поверхность земли является идеальным отражателем, и угол падения луча очень маленький, то для этих условий мощность сигнала на выходе приемной антенны определяется из выражения (2.3), а  $h_t$ ,  $h_r$  и  $d$  таковы, что эта зависимость используется при планировании сетей радиовещания и дает результат, хорошо совпадающий с данными МККР (Международный консультативный комитет по радио).

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}, \quad (2.3)$$

Из формулы (2.3) видно, что на больших расстояниях принятая мощность убывает обратно пропорционально  $d^4$  или 40 дБ на декаду. Это существенно быстрее, чем в свободном пространстве.

Для двухлучевой модели в соответствии с (2.3) потери мощности в радиоканале определяются выражением, дБ.

$$P_r = -10\lg G_t - 10\lg G_r - 20\lg h_r + 40\lg d \quad (2.4)$$

### Стандартные модели распространения на открытом пространстве

Модели распространения, которые оценивают среднюю мощность сигнала для различных расстояний между приемником и передатчиком, в пределах нескольких сотен или тысяч метров, называют крупномасштабными моделями распространения. Крупномасштабные модели весьма просты и не учитывают очень маленькие изменения, например затухания, вызванные многолучевым распространением. Эти модели полезны при предсказании охвата системы радиосвязи.

#### Модель Окамура

Модель Окамура основана на графическом представлении экспериментальных данных, полученных Окамура при измерениях уровней радиосигнала в г. Токио (Япония).

Этот экспериментальный подход является одним из широко используемых методов для расчета радиолиний в условиях города. Модель Окамура применяют при значениях параметров в пределах, указанных в таблице 2.1

Таблица. 2.1 – Допустимые значения параметров для модели Окамура

Параметр	Области применения модели Окамура	
	Основная	Расширенная
Рабочая частота, МГц	От 150 до 2000	До 3000
Протяженность трассы, км	От 1 до 20	До 100
Высота антенны БС, м	От 30 до 400	От 1,5 до 1000
Высота антенны АС, м	От 1 до 10	От 1 до 10

Модель Окамура основана на результатах экспериментальных исследований и по сравнению с двухлучевой моделью позволяет более точно предсказывать среднее значение затухания радиосигнала на относительно большом расстоянии между передающей и приемной антеннами (более 1 км) при наличии препятствий. Согласно модели Окамура среднее затухание в дБ определяется как

$$L_{50} = L(d) + A(f, d) - H(h_t) - H(h_r) - C, \quad (2.5)$$

где  $L_{50}$  – средняя величина потерь;

$L(d)$  – потери в свободном пространстве;

$A(f, d)$  – затухание в городе относительно затухания в свободном пространстве при высоте антенны передатчика  $h_t = 200$  м и высоте приемной антенны  $h_r = 3$  м;

$C$  – фактор затухания для различных типов местности.

Коэффициенты высоты  $H(h_t)$  и  $H(h_r)$  для антенн базовой и абонентской станции соответственно определяются следующим образом

$$H(h_t) = 20 \lg \left( \frac{h_t}{200} \right) \text{ при } 1000 \text{ м} > h_t > 10 \text{ м}; \quad (2.6)$$

$$H(h_r) = 10 \lg \left( \frac{h_r}{3} \right) \text{ при } h_r \leq 3 \text{ м}; \quad (2.7)$$

$$H(h_r) = 20 \lg \left( \frac{h_r}{3} \right) \text{ при } 10 \text{ м} > h_r > 3 \text{ м}. \quad (2.8)$$

Составляющие для затухания  $A(f, d)$  и  $C$  определяются графическим способом, используя рис. 2.3 и 2.4. Для сельской местности фактор затухания  $C$  на 5 дБ меньше, чем для открытого пространства.

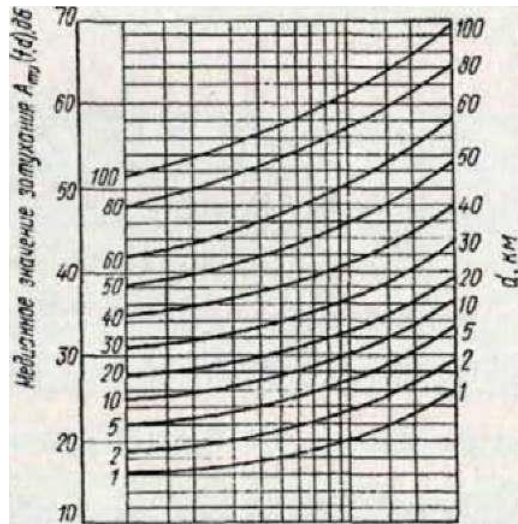


Рисунок 2.3 – Зависимость затухания в городе относительно затухания в свободном пространстве от частоты сигнала и расстояния при  $h_t = 200$  м и  $h_r = 3$  м

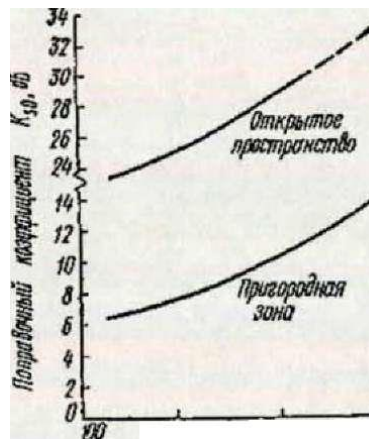


Рисунок 2.4 – Зависимость фактора затухания  $C$  от частоты сигнала и типа местности

### Модель Хата

Очевидно, что приведенная выше модель неудобна для вычислений с помощью ЭВМ. Для удобства ее реализации Хата предложил эмпирическую модель описания графической информации, представленной Окамура. Следовательно, модель Хата в виде математической записи также основана на экспериментальных данных Окамура. Модель Хата применяют при изменении значений параметров в пределах, указанных в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Допустимые значения параметров для модели Хата

Параметр	Области применения модели Хата	
	Основная	Расширенная
Рабочая частота, МГц	От 150 до 1500	От 150 до 1500
Протяженность трассы, км	От 1 до 20	До 80
Высота антенны БС, м	От 30 до 200	От 1,5 до 400
Высота антенны АС, м	От 1 до 10	От 1 до 10

Среднее затухание радиосигнала в городских условиях рассчитывается по эмпирической формуле, дБ:

$$L_{(город)} = 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(h_t) + (44,9 - 6,55 \lg(h_t)) \lg(d) - a(h_r), \quad (2.9)$$

где  $a(h_r)$  – поправочный коэффициент для высоты антенны АС.

Для крупных городов этот параметр слабо зависит от частоты и от типа местности, однако используются следующие аппроксимирующие формулы:

для малых и средних городов:

$$a(h_r) = (1,11 \lg(f) + 0,7) \cdot h_r - (1,561 \lg(f) - 0,8), \quad (2.10)$$

для больших городов:

$$a(h_r) = 8,29 \left[ \lg(1,54 \cdot h_r) \right]^2 - 1,1 \text{ при } f < 300 \text{ МГц}, \quad (2.11)$$

$$a(h_r) = 3,2 \left[ \lg(11,75 \cdot h_r) \right]^2 - 4,97 \text{ при } f \geq 300 \text{ МГц}, \quad (2.12)$$

для пригородных районов, дБ:

$$L_{np} = L_{город} - 2 \left[ \lg \frac{f}{28} \right]^2 - 5,4, \quad (2.13)$$

для сельской местности, дБ:

$$L_c = L_{город} - 4,78 \cdot \lg(f)^2 + 18,33 \cdot \lg(f) - 40,94. \quad (2.14)$$

Хотя формулы Хата не позволяют учесть все специфические поправки, которые доступны в методе Окамура, они имеют существенное практическое значение. Расчеты по формулам Хата (рис. 2.5) хорошо совпадают с данными модели Окамура для дальностей, больших 1 км

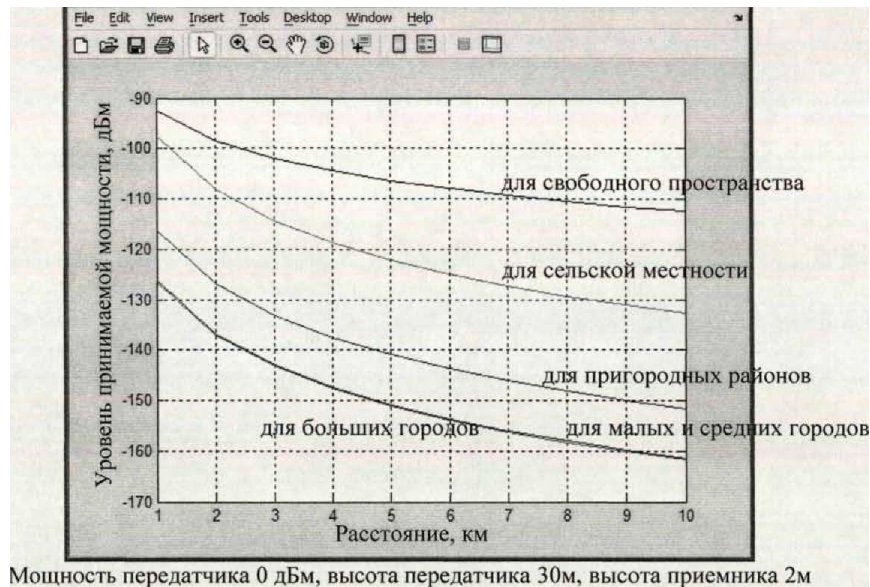


Рисунок 2.5 – Зависимость затухания сигнала от расстояния на разной местности

### Модель COST231-Хата

Для диапазона частот 1,5...2 ГГц широко используется модель COST231-Хата, которая является модифицированным вариантом модели Хата. Формула для расчета среднего затухания в городе (дБ) записывается в виде:

$$L_{(город)} = 46,3 + 33,9 \lg(f) - 13,82 \lg(h_r) + (44,9 - 6,55 \lg(h_r)) \cdot \lg(d) - a(h_r) + C, \quad (2.15)$$

где  $a(h_r) = (1,11 \lg(f) + 0,7) \cdot h_r - (1,56 \lg(f) - 0,8)$ ,

$C = 0$  дБ для малых и средних городов;

$C = 3$  дБ для больших городов.

Корректировки для пригородных районов не используются. Для сельской местности поправочный коэффициент  $a(hr)$  тот же, что и в модели Хата.

Модель Ли «от зоны к зоне»

В моделях Ли местность классифицируют по следующим признакам:

- по инфраструктуре, сформированной человеком (характер застройки), – открытая территория, пригородная зона, городская застройка;
- по естественным свойствам (характер трассы) – гладкая, холмистая, трасса над водной поверхностью, трасса через лиственные леса.

