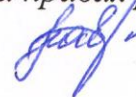


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**Павловская Ксения Александровна**

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ 5G НА ОСНОВЕ  
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (по отраслям) (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Яремко И. Н.



Идентичность всех экземпляров  
ПОДТВЕРЖДАЮ  
Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 01.024.04  
кандидат технических наук, доцент



Т.В. Завадская

Донецк – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ.....	11
1.1 Обзор стандартов сотовой связи, анализ и требования к ним .....	12
1.1.1 Обзор стандарта 2G и 3G .....	12
1.1.2 Обзор стандарта 4G .....	17
1.2 Этапы развития, особенности работы, основные требования к сетям стандарта 5G .....	22
1.2.1 Необходимость развития сетей нового поколения .....	22
1.2.2 Технические требования к сетям 5G .....	23
1.3 Анализ недостатков архитектурных решений систем сотовой связи и постановка задачи исследования .....	27
1.4 Этапы создания сети широкополосного доступа, постановка задачи исследования .....	29
1.5 Выводы по разделу .....	31
РАЗДЕЛ 2 АНАЛИЗ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ .....	33
2.1 Методы территориального планирования сетей мобильной сотовой связи .....	33
2.1.1 Метод изменения зоны работы базовой станции .....	38
2.1.2 Метод изменения формы зоны покрытия базовых станций .....	41
2.1.3 Метод управления радиочастотным ресурсом сети сотовой связи....	43
2.1.4 Метод кластерного территориального планирования сети мобильной связи .....	45
2.2 Модели прогноза зон покрытия сетей сотовой связи .....	51
2.2.1 Модель распространения сигналов Ли .....	52
2.2.2 Модель Окамуры .....	54
2.2.3 Модель Хата .....	58
2.2.4 Модель распространения сигналов Уолфиша-Икегам .....	59

2.2.5 Модель канального распространения сигналов SUI .....	62
2.3 Метод расстановки базовых станций сетей пятого поколения .....	67
2.4 Усовершенствование метода территориального планирования на базе модели SUI .....	71
2.5 Выводы по разделу .....	74
<b>РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СЕТЕЙ 5G С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА QoS МЕТОДОМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ .....</b>	<b>76</b>
3.1 Постановка задачи для обеспечения оптимальных показателей качества в сетях 5G .....	77
3.2 Определение множества возможных вариантов расположения базовых станций для сетей мобильной связи 5G .....	82
3.3 Способы решения задач размещения базовых станций сетей 5G .....	86
3.3.1 Метод полного перебора .....	89
3.3.2 Метод ветвей и границ .....	89
3.3.3 Метод ветвей и отсечений .....	92
3.3.4 Метод поиска по соседству .....	95
3.4 Выводы по разделу .....	99
<b>РАЗДЕЛ 4 РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СЕТЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ .....</b>	<b>101</b>
4.1 Особенности генетического алгоритма для решения оптимизационных задач .....	101
4.2 Программная реализация оптимальной расстановки базовых станций для сетей пятого поколения .....	107
4.3 Исследование полученных результатов на основе созданного программного обеспечения .....	110
4.4 Выводы по разделу .....	117
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>118</b>
<b>ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>120</b>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	122
Приложение А Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.....	129

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Концепция технологии сотовой связи 5G предполагает предоставление телекоммуникационных услуг разного типа. К ним относятся как голосовые услуги, так и приложения типа машина–машина M2M на скоростях передачи данных до 10 Гбит/с. Реализация такой концепции возможна за счет внедрения следующих технологических решений:

- применение массивных MIMO (Multiple Input Multiple Output),
- осуществление логического сегментирования сети (Networkslicing),
- переход на новые диапазоны свыше 3,5 ГГц.

Все вышеперечисленное вызвало определенные трудности для планирования и оптимизации мест расположений базовых станций. Основным критерием для принятия решений является обеспечение требуемых параметров качества обслуживания QoS (Quality of Service). Анализ существующих методов планирования и оптимизации мест расположения базовых станций показал, что они не позволяют полностью реализовать потенциал, заложенный в концепцию технологии сотовой связи 5G. А именно, математические модели, описывающие основные параметры территориального планирования, учитывают до двух критериев для принятия решения, при этом выбор самих критериев зависит только от субъективного мнения разработчика.

Таким образом, повышение качества связи вследствие определения точного расположения базовых станций систем сотовой связи 5G на основе многокритериальной оптимизации, за счет разработки метода территориального планирования, является актуальной задачей, имеющей большое значение для операторов сотовой связи.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемам планирования и оптимизации мест расположений базовых станций систем сотовой связи посвящено большое количество научных работ: как отечественных ученых Бойко М.П., Тихвинского В.О., Теренетьева С.В., Вишневого В.М., Портного С.Л., Шахновича И.В., так и зарубежных Murphy S., Amaldi E., Capone A., Siomina I.,

Yuan D., Beasley J., Okumura Y. Предметом рассмотрения в данных работах является методы планирования, основанные на использовании эмпирических моделей процесса распространения радиоволн для оценки дальности связи. К недостаткам этих моделей можно отнести погрешности, вносимые за счет игнорирования определенных факторов окружающей среды (атмосферные газы, климатические явления), которые существенно влияют на работу мобильных устройств в диапазонах, используемых как для LTE (Long Term Evolution), так и для 5G.

В отечественной литературе планированию сетей сотовой связи 5G посвящены работы по выбору их оптимальной архитектуры с учетом показателей качества обслуживания. Детальный анализ показал, что они не учитывают неоднородность и интеграцию различных технологических решений сетей сотовой связи 5G. Таким образом, методы однокритериальной оптимизации являются некорректными в этом случае.

На основании вышеприведенного можно сказать, что в результате использования существующих методов для планирования сетей сотовой связи 5G могут возникнуть дополнительные, не учтенные обрывы связи, приводящие к потерям абонентского состава.

**Цель и задачи исследований.** Целью работы является повышение эффективности работы сотовых сетей связи 5G путем обоснования метода территориального планирования с использованием комплексного многокритериального анализа, позволяющего определить точное месторасположение базовых станций.

**Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:**

1. Провести анализ существующих моделей и методов территориального планирования систем сотовой связи.
2. Разработать критерии оценки эффективности решения оптимизационной задачи для целей планирования мест расположения базовых станций сотовых сетей 5G.

3. Разработать метод определения мест расположения базовых станций сотовых сетей 5G с оптимальными показателями качества QoS.

4. Оценить эффективность и разработать рекомендации по практическому использованию предложенных в диссертации решений.

**Объект исследования.** Объектом исследования является процесс распространения сигнала в сотовых сетях широкополосного доступа.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются методы и методики территориального планирования сотовых сетей широкополосного доступа.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые обоснованы требования к модифицированной постановке задачи оптимального расположения базовых станций, учитывающей модель распространения сигналов в радиоканале для сетей стандарта 5G.

2. Получил дальнейшее развитие метод многокритериальной оптимизации для сетей сотовой связи.

3. Обоснована модель размещения базовых станций для сетей стандарта 5G на базе генетического подхода.

#### **Теоретическая значимость работы.**

Теоретическая значимость результатов работы заключается в раскрытии особенностей территориального планирования сетей сотовой связи, их использования для повышения эффективности работы сотовых сетей 5G и обосновании модели размещения базовых станции для сетей стандарта 5G на основе генетического подхода.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»: ГТ № Н-3-11 «Исследование и разработка методов проектирования и повышения технической эффективности цифровых систем управления, информационно-измерительных систем и телекоммуникаций»: ГТ № Н-9-16 «Разработка системы автоматического управления очередью пограничного маршрутизатора в инфокоммуникационных системах».

### **Практическая значимость работы.**

1) Разработаны критерии оценки эффективности решения оптимизационной задачи для целей планирования мест расположения базовых станций сотовых сетей 5G.

2) Разработан метод определения мест расположения базовых станций сотовых сетей 5G с оптимальными показателями качества QoS.

3) Предложена программная реализация, обеспечивающая решение задач размещения базовых станций различной размерности, позволяющая определить конфигурацию сети и рассчитать суммарную стоимость построения такой сети, учитывая критерии показателей качества.

Полученные результаты могут быть использованы научно-исследовательскими, проектными организациями, телекоммуникационными компаниями при проектировании и внедрении сетей стандарта 5G. Практическая реализация результатов работы подтверждается справкой о внедрении в учебный процесс ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (справка № 30-12/107 от 09.06.2020 об использовании в учебном процессе при проведении лабораторных занятий по дисциплине «Общая теория связи», «Системы и сети радиосвязи» по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», справкой о внедрении в ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ОПЕРАТОР СВЯЗИ» (ГП «РОС»).

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы, основанные на положениях общей теории связи, теории распространения сигналов, методы оптимизации и математического моделирования.

### **Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Установлено, что введение в целевую функцию дополнительного коэффициента  $g_{km}$ , учитывающего потери сигналов в радиоканале между антеннами базовой и абонентских станций, обеспечивает учет большого числа параметров, влияющих на распространение сигналов в радиоканале.



2. Показано, что метод многокритериальной оптимизации для сетей пятого поколения, учитывающий основные показатели качеств (QoS), позволяет рационализировать расстановку базовых станций в сетях 5G.

3. Установлено, что предложенная процедура расположения базовых станций, позволяет визуализировать получаемые результаты и существенно сократить затраты времени на планирование или адаптацию сотовой сети.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью формулировки математического описания задачи и результатами математического моделирования при решении поставленных задач в компьютерной среде с применением специализированного программного обеспечения.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) в частности: п.1. «Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п.3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем».

Основные положения диссертационной работы апробированы на научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция «Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения», г. Севастополь, 11-15 сентября 2017 г.; II Республиканская с международным участием научно-практическая конференция «Информационное пространство Донбасса: проблемы и перспективы», г. Донецк, 31 октября 2019 г.; XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Информационные

технологии, системный анализ и управление» (ИТСАУ-2019), г. Таганрог, 05-07 декабря 2019г.

**Личный вклад соискателя.** Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, цели и задач работы, в выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы, а также их внедрению в производство.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 8 научных работах, в том числе: 5 работ в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный МОН ДНР; 3 – по материалам конференций.

**Структура и объем диссертации.** работа содержит 130 страниц машинописного текста и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 83 источников на 9 страницах и 1 приложения на 2 страницах. Основной текст, изложенный на 109 страницах, иллюстрируется 32 рисунками и содержит 7 таблиц.

## РАЗДЕЛ 1

### АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ

В связи с ростом количества пользователей систем мобильной связи, актуальным является вопрос решения задач повышения качества услуг при проектировании сетей сотовой связи. При решении задач такого рода применяются различные методы оценки показателей качества, надежности и работоспособности структур сетей мобильной связи. Эти методы включают анализ используемого оборудования, топологию сети и влияния внешних факторов.

Развитие телекоммуникационного оборудования и построение на его основе современных сетей связи влечет за собой усложнение процесса планирования и увеличение материальных затрат на создание новых сетей. В связи с этим вопросы планирования и построения сетей мобильной связи нового поколения различной сложности приобретают актуальность и особую значимость. Планирование сетей должно происходить в четкой последовательности как на уровне принятия организационно-технических решений по выбору архитектуры, топологии, структуры, базовых технологий, так и при выборе аппаратуры на основе определенных технических требований.

Основное требование к сетям мобильной связи, состоит в способности их выполнять функции по обеспечению пользователей потенциальной возможностью использовать все доступные услуги этой сети, при обеспечении требуемых показателей качества QoS.

Наиболее используемая классификация сети связи является классификация по размеру. При ее применении в качестве критерия используется территориальная принадлежность, которая определяется размером площади, на которой расположены входящие в сеть базовые станции. Построение территориально-распределенных сетей требует больших затрат, основная часть которых составляет стоимость каналобразующего оборудования и работы по его прокладке, стоимость коммутационного оборудования, а также эксплуатационные затраты,

связанные с поддержанием в работоспособном состоянии территориально распределенной каналообразующей аппаратуры сети.

Для снижения стоимости сетей мобильной связи на этапе их проектирования актуальными являются задачи проектирования оптимальных структур сетей сотовой мобильной связи. Основными проблемами при проектировании качественных сетей связи, являются большое количество задач таких как, построение архитектуры, подбор оборудования и выбор топологии сетей передачи данных. Усложнение и рост размерности телекоммуникационных сетей, увеличение нагрузки на них в связи с повышением объема передаваемого трафика, требует особого внимания к качеству процесса проектирования для создания сети с оптимальной топологией.

## 1.1 Обзор стандартов сотовой связи, анализ и требования к ним.

### 1.1.1 Обзор стандартов 2G и 3G

#### Стандарт 2G

Стандарт сотовой связи второго поколения (2G) нашел широкое применение во всех странах мира. Один из самых распространенных стандартов 2G – стандарт GSM (Global System for Mobile Communications – Глобальная система мобильной связи).

Можно выделить следующие основные услуги, которые предоставляются пользователям в сетях 2G [10]:

- голосовые соединения;
- услуги передачи данных (до 384 кбит/с технологии EDGE);
- передача текстовых сообщений (sms);
- возможность переадресации входящих звонков на другой телефонный номер;
- запрет вызова (Call barring), услуга позволяющая запретить входящие (исходящие) вызовы на выбранные пользователем телефонные номера;
- удержание вызова (Call Holding), позволяет, не прерывая связь с одним абонентом, позвонить (или ответить на входящий звонок) другому абоненту;

- автоматический международный роуминг (Global roaming).

Рассмотрим структуру сети GSM, которая представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Структура сети GSM

Сеть GSM состоит из двух систем, включающих в себя функциональные устройства, которые являются составляющими сети мобильной радиосвязи [52].

Данными системами являются:

- система коммутации – Network Switching System (NSS);
- система базовых станций – Base Station System (BSS).

Система коммутации использует функции обслуживания вызовов, создания соединений и обеспечивает реализацию всех услуг, предлагаемых (выбранных) абоненту. Для успешной работы система должна включать в себя следующие устройства:

- центр коммутации мобильной связи (MSC);
- домашний регистр местоположения (HLR);
- визитный регистр местоположения (VLR);
- центр аутентификации (AUC);
- регистр идентификации абонентского оборудования (EIR).

Система базовых станций выполняют функции, использующие архитектуру радиointерфейса. В эту систему входят следующие функциональные блоки:

- контроллер базовых станций (BSC);
- базовые станции (BTS).

Телефон абонента (MS) не входит ни в одну из описанных систем, но при этом рассматривается как элемент сети.

Однако, значительный рост спроса на беспроводный широкополосный доступ, привел к тому, что МСЭ занялось разработкой нового стандарта связи 3G, который пользуется большой популярностью в наши дни во многих странах мира.

Коммерческая эксплуатация мобильной связи с использованием стандарта третьего поколения (3G) впервые была начата в 2001 году. Этот стандарт пришел на смену стандарту 2G. Замена стандарта 2G на 3G была вызвана возросшими потребностями абонентов в скорости передачи данных и качестве предоставляемых услуг мобильной связи. В сети 3G передача данных в пакетном режиме обеспечивается в пределах покрытия сети 3G по стандарту UMTS (WCDMA). Стандарт UMTS (Universal Mobile Telecommunications System – Универсальная система мобильной связи) стал одним из самых используемых стандартов на территории Европы и стран СНГ, а во всем мире по данным на май 2010 года число абонентов составляло порядка 530 миллионов [53, 82].

Использование стандарта UMTS при модернизации сетей мобильной связи дает возможность предоставить абонентам широкий перечень услуг:

- видеозвонки, видеоконференции с устойчивой связью;
- голосовые звонки с высоким качеством связи;
- загрузка аудио и видеофайлов с высокой скоростью;
- сетевые игры и интернет-магазины.

Данная технология позволяет поддерживать реальную скорость передачи информации для мобильного абонента порядка 2 Мбит/с. При введении в 2006 году технологии HSDPA (3.5 G) максимальная скорость передачи данных возросла до 14 Мбит/с.

При сравнении сети UMTS с сетью GSM можно заметить, что наибольшие изменения возникают при создании подсистем базовых станций. В первую очередь преимущества, отмеченные выше, достигаются за счет новых технологий передачи информации между базовыми станциями и телефоном абонента.

На рисунке 1.2 представлена структура системы UMTS.



Рисунок 1.2 – Структура сети UMTS

В первых версиях стандарта UMTS (R99, R4) система коммутации по своей структуре не отличалась от системы коммутации сетей 2G [69]. В ее состав входили:

- коммутации мобильной связи (MSC), выполняющие функции коммутации, создания и тарификации соединения и др.;
- домашний регистр местоположения (HLR);
- визитный регистр местоположения (VLR);
- центр аутентификации (AUC), предназначенный для хранения абонентских данных.

В последующих версиях (R5, R6, R7, R8) функции MSC были разделены между двумя устройствами: MSC-Server и MGW (Mediagateway). MSC-Server отвечает за установление соединений и тарификацию, а также выполняет определенные функции аутентификации. MGW является коммутационным полем, которое подчинено MSC-Server.

По сравнению с сетью GSM система базовых станций в сети UMTS потерпела значительных изменений. Новая технология передачи информации между базовой станцией и телефоном абонента, используемая в сети 3G, дает существенное преимущество перед системами связи ранних поколений.

Рассмотрим основные элементы подсистемы базовых станций сети UMTS.

Центральным элементом подсистемы базовых станций является контроллер сети радиодоступа системы UMTS – RNC (Radio Network Controller). Контроллер выполняет большую часть функций: контроль радиоресурсов, шифрование, установление соединений через подсистему базовых станций, распределение ресурсов между абонентами и др. Контроллер имеет большие функциональные возможности в сети UMTS по сравнению с системами сотовой связи второго поколения.

Базовая станция системы сотовой связи стандарта UMTS (NodeB). Основной функцией базовой станции является преобразование сигнала, полученного от контроллера сети радиодоступа, в широкополосный радиосигнал, передаваемый абонентской станцией. Базовая станция полностью подчинена RNC, в ее функции не входит принятие решений о выделении ресурсов, изменении скорости обслуживания абонента. Станция служит связующим звеном между контроллером и абонентской станцией и ее оборудованием.

Абонентская станция или устройство абонента UE (User Equipment). В отличие от предшествующих стандартов в UMTS, абонентом может быть не только мобильный телефон, но и смартфон, ноутбук, стационарный компьютер.

Однако, с ростом количества абонентов и абонентского трафика, требования к показателям качества опять значительно выросли, возникла необходимость обеспечивать более высокую пропускную способность, сократить временную



задержку на радиointерфейсе, что привело к тому, что была разработана и стандартизирована технология сети 4G.

### 1.1.2 Обзор стандарта 4G

Сети 4G на основе стандарта LTE работают на всех существующих диапазонах частот, которые выделены для сотовой связи. Следует отметить, что для каждого континента выделен свой диапазон частот.

Теоретическая скорость скачивания в стандарте 3GPP LTE составляет 326,4 Мбит/с (прием) и 172,8 Мбит/с (отдача). Но на практике скорость передачи данных от базовой станции к мобильному устройству абонента составляет до 100 Мбит/с и скорость от абонента до базовой станции до 50 Мбит/с.

На рисунке 1.3 представлена структурная схема сети LTE. На ней видны существенные отличия структуры новой сети от структур сетей прошлых стандартов. Основные изменения произошли не только в системе расстановки базовых станций, а и в устройствах и принципах коммутации. Изменения затронули технологию обмена данных между абонентскими устройствами и базовой станцией [47, 66], и как следствие, возникла необходимость создание новых протоколов передачи данных между сетевыми элементами. В LTE используется пакетный способ передачи информация (голосовая связь, данные). В результате принятых изменений не происходит разделения на устройства, обрабатывающие только голосовую информацию и устройства, принимающие только пакетные данные.

Основными составляющими сети LTE являются два компонента [48, 67]:

- сеть радиодоступа E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network);
- базовая сеть SAE (System Architecture Evolution) или EPC (Evolved Packet Core Network).

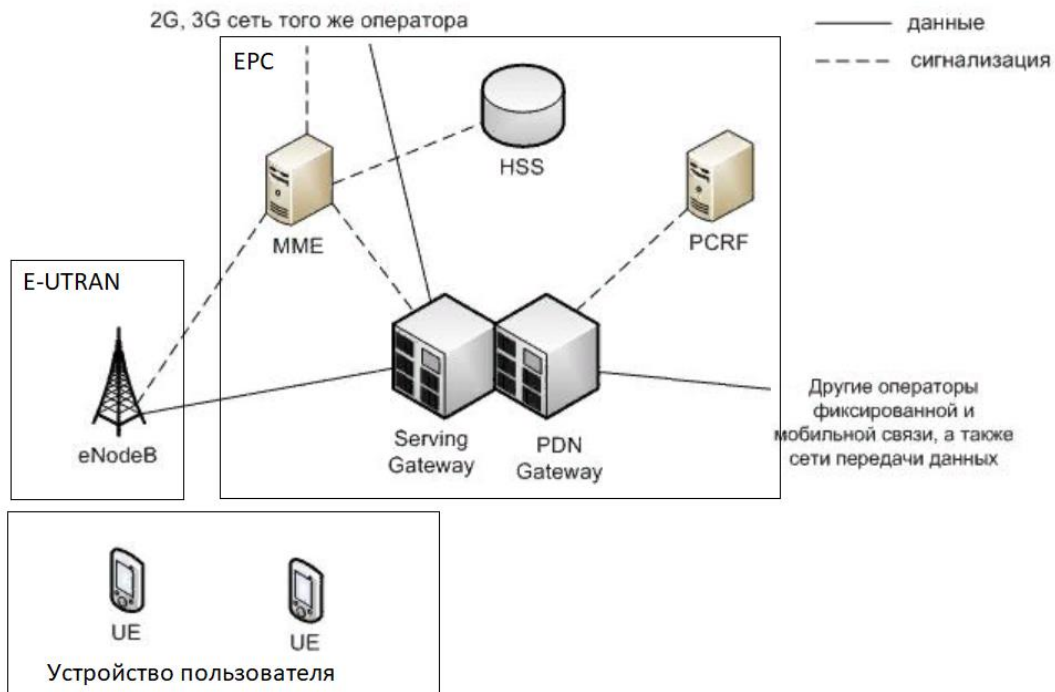


Рисунок 1.3 – Структура сети LTE

Рассмотрим основные элементы сети стандарта сети 4G. Обслуживающий шлюз сети LTE Serving Gateway (SGW) используется для обработки и маршрутизации пакетных данных, поступающих из или в подсистему базовых станций. Применение SGW позволило заменить центр коммутации мобильной связи, коммутационное поле и центр обработки пакетной информации сети UMTS. Обслуживающий шлюз получил возможность устанавливать соединение с сетями второго и третьего поколений одного оператора, это во многом упростило функцию обмена передачи данных между сетями разных поколений в обоих направлениях в условиях ухудшения зоны покрытия, увеличения трафика.

При работе определенного оператора сети LTE с сетями других операторов используется входной-выходной шлюз PDN Gateway (PGW). При передаче информация (голос, данные) других операторов из/в сети данного оператора маршрутизация происходит через шлюз PGW.

Узел управления мобильностью Mobility Management Entity (MME) отвечает за управление мобильностью абонентов сети LTE и позволяет поддерживать качественную связь при перемещении абонентов в зонах деятельности различных

базовых станций.

Сервер абонентских данных сети 4G HSS представляет собой устройство, в котором объединены следующие интерфейсы сети GSM: визитный регистр местоположения (VLR), база данных, которая содержит информацию об абонентах сети (HLR), центр аутентификации сети (AUC) [45, 46, 54].

Узел учета времени Policy and Charging Rules Function (PCRF) выполняет функцию учета времени соединения абонентов с базовой станцией, а также является устройством определения стоимости услуг мобильной связи.

Все рассмотренные выше элементы сети LTE относятся к системе коммутации, они разрабатывались с учетом недостатков ранних поколений мобильной связи. Единственный элемент заимствованный из ранних стандартов и оставшийся без изменений – это базовая станция eNodeB. eNodeB отвечает за покрытие сети LTE, выполняет функции базовой станции и является шлюзом между абонентской станцией и базовой станцией, выполняет функции контроллера базовых станций сети LTE. Использование функции контроллера позволяет расширять сеть без увеличения емкости контроллера. Покрытие сети доступа легко масштабируемы, что упрощает расширение сети.

Основным преимуществом такой структуры по сравнению с UMTS является малые задержки при передаче данных.

К сетям LTE предъявляются следующие основные требования [55]:

1. Максимальная скорость передачи данных.

Максимальная скорость передачи данных – это максимальная (пиковая) скорость передачи данных, которая поддерживается, исходя из системных требований, данная характеристика не зависит от параметров радиоинтерфейса, ширины канала и конфигурации антенны. Максимальная скорость передачи данных систем связи 4G LTE обеспечивается от 100 Мбит/с для пользователей с высокой скоростью передвижения (от 10 км/ч до 120 км/ч) и от 1 Гбит/с для пользователей с низкой скоростью (до 10 км/ч).

2. Задержка.

Общая задержка передачи трафика сигнализации включает в себя время передачи по радиointерфейсу (RAN) и опорной сети (базовой сети) при низкой нагрузке. Ориентировочное время, необходимое для перехода абонента от неактивной мобильной станции к активной станции, должно быть менее 50 мс. Время переключения базовой станции, при переходе абонента в зону ее работы, в активное состояние из состояния ожидания должно составлять менее 10 мс.

Без использования режима энергосбережения (DRX) система должна поддерживать до 300 активных пользователей с шириной канала 5 МГц. При использовании режима энергосбережения система должна поддерживать одинаковое количество соединений RRC (радиоресурсный канал) – 16000.

При передаче данных пользователем, задержки должны быть значительно меньше, чем в 3G UMTS, особенно в тех случаях, когда для абонентской станции еще не был выделен диапазон для передачи данных, а также, когда абонентской станции необходимо синхронизироваться и получить ресурс для передачи данных.

### 3. Максимальная спектральная эффективность.

Максимальная спектральная эффективность – это максимальная скорость передачи данных (имеется в виду, что передача данных проходит достоверно, без искажений и потерь), приведенная к ширине канала всего сектора, при условии использования всех доступных ресурсов одной мобильной станции. Теоретические значения для максимальной спектральной эффективности для нисходящей линии связи 30 бит/с/Гц и для восходящей линии связи 14 бит/с/Гц.

### 4. Мобильность.

Система должна обеспечивать стабильную работу с абонентами, которые могут двигаться со скоростью от 350 км/ч до 500 км/ч, при этом для обеспечения этого параметра возможно использование различных частот, в зависимости от скорости абонента. В сетях LTE увеличена производительность работы системы при условии, что абоненты двигаются со скоростью до 10 км/ч. В остальных случаях, для мобильных пользователей, движущихся на более высоких скоростях, производительность системы поддерживается на уровне требований 3G UMTS.

### 5. Хэндовер.

Время смены одной обслуживающей базовой станции на другую (прерывания на хэндовер) определяется как отрезок времени, в течение которого абонентская станция не может производить обмен данными с какой-либо другой базовой станцией.

При определении требований к хэндоверу предполагается, что вся необходимая информация о целевой базовой станции, к которой будет подключена абонентская станция известна во время начала хэндовера. Требования к времени выполнения перехода зависят от его типа хэндовера: внутри одной и той же полосы частот оно составляет 40 мс., между разными полосами частот – 60 мс.

#### 6. Частотные диапазоны.

К частотным диапазонам, которые были использованы в сетях мобильной связи предыдущих поколений, добавляются следующие диапазоны частот: 450–470 МГц; 698–862 МГц; 790–862 МГц; 2.3–2.4 ГГц; 3.4–4.2 ГГц; 4.4–4.99 ГГц.

Таким образом, в подразделе 1.1. был проведен анализ существующих систем связи последнего десятилетия 3G UMTS и 4G LTE, рассмотрена их архитектура, основные элементы сети и требования к ним.

## 1.2 Этапы развития, особенности работы, основные требования к сетям стандарта 5G

### 1.2.1 Необходимость развития сетей нового поколения.

Стремительное развитие систем сотовой связи в последние десятилетия значительно расширило возможности доступа к сети Интернет, что повлекло за собой необходимость решения целого ряда исследовательских задач.

В то время как существующие технологии системы сотовой связи получали все более широкое практическое применение, исследовательское сообщество не прекращало усовершенствовать эти технологии и разрабатывать новые. В связи растущим в геометрической прогрессии количеством пользователей сотовой связи было принято решение по разработке нового стандарта сетей под названием 5G (пятое поколение).

В начале разработки этого стандарта возникли трудности с определением того, чем стандарт пятого поколения должен отличаться от технологии 4G, поэтому было принято решение разработать технические требования к новому поколению сетей, исходя из требований конечных пользователей. Пользователи сотовой связи нуждаются в надежном, быстром, беспроводном подключении, способном передавать большие объемы информации независимо от местоположения абонента.

Можно сделать вывод, что создание сети базовых станций, обеспечивающих беспроводное покрытие и, которая обеспечивала бы требуемое качество обслуживания абонентов, является одной из главных задач, при разработке систем 5G. С каждым днем возрастает популярность интернета вещей (IoT), множество различных устройств подключены к сотовым системам доступа, это изменило привычное использование сети Интернет. Для применения IoT технологий необходимы высокая скорость передачи данных, малые задержки [29]. Сети 4G не удовлетворяют новым требованиям, их недостатками является нестабильность в скорости передачи данных, слишком большие временные задержки, необоснованно частые отказы в соединении из-за низкого качества беспроводного соединения и повышенного уровня интерференции. В результате проведенного анализа, существующие радиотехнологии были признаны неспособными для удовлетворения целевых требований, и стал вопрос о проведении активных разработок и поиска новых решений [44].

При разработке сети 5G используют перспективную архитектуру системы беспроводного доступа, основанную на использовании различных малых сот и предназначенную для удовлетворения новых требований по трафику, качеству обслуживания и покрытия сети. На рисунке 1.4 изображены особенности перспективных гетерогенных сетей 5G.

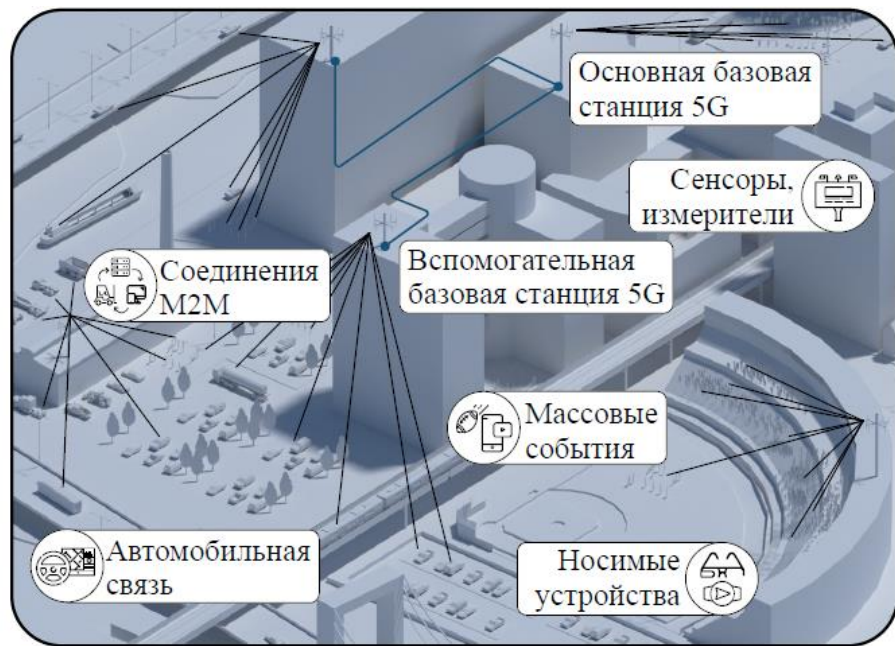


Рисунок 1.4 – Особенности развития сетей 5G.

Создаваемые неоднородные многослойные покрытия предполагают размещение базового слоя макросот с дополнительными слоями более плотно расположенных сот меньшего размера. При такой конфигурации сети базовая станция макросети обеспечивает устойчивое сетевое подключение и уверенную поддержку мобильности абонентов на больших площадях. В тоже время малобюджетные малые соты применяются для повышения качества и увеличения емкости сотового покрытия. В рамках такой иерархической неоднородной структуры мобильные устройства с функцией установки прямого соединения, могут также рассматриваться в качестве одного из слоев [66, с.34].

### 1.2.2 Технические требования к сетям 5G

Технологии широкополосной связи активно используются в повседневной жизни современного общества. Сети нового поколения должны решать следующие задачи:

1. поддержка высоких скоростей передачи данных;
2. подключение достаточно большого числа различных абонентских устройств;

3. обеспечение более высокого, по сравнению с имеющимися системами сотовой связи, качества различных услуг связи;

4. повышение экономической доступности и снижение эксплуатационных расходов [56, 80].

В сетях 5G необходимо усовершенствовать всю работу системы, повысить эффективность использования радиоспектра и механизмов физического уровня для поддержки программного обеспечения и гибкого управления сетью.

Необходимо отметить, что сети 5G переназначены не только для обслуживания пользователей (людей), но они должны обеспечивать поддержку M2M (межмашинное взаимодействие). Следовательно, к сетям будут предъявляться более жесткие требования по задержке, надежности, масштабируемости, доступности и энергетической эффективности связи для работы с приложениями M2M.

Учитывая все поставленные задачи необходимо выделить следующие требования к 5G:

- максимальная скорость передачи данных — до 20 Гбит/с;
- сверхнизкая задержка передачи данных (latency) — не более 1 мс;
- мобильность абонента – до 500км/ч;
- поддержка большого количества абонентских устройств — до 1 млн. на 1 кв. км;
- распределение между разными услугами необходимого частотного ресурса;
- обеспечение надежной защиты передаваемых данных;
- низкое энергопотребление;
- бесперебойная работа.

На рисунке 1.5 изображена существенная разница в требованиях для сетей 5G и 4G.



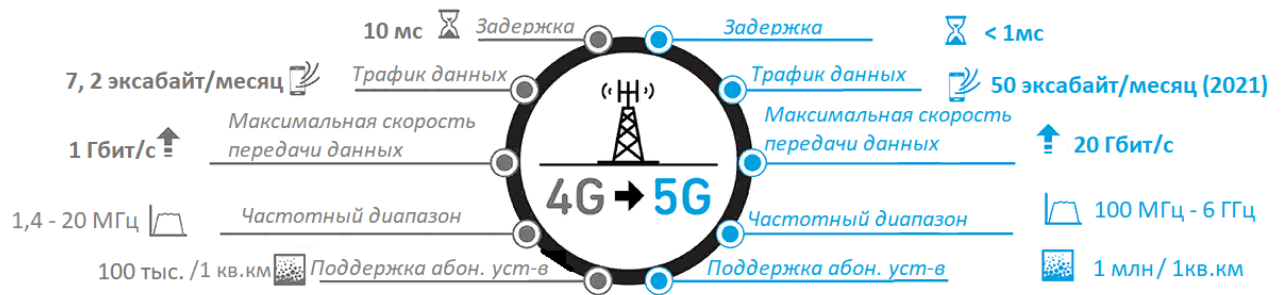


Рисунок 1.5 – Требования к сетям 4G и 5G

Проанализировав требования к сетям 5G можно выделить 3 основных класса услуг [1, 78,79]:

1. Расширенный мобильный широкополосный доступ (Рисунок 1.6). Мобильный широкополосный доступ направлен на обслуживание абонентов, пользующихся различными мультимедиа приложениями, услугами, обрабатывающими большие объемы данных. Для поддержки этих возрастающих видов сервисов требуется обеспечение расширенных сетевых возможностей, как следствие возникает возможность функционирования новых пользовательских приложений с повышенными требованиями к производительности, с более высоким качеством услуг. Существует большое количество сценариев расширения сетевых возможностей. Они включают в себя как создание устойчивой сети на обширной территории, так и организацию доступа в отдельных локациях, имеющих различные характеристики. Для зон покрытия, в которых наблюдается высокая плотность размещения абонентов, важно обеспечить достаточно высокую емкость сети и скорость передачи данных пользователем, в таких зонах требования по поддержке мобильности, как правило, являются не такими жесткими, как в случае покрытия обширной области. Для больших зон покрытия необходимо обеспечивать непрерывное соединение, и в том случае если абонент перемещается с высокой скоростью.

2. Массовое межмашинное взаимодействие. Для данного класса услуг характерно большое число подключенных устройств, которым важно получение

достоверной информации в условиях некритичной задержке передачи данных при передаче сравнительно небольших объемов информации.

3. Надежное взаимодействие с низкой задержкой. К этому классу предъявляются строгие требования по показателям работы системы, к ним относятся: пропускная способность, задержка передачи данных и доступность беспроводного соединения.



Рисунок 1.6 – Множество возможностей сетей 5G

Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что в сетях 5G предполагается использовать различные устройства, подключаемые посредством мобильной связи, которые получат возможность взаимодействовать друг с другом, используя различные технологий радиодоступа. К таким устройствам можно отнести те, которые работают на более высоких частотах и с более широкой полосой пропускания.

### 1.3 Анализ недостатков архитектурных решений систем сотовой связи и постановка задачи исследования.

Вследствие анализа уже реализованных и широко используемых проектов эффективности функционирования существующих сетей сотовой связи (подраздел 1.2), можно сделать вывод, что данные сети находятся на достаточно низком уровне. Для реализации систем сотовой связи нового поколения необходимо провести оценку проблемных мест существующих сетей, а именно, проанализировать недостатки подсистемы базовых станций (БС) и транспортных сегментов сотовых сетей [34].

Недостатки базовых станций можно разделить на следующие категории:

- проблемы эксплуатации и монтажа;
- технические проблемы БС;
- экономические проблемы, связанные с эксплуатацией БС.

Первоочередной проблемой при монтаже базовых станций для нового поколения связи является местоположение антенн станций нового поколения. На башнях и мачтах мобильных операторов уже расположены антенны для обслуживания предыдущих поколений связи 2G, как правило они располагаются в 2 ряда. На верхнем антенны стандарта GSM-900, на нижнем - стандарта GSM-1800. При монтаже антенн стандарта 3G UMTS и 4G LTE на существующих башнях или мачтах возникает необходимость устанавливать их под существующими антеннами.

Ввиду этого оператор сталкивается с целым рядом проблем увеличения нагрузки на опору. В лучшем случае необходимо уменьшить высоту антенны, что приводит к уменьшению радиуса покрытия, в худшем случае вообще невозможно установить антенну на существующую опору из-за ограниченных возможностей конструкции, тогда необходимо либо строить новую опору или укреплять существующую, что влечет за собой немалые денежные затраты.