Модель Ли «от зоны к зоне» создана на основе анализа результатов измерений уровня сигнала (локального среднего), опубликованных разными авторами для зон с различным характером застройки. Согласно этой модели на входе приемника абонентской станции (АС) уровень медианной мощности сигнала:

$$P_m(d) = P_{л} + a_1 + \gamma \lg(\bar{r}) + a_2 + a_3 + a_4 + a_5, \quad (2.16)$$

где  $\bar{r}$  – протяженность трассы, выраженная в милях (миля = 1,6 км);

$P_{л}$  – уровень ММС в точке, отстоящей от базовой станции (БС) на 1 милю, измеренный при стандартных энергетических параметрах аппаратуры;

$\gamma$  – наклон кривой потерь распространения, дБ/декада, который численно равен ослаблению сигнала при увеличении длины трассы в 10 раз;

$a_1$ - $a_5$  – поправочные коэффициенты; вводятся в случае, когда технические параметры радиointерфейса отличаются от стандартных параметров модели (таб. 2.3).

Таблица 2.3 – Сравнение параметров радиointерфейса и модели

Энергетический параметр	Стандартное значение параметра	Поправочный коэффициент
Уровень мощности передатчика БС (P <sub>bc</sub> )	P <sub>bc</sub> = 40 дБм	a <sub>1</sub> = P <sub>bc</sub> - 40
Высота антенны БС (h <sub>t</sub> )	100 футов (30 м)	a <sub>2</sub> = 10 lg(h <sub>r</sub> /h <sub>r</sub> ), h <sub>1</sub> <sup>*</sup> = 30 м
Коэффициент усиления антенны БС (g <sub>1</sub> )	6 дБ	a <sub>3</sub> = g <sub>1</sub> - 6
Высота антенны АС (h <sub>r</sub> )	10 футов (3 м)	a <sub>4</sub> = 10 lg(h <sub>r</sub> /h <sub>r</sub> <sup>*</sup> ), h <sub>r</sub> <sup>*</sup> = 3 м
Коэффициент усиления антенны АС (g <sub>2</sub> )	0 дБ	a <sub>5</sub> = g <sub>2</sub>

Поправочные коэффициенты для параметров в таблице. 2.4:

$$a_2 = 20 \lg h_t - 29,54, \quad (2.17a)$$

$$a_4 = 20 \lg h_r - 4,77, \quad (2.17b)$$

При подстановке в (2.16) протяженности трассы, выраженной в километрах, следует ввести поправку:

$$Z_l = \gamma \lg \left( \frac{d}{1,6} \right) = \gamma \lg(d) - 0,204 \cdot \gamma. \quad (2.18)$$

Находим:

$$P_m(d) = P^* - 80,31 + P_{oc} + \gamma \lg(d) + 20 \cdot \lg(h_t) + 10 \cdot \lg(h_r) + g_1 + g_2, \quad (2.19)$$

$$P_l^* = P_l + 0,204 \cdot \gamma, \quad (2.20)$$

Определим по таблице 2.4 параметры трассы «типовая пригородная» и по (2.20) уровень мощности сигнала на расстоянии 1 км от БС:

$$P_l^* = -61,7 + 7,84 = -53,86 \text{ дБм.}$$

Подставив это значение и  $\gamma = 38,4$  в (2.19), получим:

$$P_m(d) = P_{\text{бс}} - 134,31 - 38,41 \lg(d) + 20 \lg(h_t) + 10 \lg(h_r) + g_1 + g_2. \quad (2.21)$$

Окончательно в модели Ли для трассы «типовая пригородная» принят наклон  $\gamma = 40$  дБ/декада, и указана контрольная точка  $r = 10$  миль, в которой принят уровень мощности сигнала – 100 дБм. Расчетная формула для трассы «типовая пригородная»:

$$P_m(d) = P_{\text{бс}} - 132,7 - 40 \cdot \lg(d) + 20 \cdot \lg(h_t) + 10 \cdot \lg(h_r) + g_1 + g_2, \quad (2.22)$$

(Расстояние выражено в километрах, а высоты антенн - в метрах). Физический смысл слагаемых в (2.22) поясняется в таблице. 2.4

Таблица 2.4 – Обозначения величин в формуле 2.22

Слагаемое формулы	Физический смысл
РБС -132,7	Уровень мощности сигнала на расстоянии 1 км от БС при стандартных условиях, дБм
$40 \lg(r)$	Учитывает влияние сформированной структуры ( $\gamma=40$ дБ/декада для трассы «типовая пригородная»)
$20 \lg(h_r)$	Фактор «высота - усиление антенны БС», учитывающий влияние профиля трассы
$\hat{\epsilon} = 10 \lg(h_r) + g_1 + g_2$	Фактор, учитывающий отклонение технических параметров от стандартных

Зависимость от расстояния

Для трассы «типовая пригородная» представляют в виде:

$$P_m(d) = k_n - 40 \cdot \lg(d), \quad (2.23)$$

где  $k_l = P_{oc} - 132.7 - 40 \cdot \lg(d) + 20 \cdot \lg(h_t) + 10 \lg(h_r) + g_1 + g_2$  – уровень мощности приема на расстоянии 1 км от БС, дБм.

Аналогично можно записать выражение для мощности сигнала в точке приема на трассе любого типа:

$$P_m(d) = k_{zl} \cdot r^{-n}, \quad (2.24)$$

где  $k_{zl}$  – мощность сигнала в точке приема на расстоянии 1 км от БС, для трассы с заданным (Z) типом застройки;

$n = 0,1\gamma$  показатель затухания, зависящий от типа застройки.

При расчете реальных трасс следует сравнить рассматриваемую территорию с подходящей структурой в таблице 2.3. Поскольку все пригородные зоны похожи, то для них используют. Для городов показатели затухания существенно отличаются. Так, для Токио  $n = 3$ , а для центральной части Нью-Йорка  $n = 5$ . В модели Ли указано, что в случае необходимости для конкретных трасс могут быть проведены достаточно простые измерения уровня сигнала на расстоянии 1 миля и 10 миль от БС. В каждой точке должно быть выполнено по 5 - 7 измерений и их результаты усреднены.

Сопоставив, отметим, что совпали законы зависимости мощности принимаемого сигнала от протяженности трассы, полученные в модели Окамура и в модели Ли.

При радиальном расположении городских улиц относительно БС возможно возникновение волноводного эффекта, в результате которого принимаемый сигнал может усилиться. Принятые на АС сигналы, направления распространения которых параллельны направлениям улиц, имеют уровень мощности на 10 ... 20 дБ выше, чем сигналы, приходящие с других направлений. На частотах ниже 1 ГГц этот эффект значительно ослаблен.

На распространение сигналов в лесной зоне влияют параметры деревьев (размер ствола, размер ветвей, плотность листвы, расстояние между деревьями,

высота и др.). В тропических районах с очень густыми лесами сигнал может не проходить через лесной массив, он распространяется только за счет огибания верхушек деревьев и отражения от них. Некоторые сосновые леса сильно поглощают энергию сигнала, поскольку размеры иголок соответствуют примерно половине длины волны сигнала.

Однако в ряде экспериментальных исследований было показано, что среднее погонное ослабление сигнала в листве для разных лесных массивов в данном географическом районе можно считать одинаковым для трасс длиннее 1 км. Поэтому для учета влияния листвы можно принять следующие положения. Потери в листве учитывают с помощью коэффициента погонных потерь, который измеряется в децибелах на декаду либо в децибелах на метр для коротких участков леса.

Потери на участке через лиственный лес пропорциональны множителю  $A_l = f^{-4}$ , тогда как потери в свободном пространстве – множителю  $A_0 = f^{-4}$ . Следовательно, наличие леса на всей трассе приводит к увеличению потерь вдвое по сравнению с потерями в свободном пространстве.

Теоретически общие погонные потери могут достигать 60 дБ/декада (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Погонные потери для различных сред

Общие погонные потери	Составляющие общих погонных потерь		
	В свободном пространстве	За счет застройки	В листве
60 дБ/декада	20 дБ/декада	20 дБ/декада	20 дБ/декада

Потери в листве (выражены в децибелах):

$$a_{л} = 20 \cdot \frac{r_{л}}{(10 \cdot R_{л} - R_{л})} \approx 2,22 \cdot \frac{r_{л}}{R_{л}}, \quad (2.25)$$

где  $R_{л}$  – расстояние от БС до начала лесного массива;  
 $r_{л}$  – протяженность лесного массива.

Из (2.25) видно, что чем ближе БС к началу лесного массива, тем сильнее ослабление сигнала в листве. Это положение подтверждается на практике. Поэтому следует избегать расположения БС вблизи лиственных массивов.

#### Модель Уолфиша-Икегами

Модель Уолфиша-Икегами признана самой лучшей для предсказания уровня сигнала в малых сотах. Эта модель основана на физическом представлении поля в точке приема в виде двух составляющих: когерентной и рассеянной. Когерентная составляющая определяется волной, дифрагирующей вокруг строения вдоль дороги со стороны БС. Рассеянный компонент создают волны, которые образуются в результате переизлучения строениями падающей на них волны от БС. Рассеянный компонент приходит с направлений, не совпадающих с направлением на БС и даже противоположных этому направлению. Модель утверждает (рисунок 2.6), что в условиях города с относительно невысокой, но плотной застройкой основным путем распространения радиосигнала (в случае отсутствия прямой видимости между узлами) является путь, проходящий через крыши зданий (которые могут быть описаны как серии последовательных экранов), сопровождаемый многократным рассеиванием.

Основные параметры, используемые в модели:

- частота передачи ( $f$ );
- высота передающей антенны ( $h_b$ );
- высота приемной антенны ( $h_m$ );
- расстояние между приемником и передатчиком ( $d$ );
- средняя высота зданий ( $h_r$ );
- средняя ширина улиц ( $w$ );
- расстояние между зданиями ( $b$ ).

Энергия принимаемого сигнала зависит от того, где находится передатчик по отношению к приемнику.

Расчетные формулы для модели Уолфиша-Икегами получены при параметрах: расстояние между БС и АС от 0,02 км до 5 км в диапазоне частот

800...2000 МГц, высота антенн БС  $ht = 4...50$  м, высота антенн АС  $hr = 1...3$  м; высота близлежащих к БС зданий до 60 м. Имеем:

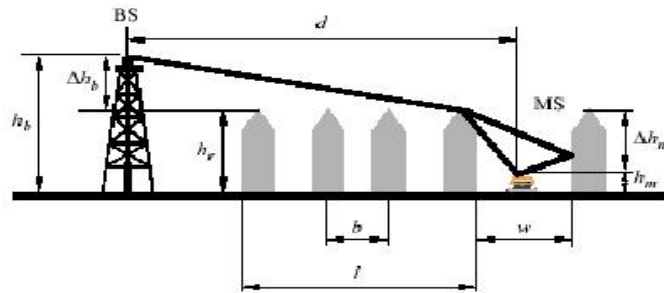


Рисунок 2.6 – Основной путь распространения радиосигнала и параметры модели Уолфиша-Икегами

а) В зоне прямой видимости («line of sight», LOS). Для вычисления величины потерь при распространении используется относительно простая формула

$$L_b = 42,6 + 26 \log \left( \frac{d}{\text{км}} \right) + 20 \log \frac{f}{\text{МГц}} \quad (2.26)$$

б) Вне зоны прямой видимости («none line of sight», NLOS).

Этот случай более сложен. Значение, на которое уменьшается мощность принимаемого сигнала при прохождении пути от источника к получателю, задается следующей формулой:

$$L_b = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd}, & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 & L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

где  $L_0$  – потери при распространении в свободном пространстве, без препятствий:

$$L_0 = 32,44 + 20 \log \left( \frac{d}{\text{км}} \right) + 20 \log \frac{f}{\text{МГц}} \quad (2.28)$$

$L_{rts}$  – потери на стороне получателя, вызванные рассеиванием радиосигнала при отражении от поверхности «конечной» улицы, на которой находится приемник:

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \lg \left( \frac{w}{M} \right) + 10 \lg \frac{f}{M \Gamma \zeta} + 20 \lg \frac{\Delta h_m}{M} + L_{Ori}, \quad (2.29)$$

$L_{Ori}$  – составляющая потерь, зависящая от ориентации улиц относительно направления прихода сигнала:

$$L_{Ori} = \begin{cases} -10 + 0,354 \frac{w}{M} & \text{при } 0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2,5 + 0,075 \left( \frac{\varphi}{\text{deg}} - 35^\circ \right) & \text{при } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ, \\ 4,0 + 0,114 \left( \frac{\varphi}{\text{deg}} - 35^\circ \right) & \text{при } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.30)$$

где  $\varphi$  – ориентация дороги по отношению к пути распространения сигнала.

Как видим, диапазон изменения значений потерь от ориентации улиц составляет 14 дБ.

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

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \lg d + k_f \cdot \lg f - 9 \lg b, \quad (2.31)$$

где  $d$  – среднее расстояние между приемником и передатчиком.

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \lg \left( 1 + \frac{\Delta h_b}{M} \right), & h_b > h_r, \\ 0, & h_b < h_r \end{cases}, \quad (2.32)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_b > h_R \\ 54 - 0,8 \cdot \frac{\Delta h_b}{m}, & d \geq 0,5 \text{ км}, h_b \leq h_R ; \\ 54 - 0,8 \cdot \frac{\Delta h_b}{m} \cdot \frac{d}{0,5}, & d < 0,5 \text{ км}, h_b \leq h_R \end{cases} \quad (2.33)$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_b > h_r \\ 18 - 15 \cdot \frac{\Delta h_b}{h_R - h_b}, & h_b < h_r ; \end{cases} \quad (2.34)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0,7 \cdot \left( \frac{f}{925} - 1 \right), & \text{для города средних размеров и пригорода} \\ 1,5 \cdot \left( \frac{f}{925} - 1 \right), & \text{для города с плотной застройкой} \end{cases} \quad (2.23)$$

Параметры  $k_d$  и  $k_f$  определяют зависимость величины потерь при распространении от частоты сигнала и рассеивания при прохождении через последовательные экраны. Увеличение потерь при уменьшении высоты антенны по отношению к средней высоте окружающих зданий задается параметром  $k_a$ .

В рабочих формулах и в формулах их коэффициентов следует подставлять частоту в мегагерцах, протяженность трассы в километрах, остальные параметры модели ( $h_{\text{Roof}}$ ,  $w$ ,  $h_{\text{RX}}$ ,  $h_{\text{TX}}$ ) в метрах. Эти формулы позволяют определить медианные потери как для трасс, на которых антенна БС расположена над городской застройкой, так и для трасс, 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 ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КАРТЫ ПОКРЫТИЯ**

### **3.1 Понятие геоинформационных систем (ГИС)**

Геоинформационные системы (ГИС) являются классом информационных систем, имеющим свои особенности. Они построены с учетом закономерностей геоинформатики и методов, применяемых в этой науке. Геоинформационные системы как интегрированные информационные системы предназначены для решения различных задач науки и производства на основе использования пространственно – локализованных данных об объектах и явлениях природы и общества.

Геоинформационная система – это организованный набор аппаратуры, программного обеспечения, персонала и географических данных, предназначенных для эффективного ввода, хранения, обновления, обработки, анализа и визуализации данных, всех видов географически организованной информации. Геоинформационные системы – многофункциональные средства анализа сведенных во едино табличных, текстовых и картографических бизнес-данных, демографической, статистической, земельной, муниципальной, адресной и другой информации. Другими словами Геоинформационная система – это система, способная хранить и использовать данные о пространственно-организационных объектах.

Геоинформационные системы получают все большее распространение не только в традиционных областях применения, таких как управление природными ресурсами, сельское хозяйство, экология, кадастры, городское планирование, но также и в коммерческих структурах – от телекоммуникаций до розничной торговли. В качестве систем поддержки принятия решений геоинформационные системы помогают улучшить обслуживание клиентов, сохранять высокий уровень конкурентоспособности, повышать прибыльность как коммерческим организациям, чья деятельность зависит от пространственной информации, так и тем, которым анализ геоинформации дает заметные преимущества. Геоинформационные системы являются эффективным инструментом для выбора мест и определения зон торговли, размещения наружной рекламы и производственных объектов, диспет-

черизации и маршрутизации средств доставки, информатизации риэлторской деятельности.

### Технологии геоинформационных систем

Отличительной особенностью географических информационных систем является наличие в их составе специфических методов анализа пространственных данных, которые в совокупности со средствами ввода, хранения, манипулирования и представления пространственно-координированной информации и составляют основу технологии географических информационных систем, или ГИС-технологии. Геоинформационные технологии можно определить как совокупность программно-технологических средств получения новых видов информации об окружающем мире. Именно наличие совокупности способных генерировать новое знание специфических методов анализа с использованием как пространственных, так и непространственных атрибутов и определяет главное отличие ГИС-технологии от технологий, например, автоматизированного картографирования или систем автоматизированного проектирования (так называемых СА-Провских систем). Геоинформационные системы и ГИС – технологии объединяют компьютерную картографию и системы управления базами данных. Концепция технологии ГИС состоит в создании многослойной электронной карты, опорный слой которой описывает географию территории, а каждый из остальных слоев – один из аспектов состояния территории. Тем самым ГИС-технологии определяют специфическую область работы с информацией.

Основными функциями, реализуемыми ГИС являются:

- ввод и обновление данных;
- хранение и манипулирование данными;
- анализ данных;
- вывод и представление данных и результатов.

Геоинформационные технологии предназначены для повышения эффективности: процессов управления, хранения и представления информации, обработки и поддержки принятия решений.

ГИС имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при изучении этих систем. Одна из особенностей ГИС и геоинформационных технологий состоит в том, что они являются элементами информатизации общества. Это заключается во внедрении ГИС и геоинформационных технологий в науку, производство, образование и применение в практической деятельности получаемой информации об окружающей реальности.

Геоинформационные технологии являются новыми информационными технологиями, направленными на достижение различных целей, включая информатизацию производственно-управленческих процессов. Другой особенностью ГИС является то, что как информационные системы они являются результатом эволюции этих систем и поэтому включают в себя основы построения и функционирования информационных систем.

ГИС как система включает множество взаимосвязанных элементов, каждый из которых связан прямо или косвенно с каждым другим элементом, а два любые подмножества этого множества не могут быть независимыми не нарушая целостность, единство системы. Автоматизированной информационной системой (АИС) называют организационно-техническую систему, использующую автоматизированные информационные технологии в целях обучения, информационно-аналитического обеспечения научно-инженерных работ и процессов управления. В соответствии с данным определением ГИС попадает в класс автоматизированных информационных систем. Еще одной особенностью ГИС является то, что она является интегрированной информационной системой. Интегрированные системы построены на принципах интеграции технологий различных систем. Они зачастую применяются настолько в разных областях, что их название часто не определяет все их возможности и функции. По этой причине не следует связывать ГИС с решением задач только геодезии или географии. "Гео" в названии геоинформационных систем и технологий определяет объект исследований, а не предметную область использования этих систем. Необходимо рассмотреть место ГИС среди других автоматизированных систем, что требует дать краткую классификацию этих систем.

Выбирая различные аспекты рассмотрения автоматизированных информационных систем можно дать их различные классификации. По принадлежности к конкретной предметной области можно подразделить информационные системы на три класса: технические, экономические, информационно-аналитические. К техническим относят автоматизированные системы научных исследований (АСНИ), системы автоматизированного проектирования (САПР), гибкие производственные системы (ГПС), робототехнические комплексы (РТК) и др. Информационно-аналитические автоматизированные системы включают: автоматизированные справочно-информационные системы (АСИС), базы данных (БД), экспертные системы (ЭС), статистические информационные системы (СтИС) и т.п. Примером экономических систем могут служить автоматизированные системы управления (АСУ), бухгалтерские информационные системы (БУ-ИС), банковские информационные системы (БИС), биржевые информационные системы (БИС), маркетинговые информационные системы (МИС) и др. Особенностью ГИС как интегрированной системы является то, что она интегрирует технологии трех перечисленных выше классов систем: технических, информационно-аналитических и экономических. Следовательно, ГИС могут быть использованы как любая из этих систем.

Технология ГИС применима везде, где необходимо учитывать, обрабатывать и демонстрировать территориально распределенную информацию. Пользователями ГИС-технологии могут быть как организации, чья деятельность целиком базируется на земле владельцы нефтегазовых предприятий, экологические службы, жилищно-коммунальное хозяйство, так и многочисленные коммерческие предприятия - банки, страховые, торговые и строительные фирмы, чья успешная работа во многом зависит от правильного и своевременного учета территориального фактора.

В основе любой ГИС лежит информация о каком-либо участке земной поверхности: континенте, стране, городе, улице.

БД организуется в виде набора слоев информации. Основной шрифт содержит географически привязанную карту местности (топооснова). На него

накладываются другие слои, несущие информацию об объектах, находящихся на данной территории: коммуникации, в том числе линии электропередач, нефте- и газопроводы, водопроводы, промышленные объекты, земельные участки, почвы, коммунальное хозяйство, землепользование и др.

В процессе создания и наложения слоев друг на друга между ними устанавливаются необходимые связи, что позволяет выполнять пространственные операции с объектами посредством моделирования и интеллектуальной обработки данных.

Как правило, информация представляется графически в векторном виде, что позволяет уменьшить объем хранимой информации и упростить операции по визуализации. С графической информацией связана текстовая, табличная, расчетная информация, координатная привязка к карте местности, видеоизображения, аудиокomentarии, БД с описанием объектов и их характеристик.

Многие ГИС включают аналитические функции, которые позволяют моделировать процессы, основываясь на картографической информации.

Программное ядро ГИС можно условно разделить на две подсистемы: СУБД и управление графическим выводом изображения. В качестве СУБД используют SQL-серверы.