Второй проблемой является необходимость возводить антенно-фидерный тракт от радиомодуля к антеннам и строить фидерные трассы при подключении

«feederline» или же монтировать радиомодули на опоре при подключении «feederless». Решение этих проблем значительно увеличивает нагрузку на опору, что приводит к негативным последствиям [35, 36].

Третьей проблемой являются большие габариты и вес оборудования базовых станций. Из-за этого часто возникают сложности при необходимости расширения оборудования.

Финансовые проблемы. При монтаже новых антенн на арендованных (частных) сооружениях необходимо платить арендную плату за место, где располагается антенна.

Как было упомянуто выше, при невозможности установить антенны на существующих опорах возникает необходимость укреплять существующие опоры или монтировать новые, что требует денежных затрат. Если антенну невозможно установить на опоре, которая находится на крыше, то для сооружения дополнительной опоры необходимо арендовать дополнительные площади на крыше. Это в свою очередь приводит к увеличению арендной платы.

Технологические проблемы. Как было рассмотрено выше, если на существующих конструкциях установлены антенны предыдущих стандартов, то обычно необходимо устанавливать антенну ниже уже существующих антенн. Чаще всего, высота антенны составляет 2 метра. При этом между антеннами расстояние должно составлять не менее одного метра для обеспечения электромагнитной изоляции между антеннами и для облегчения эксплуатации антенн. Исходя из этого требования следует, что фазовый центр антенны стандарта UMTS будет как минимум на 6 м ниже существующей антенны стандарта GSM. Следовательно, при установке антенн стандарта LTE ее высота подвеса будет ниже уже по меньшей мере на 9 м, а для стандартов пятого поколения - ниже на 12 и более метров.

В некоторых случаях, возникает необходимость устанавливать антенны ниже на 6 метров, например из-за:

- большой нагрузки на опору;
- уменьшения влияния оттяжек от мачты;
- присутствия на опоре антенн других операторов.

Понижение высоты подвеса антенны значительно уменьшает потенциальную площадь покрытия, что является нежелательным для оператора, особенно в условиях городской застройки.

Существенной технологической проблемой как новых, так и существующих стандартов является затухание сигнала в фидерах. Это затухание значительно уменьшает мощность электромагнитного сигнала, который излучает антенна и сигнала, который антенна принимает. Уменьшение мощности (уровня) сигнала приводит к уменьшению площади покрытия и к ухудшению качества обслуживания в существующей зоне.

Все рассмотренные проблемы создают определенную сложность планирования подсистем базовых станций операторов сотовой связи. Поэтому необходимо проводить разработку новых моделей и методов планирования мест расположения базовых станций и соединения между ними. Они должны учитывать технологические ограничения предыдущих поколений мобильной связи и использовать новые технические возможности 5G.

1.4 Этапы создания сети широкополосного доступа, постановка задачи исследования.

При создании и совершенствовании сетей мобильной связи решают две задачи, которые тесно взаимосвязаны между собой, это планирование сети (предварительное и подробное) и оптимизация сети (изменение расстановки базовых станций с учетом требования абонентов по результатам эксплуатации).

При планировании сети проводится анализ ее структуры и определение мест расстановки всех ее элементов.

При предварительном планировании новой сети мобильной связи используют концепцию использования наилучших параметров сети таких, как покрытие, емкость, основные ключевые параметры качества функционирования. На этом этапе, исходя из заданного покрытия в условиях качественного соединения, проводят оценку количества базовых станций, предполагаемое размещение элементов сетей и компоновку сети. Как показывает практика

использование гипотетических данных о параметрах и инфраструктуре сети на этапе предварительного планирования позволяет создать сеть с показателями близкими к требуемым, окончательное усовершенствование сети происходит на следующем этапе детального планирования.

В данной работе решается задача, которая относится к этапу предварительного планирования сети. Целью этой задачи является, исходя из предполагаемых данных о количестве и расположении абонентских станций и возможного трафика, сформировать такую сетевую топологию, при которой местоположение базовых станций мобильной связи 5G и подключение к ним абонентских станций будет оптимальным. Таким образом, результатом решения задачи является синтез пространственной структуры беспроводной сети широкополосного доступа стандарта 5G.

Проблемам планирования сотовых сетей посвящено большое количество научных работ [5,14]. Существующие методы [64] применимы при планировании существующих, устаревших технологий транспортных сетей. В отечественной литературе существует ряд работ, в которых в должной мере освещено планирование транспортных сетей [49]. В них рассматриваются методы выбора оптимальной архитектуры транспортных сетей с учетом показателей качества обслуживания QoS с помощью методов однокритериальной оптимизации. Однако, анализ данных работ показал, что они не учитывают возможную многослойность транспортных сетей, их неоднородность, интеграцию различных технологических решений.

Таким образом, проанализировав перспективу развития систем пятого поколения, с учетом недостатков архитектурных решений существующих систем сотовой связи, можно сделать вывод о необходимости разработки методов определения оптимальной структуры сети (количество и местоположение базовых станций), учитывающих несколько критериев, таких как качество обслуживания, абонентский трафик и их стоимостные характеристики. Исходя из вышесказанного, целью данной работы является разработка метода построения сети пятого поколения, с использованием комплексного критерия для повышения

точности месторасположения и количества базовых станций. В отличие от существующих методов, предложенный комплексный критерий позволит учитывать важнейшие характеристики работы сети 5G, такие как показатели качества обслуживания потребителей, трафик и стоимостные характеристики.

Следовательно, данная диссертационная работа является актуальной, и имеет практическую значимость, так как направлена на планирование сетей нового поколения 5G.

Таким образом, сформулируем задачу оптимального размещения базовых станций при построении сети 5G: размещение базовых станций на выбранной территории должно происходить таким образом, чтобы минимальное количество базовых станций обеспечивало устойчивое подключение необходимого числа абонентских станций с гарантией требуемых показателей качества обслуживания QoS.

## 1.5 Выводы по первому разделу

1. Была рассмотрена эволюция операторов сотовой связи, определены основные тенденции развития радиотехнологий в мире. Появление новых услуг и совершенствование технических возможностей устройств говорит о том, что объемы трафика в сотовых сетях и потребительский спрос на высокоскоростную передачу данных будет расти с беспрецедентной скоростью. В последнее время трафик сотовых операторов растет в геометрической прогрессии, и эта тенденция этого роста будет продолжаться в будущем. Анализ эволюции развития сотовых сетей позволяет сделать вывод, что рост трафика после 2020 года, в связи с введением нового стандарта 5G, увеличится более чем в 1000 раз, и емкость систем сотовой связи будет способна обеспечить обработку повышенного трафика. При внедрении сети нового стандарта, рост числа подключенных абонентских устройств будет происходить вследствие использования новых возможностей сетей мобильной связи, что в свою очередь создаст необходимость разработки новых гибких требований к сетям, которые будут меняться в зависимости как от функций самого абонентского устройства, так и от цели его использования.

2. Рассмотрев существующие проблемы качества обслуживания абонентов в реализованных проектах сетей LTE установлено, что фактическое качество обслуживания абонентов находится на достаточно низком уровне, это свидетельствует о низкой эффективности существующих методов планирования радиосетей, транспортных подсистем, методов управления и обеспечения кибербезопасности.

3. Таким образом, для того, чтобы успешно справиться с задачами, повышения эффективности функционирования сотовых сетей, требуется разработка новых, более совершенных и эффективных решений. Эти решения могут быть реализованы на базе 5G.

Эффективные и высокопроизводительные решения могут быть реализованы на базе стандарта 5G.

4. Сформулирована задача оптимальной расстановки базовых станций и подключения к ним абонентских станций. Для решения такой задачи, в первую очередь, необходимо провести совершенствование методик территориального планирования (ТП) систем сотовой связи и разработать новую методику ТП повышения эффективности функционирования сетей 5G, затем провести оптимизацию подсистемы базовых станций, обобщить разработанные методы и модели в методологию повышения эффективности функционирования сотовых сетей связи и проверка разработанной методологии посредством проведения экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.



## РАЗДЕЛ 2

### АНАЛИЗ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ

При создании сетей мобильной связи для обеспечения требуемых показателей качества мобильной связи QoS большое значение имеет расположение базовых станций. Для решения вопроса создания базовых станций используется территориальное планирование сетей мобильной связи. Территориальное планирование включает в себя выбор конфигурации сети, расположение на местности базовых станций, выбор мощности станций и их количество, расположение и ориентация приемных и передающих антенн с учетом распределения частот работы базовых станций. Для уменьшения капитальных затрат на создание сетей мобильной связи необходимо оптимизировать территориальный план, для этого требуется разработка плана такой сети, которая бы охватывала с должным качеством связи заданную зону обслуживания, соответствовала требованиям емкости сети, при этом количество базовых станций должно быть минимальным. Планирование должно рассматривать варианты расположения базовых станций исходя из двух направлений: базовая станция-абонент и базовая станция- коммутатор оператора мобильной связи.

#### 2.1. Методы территориального планирования сетей мобильной сотовой связи

Использование методов территориального планирования должно обеспечивать оптимальный выбор:

- зон уверенной работы базовых станций, исходя из требуемого качества связи, с контролем на границах зон;
- зон покрытия базовых станций, в этих зонах уровень сигнала соответствует заданному, но вне зоны покрытия уровень сигнала не гарантируется;
- зон покрытия коммутатора, зоны в которых подключение базовых станций к коммутатору происходит без потери качества связи;
- зон взаимных помех, эти зоны определяются по уровню помех, создаваемых станциями друг на друга при наложении зон покрытий;

- уровня сигнала базовой станции выше уровня помех.

С использованием методов территориального планирования производится построение зон уверенной работы и зон покрытия с учетом значения уровня сигнала внутри зоны, а так без его учета. При построении зон без учета уровня сигнала внутри зоны, границы зоны проводят исходя из того, что уровень сигнала базовой станции превышает заданный уровень.

Исходными данными при применении методов территориального планирования являются параметры сети мобильной связи – распределение трафика по зонам и количество услуг, а также характеристики оборудования базовых станций, такие как мощность передатчика, диаграмма направленности антенны и высота ее установки, потери в сетях коммуникаций. Кроме указанных параметров учитываются рельеф местности, план и типы жилой застройки, присутствие водоемов и растительности.

Результатом применения методов будет создание конфигурации сети мобильной связи с точками размещения базовых станций и их конфигурация, а также режим работы оборудования. При этом очевидно, что на результаты планирования будут оказывать влияние системные факторы, которые будут усложнять задачу и увеличивать неоднозначность решения задачи создания сети.

Применение методов территориального планирования [6] решает задачу создания сети, которая должна удовлетворять исходным требованиям. Необходимо создать такую сеть мобильной связи  $S''$ , которая обладает наилучшей, с точки зрения безусловного критерия предпочтения, совокупностью показателя качества где  $\bar{K}(S'')$ :

$$\bar{K}(S'') \leq \bar{K}(S') \quad (2.1)$$

Из данного выражения следует, что любой или, по крайней мере, один из показателей качества  $K_i(S'')$  оптимизированной сети лучше, чем у исходной сети  $S'$ .

Выбор решения, при котором сеть обладает наилучшими показателями вектора качества  $K(S)$ , должен осуществляться при рассмотрении нескольких

вариантов векторно-сравнимых решений задач векторной многокритериальной оптимизации.

Очевидным является то, что при равных показателях качества лучшей сетью можно считать сеть с меньшими затратами, что является положительным результатом использования методов территориального планирования, который позволит использовать сэкономленные затраты на других этапах планирования сети. При использовании методов территориального планирования проводится оптимизация как аппаратного ресурса с учетом ресурса (частотного) самой сети. Если в процессе планирования возникают противоречия между двумя этими факторами, то для достижения необходимого показателя качества, один из них (менее важный на данный момент) игнорируется.

Задачу синтеза сети мобильной связи пятого поколения можно успешно решить при совместном использовании методов математического анализа, при идеализации сети, и эвристическим синтезом, основанном практических методах с использованием уже известных инженерных решений.

При использовании методов территориального планирования для решения задачи синтеза сети мобильной связи наиболее оптимальным является решение частных задач с привлечением разработчиков и потребителей, а также широким использованием различных вычислительных методов. Результатом выполнения данных условий является создание сети мобильной связи с единственным наилучшим соотношением качество связи – стоимость. Алгоритм использования методов территориального планирования сети 5G на рисунке 2.1.

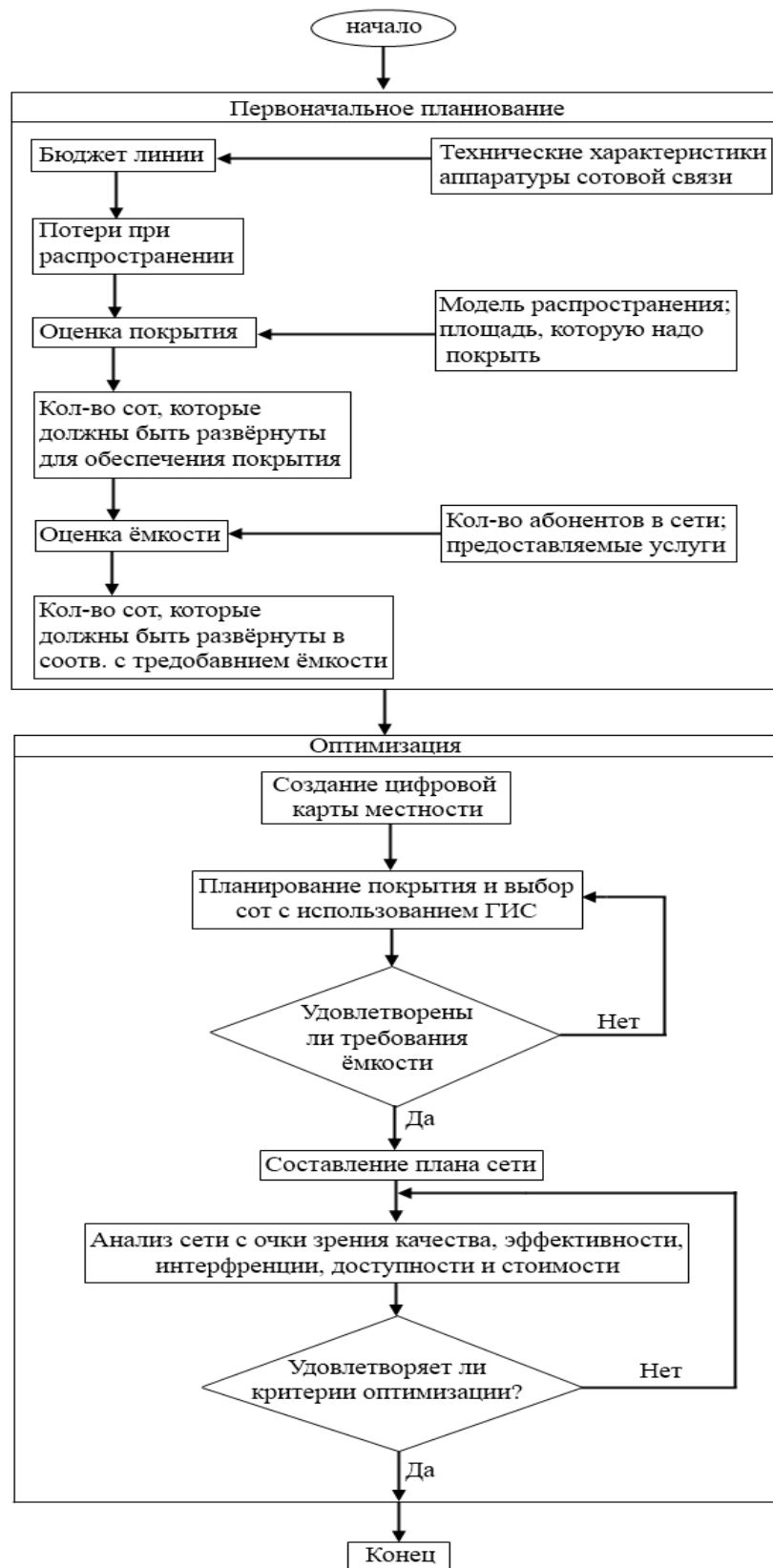


Рисунок 2.1 – Алгоритм территориального планирования сети 5G

Основное внимание при проектировании сетей мобильной связи 5G уделяется частотно-территориальному планированию, исходя из результатов

которого, выбирают конфигурацию сети, которая включает в себя расположение базовых станций позволяющих обеспечить необходимое качество связи в требуемой зоне обслуживания абонентов, использование разрешенных частот и распределения каналов связи, учитывает требуемую емкость сети и абонентскую нагрузку на сеть. Для более четкого выбора конфигурации сети возможно использование имеющихся сетей мобильной связи, существующих линий проводной связи и оборудования для учета их характеристик с поправками на повышенные показатели качества связи нового поколения.

Для планирования сети мобильной связи 5G используют уже существующие стандарты сети, а при отсутствии некоторых стандартов, в связи с их разработкой опираются на стандарты сетей предыдущего поколения.

При планировании сетей мобильной связи пятого поколения учитываются следующие параметры:

- планируемые зоны охвата базовыми станциями, структура зоны и приоритет подключения базовой станцией;
- перекрытие зон действия базовых станций и возможность дублирования или выбора соседней станции для улучшения качества связи;
- трафик, обеспечивающий качество обслуживания абонентов, плотность абонентов в зоне конкретной базовой станции, возможность передачи части абонентов соседней станции без ухудшения качества связи для увеличения трафика;
- оборудование и конфигурация базовых станций, его стоимость;
- рельеф местности, ландшафт, этажность застройки и ее плотность, возможность установки базовых станций;
- количество планируемых базовых станций;
- количество абонентов и вероятностные характеристики их роста.

При практическом применении результатов планирования на реальной местности следует делать поправку для максимального охвата площади покрытия и качества обслуживания максимального количества абонентов.

При планировании сетей 5G границы зоны действия базовой станции (соты) определяются взаимным воздействием самой базовой станции и определенным количеством абонентов. Для обеспечения качественных услуг мобильной связи должно быть запланировано необходимое количество каналов связи (частот) и возможность переключения при увеличении трафика на данной конкретной частоте. Преимуществом сетей 5G является более расширенный радиочастотный спектр, что дает возможность проектировать большие зоны обслуживания и снижать повторное использование (наложение) одинаковых частот разными абонентами. Однако, при насыщенном спектре абонентов с большим трафиком следует учитывать взаимосвязь между базовыми станциями и абонентами и планировать их территориальное нахождение с учетом повторяющихся рабочих частот [3].

Базовые станции обладают относительно небольшой мощностью сигнала и ограниченным количеством каналов связи, этот фактор необходимо учитывать при частотно-территориальном планировании для использования частоты подобных каналов в другой, территориально удаленной на значительное расстояние зоне. В соседних зонах для уменьшения влияния базовых станций друг на друга планируется использование разнесенных по частоте каналов.

Рассмотрим существующие методы территориального планирования зон обслуживания базовыми станциями.

### 2.1.1 Метод изменения зоны работы базовой станции

Системы мобильной связи имеют изменяющийся трафик, связанный с количеством абонентов мобильной сети. При перегрузке сети вследствие увеличения числа абонентов, происходит перераспределение каналов связи и изменение размеров зон покрытия. Решением проблем большого трафика и увеличения количества абонентов может быть увеличение емкости системы связи и изменение величины зон покрытия. Для этого применяют следующие способы [13]:

- разделяют зоны на сектора;
- делят зоны на зоны меньшего размера;
- используют концепцию микрозон.