Рассмотрим типовую схему организации ГИС-технологии, в настоящее время сложился основной набор компонентов, составляющих ГИС. К ним относятся:

- приобретение и предварительная подготовка данных;
- ввод и размещение данных;
- управление данными;
- манипуляция данными и их анализ;
- производство конечного продукта.

Функциональным назначением данных компонентов является:

Приобретение и подготовка исходных данных; включает манипуляции с исходными данными карт – материалами на твердой или бумажной основе, дан-

ными дистанционного зондирования, результатами полевых испытаний, текстовыми (табличными) материалами, с архивными данными.

Ввод и размещение пространственной и непространственной составляющих данных включает конвертирование информации во внутренние форматы системы и обеспечение структурной и логической совместимости всего множества порождаемых данных.

Управление данными предполагает наличие средств оптимальной внутренней организации данных, обеспечивающих эффективный доступ к ним.

Функции манипуляции и анализа представлены средствами, предназначенными для содержательной обработки данных в целях обработки и реорганизации данных. С точки зрения пользователя, эти функции являются главными в ГИС-технологиях, потому что позволяют получать новую информацию, необходимую для управления, исследовательских целей, прогнозирования.

Производство конечного продукта включает вывод полученных результатов для конечных потребителей ГИС. Эти продукты могут представлять карты, статистические отчеты, различные графики, стандартные формы определенных документов.

Кроме этого, каждый картографический объект может иметь атрибутивную информацию, в которой содержится информация, которая не обязательно должна отображаться на карте (например, число жильцов какого-либо дома и их социальный статус).

Подавляющее большинство ГИС-систем различают геометрическую и атрибутивную компоненты баз данных ГИС. Их часто называют также пространственными (картографическими, геометрическими) и непространственными (табличными, реляционными) данными.

Картографическая информация представляется точками, кривыми и площадными объектами.

Атрибутивная информация содержит текстовые, числовые, логические данные о картографических объектах. Большинство современных ГИС-

инструментариев позволяют хранить информацию в составе БД, как правило, реляционных.

Атрибутивная информация хранится в виде отдельных табличных файлов, как правило, в форматах реляционных баз данных систем DBF, PARADOX, ORACLE, INGRESS. Такой способ характерен как для западных коммерческих продуктов, так и современных отечественных разработок.

Рынок ГИС, начиная с момента появления первых коммерческих продуктов во второй половине прошлого века, постоянно развивается и растет. Растет оборот как непосредственных разработчиков базового программного ГИС обеспечения, так и их партнеров, предлагающих готовые наборы геоданных и собственные разработки, дополняющие возможности базовых продуктов полезными, в том числе специализированными функциями и инструментами. Рынок ГИС растет и в периоды экономического подъема, и даже в трудные времена. Эта технология очень ценна для улучшения производственного процесса, при принятии решений, для общения и налаживания контактов между людьми, повышения их знания об окружающем мире, для общего повышения эффективности работы и расширения взаимодействия внутри и между организациями.

### **3.2 Принципы построения и функциональные возможности системы частотно-территориального планирования**

Система должна обеспечивать частотно-территориальное планирование сетей сотовой наземной подвижной и фиксированной радиосвязи в диапазонах частот их использования. В качестве геоинформационной системы (ГИС) целесообразно использовать системы, позволяющие работать на различных платформах (например Unix, Windows и др.) и создавать приложения, ориентированные на конкретные задачи пользователя.

Система должна обеспечивать расчет:

- зон обслуживания (ЗО) базовых станций (БС) по заданному уровню поля на их границе с контролем возможности обеспечения радиосвязи в пределах зоны с заданным качеством;
- зон покрытия (ЗП) БС, где уровень радиосигнала не ниже заданного, но при этом не гарантируется возможность радиосвязи во всей зоне покрытия;
- зон покрытия по связи (ЗПС) БС, на которых выполняются требования по качеству связи;
- зон взаимных помех (ЗВП) по основному и побочным каналам приема, определяемых наложением ЗП на ЗО базовых станций, где отношение сигналов и помех меньше защитного соотношения.

Инструменты системы планирования должны обеспечивать построение ЗО и ЗП как с учетом значений уровня поля внутри зоны, так и без него. В последнем случае строится только граница зоны, в которой поле сигнала передатчика БС превышает заданный уровень.

План размещения БС сети и их параметры (мощность передатчика, потери в антенном фидере, диаграмма направленности антенны, высота ее установки и ориентация) являются исходными для расчета и вводятся пользователем. План размещения БС сети и результаты расчетов ЗО и ЗП отображаются на карте. Уровни поля в зонах отображаются цветом.

Для расчета основных потерь при распространении радиоволн должен учитываться рельеф местности, план жилой застройки, наличие водоемов и лесных массивов.

Система должна быть ориентирована на обязательное использование моделей распространения радиоволн, описанных в Рекомендациях МККР, МСЭ, УА93 и др.

Зона покрытия совпадает с зоной обслуживания в случае, если излучаемая мощность абонентских радиостанций (АС) превышает излучаемую мощность базовой станции. При этом дальность связи определяется мощностью излучения базовой станции. В противном случае, если мощность излучения АС меньше мощ-

ности излучения БС, то АС не сможет обеспечить необходимый уровень сигнала на входе приемника БС, находясь на границе ЗП ее передатчика, и дальность связи ограничивается мощностью излучения АС. Используя теорему взаимности для базовых потерь, можно производить расчет зон покрытия от абонентских радиостанций различной мощности путем замещения фактического передатчика БС на эквивалентный. Излучаемая мощность эквивалентного передатчика полагается равной излучаемой мощности передатчика АС. За нормированную ДН эквивалентной антенны принимается нормированная ДН приемной антенны БС. Зона покрытия такого эквивалентного излучателя и будет зоной обслуживания БС для абонентских станций с заданными параметрами. В пределах этой зоны обеспечивается двухсторонняя радиосвязь между АС и БС с заданным уровнем качества. Если на БС используется разнесенный прием, то при расчете ЗО величина энергетического выигрыша за счет разнесенного приема прибавляется к коэффициенту усиления эквивалентной антенны АС.

В системе должна быть предусмотрена возможность расчета зон помех от всех БС планируемой сети. Зона помех оценивается в виде зоны покрытия передатчика БС, в которой уровень электрического поля превышает минимальный допустимый уровень напряженности поля, уменьшенный на величину защитного отношения сигнал/помеха в совмещенном (соседнем) канале приема. Достаточным условием полного исключения помех в паре БС является отсутствие и взаимных пересечений ЗО и ЗВП.

Обобщенная функциональная схема системы частотно-территориального планирования представлена на рис. 3.1 и содержит три каталога:

а) Системный каталог, который содержит приложения ГИС, системные библиотеки и файлы проектов.

б) Каталог электронной карты местности текущего проекта, включающий следующие таблицы:

- линии уровня;
- кварталы жилой застройки;
- дороги (в расчетах не используется);

- водоемы;
- лесные массивы.

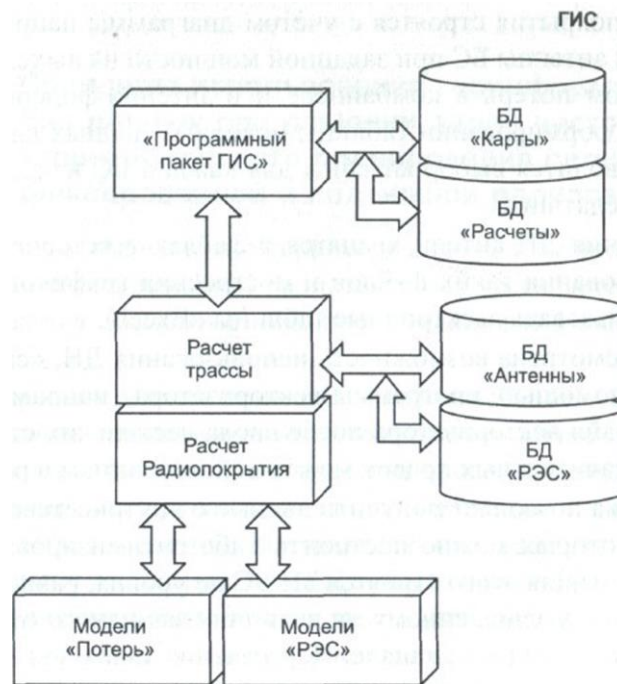


Рисунок 3.1 – Обобщенная функциональная схема системы частотно-территориального планирования

Каталог текущего проекта, содержащий таблицы исходных данных, и результаты расчетов по частотно-территориальному плану текущего проекта.

Для расчета потерь распространения система должна использовать следующие географические данные:

- изолинии высоты рельефа местности над уровнем моря;
- кварталы застройки;
- водные объекты (морья, озера, реки);
- лесные массивы.

Зоны обслуживания рассчитываются для нескольких типов абонентских радиостанций, отличающихся уровнем эквивалентной изотропно излучаемой мощности.

Зоны покрытия строятся с учетом диаграммы направленности передающей антенны БС при заданной мощности на выходе передатчика с учетом потерь в комбайнере и в антенно-фидерном тракте (АФТ). При формировании таблицы исходных данных для планирования производится выбор антенны для каждой БС и задается мощность ее передатчика.

Описания ДН антенн хранятся в файлах текстового формата. Для формирования таких файлов и построения графиков диаграмм можно использовать электронные таблицы «Excel».

Предусмотрена возможность использования ДН, «сколотых» с чертежа с помощью программы-векторизатора, например «R2V». Выходной файл векторизатора после ввода нескольких строк управления и незначительных правок может использоваться в расчетах.

Система позволяет получить данные о внутрисетевой ЭМС, на основании которых можно построить либо оптимизировать частотный план сети. Для этого строятся ЗП БС до уровня, равного уровню на границе ЗО, уменьшенному на величину защитного отношения в совмещенном (соседнем) канале. Пересечения таких зон покрытия с зонами обслуживания представляют собой зоны возможных помех. По такому принципу система рассчитывает таблицу взаимных помех БС сети (матрица ЭМС).

Данные об уровнях поля сигналов и помех внутри зон обслуживания и покрытия позволяют решить задачу анализа ЭМС, в том числе с учетом алгоритмов регулировки мощностей передатчиков абонентских и базовых станций, выделения каналов подвижным абонентам и передачи из зоны в зону.

Следует отметить, что в реальной сети помехи могут отсутствовать даже в случае частичного пересечения ЗО и ЗВП. В процессе проектирования это требует дополнительного рассмотрения. При решении данной задачи следует исходить из того, что в сетях связи уровень внутрисистемной помехозащищенности определяется при прочих равных условиях характером регулировки мощностей передатчиков абонентских и базовых радиостанций и рядом других факторов, например, ал-

горитмами эстафетной передачи абонентов, предоставления канала и другими особенностями системы радиосвязи, к которой принадлежит проектируемая сеть.