При разделении зон на сектора происходит уменьшение соотношения сигнал-помеха в секторах, что дает возможность получить требуемое соотношение сигнал-помеха для всей зоны. При разделении зон покрытия используемые каналы связи могут использоваться в секторах. В каждом секторе мы имеем возможность использовать каналы доступные для рассматриваемой зоны, это приводит к увеличению коэффициента повторного использования  $1/N$  емкости системы.

Разделение на сектора происходит вследствие увеличения антенн и базовых станций, что позволяет увеличить трафик и увеличить частоту передачи данных.

Деление на зоны меньшего размера происходит за счет уменьшения зоны покрытия. Радиусы уменьшенных зон принимаются равными половине радиуса исходной зоны, как следствие площадь зоны уменьшается в четыре раза. Зоны покрытия с большей площадью как правило используются в районах с небольшим трафиком, с меньшей площадью – в районах с более интенсивным трафиком. На рисунке 2.2 представлен пример деления зон, новая зона может располагаться как внутри старой зоны, так и между зонами. Необходимо отметить, что добавление новой зоны не меняет величину внутриканальных помех, так как расстояния между зонами уменьшаются вдвое. Создание новой зоны необходимо для того, чтобы мощность сигнала базовой станции была не больше уровня, который обеспечивал мощность принимаемого сигнала на границе меньшей зоны и был бы равен мощности сигнала на границе исходной зоны.

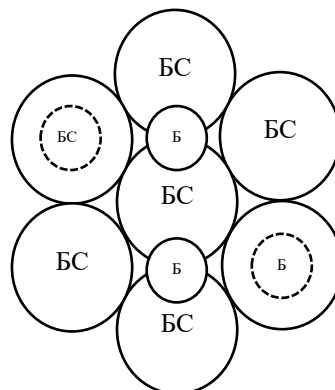


Рисунок 2.2 – Деление зон работы базовых станций

Деление зоны на зоны меньшего размера влечет за собой изменение распределения каналов в зонах, расположенных в непосредственной близости от новой малой зоны. Для увеличения емкости сети разделение зон проводят поэтапно, учитывая влияние новых зон на уже существующие.

В существующих больших зонах каналы, которые используются во вновь созданных малых зонах, применяются в центральных областях зоны, другие каналы используются на всей территории большой зоны. Такое распределение каналов существенно усложняет работу базовых станций. Сигналы, используемые для передачи по каналам в малых и в центральных областях больших зон, должны иметь меньшую мощность, по сравнению с сигналами, которые передаются по каналам, которые эксплуатируются только в больших зонах. Существенным недостатком является ограниченность частотного ресурса для покрытия всех вновь образованных зон работы.

Достоинством метода изменения зоны работы базовой станции, является увеличение емкости сети сотовой связи за счёт увеличения количества базовых станций на определенной территории, это позволяет обслуживать большее количество абонентов без ухудшения качества обслуживания.

Недостатком описанного метода является увеличение наложения частот из-за роста использования частотных каналов, что ухудшает электромагнитную совместимость всей системы мобильной связи. Для устранения этой проблемы необходимо исключить взаимное влияние базовых станций за счёт уменьшения радиуса работы станций и, как следствие, увеличения количества станций, что влечет за собой увеличение стоимости сети мобильной связи.

### 2.1.2 Метод изменения формы зоны покрытия базовых станций

Одним из главных инструментов, влияющих на оптимизацию сети мобильной связи, являются антенны базовых станций. Развитие антенных технологий позволяет улучшить контроль над передающим и принимаемым сигналами. В определенной степени зона покрытия базовой станции это зона



работы антенны с ее возможностью отсеять ненужные сигналы при приеме и усилить передаваемый сигнал. Антенны выступают инструментом оптимизации и контроля работы базовой станции, подавляя боковые и задние лепестки диаграммы направленности и автоматически регулируя углы поляризации антенны.

Изменить форму зоны работы базовой станции возможно изменением угла излучения антенны или набором антенн, что увеличит дальность в определенном необходимом для данного рельефа местности направлении или уменьшит уровень сигнала в направлении работы другой базовой станции для уменьшения взаимных помех.

Изменение угла наклона антенны вниз или вверх меняет дальность излучения без изменения мощности самой базовой станции, такое решение используется для уменьшения зоны действия базовой станции в первом случае и во втором случае увеличивает зону доступа абонента в режиме «длинная сота», уменьшая при этом количество каналов трафика вдвое (Рисунок 2.3).

При стандартном расположении антенны увеличить зону работы базовой станции возможно используя в зоне работы станции повторителей (репитеров) [19]. В сетях 5G такими повторителями будут сети Wi-Fi, мобильные телефоны потребителей, сети других мобильных операторов. Репитеры будут применяться для улучшения качества работы мобильной связи в местах плотной городской застройки с «мертвыми зонами». В данных зонах прямой сигнал базовой станции не достаточен для обеспечения показателей качества QoS из-за рельефа местности или нахождения в зоне прямой видимости высотных зданий. Распределение измерений для этих зон составляет в сумме 10 – 20 %, но эти зоны входят в зону обслуживания базовой станции. Повторители выступают в роли антенного усилителя и позволяют расширить или изменить зону обслуживания базовой станции для большого числа потребителей мобильных сетей в узкой или широкой полосе пропускания.

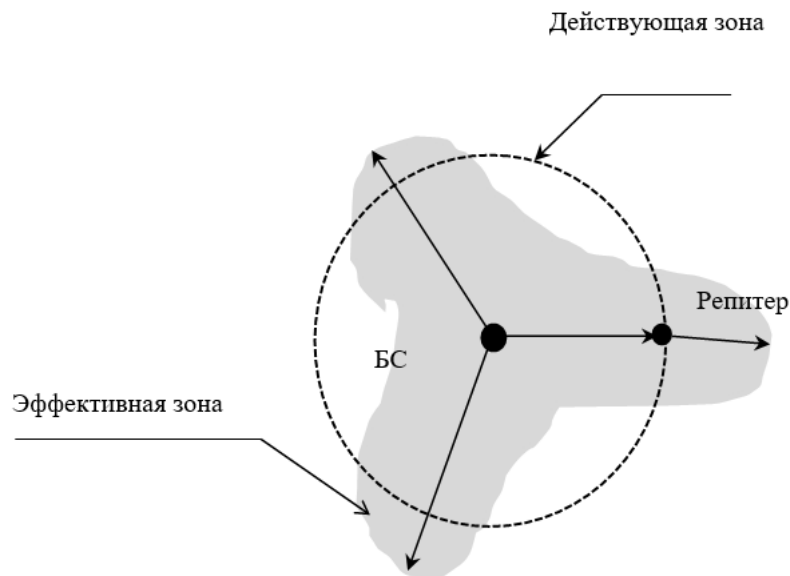


Рисунок 2.3 – Изменения формы зоны покрытия базовых станций

Изменение формы зоны покрытия базовых станций с применением репитеров позволяет расширить зону охвата базовой станции без установки новой станции. Это влечёт за собой экономию средств на строительстве новой базовой станции и затраты на прокладку новых линий коммуникаций.

Недостатком данного метода является то, что при увеличении зоны действия сети за счет увеличения мощности сигнала репитер не увеличивает канальную ёмкость сети, помимо выше сказанного, увеличение мощности сигнала может привести к возникновению помех при работе других базовых станций, на работу которых начальный сигнал базовой станции не оказывал влияния.

### 2.1.3 Метод управления радиочастотным ресурсом сети сотовой связи

В настоящее время, в связи с интенсивным развитием сотовой связи базовые станции охватывают большую территорию потребителей мобильной связи. Вместе с тем количество абонентов и требования к качеству услуг связи растут, развитие интернета вещей (*IoT*) ставит перед сетями мобильной связи новые требования, решение которых без подключения дополнительных частот для увеличения пропускной способности невозможно. Существующие стандарты мобильной связи

используют различные частотные диапазоны, вследствие, чего структура сетей мобильной связи усложняется, создавая многочастотные иерархические сети, работающие как в одном, так и в смешанных диапазонах от 900МГц до 2500МГц.

Операторы сетей смешанной мобильной связи (Рисунок 2.4) сталкиваются с проблемами, связанными с планированием сетей. На этапе планирования используются различные математические модели для расчета зон покрытия базовых станций с учетом трафика. В процессе эксплуатации эти математические модели не дают реальную оценку состояния сети и для анализа работы сетей мобильной связи эмпирические методы с использованием программных инструментариев. Для оценки работы сети используют такие хендверные характеристики: эстафетная передача сигнала, неудачные попытки соединения, сброшенные соединения, а также взаимное влияние сигналов радиоканала. Но этих характеристик недостаточно для полной оценки работы сети в связи с наличием неоднозначных характеристик системы, связанных с количеством потребителей, изменяющимся трафиком, удаленности абонента от базовой станции.

В связи с этим возникает необходимость постоянного мониторинга работы сети, ее частотных характеристик и степени загруженности аппаратной части центров коммуникаций и контроллеров базовых станций. Наиболее уязвимой является частотная составляющая, так включение новых базовых станций приводит к изменению иерархической организации сети и перераспределению пространственно-временного трафика, и как следствие, влияет на работу сотовой сети, неравномерного распределения трафика [38].

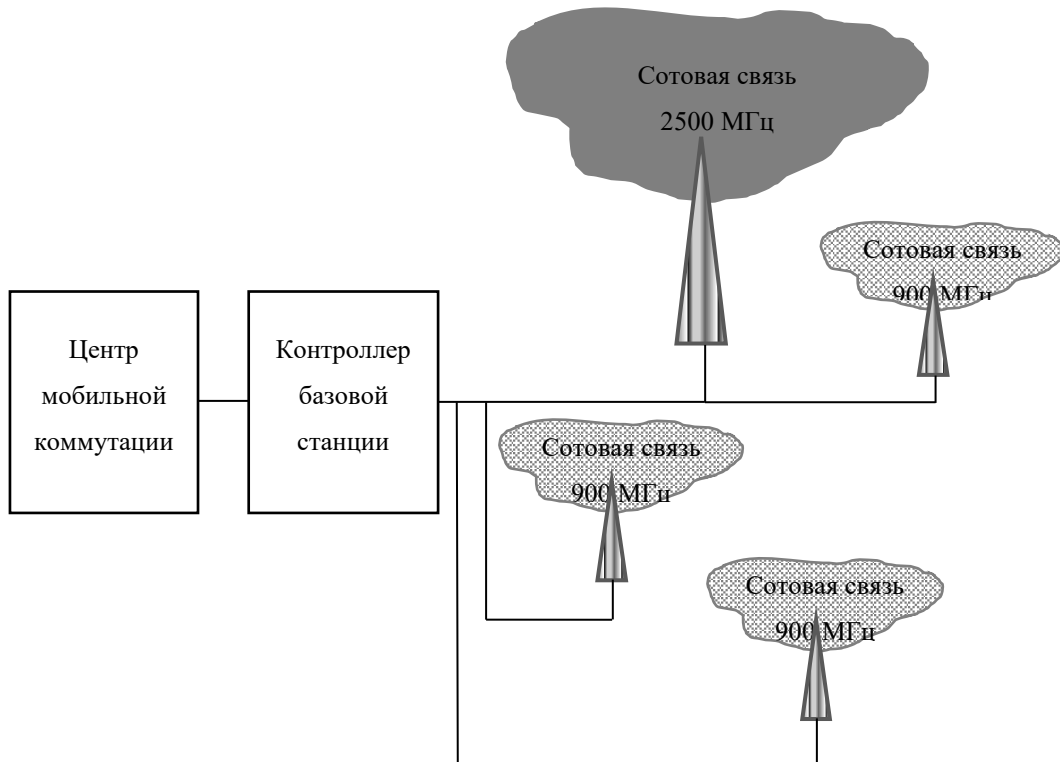


Рисунок 2.4 – Схема работы операторов сетей смешанной мобильной связи

Для оптимизации работы сети мобильной связи необходимо, чтобы такие характеристики радиочастотного тракта как пропускная способность системы, хэндоверные характеристики и интерференционные показатели находились под постоянным контролем и при необходимости корректировались [9].

Достоинством метода управления радиочастотным ресурсом является возможность отдельного территориального планирования для различных частотных диапазонов, использование базовых станций с различными частотами, исключая взаимное влияние друг на друга. Использование иерархических сетей сотовой связи позволяет разгрузить сотовую связь в условиях плотной городской застройки и увеличивает радиочастотный ресурс сетей сотовой связи.

К недостаткам можно отнести сложность организации, увеличение базовых станций, связанных с различными стандартами связи. Еще одним из недостатков является возможность абонентов получать услуги только одного стандарта связи.

#### 2.1.4 Метод кластерного территориального планирования сети мобильной связи

При использовании метода кластерного территориального планирования применяют статистический или детерминированный [33] способ планирования сети мобильной связи.

В основе статистического способа лежит рассмотрение основных статистических характеристик распространения сигналов в системах мобильной связи. Вся зона покрытия делится на одинаковые по форме ячейки и с помощью использования методов статистической радиофизики происходит определение их оптимальных размеров и расстояния между ячейками, в которых учитываются условия допустимого взаимного влияния. Для получения качественных услуг связи зоны покрытия разбиваются на отдельные ячейки, что позволяет получить однородные (гомогенные) зоны без перекрытия и пропусков. Ячейки можно представить в виде одной из трех геометрических фигур: треугольник, квадрат и шестиугольник, использование круга допускает взаимное влияние базовых станций либо появление слепых зон, при которых невозможно обеспечить отличное качество связи (Рисунок 2.5).

Очевидным является то, что наиболее оптимальным для планирования будет использование правильного шестиугольника, т.к. применение зоны такой конфигурации дает возможность обеспечить устойчивое соединение практически со всеми абонентами в зоне обслуживания при условии, что в центре ячейки будет расположена антенна с круговой диаграммой направленности. Созданная таким образом структура зоны обслуживания называется сота. Применение статистического способа позволяет использовать одинаковые рабочие каналы в зонах, так как величина интервала между зонами будет больше требуемого, это позволит исключить влияния зон друг на друга и исключит влияние взаимных помех.

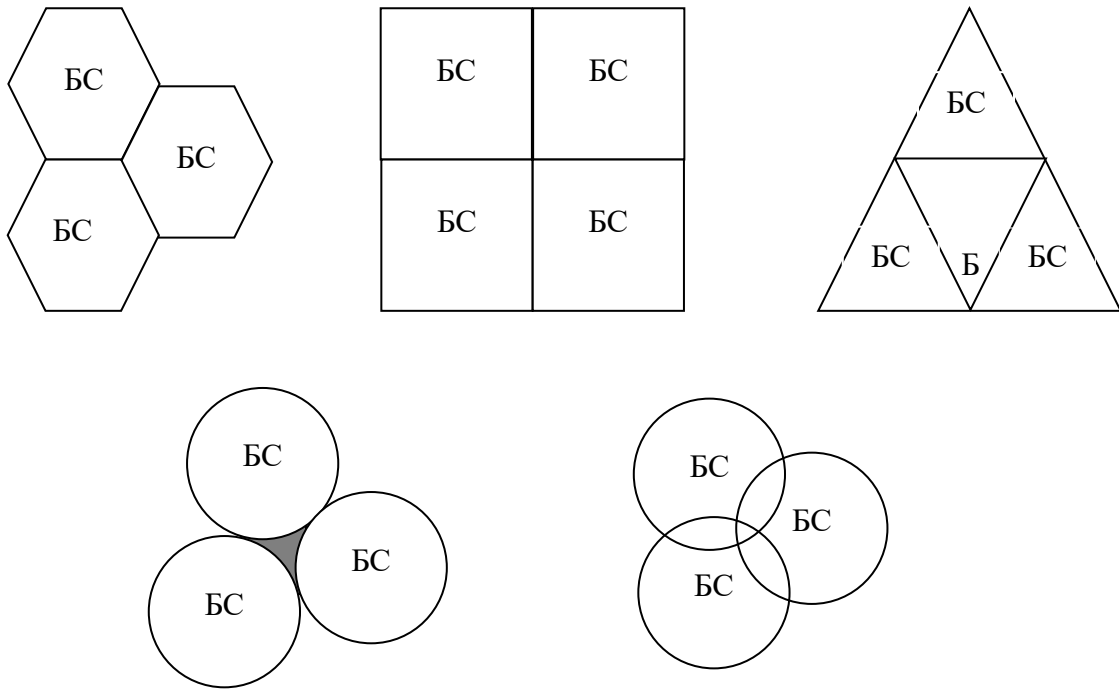


Рисунок 2.5 – Различные формы планирования зон охвата базовых станций

При применении детерминированного способа проводят измерения и расчет параметров распространения сигнала для определенной местности.

Использование детерминированного способа подразумевает детальное измерение и расчет всех параметров системы мобильной связи, при которых определяются минимальное количество базовых станций, обеспечивающих качественное обслуживание абонентов, одновременно с этим определяются места расположения базовых станций с учетом топографии, и рассматривается возможность использования технологии MIMO, ретрансляторов работающих в режиме WI-FI, соседних базовых станций с меньшей на определенный момент нагрузкой [16].

Соты с различными наборами частот объединяют в группы, такие группы носят наименования кластеры, параметром которых является количество используемых соседних частот. Величина кластера может включать в себя от 3 до 19 базовых станций с различными вариациями (Рисунок 2.6).

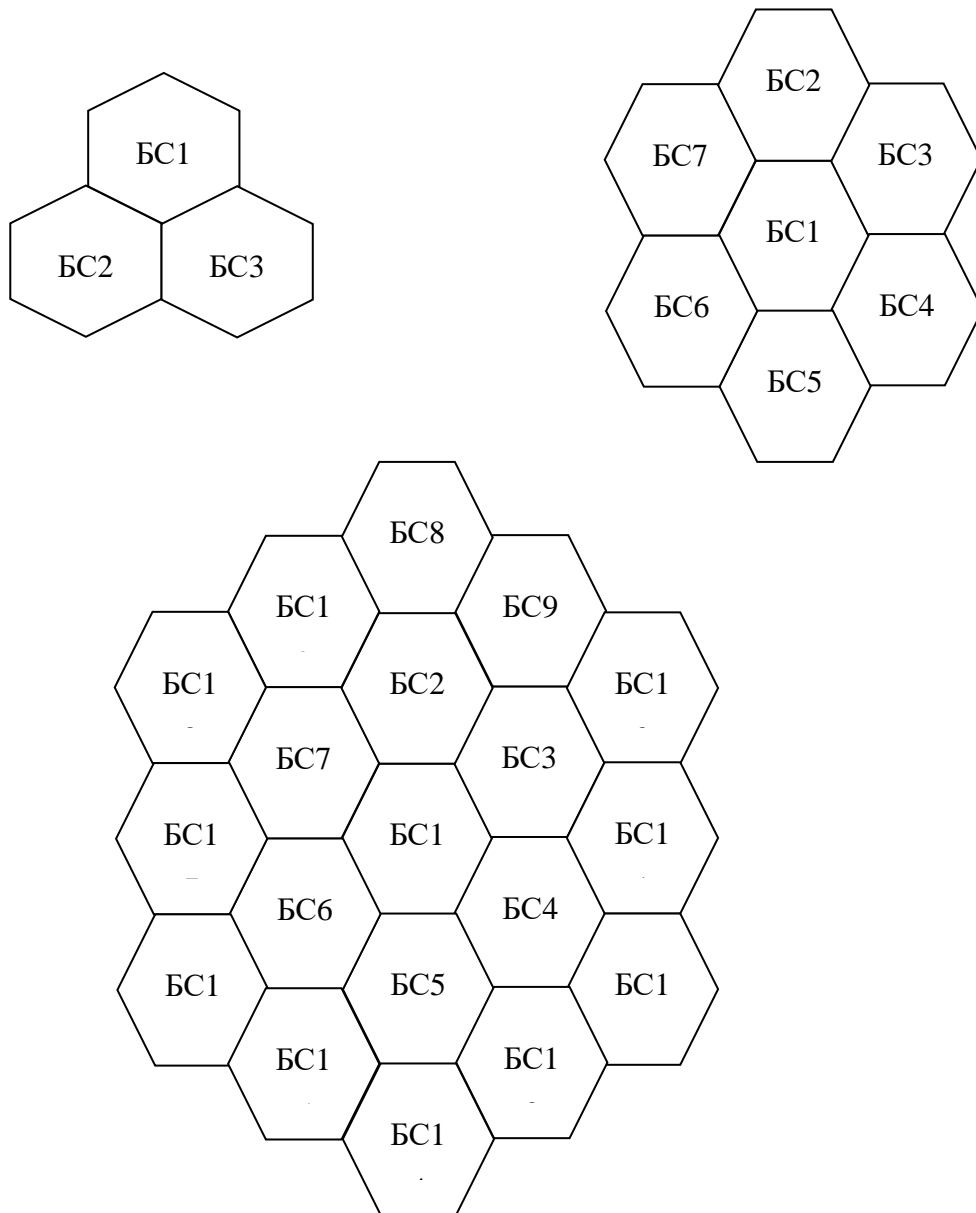


Рисунок 2.6 – Конфигурация 3, 7, 19 базовых станций

В кластерах частоты используются для формирования регулярной структуры, в которой допускается повторное применение частот в несмежных ячейках, данный принцип расстановки базовых станций является базовым принципом сотовой связи, который позволяет в полной мере использовать отведенные для систем мобильной связи частоты.