### **3.3 Требования к картографической информации и геоинформационным базам данных при планировании радиосвязи**

Геоинформационной системой принято называть совокупность компьютерных средств и программного обеспечения, позволяющую вводить, поддерживать, анализировать и показывать все виды географических и пространственных объектов, а также других данных связанных с ними. ГИС позволяет выполнять комплексные пространственные операции над множеством объектов и связанными с ними данными.

Один из основных принципов создания ГИС подразумевает разделение содержания картографической базы на информационные слои. Слоем называется графический уровень представления данных таблицы в окне карты.

Такой подход к созданию и использованию ГИС позволяет учитывать конкретные условия различных потребителей, предоставляя им возможность заказывать необходимые слои информации и работать с ними. Произвольное комбинирование слоев позволяет удовлетворить требования самых разнообразных потребителей, а также ускорить широкое внедрение цифровых карт.

В окне карты могут быть показаны растровые слои (слой с растровым изображением), тематические и косметический слои. Самым верхним в окне карты всегда является косметический слой, данные которого находятся в специальной временной таблице.

Геоинформационная база данных может содержать следующие слои:

- данные о РЭС (координаты и характеристики);
- рельеф местности (рекомендуемый шаг изолиний 5-20 м);
- данные по типам застройки (городская, пригородная и сельская – дома или кварталы);
- водные объекты (моря, озера и реки);

- лесные массивы (тип леса, плотность и высота деревьев);
- данные почв;
- описание зон рефракции и субрефракции;
- дороги и спецмагистралы (ЛЭП, линии связи и т. п.);
- прочие объекты и обозначения.

В качестве примера слоя карты удобно рассмотреть слой, содержащий информацию о рельефе местности.

Данные о высоте представляются в виде изолиний равных высот, которые в базе данных хранятся с помощью полилиний или полигонов. Полилинии состоят из прямых отрезков. Последняя точка предыдущего отрезка является первой точкой следующего и называется узлом. Координаты узлов заносятся как объектное представление в таблицу. Точки высот хранятся в виде точечных объектов, характеризующихся только координатной парой X, Y. Точечные объекты на карте можно обозначать символом (например, кружочком, звездочкой или квадратиком).

Слой, содержащий информацию о рельефе местности, удобно представлять как тематическую карту, которая использует разные графические стили (такие, как цвет или штриховка) для выделения отдельных уровней высот. Например, области, в которых имеется максимальная высота, закрашены красным цветом, а области с минимальной высотой – зеленым. В зависимости от высоты области могут быть закрашены разными оттенками от зеленого до красного цвета.

Для удобства визуального восприятия информации о рельефе местности удобно использовать трехмерное графическое представление (рис. 3.2).

Детерминированные методы требуют построения профиля трассы «БС-ПО» для каждой ЭППР территории. Точность расчета затухания сигнала на трассе зависит от точности метода расчета и точности задания исходных данных, т. е. от точности восстановления в общем случае трехмерной картины. Для автоматизации расчетов целесообразно использовать геоинформационные системы (ГИС) на основе ЦК.

При обосновании величины горизонтального разрешения пространственного распределения морфологических данных о местности, точности аппроксимации высот рельефа, номенклатуре типов подстилающей поверхности было показано, что для условий среднепересеченной местности достаточным является горизонтальное разрешение 250 м, точность задания высот 4 м и учет восьми типов подстилающей поверхности. В гористой местности горизонтальное разрешение уменьшается до 50 м. Для городских условий горизонтальное разрешение должно составлять 5 м, иначе не будут обозначены все проезды, хотя для проведения самих расчетов достаточно горизонтального разрешения в 10 м.

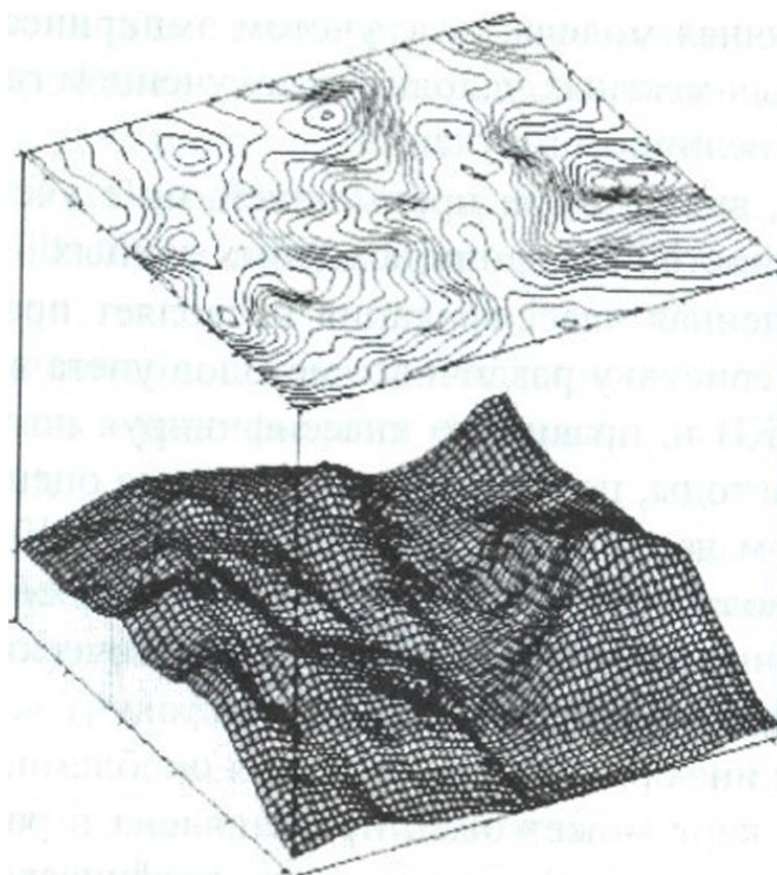


Рисунок 3.2 – Пример построения модели рельефа с помощью линий равных высот





Расчет делается автоматически, используя надстройку для программного комплекса QGIS 2.18.26 и отображается на карте в виде отдельного слоя. Расчет строится следующим образом:

– на карте при помощи средств QGIS строится квадратная сетка, покрывающая весь населенный пункт, размер ячейки сетки 100x100м рис.4.3;

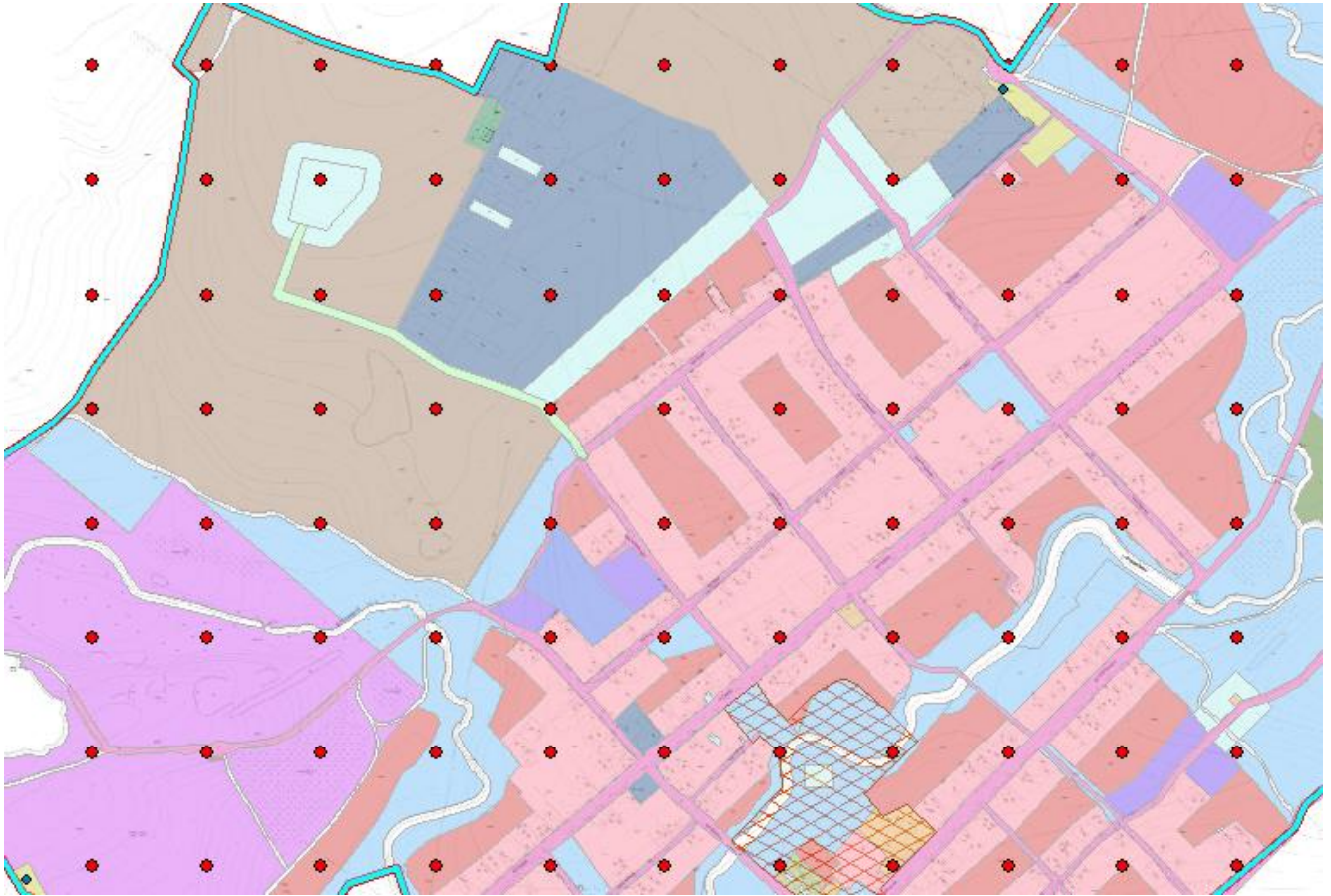


Рисунок 4.3 – Пример сетки точек

– надстройка автоматически высчитывает расстояние от каждой базовой станции до каждой точки и заносит данные во внутреннюю таблицу;

– выполняется расчет при помощи формул модели Хата и на основе полученных данных делается сравнение с минимально допустимым уровнем мощности полезного сигнала;

– создается полигональный слой и наносятся зоны покрытия базовых станций.

Надстройка представляет собой программу, в которой задаются необходимые параметры:

- слой БС;
- слой точек для расчета;
- характеристики БС;
- исходящий слой.

Окно надстройки показано на рисунке 4.4.

Расчет зоны покрытия

Слой БС:  
D:\GPKolarovka\eskiz\BS.shp

Слой точек:  
D:\GPKolarovka\eskiz\Point.shp

Мощность БС: 35

Чувствительность приемника БС: -107

Коэффициент усиления антенны: 14

Затухание в антенно-фидерном тракте радиопередатчика: 1.51

Потери в дуплексере на передачу: 3

Название слоя покрытия: emp

Рисунок 4.4 – Окно надстройки

Результат работы надстройки – это созданный слой и помещение его на карту (рис.4.5).