Применение повторного использования частот в системах мобильной связи обусловлено применением антенн с круговой диаграммой направленности и предположением, что во всех направлениях передается сигнал одинаковой

мощности. В этом случае абонент мобильной связи может принимать сигнал от всех базовых станций, в зоне приема которых он находится.

3-элементный кластер является минимально возможным для построения системы сотовой связи 5G, в этом случае каждая базовая станция может использовать третью часть полного частотного диапазона системы. Такой кластер наименее применим с точки зрения помехоустойчивости, так как базовые станции с одинаковыми частотами часто повторяются, что увеличивает помехи между каналами и как следствие взаимное влияние станций системы мобильной связи так, как станции работают в разных ячейках, но на одних и тех же частотных каналах. Очевидным является использование многоэлементных кластеров.

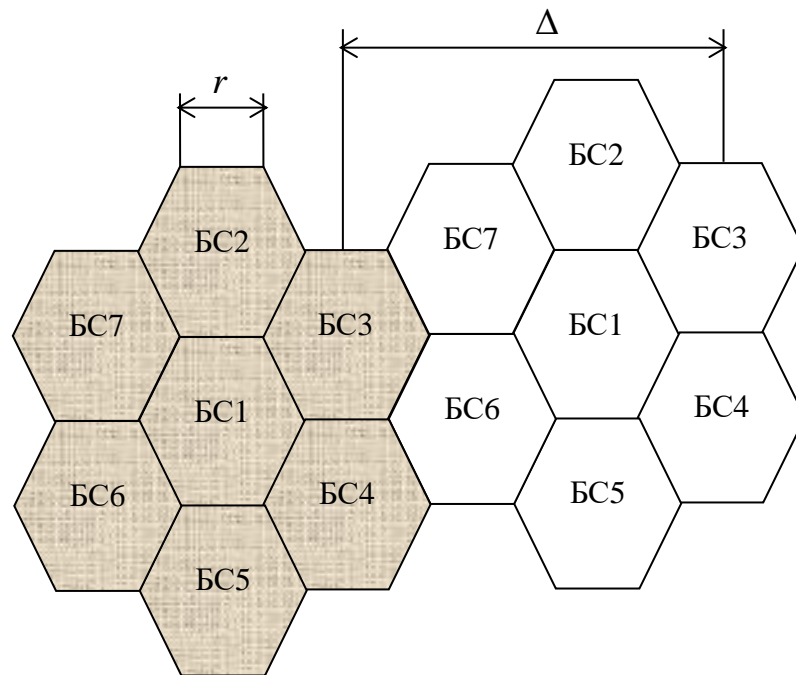


Рисунок 2.7 – Защитный интервал

При повторном использовании выделенного набора частот, между базовыми станциями должен быть защитный интервал (Рисунок 2.7), это расстояние  $\Delta$ , на которое необходимо разнести станции для уменьшения влияния станций друг на друга. Соседние базовые станции, которые используют различные частоты составляют группу из  $C$  станций, при этом каждая базовая станция использует  $m$  частотных каналов с шириной полосы  $F_K$ , тогда общую ширину полосы  $F_C$ , системы сотовой связи, можно представить в виде выражения [2]:



$$F_c = F_k m C \quad (2.2)$$

Из формулы видно, что исходя из значения величины  $C$  можно определить минимально количество каналов сети. Величина  $C$  является частотным параметром системы сотовой связи, его численное значение представлено как коэффициент повторения частот. Величина коэффициента не зависит от числа каналов в полосе частот, при уменьшении радиуса ячейки его значение увеличивается, повышая вероятность повторения частот.

Использование гексагональных ячеек позволяет минимизировать ширину используемого частотного диапазона, обеспечивая при этом оптимальное соотношение между величинами  $C$  и  $\Delta$ .

Ячейки, в которых используются одинаковые полосы частот, располагают на расстоянии  $\Delta$  друг от друга. Связь между этим расстоянием и числом ячеек  $N$  в кластере можно отобразить следующим образом:

$$\Delta = r\sqrt{3N}, \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{\Delta}{r} = \sqrt{3N}, \quad (2.4)$$

где  $r$  – радиус ячейки (радиус окружности, которую можно описать вокруг соты);  
 $Q$  – коэффициент уменьшения соканальных помех.

Коэффициент уменьшения соканальных помех  $Q$  – коэффициент отражающий влияние между ячейками одного кластера, зависимость коэффициента  $Q$  в зависимости от количества сот в кластере для сетей мобильной связи 5G представлен в Таблице 2.1.

Размеры зоны покрытия определяются радиусом  $r$  – радиусом окружности, описанной вокруг правильного шестиугольника. В зависимости от значения  $r$  определяются размеры защитного интервала между ячейками, в которых могут повторно использоваться повторяющиеся частоты. Значение защитного интервала  $\Delta$  зависит от требуемого уровня помех, ландшафта и как следствие, от условий распространения сигнала мобильной связи в зоне работы базовой станции.

Таблица 2.1. Коэффициенты уменьшения соканальных помех

Количество сот в кластере	3	4	7	12	19
Коэффициент уменьшения соканальных помех	3,00	3,46	4,58	6,00	7,55

Исходя из размеров зоны работы базовой станции (радиуса ячейки  $r$ ), можно определить количество абонентов  $N$  одновременно пользующимися услугами связи данной базовой станции. Очевидно, что при уменьшении радиуса ячейки повысится эффективность использования выделенной полосы частот и увеличится трафик системы, станет возможным уменьшить мощность передатчиков, повысить чувствительность приемников базовых станций и мобильных абонентов. Это так же позволит уменьшить воздействие работающих систем сотовой мобильной связи на другие радиоэлектронные системы и не создавать электромагнитные помехи, критически влияющие на работу технических средств.

Достоинством метода кластерного территориального планирования сети мобильной связи является возможность, зная предполагаемую абонентскую нагрузку на сеть, проводить предварительное планирование количества базовых станций. И исходя из этого возможность рассчитать её помехозащищенность и пропускную способность, стоимость системы, спектр повторяющихся частот и необходимого радиочастотного ресурса сети сотовой связи.

К недостаткам данного метода можно отнести абстрактный подход к частотному планированию, так как при реализации проекта может возникнуть необходимость увеличения базовых станций для обеспечения качества обслуживания абонентов и, как следствие, увеличение канальных помех. Данный метод возможно использовать при предварительном планировании, так как он не учитывает рельеф местности, ландшафт, плотность и этажность застройки. базовые станции и не позволяет в реальности создать кластеры стандартных форм и размеров.

Для более глубокого раскрытия принципов и организации территориального планирования и применения их для систем сотовой связи 5G рассмотрим подробно

модели планирования прогнозируемых зон покрытия сетей сотовой связи на примере классических систем сотовой связи.

## 2.2. Модели прогноза зон покрытия сетей сотовой связи

При прогнозировании зон покрытия базовыми станциями особую роль играет расчет нагрузки сетей мобильной связи, исходя из которого планируют архитектуру создающейся сети, координаты базовых станций с учетом заданного качества обслуживания QoS.

Основными параметрами для расчета нагрузки сети являются мощность передатчика базовой станции, чувствительность базовой станции и станции абонента, высота антенны базовой станции, рельеф зоны обслуживания базовой станции и потери в каналах базовая станция-абонент в зависимости от рельефа местности. Радиус зоны работы базовой станции определяют по уровню потерь сигнала мобильной станции в зависимости от рельефа местности. Наиболее эффективным инструментом определения потерь сигнала мобильной связи является использование эмпирических моделей распространения сигнала систем сотовой связи, рассмотрим основные из них.

### 2.2.1 Модель распространения сигналов Ли

Модель Ли (англ. W. C. Lee) [74,75] была предложена на основании измерений распространения сигнала, проведенных в США, за основу была выбрана частота системы мобильной связи 900 МГц. Для этой модели среднее значение мощности можно представить следующим образом:

$$P(d) = P_0 \left( d/d_0 \right)^{-\gamma} \left( f/f_0 \right)^{-n} F_0; \quad (2.5)$$

где  $P_0$  – эталонная медианная мощность, измеренная в интервале  $d_0=1$ км;  $F_0$  – поправочный коэффициент (2.6).

$$F_0 = \prod_{i=1}^5 F_i; \quad (2.6)$$

где  $F_i$  рассчитывается по следующим формулам:

$$F_1 = (h_{бсэфф}/30,48)^2; \quad (2.7)$$

$$F_2 = (h_{маб}/3)^v; \quad (2.8)$$

где  $h_{бсэфф}$  – эффективная высота антенны базовой станции, м;  $h_{маб}$  – высота антенны абонентской станции, м;  $v$  – показатель степени, который зависит от высоты антенны, при высоте антенны более трех метров его значение принимается равным 1, а при высоте антенны 10 метров и более – 2.

Остальные поправочные коэффициенты рассчитывают следующим образом:

$$F_3 = P_t/10, \quad (2.9)$$

$$F_4 = G_t/4, \quad (2.10)$$

$$F_5 = G_r, \quad (2.11)$$

где  $P_t$  – мощность сигнала базовой станции, Вт;  $G_t$ ,  $G_r$ , – коэффициенты усиления антенны базовой станции и антенн абонентской станции.

Для различных видов ландшафта значения  $P_o$  и  $Y$  были получены экспериментально. Для этой модели  $P_o = -41$ ,  $Y = 20,0$  дБ/декада при отсутствии построек и растительности,  $P_o = -40$ ,  $Y = 43,5$  дБ/декада для сельская местности или редких строений,  $P_o = -54$ ,  $Y = 38,4$  дБ/декада в городской черте или частой застройке.

В зависимости от частоты медианные потери мощности определяются коэффициентом  $(f/f_0)^{-n}$  и его показателем степени  $n$ . При условии, что расстояние между базовой станцией и абонентской станцией составляет от 2 до 30 км и частоты работы станций находятся в диапазоне от 30 МГц до 2 ГГц показатель степени  $n$  принимает значения от 2 до 3. Параметры  $n$  меняются в зависимости от ландшафта местности. Для пригородов и сельских районов при частотах ниже 450 МГц  $n$  принимаем равным 1 и равным 3 при частотах выше 450 МГц. При использовании этой модели следует обращать внимание, что на холмистых участках и участках с

перепадами высот действующая высота антенны может значительно отличаться от ее физической высоты.

### 2.2.2 Модель Окамуры

Одним из результатов крупных исследований в области эмперических методов является модель Окамуры. Для создания модели Окамуры (англ. Okumura) было проведено множество измерений, замеры проводились в условиях городского ландшафта в Токио, результаты впервые были представлены в работе [83]. Для измерений использовался частотный диапазон от 150 до 1920 МГц. В результате анализа полученных результатов зависимость потери сигнала между базовой станцией и абонентской станцией  $(L_{50})_{dB}$  от расстояния  $d$  до передающей антенны базовой станции была представлена в следующем виде (2.12):

$$(L_{50})_{dB} = L_s + A(f, d) + G(h_{БСэфф}) + G(h_{ac}) \quad (2.12)$$

где  $L_s$  – потери сигнала в свободном пространстве;  $A(f, d)$  – медианное значение потерь в городской среде с абсолютно гладкой земной поверхностью по отношению к затуханию в свободном пространстве при условии действующей высоты антенны базовой станции  $h_{БСэфф} = 200$  м, и высоте антенны абонентской станции  $h_{ac} = 3$  м;  $G(h_{БСэфф})$  – коэффициент отличия действующей высоты антенны базовой станции от 200 м, дБ;  $G(h_{ac})$  – корректирующий коэффициент, зависящий от высоты антенны абонентской станции, при высоте не равной 3 м, дБ.

Потери сигнала при распространении в свободном пространстве для базовой станции определяются с использованием формул потерь в свободном пространстве в логарифмическом масштабе (Рисунки 2.8, 2.9, 2.10).

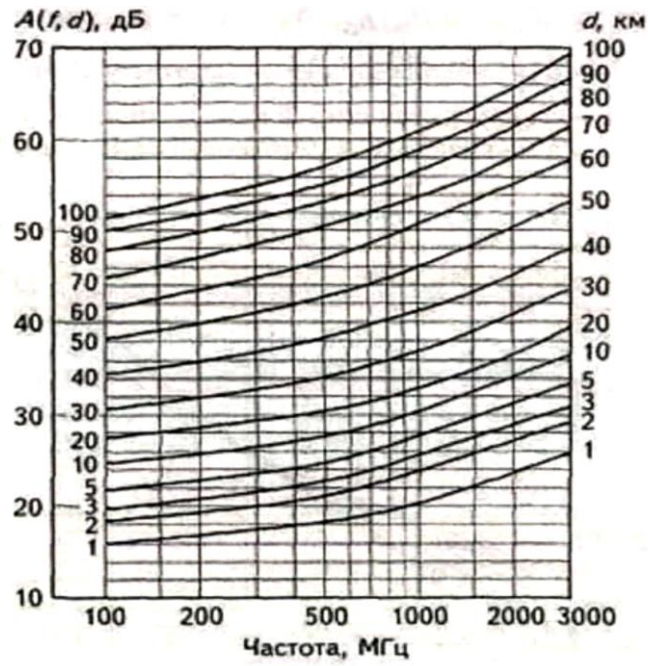


Рисунок 2.8 – Медианное значение ослабления  $A(f, d)$  на абсолютно гладкой поверхности по отношению к затуханию в свободном пространстве

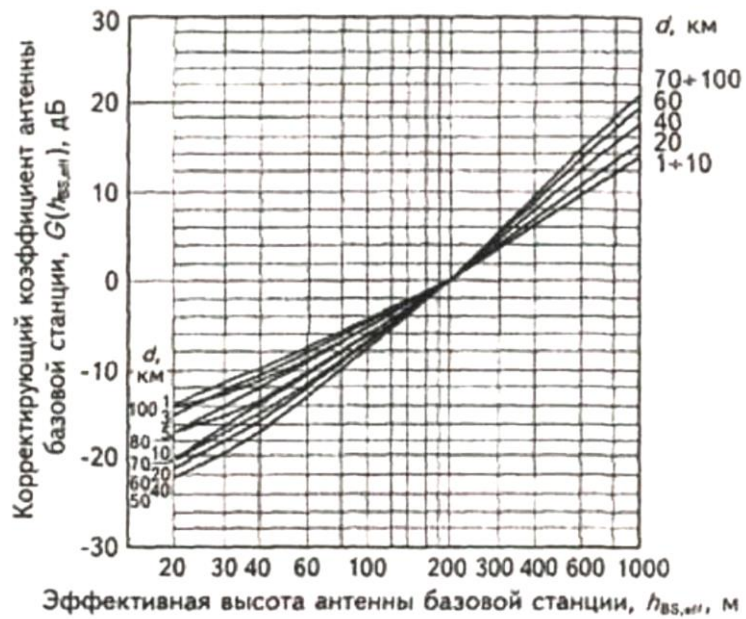


Рисунок 2.9 – Зависимость корректирующего коэффициента эффективной высоты антенны базовой станции от расстояния в условиях городской местности

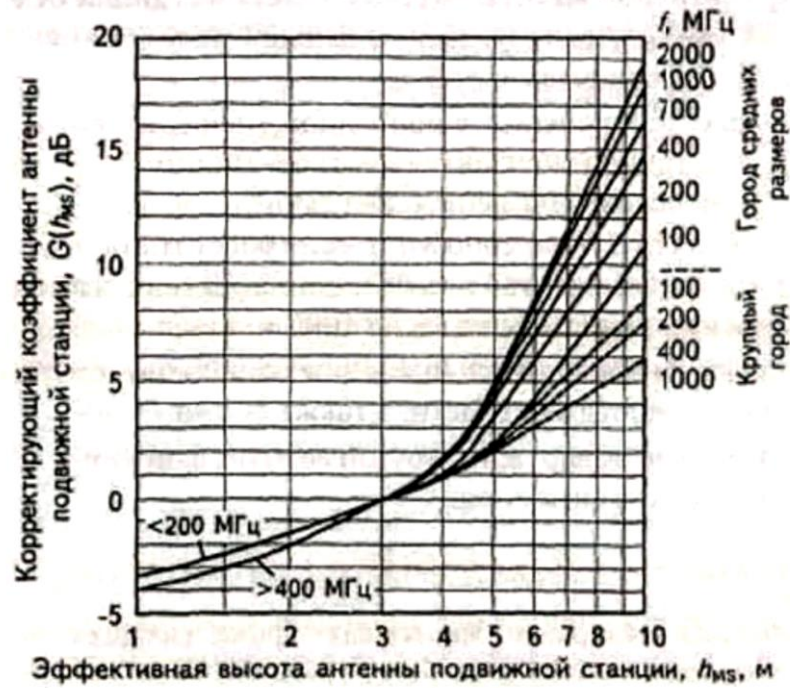


Рисунок 2.10 – Зависимость корректирующего коэффициента эффективной высоты расположения антенны БС от частоты и типа городской застройки.

Кроме формулы, описанной выше (2.12), модель Окамуры можно представить в другом виде. В научной литературе часто применяют вариант формулы, описывающей данную модель (2.13).

$$(L_{50})_{dB} = L_s + A(f, d) - G(h_{\text{БСэфф}}) - G(h_{\text{ac}}) - G_{\text{местн}}, \quad (2.13)$$

где  $L_s$  – потери сигнала в свободном пространстве;  $A(f, d)$  — медианное значение потерь в городской среде с абсолютно гладкой земной поверхностью по отношению к затуханию в свободном пространстве при условии эффективной высоты антенны базовой станции  $h_{\text{БСэфф}} = 200$  м, и высоте антенны станции абонента  $h_{\text{ac}} = 3$  м, значение берется из графика на рисунке 2.8;  $G(h_{\text{БСэфф}})$  – коэффициент, учитывающий отличие эффективной высоты антенны базовой станции от 200 м, дБ;  $G(h_{\text{ac}})$  – коэффициент корректировки, зависящий от высоты антенны абонентской станции, при величине ее отличной от 3 м, дБ.

Поправочный коэффициент  $G_{\text{местн}}$  (дБ) определяется из графика (Рисунок 2.11), его значения зависят от типа местности и значения несущей частоты.

В результате того, что модель Окамуры создана на основе практических данных, полученных в районах Токио, она имеет исключительно экспериментальный характер. Следствием этого в США и странах Европы применение модели Окамуры дает результаты с незначительными отклонениями от реальных, это в большей степени вызвано тем, что распространение сигнала различно в городской и сельской местности. Несмотря на этот недостаток, модель Окамуры наиболее используемая и считается одной из лучших моделей при разработке сотовых систем мобильной связи [81]. Применение модели Окамуры наиболее эффективно при планировании в городах и пригородных районах, но эффективна для сельской местности.

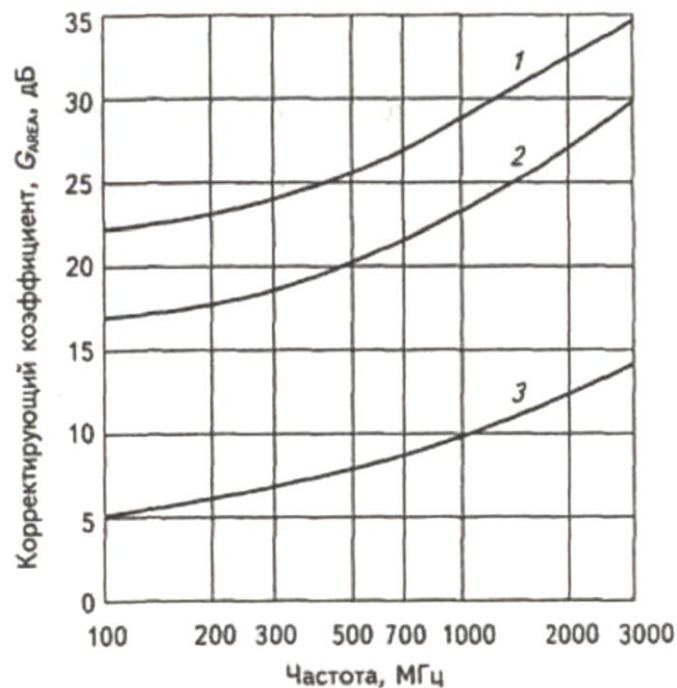


Рисунок 2.11 – Зависимость корректирующего коэффициента  $G_{\text{местн}}$  от частоты базовой станции и местности.



### 2.2.3 Модель Хата

Модель Хата (англ. *Hata*) была разработана на основе эмпирических формул к графикам, составленным Окамурай. Выражения, выведенные Хатом, позволяют, используя графики, получать значения наиболее приближенные к реальным для определенных диапазонов несущих частот в условиях гладкой земной поверхности. Для данной модели используются различные эмпирические формулы. В частотном диапазоне от 150 до 1500 МГц при в работе городской местности и эффективной высоте антенны базовой станции ( $h_{бэфф}$ ) от 30 до 200 м модель описывается следующей формулой:

$$(L_{50})_{дВ/город} = 69,55 + 26,16\lg f - 13,28\lg h_{БС} - a(h_{аб}) + (44,9 - 6,55\lg h_{БС})\lg d, \quad (2.14)$$

$$a(h_{аб}) = (1,1\lg f - 0,7)h_{БС} - 1,56\lg d + 0,8, \quad (2.15)$$

где  $a(h_{аб})$  – поправочный коэффициент, который зависит от высоты антенны абонента, которая может быть в пределах от 1 до 10 м,  $f_{MHz}$  – частота сигнала, МГц.

Коэффициент  $a(h_{аб})$  имеет различные значение в зависимости от плотности застройки (2.16) и ландшафта местности.

Городские условия:

$$a(h_{аб}) = \begin{cases} (1,1\lg f - 0,7)h_{аб} - 1,56\lg d + 0,8 - \text{малая и средняя застройка} \\ 8,29(\lg(1,54h_{аб}))^2 - 1,1 - \text{плотная застройка при } f \leq 200\text{МГц} \\ 3,2(\lg(11,75h_{аб}))^2 - 4,97 - \text{плотная застройка при } f \geq 200\text{МГц} \end{cases} \quad (2.16)$$

Сельская застройка:

$$(L_{50})_{дВ} = (L_{50})_{дВ/город} - 2 \left( \lg \left( \frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5,4 \quad (2.17)$$

Открытое пространство:

$$(L_{50})_{дВ} = (L_{50})_{дВ/город} - 4,78(\lg f)^2 + 18,33\lg f - 40,94 \quad (2.18)$$

Описанная модель распространения сигнала дает возможность оценить зависимость потерь сигнала от значения несущей частоты, высоты антенн базовой

и абонентской станции, типа местности. Более точные результаты для описания процессов распространения сигнала при использовании описанных выше формул достигаются для расстояний свыше 1 км и частот до 1,5 ГГц.

#### 2.2.4 Модель распространения сигналов Уолфиша-Икегами

Одной из более совершенных моделей является модель Уолфиш-Икегами, разработанная в рамках программы проекта 231 Международного союза по телекоммуникациям (ITU – International Telecommunication Union) и получившая в дальнейшем название COST 231 Уолфиша-Икегами или сокращенно WIM [68]. Основными параметрами модели Уолфиша-Икегами являются особенности городской застройки, приведенные на рисунке 2.12.

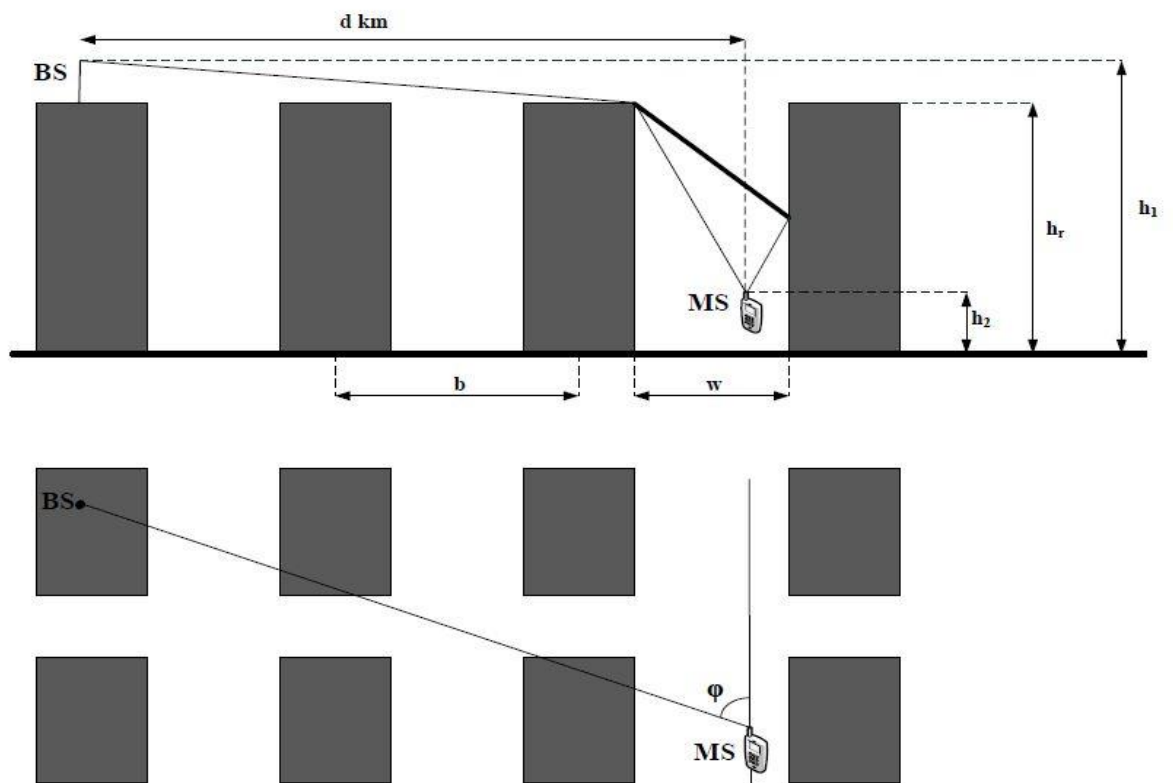


Рисунок 2.12 – Параметры модели Уолфиша-Икегами с учетом распространения радиосигнала.

Эта модель наиболее применима для густонаселенной территории с различной расстановкой базовых станций. Данная модель применяется для решения задач расстановки базовых станций при следующих основных параметрах:

- полоса частот от 800 МГц до 2000 МГц;
- высота антенны базовой станции от 4 м до 50 м;
- высота антенны мобильного абонента от 1 м до 3 м;
- высота близлежащих к базовой станции зданий  $\leq 80$  м;
- расстояние между домами от 20 м до 50 м;
- ширина улицы от 10 до 25 м;
- ориентация улицы относительно приходящего сигнала от  $0^0$  до  $90^0$ .

Модель Уолфиша-Икегами используется для расчета топологии сетей мобильной связи в условиях плотной городской застройки.

В модели Уолфиша для вычисления медианного значения затухания  $L_b$  используется эмпирическая формула, в которой затухание описывается как сумма потерь распространения волн в свободном пространстве, с учетом потерь отражённого сигнала от зданий, потерь и дифракции сигнала (2.16) [73]:

$$L_b = \begin{cases} L_o + L_{rts} + L_{msd}, & L_{rts} + L_{msd} \geq 0 \\ L_o, & L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases}, \quad (2.19)$$

где,  $L_o$  – потери при распространении волн в свободном пространстве, дБ (2.18);  $L_{rts}$  – потери сигнала при отражениях от зданий, дБ (2.19);  $L_{msd}$  – потери за счет дифракции, дБ (2.22).

$$L_o = 32,45 + 20 \lg d_{km} + 20 \lg f_{MHz}, \quad (2.20)$$

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \lg w + 10 \lg f_{MHz} + 20 \lg (h_r - h_2) + L_{ori}, \quad (2.21)$$

где,  $L_{ori}$  – потери, в следствии расположения улиц относительно направленности сигнала, дБ (2.22);  $w$  – ширина улицы, м.

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi, & 0 \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35), & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}, \quad (2.22)$$

где  $\varphi$  – угол ориентации улицы относительно направленности сигнала, следует отметить, что при  $\varphi=28,25$  значение  $L_{ori}$  принимает значение равное нулю.

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \lg d_{km} + k_f \cdot \lg f_{MHz} - 9 \lg b, \quad (2.23)$$

где,  $L_{bsh}$  – переменная, учитывающая уменьшение потерь, при расположении антенна базовой станции выше зданий (2.24);  $k_a$  – коэффициент, который учитывающий значение влияния радиуса соты на потери  $L_{msd}$  (2.23);  $k_d$  – коэффициент влияния высоты антенны базовых станций относительно зданий (2.26);  $d_{km}$  – расстояние между базовой и мобильной станцией, км;  $k_f$  – коэффициент учитывающий влияние значение частоты сигнала в зависимости от ландшафта;  $b$  – расстояние между домами, м.

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \lg(1 + h_1 - h_r), & h_1 > h_r \\ 0 & h_1 \leq h_r \end{cases}, \quad (2.24)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_1 > h_r, \\ 54 - 0,8(h_1 - h_r), & d_{km} \geq 0,5, h_1 \leq h_r, \\ 54 - 1,6d_{km}(h_1 - h_r) & d_{km} < 0,5, h_1 \leq h_r \end{cases} \quad (2.25)$$

где  $h_1$  – высота передающей антенны базовой станции, м;  $h_2$  – высота антенны абонента над уровнем земли, м;  $h_r$  – высота близлежащих к передающей антенне зданий, м.

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_1 > h_r, \\ 18 - 15(h_1 - h_r)/h_r & h_1 \leq h_r \end{cases}, \quad (2.26)$$

$$kf = \begin{cases} -4 + 0.7(f_{MHz}/925 - 1), & \text{для города средних размеров и пригорода} \\ & \text{с умеренными лесопосадками;} \\ -4 + 1.5(f_{MHz}/925 - 1), & \text{для крупного города (мегаполиса).} \end{cases} \quad (2.27)$$

где  $f_{MHz}$  – частота сигнала, МГц.

При хаотичной застройке значения параметров  $h_r$ ,  $b$ ,  $w$  выбирают, исходя из их среднего значения, полученного для маршрута распространения (Рисунок 2.13), где  $b_i$  и  $w_i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots$ ).

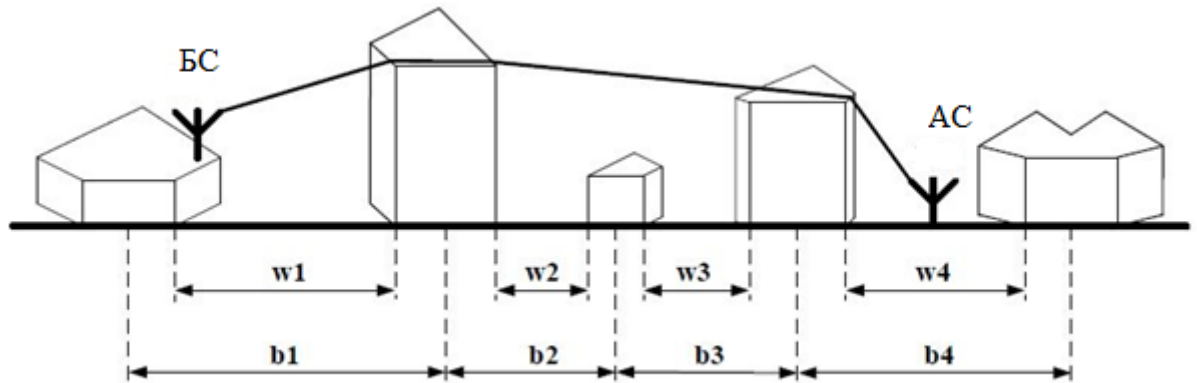


Рисунок 2.13 – Определение параметров модели Уолфиша-Икегами для хаотичной застройки

### 2.2.5 Модель канального распространения сигналов SUI

При передаче данных на качество сигнала влияют потери сигнала в радиоканале. Поэтому при планировании сети сотовой связи необходимо учитывать следующие параметры: потери при передаче по радиоканалу (включая затенение), изменение задержки при использовании многолучевых антенн, характеристику затухания, эффект Доплера, внутриканальные и межканальные помехи. Данные параметры напрямую зависят от рельефа местности, плотности застройки, наличия насаждений, высот антенн базовых станций и абонентов,

погодных условий.

Модель Stanford University Interim (SUI) [61] была разработана группой 802.16 IEEE совместно со Стэнфордским университетом, она является расширением модели Хата с параметрами коррекции для частот выше 1900 МГц. Канальная модель распространения сигналов SUI учитывает потери при распространении по трем различным типам местности и может использоваться для проектирования, разработки и тестирования сетей сотовой связи в диапазоне 3,5 ГГц – 11 ГГц. Модель SUI учитывает зависимость затухания радиосигнала от расстояния между базовой станцией и абонентом, частоты и типом местности.

Рассмотрим влияние типов местности на качество сигнала. Максимальные потери сигнала возникают при распространении через горную (холмистую) местность с большими лесными массивами, с плотностью застройки от средней до сильной (категория А). Территорией с минимальными потерями при распространении является равнинная местность с одноэтажной сельской застройкой и малой плотностью деревьев (категория С). Категория В учитывает средние величины потерь распространении сигнала мобильной связи в холмистой местности и редкой растительностью, пригородной зоне с разновысотными постройками [65].

Модель SUI применяется при выполнении следующих условий:

- 1) радиус покрытия отдельных ячеек не должен быть более 8км;
- 2) высота антенны на приемном модуле составляет от 2 до 10 м;
- 3) высота антенны передающего источника (базовой станции) составляет от 15 до 40 м;
- 4) покрытие сотовой связи составляет от 80 до 90%.

Главное отличием этой модели от существующих является введение показателя потерь на трассе  $\gamma$  и стандартного отклонения слабого затухания  $s$  в качестве случайных величин, полученных с помощью статистической процедуры.

При определении потерь при распространении сигнала применяется корректирующая формула (2.28), использующая частоту работы базовой станции, высоты антенн базовой и абонентской станции, тип местности.

$$L = 20 \lg \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 10\gamma \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + \delta + 6 \lg \left( \frac{f}{2000} \right) - 20 \lg \left( \frac{h_{аб}}{2} \right) \quad (2.28)$$

где,  $d_0 = 100$  м;  $\lambda$  – длина волны, м;  $\gamma = (a - b * h_{БС} + c / h_{БС})$  – экспонента потерь сигнала мобильной связи, дБ;  $d$  – расстояние от базовой станции до абонентской, м;  $h_{БС}$  и  $h_{аб}$  – высоты антенн базовой и абонентской станциями, м;  $\delta$  – случайная составляющая потерь при распространении, дБ;  $f$  – рабочая частота, МГц;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, зависящие от категории местности согласно таблице 2.2.

Таблица 2.2. Зависимость коэффициентов от категории местности

Коэффициенты	Категория местности А	Категория местности В	Категория местности С
$a$	4,6	4	3,6
$b$	0,0075	0,0065	0,005
$c$	12,6	17,1	20

Для данной модели абоненты представляются множеством статических «тестовых» точек, каждая из которых соответствует сообществу клиентов с одинаковыми условиями передачи сигналов [12]. Каждая тестовая точка имеет свое предполагаемое количество запросов пользователей, выявленных в результате предварительного исследования. Соответственно, зонам с большой плотностью тестовых точек будет соответствовать большее количество потребляемого трафика.

Использование поправочных коэффициентов в формуле (2.25) необходимо для получения более точных результатов для категорий местности А, В, С. На рисунке 2.14 приведена зависимость высоты подвеса базовой станции от показателя потерь сигнала в сетях сотовой связи, без учета поправочных коэффициентов.

Из рисунка 2.14 следует, что все три графика стремятся к одинаковым

значениям  $\gamma$  для высоты базовой станции выше 2 м, вследствие чего расчеты потерь становятся менее точными для различных категорий местности. Следует отметить тот факт, что категория С характеризуется наибольшими показателями потерь на трассе, а в категории А наименьший показатель потерь на трассе.