## 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

Целью данного дипломного проекта является проектирование сети мобильной связи в с. Коларовка (Болгарка).

Далее приведем расчет затрат на проектирование, внедрение, эксплуатацию и расчет окупаемости проекта. Для расчета срока окупаемости и экономической эффективности разработанной сети необходимо разработать тарифные планы и предусмотреть степень подключаемости абонентов к сети, т.е. поступление платежей. Но это предполагает проведение маркетинговых исследований в сфере рынка операторов сотовой связи и разработки полного бизнес-плана. Поэтому расчет в рамках дипломного проекта будем вести в укрупненных расчетах.

### 5.1 Расчет сметы затрат на реализацию проекта

В состав затрат на реализацию проекта учитываются все ресурсы, необходимые для реализации комплекса работ. С целью определения затрат на реализацию проекта составим смету затрат (Таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Смета затрат на реализацию проекта

Статьи затрат	Условное обозначение	Сумма	
		Грн	Часть, %
Специальное оборудование	СО	130486,5	31
Основная и дополнительная зарплата сотрудников	ЗП	143880,0	34,2
Отчисления на социальное страхование	22% от ЗП соц. страх.	31653,6	7,5
Накладные расходы	НР	115104	27,3
Всего затрат на реализацию проекта	$K_{\text{проекта}}$	421124,1	100

Отчисления на социальное страхование составляют 22% от основной и дополнительной зарплаты сотрудников.

$$C_{\text{соц.страх.}} = \frac{143880 \cdot 22}{100} = 31653,6 \text{ грн,}$$

где  $C_{\text{соц.страх.}}$  – отчисления на социальное страхование.

К накладным расходам относятся затраты на общее управление и общехозяйственные нужды, содержание и эксплуатацию зданий. Накладные расходы принимаются равными 80 % от основной заработной платы производственного персонала.

$$C_{\text{н.р.}} = 143880 \cdot 0,8 = 115104 \text{ грн.},$$

где  $C_{\text{н.р.}}$  – накладные расходы.

Затраты на приобретение оборудования и его монтажа

Таблица 5.2 – Расчет затрат на приобретение оборудования

Наименование оборудования	Количество	Цена за единицу, грн.	Общая цена, грн.
Siemens BS240/241	3	12600,0	37800,0
RNC 3810	1	14000,0	14000,0
RXI 820	1	4200,0	4200,0
Стойка телекоммуникационная	3	5000,0	15000,0
ПК управления	1	15000,0	15000,0
Кабель	5км	1400,0	7000,0
Оптический кросс	3	1750,0	5250,0
Источник питания ИБЭП-220/48(60)-60	3	2500	7500,0
Мультиплексор LucentWaveStar AM-1	3	5400	16200,0
Лицензия	1	6400,0	6400,0
Итого:			121950,0
Тара и упаковка, 3%			3658,5
Транспортные расходы, 4%			4878,0
Итого:			130486,5

Расчет заработной платы сотрудников

Затраты на основную заработную плату рассчитываются исходя из необходимого для выполнения работ состава и количества исполнителей, а также их среднемесячной заработной платы (или должностных окладов). Для реализации

данного проекта необходимо участие инженера и трех монтажников оптических сетей (ОС).

Расчет зарплаты приводится в таблице 5.3 (при 22 рабочих днях в месяце).

Таблица 5.3 – Заработная плата сотрудников

№ п.п.	Должность	Оклад, грн	Дополнительная Заработная плата (премии), грн	Фонд оплаты труда, грн
1	Инженер	6800	680	44880
2	Монтажник БС	5000	500	33000
3	Монтажник БС	5000	500	33000
4	Монтажник БС	5000	500	33000
5	Итого	21800	2180	143880

Дополнительная зарплата определяется в размере 10% основной заработной платы штатных работников и составляет  $Z_{\text{доп.}} = 2180$  грн в месяц. Фонд оплаты труда рассчитан за 6 месяцев работ.

## 5.2 Бальная оценка экономической эффективности проекта

Бальная оценка проводится по следующим важным показателям:

- важность разработки/исследования  $K_1$ ;
- возможность использования результатов разработки/исследования  $K_2$ ;
- теоретическая значимость и уровень новизны достижения  $K_3$ ;
- сложность разработки/исследования  $K_4$ .

Таблица 5.4 – Шкала для оценки важности разработки  $K_1$

Показатель	Балы
1. Инициативная работа, которая не является частью комплексной программы или заданием ведомственных органов	1
2. Работа, выполненная по договору о научно-технической помощи	3
3. Работа, являющаяся частью ведомственной программы	5
4. Работа, являющаяся частью ведомственной комплексной программы	7
5. Работа, являющаяся частью международной комплексной программы	8

Важность исследования  $K_1 = 3$ . Исследование выполняется по договору о научно-технической помощи интернет провайдерам или организациям.

Таблица 5.5 – Шкала оценки возможности использования результатов разработки  $K_2$

№ з/п	Показатель	Балы
1	В данном подразделении	1
2	В данной организации	3
3	Во многих организациях	5
4	В масштабах страны	8

Возможность использования результатов исследования  $K_2 = 3$ . Результаты исследования можно использовать только в данной организаций.

Таблица 5.6 – Шкала оценки теоретической значимости и уровня новизны исследования  $K_3$

№ п/п	Показатель	Балы
1	Анализ, обобщение и классификация известной информации. Подобные результаты были известны в исследованной области	2
2	Получение новой информации, которая дополняет знания о сущности исследуемых процессов, неизвестной в исследуемой области	3
3	Получение новой информации, которая изменяет представление о сущности исследуемых процессов, неизвестной ранее	5
4	Создание новых теорий, методик	6
5	Получение информации, способствующей формированию направлений, неизвестных ранее	8

Оценка теоретической значимости и уровень новизны исследования  $K_3 = 2$ . Анализ, обобщение и классификация известной информации. Подобные результаты были известны в исследованной области

Таблица 5.7 – Шкала оценки показателей сложности исследования  $K_4$ 

№ п/п	Показатель	Балы
1	Работа выполняется одним подразделением, затраты меньше 10 000 грн.	1
2	Работа выполняется одним подразделением, затраты меньше 10 000-50 000 грн.	3
3	Работа выполняется одним подразделением, затраты меньше 50 000 – 100 000 грн.	5
4	Работа выполняется с участием нескольких подразделений, затраты меньше 100 000 – 500 000 грн.	7
5	Работа выполняется несколькими организациями, затраты больше 500 000 грн.	8

Шкала оценки показателя сложности исследования. Исследование проводится одним подразделением с затратами 100-500 тыс. гривен.  $K_4 = 7$ .

Общую оценку найдем путем перемножения коэффициентов.

$$B = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4;$$

$$B = 3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 7 = 126,$$

Где  $B$  – общая оценка;

$K_1$  – коэффициент важность разработки/исследования;

$K_2$  – коэффициент возможности использования результатов разработки/исследования;

$K_3$  – коэффициент теоретической значимости и уровня новизны достижения;

$K_4$  – коэффициент сложности разработки/исследования.

Удельный эффект на каждый бал – 2000 грн.

Общий эффект исследования составляет.

$$E = 2000 \cdot B;$$

$$E = 2000 \cdot 126 = 252000 \text{ грн.},$$

где  $E$  – общий эффект исследования.

Коэффициент эффективности исследования:

$$K_v = \frac{E}{K_{\text{проекта}}} = \frac{252000}{421124,1} = 0,6$$

где  $K_B$  – коэффициент эффективности исследования;  
 $E$  – общий эффект исследования;  
 $K_{\text{проекта}}$  – всего затрат на реализацию проекта.  
Срок окупаемости исследования:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{K_B} = \frac{1}{0,6} = 1,6 \text{ года,}$$

где  $T_{\text{ок}}$  – срок окупаемости исследования;  
 $K_B$  – коэффициент эффективности исследования.  
Что составит чуть больше шести месяцев.

## **6 ОХРАНА ТРУДА И БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

### **6.1 Анализ потенциальных опасностей**

Основной задачей данного раздела является подобрать систему законодательных актов и профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособность человека в процессе труда.

При проектировании и построении пассивной оптической сети доступа следует выделить следующие опасные и вредные факторы:

- возможность поражения электрическим током;
- вредное воздействие электромагнитного излучения;
- постоянное умственное и физическое напряжение;
- неудовлетворительные параметры микроклимата;
- неудовлетворительное освещение;
- опасность возгораний.

### **6.2 Мероприятия по технике безопасности**

Мероприятия по ГОСТ 12.2.007.0-75\*(2001) «ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» определены для аппаратуры, непосредственно подключаемой к электрической сети и предназначенной для эксплуатации внутри помещения на высотах до 200 см и неподвергаемой воздействию капель или брызг. Аппаратура надежно заземлена для защиты от поражения электрическим током. Конструкция аппаратуры обеспечивает:

- защиту потребителя от поражения электрическим током;
- защиту потребителя от воздействий взрыва;
- защиту потребителя от высокочастотного излучения.

Рабочие места спроектированы безопасными и удобными для выполнения работ в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Предусмотрена защита от поражения электрическим током:

- токоведущие части надежно изолированы и ограждены;
- металлические части, которые могут вследствие повреждения оказаться под электрическим напряжением опасной величины, заземлены;
- в схеме электрических цепей предусмотрено устройство, централизованно отключающее от питающей сети все электрические цепи.

Конструкция оборудования исключает возможность накопления зарядов статического электричества, а так же обеспечивает снижение уровня излучения путем применения электростатических заземленных экранов. Органы управления выполнены и заблокированы так, что исключена неправильная последовательность операций или возможность самопроизвольного включения и выключения оборудования. Органы аварийного выключения красного цвета и размещены в легкодоступных местах. Помещение, предназначенное для установки оборудования, относится к категории без повышенной опасности согласно ПУЭ-76 «Правила устройства электроустановок» с параметрами:

- сухо (относительная влажность не более 60 процентов);
- температура ниже +30 °С;
- полы не токопроводящие.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности разработаны в соответствии с ГОСТ 12.2.007.0-75\*(2001) «ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности».

Сеть электропитания включается и выключается при помощи пусковой аппаратуры (рубильником).

Для предотвращения прикасания человека к частям ЭВМ, находящимся под напряжением, служит защитное заземление. Современные ЭВМ включаются в розетку с помощью трехполюсной вилки, один из полюсов которой используется для заземления. С ним электрически соединены металлические нетоковедущие части ЭВМ, которые могут оказаться под напряжением. В компьютерном

центре предусматривается использование только трехполюсных розеток, у которых соответствующий полюс соединен с шиной заземления. Конструкция производственного оборудования исключает возможность накопления зарядов статического электричества в опасных количествах.