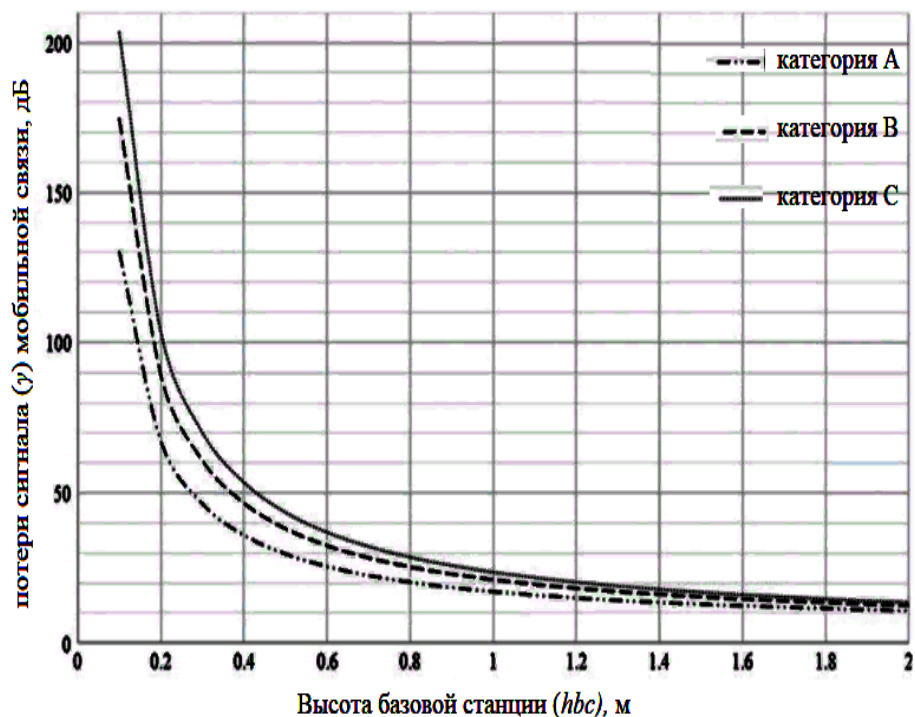


Рисунок 2.14 – Зависимость высоты подвеса базовой станции от показателя потерь сигнала в сетях сотовой связи, без учета поправочных коэффициентов

Очевидно, что при использовании рабочих частот выше 2 ГГц, а также высоты антенн базовой станции между 2 и 10 м, необходимо использовать поправочные коэффициенты для каждой категории местности, приведенных в таблице 2.2.

На рисунке 2.15 показано, что при высоте базовой станции выше 3 метров наибольшее затухание характерно для категорий местности А и В (наибольший показатель потерь), что подтверждает мнение о необходимости использования поправочных коэффициентов в модели SUI.

Таким образом, применение модели SUI с поправочным коэффициентом в



полной мере позволяет учитывать потери при распространении сигнала для различных типов местности.

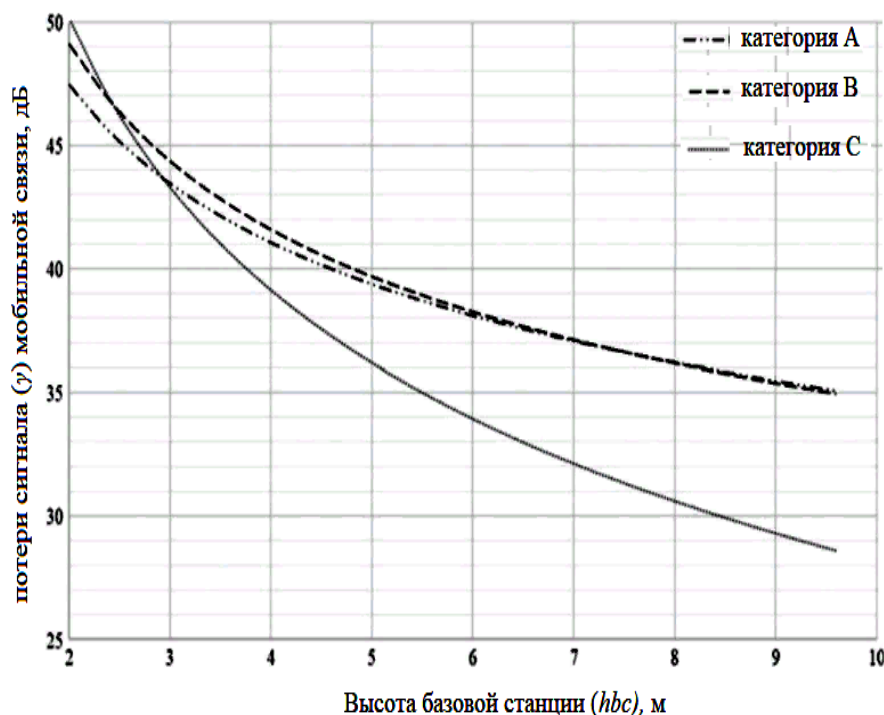


Рисунок 2.15 – Зависимость высоты подвеса базовой станции от показателя потерь сигнала в сетях сотовой связи, с учетом поправочных коэффициентов

### 2.3 Метод расстановки базовых станций сетей пятого поколения

При построении существующих сетей мобильной связи главной задачей является оптимальное размещение базовых станций. Рассмотрим существующий метод расстановки базовых станций, условиями расстановки станций являются определенная территория и количество абонентских станций, которые должны быть подключены к минимальному количеству базовых станций с гарантией соответствующего качества услуг [22, 25].

Для определения количества абонентских станций, на первом этапе построения сети, анализируется количество потенциальных пользователей, а также услуги, которые могут предоставляться абонентам их устройствам, а вследствие и примерная полоса пропускания. Таким образом оператор связи может предположить, где необходимо размещать базовые станции, чтобы обеспечить требования к показателям качества QoS.

Для решения задачи, необходимо определить начальные параметры такие как:

$m = \overline{1, M}$  – координаты расположения базовых станций, где  $m$  – число планируемых мест расстановки БС;

$n$  – количество типов станций,  $n = \overline{1, N}$ ;

$k$  – число абонентов с заданными координатами,  $k = \overline{1, N}$ ;

$b_n$  – производительность станции  $m$ -го типа, Гбит/с;

$c_n$  – стоимость станции  $m$ -го типа, усл. ед;

$b_k$  – требуемая полоса пропускания для  $n$ -го абонента, Гбит/с;

$$X_{mn} = \begin{cases} 1, & \text{если станция } m \text{ – го типа, расположена на } s \text{ – ом месте;} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases};$$

$$Y_{km} = \begin{cases} 1, & \text{если абонент подключен к станции расположенной на } s \text{ месте} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$W_{kmn} \begin{cases} W_{kmn}^1 > 0, & \text{если расстояние } r \leq R_1 \\ W_{kmn}^2 > 0, & \text{если расстояние } R_1 < r \leq R_2, \\ W_{kmn}^3 = 0, & \text{если расстояние } r > R_2 \end{cases} \text{ усл. ед.}$$

где  $W_{kmn}^1$  – стоимость подключения  $n$ -го абонента к станции  $m$  типа, при условии, что она расположена на  $s$ -ом месте;

$R_2$  – радиус действия базовой станции;

$R_1$  – расстояние до базовой станции, на котором качество сигнала меняется не существенно,  $R_1 = R_2/2$  [23].

Если  $r > R_2$  (в случае если абонент находится не в зоны действия сети), то подключение невозможно и  $W_{kmn}^3 = 0$ .

Переменная  $W_{kmn}$  разбита на три составляющие, ее значения зависят от расстояния, зоны покрытия базовой станции, мощности передачи базовой станции и абонентского устройства, от типа абонентской станции, а также условий работы (рельеф, тип местности (городская, сельская застройка), которые значительно влияют на дальность и качество работы мобильных станций [24].

Сформулируем и рассмотрим ограничения, которые возникают при постановке задачи.

1. В каждом из планируемых мест размещения базовых станции располагается не более одной базовой станции:

$$\forall t \sum_{n=1}^N X_{tn} \leq 1 \quad (2.29)$$

2. Любая абонентская станция в определенный момент времени подключена только к одной базовой станции:

$$\forall k \sum_{m=1}^M Y_{km} = 1 \quad (2.30)$$

3. Из условия подключения абонентской станции только к одной базовой станции и условия размещения одной базовой станции в планируемом месте следует, что для определенного абонента  $k$  из всех элементов  $Y_{km}$  только один элемент равен единице. Одновременно с этим, из условия (2.29) следует, что для определенного места кандидата  $t$  среди всех элементов  $X_{tn}$  существует не более одного. Расположение базовой станции  $t$ -ом месте планируемого размещения базовой станции и подключения к ней  $n$ -го абонента можно описать следующим выражением:

$$\forall k \sum_{m=1}^M Z_{ns} \sum_{n=1}^N Y_{km} X_{kn} \geq 1 \quad (2.31)$$

Из выражения следует, что для определенного абонента  $k$  из всех произведений  $Y_{km} X_{kn}$  только одно равно единице. Поставив в соответствие каждому произведению значение  $Y_{km}$  и  $X_{kn}$  переменную  $Z_{kmn}$ , получим стоимостное выражение подключения  $k$ -го абонента при заданной конфигурации сети:

$$\forall k \sum_{m=1}^M Z_{ns} \sum_{n=1}^N W_{kmn} Z_{kmn} \geq 1 \quad (2.32)$$

4. Обеспечение соответствующего качества обслуживания является одним из ключевых факторов планирования сети. Оператор связи несет ответственность за качество предоставляемых услуг потребителю. Для потребителя (абонента) одним из критериев качества обслуживания является соотношением фактической скорости передачи данных и скорости, заявленной оператором. В стандарте 5G поддержка качества обслуживания является одной из приоритетных задач. Следовательно, необходимо ввести ограничения для того, чтобы обеспечить выполнение требований качественного обслуживания абонентов:

$$\forall m \sum_{n=1}^N b_n X_{mn} \geq \sum_{k=1}^K b_k Y_{km} \quad (2.33)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что значение суммарного трафика всех абонентских устройств, подключенных к станции  $m$ -го типа, расположенной на  $n$ -ом месте, должны быть меньше значения производительности данной базовой станции.

Решение задачи состоит в том, чтобы из большого количества возможных мест расстановки базовых станций выбрать единственно верное место, на котором работа базовой станции обеспечит устойчивое подключение всех абонентов с минимальной стоимостью. Для решения этой задачи необходимо решить целевую функцию стоимости, записанной в виде следующего выражения:

$$\varphi = \sum_{k,m,n} W_{kmn} X_{mn} Y_{km} + \sum_{m,n} c_n X_{mn} \quad (2.34)$$

Таким образом, найденное минимальное значение из множества возможных значений целевой функции стоимости, соответствует минимальному количеству базовых станций, обеспечивающих покрытие необходимой территории,  $\varphi \rightarrow \min$ .

При постановке задачи не рассматривался уровень потерь при

распространении сигнала в радиоканале между антенной базовой станции и антенной абонентского устройства. На качество соединения и качество предоставляемых услуг в сетях мобильной связи в значительной мере влияют потери в радиоканале. При обслуживании радиоканала (канала беспроводной мобильной связи) возникает необходимость учитывать различные параметры потерь при передаче сигнала такие, как: замирания сигнала, затенение поверхностей, эффект Доплера, внутриканальная и межканальная интерференция, характеристика затухания сигнала. Однако описанные потери возникают в зависимости от ряда факторов: условий ландшафта, плотности застройки и ее качества, высоты антенн базовой и абонентской станции, погодных условий и времени года [15]. Рассмотренные в этом разделе модели распространения сигналов учитывают большинство этих факторов. В диссертационной работе предлагается использовать канальную модель распространения сигналов [37], которая более подробно будет рассмотрена в подразделе 2.4.

#### 2.4 Усовершенствование метода территориального планирования на базе модели SUI.

При рассмотрении методов территориального планирования был сделан однозначный вывод необходимости применения метода кластерного территориального планирования сети мобильной связи. Для устранения недостатков этого метода предлагается использовать совместно с данным методом эмпирические модели распространения сигнала.

Анализ эмпирических моделей распространения сигнала систем сотовой связи показал, что модели Ли, Окамуры, Хата, Уолфиша-Икегами могут успешно применяться при планировании систем мобильной связи с различными недостатками для каждой модели.

Модель Ли может использоваться для городской и сельской местности, однако при использовании этой модели следует обращать внимание, что местности на местности с большими перепадами высот действующая высота антенны может существенно отличаться от ее физической высоты.

Модели Окамуры лучшим образом подходит для городской застройки и районов с одноэтажными зданиями, однако эффективность ее падает при использовании для открытой и сельской местности, она является наиболее используемой и считается наилучшей моделью.

Модель Хата дает возможность оценить зависимость потерь сигнала от несущей частоты, высоты антенны базовой станции и антенны абонентской станции, типа местности. Более точные результаты для описания процессов распространения сигнала для расстояний свыше 1 км и частот до 1,5 ГГц.

Теоретически модели Окамуры, Хата может использовать только базовых станции с высотой антенны превышающей 30м, однако их применение возможно и для более низких высот при условии, что высота соседних зданий значительно ниже высоты антенны базовой станции.

Модель Уолфиша-Икегами применима при расчете топологии сетей мобильной связи в условиях насыщенной городской застройки

Данная модель отличается от других моделей тем, что она использует наложение отраженных волн пришедших в точку приема с нескольких направлений. Однако, по сравнению с другими описанными выше моделями, такими как модели Окамура и Хата, модель Уолфиша-Икегами требует большего количества информации об условиях местности и характера застройки.

Анализ показал, что все перечисленные модели не могут использоваться для планирования сетей сотовой связи 5G в следствии того, что диапазон их ограничен частотами 2ГГц (Таблица 2.3).

Таким образом, наиболее подходящим методом для планирования сетей мобильной связи 5G является метод канального распространения сигналов SUI который может использоваться для частот в диапазоне 1-11ГГц.

Таблица 2.3 Частотный диапазон применения эмпирических моделей

Модель	Диапазон действия (МГц)									
	100	150	450	500	800	1000	1500	2000	3000	5000
Ли										
Окамуры										
Хата										
Уолфиша-Икегами										
SUI										

На основании вышесказанного для планирования сети мобильной связи 5G предлагается использовать модифицированную модель распространения сигналов систем мобильной связи. За основу, с учетом всех моделей, рассмотренных в разделе 2.2. принята канальная модель распространения сигнала SUI.

При разработке модифицированной задачи учитывался тот факт, что в ней не подымается вопрос учета потерь распространения сигнала. Значение потерь  $L$  рассчитанных по формуле (2.28) при использовании в формуле целевой функции (2.34), нарушили бы размерность целевой функции. Для решения этой проблемы в формулу было добавлено третье слагаемое с коэффициентом  $g_{km}$ , который обеспечивает учет потерь сигнала (2.35).

$$\varphi = \sum_k \sum_m \sum_n W_{kmn} X_{mn} Y_{kn} + \sum_m \sum_n c_n X_{mn} + \sum_k \sum_m \frac{1}{g_{km}} Y_{km} \rightarrow \min, \quad (2.35)$$

где  $g_{km}$  ( $0 < g_{km} \leq 1$ ) – коэффициент распространения сигнала мобильной связи в радиоканале при различных условиях между  $k$ -м абонентским устройством и базовой станцией, расположенной на  $m$ -м планируемом месте.

Для корректного вычисления целевой функции, с целью ее минимизации, в знаменателе дроби третьего компонента формулы (2.32) добавлен коэффициент  $g_{km}$ . Этот коэффициент должен удовлетворять главному критерию сохранения

формулировки задачи при решении ее методами целочисленного программирования. Для решения задачи усовершенствования метода территориального планирования на базе модели SUI производится расчет потерь сигнала в радиоканалах между всеми базовыми станциями в местах планируемого размещения и станциями абонентов. Каждому множеству значений потерь при распространении  $L$  сигнала мобильной связи, рассчитанных по формуле (2.28), соответствует свой коэффициент  $g_{km}$ . При минимальных значениях потерь значение  $g_{km}$ , равно единице, а для максимально возможных потерь при распространении  $L_{max}$  значение коэффициента  $g_{km}$ , стремится к нулю. Каждому множеству потерь соответствует единственное значение коэффициента. Коэффициенты  $g_{km}$ , выбирают таким образом, что при делении единицы на коэффициент  $g_{km}$  получались бы целые числа 1, 2, 3 и т.п. Пример определения коэффициента  $g_{km}$  для различных значений  $L$  приведен в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Значение коэффициента  $g_{km}$  от величины потерь

$L$ , дБ	10	12,9	18,6	22,3	27,4	30
$g_{km}$	1	0,5	0,33333333	0,25	0,2	0,16666666

В целевой функции (2.32) первое слагаемое является стоимость переменной подключения абонентов для заданной конфигурации сети, второе отражает стоимость базовых станций, расположенных на планируемых местах, третье слагаемое, как говорилось выше, учитывает потери в каналах распространения систем сотовой связи.

При точных расчетах потерь распространения сигнала возникает необходимость учитывать колебания сигнала относительно среднего уровня, так называемы медленные замирания, связанные с метеоусловиями, и колебания сигнала связанные с быстрыми замираниями, которые возникают при движении абонентской станции и при нахождении абонентской станции в условиях плотной городской застройки. Дополнительным требованием является использование при расчете завышенного значения мощности сигнала на входе приемной антенны



абонентских станций. Это связано с тем, что входящий сигнал имеет стандартные характеристики непосредственно влияющие на коэффициент надежности связи  $S(k_{mp})$  – отклонения сигнала по месту ( $y_d$ , дБ) и по времени ( $y_t$ , дБ). В данной работе указанные выше характеристики потерь при распространении сигнала в радиоканале мобильной связи не будут учитываться, так как для решения поставленной задачи нами выбран коэффициент  $g_{km}$  (2.25), его универсальность состоит в том, что он в достаточной мере учитывает описанные характеристики потери в зависимости от местонахождения базовой станции.

## 2.5. Выводы по второму разделу

1. Основной задачей территориального планирования систем сотовой связи является предоставление абонентам сотовой сети частотных диапазонов передачи и приема сигнала, исключающих или предельно уменьшающих уровень взаимных помех, обеспечение необходимого трафика для заданной территории с требуемым уровнем показателей качества мобильной связи QoS. В результате анализа методов территориального планирования был выбран метод для решения данной задачи и способы его усовершенствования.

2. Применение усовершенствованного метода позволит провести планирование сети 5G с оптимальным использованием ресурса оператора мобильной связи с требуемой канальной емкостью сети, трафиком и качеством.

3. Разработанная канальная модель распространения сигнала дает возможность планировать сети сотовой связи 5 поколения путем оптимального расположения базовых станций с учетом потерь, возникающих при передаче сигнала по радиоканалу мобильной связи. Базовые станции будут располагаться в зависимости от внутриканальных и межканальных помех, а также местности, плотности застройки, наличия насаждений, высот антенн базовых станций и абонентских станций, погодных условий.

## РАЗДЕЛ 3

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СЕТЕЙ 5G С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА QOS МЕТОДОМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ.

В связи с ростом потребностей абонентов в качественной мобильной связи операторы связи вынуждены переходить на новый формат 5G, в результате чего возникает заинтересованность в том, чтобы мобильная связь отвечала необходимым критериям как в вопросе качества услуг, которые предоставляются потребителю, так и в вопросе надежности связи, затрагивающей как интересы потребителей, так и самого оператора. В процессе проектирования мобильной сети задание выбора лучшего варианта состоит в определении варианта с оптимальными показателями качества с одной стороны и минимальным количеством базовых станций с другой стороны.

При выборе концепции проекта и отсутствии достоверных данных, решение часто принимается в условиях неопределенности. Как правило, известны характеристики работы сети в отдельных стандартных условиях (таких как многоэтажная застройка, шоссе, село и т.д.), однако достоверной информации, как поведет себя сеть в целом на этапе проектировки, нет.

Важность принятия решения о выборе проекта состоит и в том, что помимо возможности предоставления некачественных услуг связи, возникает вопрос увеличения стоимости сети, для исправления недостатков, и соответственно финансовые потери оператора мобильной связи.

Необходимо отметить, что при проектировании мобильных сетей первых поколений выбирался один базовый критерий - качество голосовой связи и на базе него создавалась сети мобильной связи. Однако сейчас, в связи с возросшими требованиями потребителей, стало очевидно, что для создания оптимальной сети необходимо руководствоваться несколькими критериями, причем в ряде случаев противоречивыми.