Электробезопасность обеспечивается:

- конструкцией электроустановок;
- техническими способами и средствами защиты.

Технические способы и средства защиты, обеспечивающие электробезопасность, установлены с учетом условий внешней среды: помещение по степени опасности и поражения электрическим током относится к категории "Помещения без повышенной опасности".

Для обеспечения электробезопасности применены отдельно либо в сочетании друг с другом следующие технические средства защиты:

- электрическая изоляция токоведущих частей двойная;
- защитное заземление;
- защитное отключение;
- электрическое разделение сети;
- малое напряжение.

Для обеспечения безопасности работ в действующих электроустановках выполняются следующие организационные мероприятия:

- назначение лиц, ответственных за организацию и производство работ;
- оформление работы нарядом или устным распоряжением;
- допуск к работе;
- надзор во время работы;
- оформление перерыва в работе, переводов на другое рабочее место, окончания работы.

Человек подвергается воздействию геомагнитного поля, электрического поля, постоянного магнитного поля, электромагнитного поля промышленной частоты (50 Гц), электромагнитных полей диапазона радиочастот (10кГц – 300 ГГц) ГСНиП №239 -96.

Обеспечение защиты работающих от неблагоприятного влияния ЭМП осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий.

Организационные мероприятия при проектировании и эксплуатации оборудования, являющегося источником ЭМП или объектов, оснащенных источниками ЭМП, включают:

- выбор рациональных режимов работы оборудования;
- выделение зон воздействия ЭМП (зоны с уровнями ЭМП, превышающими предельно допустимые, где по условиям эксплуатации не требуется даже кратковременное пребывание персонала, ограждается и обозначается соответствующими предупредительными знаками);
- расположение рабочих мест и маршрутов передвижения обслуживающего персонала на положенных расстояниях от источников ЭМП, обеспечивающих соблюдение ПДУ;
- ремонт оборудования, являющегося источником ЭМП, следует производить (по возможности) вне зоны влияния ЭМП от других источников;
- соблюдение правил безопасной эксплуатации источников ЭМП.

Инженерно-технические мероприятия обеспечивают снижение уровней ЭМП на рабочих местах путем внедрения новых технологий и применения средств коллективной и индивидуальной защиты (когда фактические уровни ЭМП на рабочих местах превышают ПДУ, установленные для производственных воздействий).

Руководители организаций для снижения риска вредного влияния ЭМП, создаваемого средствами радиолокации, радионавигации, связи, в том числе подвижной и космической, приняли меры по обеспечению работающих средствами индивидуальной защиты.

Коллективные и индивидуальные средства защиты обеспечили снижение неблагоприятного влияния ЭМП и оказывают вредное воздействие на здоровье работающих.

Коллективные и индивидуальные средства защиты изготавливаются с использованием технологий, основанных на экранировании (отражении, поглощении энергии ЭМП) и других эффективных методах защиты организма человека от вредного воздействия ЭМП.

Все коллективные и индивидуальные средства защиты человека от неблагоприятного влияния ЭМП, включая средства, разработанные на основе новых технологий и с использованием новых материалов прошли санитарно-эпидемиологическую оценку и имеют санитарно-эпидемиологическое заключение на соответствие требованиям Санитарных правил, выданное в установленном порядке.

Средства защиты от воздействия ЭСП соответствуют требованиям государственного стандарта на общие технические требования к средствам защиты от статического электричества.

В результате выполнения работы наступает понижение работоспособности, называемое утомляемостью.

В борьбе с утомляемостью большое значение имеет физиологическая рационализация трудового процесса, которая включает систему мер, касающихся экономии движений на работе, более равномерное распределение нагрузки между различными мышечными группами тела человека и др. При работе сидя следует обращать внимание на осанку, чтобы не было вынужденного положения, имелась возможность периодически менять позу.

Санитарные требования к производственным помещениям установлены ДСН 3,3,6-042-99 «Санитарные нормы микроклимата промышленных помещений».

### **6.3 Мероприятия по производственной санитарии и гигиене труда**

Мероприятия по производственной санитарии и гигиене труда обеспечивают на рабочих местах нормальные условия для работы персонала: микроклимат,

необходимая освещенность, исключение или уменьшение воздействия шума, излучения и другие вредные производственные факторы.

На производственном участке, где изготавливается спроектированное устройство, а также осуществляется его испытание, с целью обеспечения полной безопасности проведения этих работ предусмотрено освещение и вентиляция.

На участке применяется прямоточная вентиляция с калорифером, в соответствии с требованиями ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування". В холодный и переходный периоды года для первой категории работ температура воздуха составляет 20-30 °С, относительная влажность 60-40 % , скорость движения воздуха не более 0,2 м/с; в теплый период соответственно температура 22-25 °С, значения влажности и скорости движения воздуха не изменяются.

Для обеспечения достаточной освещенности рабочих зон снабдить персонал индивидуальными источниками света РВО 42, соответствующие ГОСТ 17516.1-90 (2001) «Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам». Природное освещение осуществляется через световые проемы.

Общие технические условия. Межгосударственный стандарт». Причем дополнительное искусственное освещение используют не только в темное время суток, но и в светлое время суток. Лучше всего использовать на производственном участке люминисцентные лампы белого цвета и тепло-белого цвета 20, 40 или 80Вт.

Проведем расчет освещенности производственного участка. Для заданного помещения 30×24×6 необходимо создать освещенность 300 лк.

Разряд зрительной работы – IVа.

Источник света – люминисцентные лампы белого света.

Светильник типа – люминисцентный светильник пылезащищенный (ЛСП) у него такие параметры:

– коэффициент светильника (L/h) – 1,3;

– коэффициент запаса (kз) – 1,6;

– коэффициент неравномерности ( $z$ ) – 1,1.

Для нашего помещения характерны следующие коэффициенты отражения:

от стен 50%;

от потолка 30%;

от пола 10%.

Индекс освещения (показатель помещения) рассчитывается следующим образом:

$$i = \frac{AB}{h \cdot (A + B)} = \frac{30 \cdot 24}{4,6 \cdot (30 + 24)} = 2,9$$

где  $h$  – высота светильников над рабочей поверхностью, м;

$A$ ,  $B$  – ширина и длина помещения соответственно, м.

Чтобы найти  $h$  найдем количество рядов светильников в помещении и определим максимально допустимое расстояние между светильниками.

$$N_p = \frac{B}{(H - hp) \cdot L / h} = \frac{24}{(6 - 0,8) \cdot 1,3} = 4 ;$$

$$L_{\max} = \frac{B}{N_p} = \frac{24}{4} = 6 ;$$

$$h = \frac{L_{\max}}{L / h} = \frac{6}{1,3} = 4,6 ;$$

где  $N_p$  – количество рядов светильников в помещении

$B$  – ширина помещения, м;

$h$  – высота светильников над рабочей поверхностью, м;

$hp$  – высота рабочей поверхности над полом (0,8 м);

$H$  – высота помещения;

$[L/h]$  – коэффициент светильника;

$L_{\max}$  – допустимое расстояние между светильниками;

$h_3$  – высота свисания светильника от потолка.

Принимаем ( $\eta = 0,52$ ) – отношение светового потока, который падает на рассчитываемую поверхность источника света.

Рассчитаем значение суммарного светового потока в помещении.

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{En \cdot S \cdot z \cdot k}{\eta} = \frac{300 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 1,6 \cdot 1,1}{0,52} = 731076,$$

где  $\Phi_{\Sigma}$  – расчетное значение суммарного светового потока в помещении, лм;

$S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;

$z$  – коэффициент неравномерности освещения;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока освещающей установки;

$k$  – коэффициент запаса.

Определим условное количество светильников в помещении.

$$N^* = \frac{A \cdot B}{[L/h] \cdot h^2} = \frac{20 \cdot 30}{(1,3 \cdot 4,6)^2} = 20,$$

где  $N^*$  – условное количество светильников в помещении, шт;

$A, B$  – ширина и длина помещения соответственно, м;

$[L/h]$  – коэффициент светильника;

$h$  – высота светильников над рабочей поверхностью, м.

Рассчитаем световой поток условного источника света:

$$\Phi_{л}^* = \frac{\Phi_{\Sigma}}{N^* \cdot n} = \frac{731076}{20 \cdot 2} = 18277,$$

где  $\Phi_{л}^*$  – световой поток условного источника света, лм;

$\Phi_{\Sigma}$  – расчетное значение суммарного светового потока в помещении, лм;

$N^*$  – условное количество светильников в помещении, шт;

$n$  – количество ламп в светильнике (в нашем случае 2), шт.

Исходя из этих данных, выбираем лампу ЛБ мощностью ( $P_l$ ) 80 Вт, световой поток ( $\Phi_l$ ) 5400 лм, длина лампы 1,5 м.

Найдем оптимальное количество ламп в помещении, которая отвечает равноколичественному размещению ламп в каждом ряду.

$$N_{\phi l} = n \cdot N^* \cdot \frac{\Phi_l^*}{\Phi_l} = 2 \cdot 20 \cdot \frac{18277}{5400} = 136,$$

где  $N_{\phi l}$  – оптимальное количество ламп в помещении, шт;

$n$  – количество ламп в светильнике, шт;

$N^*$  – условное количество светильников в помещении, шт;

$\Phi_l^*$  – световой поток условного источника света, лм;

$\Phi_l$  – световой поток лампы ЛБ мощностью 80 Вт, лм.

Определим общую расчетную освещенность в помещении при использовании стандартных ламп.

$$E_p = \frac{\Phi_l \cdot \eta \cdot N_{\phi l}}{S \cdot z \cdot k_z} = \frac{5400 \cdot 0,52 \cdot 136}{24 \cdot 30 \cdot 1,6 \cdot 1,1} = 301,36,$$

где  $\Phi_l$  – световой поток лампы ЛБ мощностью 80 Вт, лм;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока освещающей установки;

$N_{\phi l}$  – оптимальное количество ламп в помещении, шт;

$S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;

$k_z$  – коэффициент запаса;

$z$  – коэффициент неравномерности освещения.

Таким образом, с учетом площади производственного цеха, размещения рабочих столов и поставленных условий искусственного освещения определили, что светильники нужно размещать в 4 ряда, в каждом по 17 светильников.

При данной специфике производства отсутствуют факторы, приводящие к загрязнению окружающей среды.

При проектировании участков, производственных помещений были учтены требования, установленные СНиП II-90-81 "Производственные здания промышленных предприятий", СНиП II-96-86 "Вспомогательные здания и помещения промышленных предприятий".

#### **6.4 Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности**

Пожарная безопасность объекта в соответствии с ДБН В.1.1-7:2016 "Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги" обеспечивается системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-технические мероприятия. Мероприятия по пожарной безопасности направлены на обеспечение безопасности людей, на предотвращение пожара, ограничение его распространения, создание условий для успешного тушения пожара.

Степень огнестойкости здания АТС III. По взрывопожарной и пожарной опасности помещения и здания АТС относятся к категории Д. В помещениях компьютерных залов имеются в больших количествах бумага, пластмассы, резина и другие горючие материалы. В основном источником пожара являются ЭВМ. Они характеризуются высокой плотностью размещения электронных схем. В непосредственной близости друг от друга располагаются соединительные провода, коммутационные кабели. При протекании тока возможен их перегрев, плавление изоляции и, как следствие, короткое замыкание, которое сопровождается искрением, перегрузками элементов электронных схем.

Противопожарная защита обеспечена:

- применением средств пожаротушения и соответствующих видов пожарной техники, огнетушителей марки ОУ-5 – 3шт;
- применением автоматических установок пожарной сигнализации и пожаротушения типа ПКИЛ с извещателями АИП-2;
- применением систем противодымной защиты с датчиками СПД-3.2;
- применением средств коллективной и индивидуальной защиты людей от опасных факторов пожара.

Особые требования предъявляют к устройству и размещению кабельных коммуникаций. Все виды кабелей прокладывают в металлических газовых трубах вплоть до распределительных щитов или стоек питания.

Для спасения людей в случае возгорания применяются противодымовые маски с фильтрами респираторного типа. Огнетушители и защитные маски размещены в легкодоступных и заметных местах. Ручные огнетушители размещены методом навески на вертикальные конструкции на высоте 1,5 м.

В зданиях и сооружениях необходимо предусмотреть технические средства (лестничные клетки, противопожарные стены, лифты, наружные пожарные лестницы, аварийные люки и т. п.), имеющие устойчивость при пожаре и огнестойкость конструкций не менее времени, необходимого для спасения людей при пожаре и расчетного времени тушения пожара.

В организационно-технические мероприятия включены:

- обучение рабочих правилам пожарной безопасности;
- реализацию норм и правил пожарной безопасности, инструкций о соблюдении противопожарного режима и о действиях людей при возникновении пожара;
- мероприятия по действиям администрации на случай возникновения пожара и организации эвакуации людей.

При выполнении всех необходимых мероприятий можно предотвратить возникновение пожара, а также нежелательных последствий.

## **6.5 Мероприятия по обеспечению безопасности в чрезвычайной ситуации**

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на территории или объекте, вызванное аварией, катастрофой, стихийным бедствием или другим опасным событием, которое привело или может привести к гибели людей. Поэтому эвакуация является одним из способов защиты населения в период ЧС.

В связи с тем, что вычислительные центры находятся вблизи других объектов, к которым могут относиться и опасные (АЭС, плотины, базы хранения взрывоопасных и химических веществ), то целесообразно иметь на предприятии средства индивидуальной защиты: средства защиты органов дыхания и средства защиты кожи.

По принципу защиты индивидуальные средства защиты делятся на фильтрующие и изолирующие.

К средствам индивидуальной защиты органов дыхания относятся противогазы и респираторы, а также простейшие средства – противопылевая тканевая маска (ПТМ) и ватно-марлевая повязка (ВМП). Простейшие средства защиты могут быть изготовлены самостоятельно. При отсутствии и этих средств можно воспользоваться тканью, сложенной в несколько слоев, полотенце и т.п.

Взрослое население использует фильтрующие противогазы ГП-5 и ГП-7, предназначенные главным образом для защиты лица, глаз и органов дыхания от отравляющих веществ. Если потребуется, их можно применять и для защиты от радиоактивных веществ и бактериальных средств.

Противогазы ГП-5 и ГП-7 защищают органы дыхания от таких веществ, как хлор, сероводород, соляная кислота, сернистый газ, синильная кислота, тетраэтилсвинец, нитробензол, фенол, фосген, флорэтан. С целью расширения возможностей противогазов введены дополнительные патроны. ДПП-3 в комплекте с противогазом защищают от аммиака, хлора, диметиламина, нитробензола, серо-

водорода, синильной кислоты, фенола, фосгена. ДПГ-1 кроме того защищает от двуокиси азота, метила хлористого, окиси углерода и окиси этилена.

Для защиты органов дыхания от радиоактивной пыли кроме фильтрующих противогазов и изолирующих приборов и противогазов могут быть использованы противопылевые респираторы различных типов.

Противопылевые респираторы – это приборы, предназначенные для защиты органов дыхания от вредных аэрозолей.

Респиратор Р-2 применяется для защиты органов дыхания от радиоактивной, производственной и обычной пыли. Он может быть использован также при действиях в очаге бактериологического поражения для защиты от бактериальных средств, находящихся в воздухе в виде аэрозолей.

Респиратор ШБ-1 "Лепесток" изготовлен из специального материала, обладающего высокими фильтрующими способностями, и предназначен для однократного пользования. Вес его около 10 г. Правильно подогнанный респиратор задерживает до 99,9% пыли.

Противопылевая тканевая маска ПТМ-1 состоит из корпуса и крепления. Корпус делается из четырех-пяти слоев ткани. Для верхнего слоя пригодны бязь, штапельное полотно, трикотаж, для внутренних слоев – фланель, хлопчатобумажная или шерстяная ткань.

Ватно-марлевые повязки, как правило, одноразового пользования. После снятия зараженной повязки ее уничтожают (сжигают или закапывают).

При использовании простейших средств защиты органов дыхания для защиты глаз необходимо надевать противопылевые очки.

Средства защиты кожи наряду с защитой от паров и капель опасных веществ предохраняют открытые участки тела, одежду, обувь и снаряжение от заражения радиоактивными веществами и биологическими средствами. Кроме того, они полностью задерживают альфа-частицы и в значительной мере ослабляют воздействие бета-частиц.

К подручным средствам защиты кожи относятся обычная одежда и обувь. Обычные накидки и плащи из хлорвинила или прорезиненной ткани, пальто из

драпа, грубого сукна или кожи хорошо защищают от радиоактивной пыли и бактериальных средств.

Для защиты ног используют сапоги промышленного и бытового назначения, резиновые боты, галоши, валенки с галошами, обувь из кожи и кожзаменителей.

Для защиты рук можно использовать резиновые или кожаные перчатки и брезентовые рукавицы. При использовании обычной одежды в качестве средства защиты для большей герметизации необходимо застегивать ее на все пуговицы, обшлага рукавов и брюк завязывать тесьмой, воротник поднимать и обвязывать шарфом.

Для более надежной защиты кожных покровов рекомендуется применять упрощенный защитный фильтрующий комплект, который при специальной пропитке может обеспечить защиту и от паров опасных веществ.

Простейшие средства защиты кожи надевают непосредственно перед угрозой поражения радиоактивными, отравляющими веществами или бактериальными средствами. После этого надевают противогаз, поднимают воротник куртки (пиджака) и шарфом завязывают его, надевают капюшон, головной убор, перчатки (рукавицы).

Таким образом, в ходе разработки проекта по обеспечению безопасности рабочего персонала были предусмотрены следующие мероприятия:

- мероприятия по обеспечению безопасности и снижения риска травматизма и вреда жизни и здоровья персонала, а также рассмотрены мероприятия по эвакуации населения при ЧС;
- провести мероприятия по обеспечению электробезопасности;
- использовать спецодежду и обувь согласно ГОСТ 12.4.011-89 «Средства защиты работающих. Общие требования и классификация»;
- обеспечить персоналу необходимую освещённость рабочих мест согласно ДБН В.2.5-28:2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення»;

– создать благоприятные условия работы для персонала, соответствующие физиологическим потребностям человеческого организма, а также санитарные нормы, удовлетворяющие оптимальным метеорологическим условиям в рабочей зоне помещения согласно ДСН 3.3.6-042-99 "Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень";

– обеспечить пожарную безопасность объекта в соответствии с ДСТУ 4297:2004 "Пожежна техніка. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги".

В данном разделе рассмотрены основные требования к охране труда на производстве и приняты меры к их соблюдению.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы была смоделирована зона покрытия сети базовых станций в с. Коларовка (Болгарка) Приморского района Запорожской области.

Были проанализированы методы расчетов и выбран оптимальный для расчетов метод Хата. В ходе работы была разработана надстройка к ГИС-системе, при помощи которой в автоматическом режиме производятся расчеты и наносятся на карту зоны покрытия.

В качестве ГИС-системы была выбрана QGIS 2.18.26 как свободная кроссплатформенная геоинформационная система.

Разработанная система подходит для расчетов как для маленьких сел, так и для городов и пригородов, т.к. в модели Хата предусмотрены необходимые формулы для расчетов.

В организационно-экономическом разделе определен размер капитальных вложений, срок окупаемости составил 1,6 года

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Попов В.И., Основы сотовой связи стандарта GSM. / В.И. Попов М.: Эко – Трендз, 2005, – 296 с.
2. Попов В.И. “Антенны базовых станций в сотовых сетях мобильной связи. Современное состояние и перспективы развития,” / В.И. Попов, В.А. Скуднов, А.С. Васильев. Евразийский Союз Ученых (ЕСУ), №11 (20), часть 3, 2015, – С. 138.
3. Весоловский К., Системы подвижной радиосвязи. / М: Горячая линия – Телеком, 2006, – 536 с.
4. Шабунин С.Н. Распространение радиоволн в мобильной связи. Методические указания по курсу “Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства в системах мобильной связи”. / С.Н. Шабунин, Л.Л. Лесная, Екатеринбург: УГТУ, 2000, – 38 с.
5. Попов В.И., Распространение радиоволн в лесах. / В.И. Попов. Москва: Горячая линия – Телеком, 2015, – 392 с.
6. Ли У. Техника подвижных систем связи / У. Ли. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 392 с.
7. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / Под ред. У.К. Джейкса. – М.: Связь, 1979. – 520 с.
8. Бабков В.Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование / В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, П.А. Михайлов Учебное пособие для ВУЗов. – Изд. 2–е исправленное. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 224 с
9. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами / Э.А. Сукачев Учеб. пособие. – Изд. 2–е, испр. и доп. – Одесса: УГАС, 2000. – 119 с.
10. Маковеева М.М. Системы связи с подвижными объектами./ М.М. Маковеева, Ю.С. Шинаков М.: Радио и Связь, 2002.
11. Модели и методы расчета абонентской нагрузки в сотовых сетях И.Р. Гершман [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://telecomproject.tripod.com/nagr.htm>

12. Тараненко Ю.А. Проектирование цифровой сети технологической радиосвязи / Ю.А. Тараненко Автоматика Связь Информатика, 2008. №12. – С. 28-29
13. Структурно-функциональное построение систем GSM. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://alex-bor2006.narod.ru/gsm/3\\_struk.htm](http://alex-bor2006.narod.ru/gsm/3_struk.htm)
14. Кшиштоф В. Системы подвижной радиосвязи. / В. Кшиштоф М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 536 с.
15. Печаткин А.В. Системы мобильной связи (часть 1). / А.В. Печаткин Рыбинск: РГАТА, 2008. – 122 с.