На этапе проектирования сетей мобильной связи актуальным выглядит определение как самих отдельных критериев, так и их количества. Однако анализ мобильной сети по нескольким критериям является сложной задачей, поскольку сеть, по сути, не однородна с точки зрения топологии и загруженности базовых станций, и в каждом отдельном случае критерии оказывают отдельное влияние.

Известные математические методы оптимизации используют алгоритмы скалярного синтеза по одному критерию. Поэтому при проектировании мобильной сети возникает задача сведения векторного анализа к скалярному.

Для решения этой проблемы целесообразно использовать усовершенствованный метод многокритериальной оптимизации. Использование этого метода позволит сократить время проектирования, упростить процесс проектирования сетей 5G и исключить принятие проектировщиками субъективных решений. Метод многокритериальной оптимизации решает вопрос нахождения оптимальной конфигурации сети, исходя из всех требований потребителя и поставщика услуг мобильной связи.

### 3.1 Постановка задачи для обеспечения оптимальных показателей качества в сетях 5G

Для достижения требуемых показателей качества обслуживания в сетях пятого поколения необходимо поставить задачу оптимизации расстановки базовых станций.

Оптимизацию можно рассматривать как совокупность математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение и идентификацию лучших вариантов из множества других вариантов, а также процесс приведения системы к оптимальному состоянию [31, 53, 59].

Для того что бы решить задачу оптимизации необходимо исходить из требований потребителей услуг мобильной связи, эти требования являются критериями, на основании которых и формируется оценка качества работы сетей связи. Качество связи оценивается по численному значению критерия.

Учитывая, тот фактор, что показатели качества оцениваются по нескольким критериям, целесообразным является рассмотрение задачи многокритериальной оптимизации [55]. Суть многокритериальной оптимизации заключается в сравнении вариантов по двум или более критериям с целью нахождения оптимального (эффективного) варианта или одного из оптимальных (эффективных), если таких несколько. Решая задачи многокритериальной оптимизации, мы находим решение, при котором один из критериев не может быть улучшен без ухудшения других. Такое решение называется оптимальность по Парето. При решении задач, оптимальных по Парето, любое решение является оптимальным, если оно обладает свойством эффективности (в крайнем случае, мало эффективности).

В нашем случае в результате многокритериальной оптимизации при создании сети связи 5G решаются две основные задачи [41]:

- задача выбора оптимальной сети 5G, исходя из частных критериев, которыми она характеризуется;
- задача синтеза оптимальной структуры сети, то есть нахождения соответствующего расположения базовых станций.

На этапе планирования сетей 5G производится выбор частных оптимальных критериев, характеризующих функциональную надежность сети. Частные критерии должны соответствовать следующим требованиям:

- их количество должно быть минимальным и включать в себя наиболее важные частные критерии;
- вектор  $K$  (Формула 3.1) должен с достаточной точностью описывать функциональную надежность проектируемой сети.
- частные критерии должны иметь понятное содержание и характеризовать простые свойства сетей 5G.

Для сетей мобильной связи 5G наиболее значимыми критериями, которые в полной мере отображают качество обслуживания (QoS) являются [60]:

- критерий надежность передачи данных (N). Данный критерий характеризуется вероятностью неработоспособности (Q) сети. Критерий в полной

мере влияет на состояние всей сети связи, так при увеличении количества отказов отдельно взятой базовой станции надежность соединения снижается, что влечет за собой снижение надежности всей сети и качества ее работы.

- критерий скорости передачи (V) (пропускная способность). Критерий основного качественного показателя сети характеризуется относительными отклонениями от нормы коэффициентов использования емкости кольца  $\Delta\mu_{ring\_N}$  и сети  $\Delta\mu_{network}$ . Одним из примеров проявления данного критерия является неравномерная загрузка сети, при таком режиме работы сети часть базовых станций работает с перегрузкой, другая их часть простаивает либо недогружена, данная ситуация снижает надежность работы сети в первом случае и влечет необоснованные финансовые затраты во втором.

- критерий материальных затрат (C). Данный критерий характеризуется коэффициентом использования капитальных затрат  $K_{икз}$  на строительство базовых станций. Для операторов мобильной связи важным является предоставление качественных и надежных услуг мобильной связи при малых значениях критерия капитальных затрат.

Определив критерии оптимизации и влияние выбранных критериев на показатели качества QoS в сетях 5G, перейдем к оптимизации проектируемой сети мобильной связи.

Каждый из выбранных вариантов построения сети мобильной связи  $M_i$  можно описать целевой функцией (3.1) и функцией полезности (3.2).

$$\min K_i = K(N_i(\bar{x}_N), V_i(\bar{x}_V)), \quad (3.1),$$

$$C_i(\bar{x}_N, \bar{x}_V) \leq C_{npun}, \quad (3.2),$$

где  $K_i$  – вектор оптимального решения для сети мобильной связи 5G  $M_i$ ;

$N_i$  – частный критерий надежности передачи данных;

$V_i$  – частный критерий пропускной способности сети;

$C_i$  – частный критерий материальных затрат при создании сети;

$\bar{x}_N$  – вектор надежности передачи данных;  $\bar{x}_V$  – вектор пропускной способности сети;

$C_{don}$  – допустимое значение частого критерия материальных затрат.

На этапе планирования сети сотовой связи 5G и на этапе дальнейшей эксплуатации векторы надежности передачи данных имеют следующий вид:

$$\bar{x}_N = \begin{Bmatrix} P_{ab}, \\ P_k, \\ \Phi_k \end{Bmatrix}, \quad \bar{x}_N = \begin{Bmatrix} \tilde{\tau}_{ab} \\ \chi \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Вектор пропускной способности можно представить в следующем виде:

$$\bar{x}_V = \begin{Bmatrix} \mu_{link\_ij} \\ \mu_{MUX\_i} \\ \mu_{ring\_N} \\ \mu_{network} \end{Bmatrix}, \quad (3.4)$$

где  $\mu_{link\_ij}$ ,  $\mu_{MUX\_i}$ ,  $\mu_{ring\_N}$ ,  $\mu_{network}$  – коэффициенты использования емкости канальных групповых трактов, мультиплексоров, колец и сети в целом.

Общим ограничением, для рассматриваемых моделей с учетом трех критериев, является использование исключительно кольцевых схем при построении сетей мобильной связи 5G.

Ограничения для модели с учетом критерия надежности передачи данных описываются следующим множеством:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2 \leq \tilde{\tau}_{ab_{\text{номин.}}} \leq 5 \text{ мкс/км}, \\ n_{\text{рест\_номин.}} \leq 3, \\ 10^{-9} \leq \text{BER} \leq 10^{-11}, \\ t_{\text{перекл. SNCP}} \leq 30 \text{ мс}, \\ t_{\text{перекл. MSP, MS-SPRing}} \leq 50 \text{ мс}. \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Для модели функциональной надежности ограничения, которые накладываются сектором телекоммуникаций МЭС и операторами телекоммуникаций следующие:

- среднее допустимое время прохождения сигнала по маршруту для любой пары узлов составляет 2-5 мкс/км;
- количество рестартов для одного соединения – 2 (устанавливается оператором);
- значение BER в диапазоне  $10^{-9} \leq BER \leq 10^{-11}$ ;
- полная вероятность работоспособности сети должна быть не меньше, чем 0.99999.

Для моделей с учетом критерия пропускной способности применяются следующие ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ij} \leq v_{link_{ij}}, \\ v_{ring\_N} \leq v_{\Sigma\_ringN}, \\ 0,7 \leq \mu_{link_{ij}} \leq 0,8, \\ 0,7 \leq \mu_{MUX_i} \leq 0,8, \\ 0,7 \leq \mu_{ring\_N} \leq 0,8 \\ 0,7 \leq \mu_{network} \leq 0,8. \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Для моделей материальных затрат при создании сети используют ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{MOD} \leq C_{MAX\_MOD}, \\ C_{NETWORK} \leq C_{MAX\_NETWORK}, \\ 15 \leq r \leq 30 \%, \\ 3 \leq t \leq 5 \text{ лет.} \end{array} \right. \quad (3.7)$$

где  $C_{MOD}$  – затраты оператора на модернизацию сети;  $C_{MAX\_MOD}$  – максимально возможные затраты оператора на модернизацию сети;  $C_{NETWORK}$  – капитальные затраты на строительство сети;  $C_{MAX\_NETWORK}$  - максимально возможные инвестиционные вложения на строительство сети;  $r$  – величина средне рыночной прибыли среди операторов на рынке СНГ в период 2016-2018 гг.;  $t$  – период окупаемости инвестиций.

Значения выбранных частных критериев должны отвечать следующим условиям:

- быть положительными и больше нуля:

$$N_i > 0, V_i > 0, C_i > 0;$$

- значения частных критериев и вектора стремятся к минимуму:

$$N_i, V_i, C_i \rightarrow \min, K_i \rightarrow \min.$$

Так как каждый из выбранных критериев является величиной скалярной для нахождения оптимального значения используем векторный синтез. В трехмерном пространстве  $\psi$  показателей качества QoS в сетях 5G( $C_i, N_i, V_i$ ) каждой системе  $M_i$  соответствует единственное выбранное значение вектора  $K_i$ , и наоборот каждому вектору  $K_i$  соответствует единственно выбранная система  $M_i$ . В пространстве  $\Psi$  всем допустимым значениям вектора  $K_i$  соответствует множество допустимых точек  $N_{\text{доп}}$ . Вид области  $N_{\text{доп}}$  зависит от множества условий и ограничений, которые применяются к разрабатываемой сети мобильной связи  $T_i$  и ее частным критериям выбранным выше.

Таким образом задание векторного синтеза в нашем случае состоит в том, чтобы из множества допустимых точек (координат расположения базовых станций) выбрать такую точку  $A$  с координатами  $(C_a, N_a, V_a)$ , которая имела бы оптимальные значения вектора  $K$  (Рисунок 3.1) и отвечала бы оптимальным критериям качества сети мобильной связи 5G.

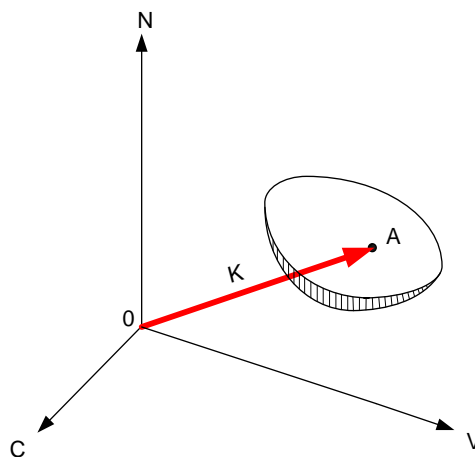


Рисунок 3.1. Векторное изображение показателей качества QoS сетей 5G.



### 3.2 Определение множества возможных вариантов расположения базовых станций для сетей мобильной связи 5G

При использовании усовершенствованного метода многокритериальной оптимизации выбранные частные критерии позволяют в полной мере описать и оптимизировать параметры сети мобильной связи 5G.

Анализируя  $v_i$  вариантов расположения базовых станций сети мобильной связи, приходим к выводу, что каждому вышеуказанному варианту расстановки базовых станций соответствуют состояния сети  $S_1, S_2, S_3$  для которых частные критерии принимают значения  $N_i, V_i, C_i$ . Для каждого из предложенных вариантов, руководствуясь обобщенными показателями качества  $QoS_g(v_i)$ , необходимо выбрать оптимальный вариант  $v_{optim}$ . Именно основываясь на значении  $g(v_i)$  будет выбран оптимальный вариант расположения базовых станций по трем частным критериям: надежности передачи данных, скорости передачи данных и величине материальных затрат.

Варианты расположения и соответствующие им значения критериев представим в виде матрицы  $G$  (3.8).

$$G = \begin{pmatrix} & S_1 & S_2 & S_3 \\ v_1 & g_{11} = N_1, & g_{12} = V_1, & g_{13} = C_1, \\ v_2 & g_{21} = N_2, & g_{22} = V_2, & g_{23} = C_2, \\ v_3 & g_{31} = N_3, & g_{32} = V_3, & g_{33} = C_3, \\ v_4 & g_{41} = N_4, & g_{42} = V_4, & g_{43} = C_4, \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_l & g_{l1} = N_l, & g_{l2} = V_l, & g_{l3} = C_l, \end{pmatrix}, \quad (3.8),$$

где  $S_1, S_2, S_3$  – условия функционирования сети, при котором система связи принимает однозначные значения показателей надежности, скорости и материальных затрат;

$v_1, v_2, v_3$  – варианты расположения базовых станций, используемых для нахождения оптимального решения задачи.

Однако следует отметить, что используемые частые критерии имеют различную размерность и для того, чтобы использовать метод оптимизации необходимо выполнить нормирование значений матрицы  $G$  приведя их к одному масштабу. Выбор варианта масштабирования проведем из понимания, что данный процесс носит субъективный характер [4,27]. Наиболее предпочтительным в данном случае является способ нормирования показателей на основе усреднения значения каждого показателя:

$$\tilde{N}_{\vartheta_i} = \frac{N_i - \bar{N}}{\bar{N}}, \quad \tilde{V}_{\vartheta_i} = \frac{V_i - \bar{V}}{\bar{V}}, \quad \tilde{C}_{\vartheta_i} = \frac{C_i - \bar{C}}{\bar{C}}, \quad (3.9)$$

где  $\bar{N}, \bar{V}, \bar{C}$  – среднее значение для каждого из критериев.

Средние значения для каждого из частных критериев найдем, исходя из количества вариантов расположения базовых станций (3.10, 3.11, 3.12).

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^l N_i}{l}, \quad (3.10)$$

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^l V_i}{l}, \quad (3.11)$$

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^l C_i}{l}, \quad (3.12)$$

где  $l$  – количество вариантов решений для выбранной сети мобильной связи 5G.

Так как количество вариантов в теории стремиться к бесконечности, то после масштабирования частных критериев для ограничения области принятия решений необходимо уменьшить степень неопределенности [58, 59]. Для решения данной задачи наиболее целесообразно использовать методы которые будут эффективны на этапе уменьшения области возможных решений, эти методы используются в условиях неопределенности или частичной неопределенности. Рассмотрим некоторые из этих методов [43]:

1. *Метод равных вероятностей.*

Использовании данного метода основано на том, что оптимальный вариант значения  $v_{optim}$  выбирается исходя из минимального значения обобщенного

показателя качества QoS  $q_{pb}$ .

$$v_{optim} = \arg_{\min_i} \left\{ q_{pe}(v_i) = \bar{g}(v_i) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k g_{ij}, i = \overline{1, l} \right\}, \quad (3.13)$$

где  $k$  – количество показателей (в нашем случае  $k=3$ ).

## 2. Метод Гурвица.

Для данного метода оптимальным вариантом  $v_{optim}$  будет вариант  $v_i$ , при котором оптимальный показатель качества будет  $q_{\Gamma}$  минимален:

$$v_{optim} = \arg_{\min_i} \left\{ q_{\Gamma}(v_i) = c \cdot q_{i\_min} + (1-c) \cdot q_{i\_max}, i = \overline{1, l} \right\}, \quad (3.14)$$

$$q_{i\_min} = \min_j \{ g_{ij}, j = \overline{1, k} \}, \quad (3.15)$$

$$q_{i\_max} = \max_j \{ g_{ij}, j = \overline{1, k} \}, \quad (3.16)$$

где  $c$  – весовой коэффициент,  $c \in (0;1)$ .

## 3. Метод Шаньявского.

Особенностью метода Шаньявского является то, что при его применении не только используются результаты метода равных вероятностей, но и происходит их корректировка. После корректировки полученных результатов оптимальный вариант будет выглядеть следующим образом:

$$v_{optim} = \arg_{\min_i} \left\{ q_{Ш}(v_i) = c \cdot q_{PB}(v_i) + (1-c) \cdot q_{i\_max}, i = \overline{1, l} \right\} \quad (3.17)$$

## 4. Минимаксный метод.

Использование минимаксного метода обеспечивает нахождение минимального значения из максимальных значений нормированных критериев. При использовании минимаксного метода применяется наименьшая априорная информация о системе, в результате чего определяется минимальное значение обобщенного показателя качества  $q_{min/max}(v_i)$  при котором вариант  $v_i$  будет оптимальным.

$$v_{optim} = arg\_min_i \{q_{min/max}(v_i)\}, \quad q_{min/max}(v_i) = max_j \{g_{ij}\} \quad (3.18)$$

### 5. Метод Сэвиджа.

Для каждого состояния сети  $S_k$  находим минимальные значения  $g_{in\_min}$  (3.19).

$$g_{i1\_min}, g_{i2\_min}, \dots, g_{lk\_min}. \quad (3.19)$$

Формируем новую матрицу  $H$  (3.5) вычитая значения  $g_{in\_min}$  от значений находящихся в соответствующих столбцах матрицы (3.8). В нашем частном случае матрицы  $H$  и  $G$  имеют по три столбца.

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} = g_{11} - g_{i1\_min}, & h_{12} = g_{12} - g_{i2\_min}, & h_{13} = g_{13} - g_{i3\_min}, \\ h_{21} = g_{21} - g_{i1\_min}, & h_{22} = g_{22} - g_{i2\_min}, & h_{23} = g_{23} - g_{i3\_min}, \\ \dots & \dots & \dots \\ h_{l1} = g_{l1} - g_{i1\_min}, & h_{l2} = g_{l2} - g_{i2\_min}, & h_{l3} = g_{l3} - g_{i3\_min}. \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

При использовании данного метода оптимальным вариантом  $v_i$  является тот, в котором показатель качества отвечает следующим условием:

$$v_{optim} = arg\_min_i \{q_{ces}(v_i), i = \overline{1, l}\}, \quad q_{ces}(v_i) = max_j \{h_{ij}, j = \overline{1, k}\}$$

Используя все варианты расположения базовых станций, выбранные с использованием как минимум трех вышеописанных методов, сформируем область Парето в которой сеть создается с учетом целесообразных решений, иными словами выбирается такое состояние сети, при котором улучшение значения каждого частного критерия влечет за собой без ухудшение значения других критериев [57].

### 3.3 Способы решения задач размещения базовых станций сетей 5G

Задачи размещения базовых станций пятого поколения, с учетом критерия качества QoS, решаются в зависимости от производительности базовых станций. Существует два варианта решения этих задач, при ограниченной производительности базовой станции и при неограниченной емкости обслуживаемых устройств. На данный момент емкость базовых станций ограничена, поэтому в диссертационной работе будет решаться задача с учетом ограниченной производительности сети и условием, что абонент будет обслуживаться в определенный момент только одной базовой станцией. Таким образом, поставленная задача является задачей комбинаторной оптимизации, широко применяемой в планировании и разработке телекоммуникационных сетей [76]. В обобщенном виде цель задачи состоит в размещении определенного количества базовых станций, обслуживающих некоторое множество абонентов, при минимальных затратах и с учетом критериев качества. Эту задачу решают, как задачу целочисленного программирования:

$$Z = \min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} f_i y_i \quad (3.21)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in J \quad (3.22)$$

$$\sum_{j \in J} w_j x_{ij} \leq \sum_{i \in I} s_i y_i, \quad \forall i \in I \quad (3.23)$$

$$x_{ij} \in [0,1], \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.24)$$

$$y_i \in [0,1], \quad \forall i \in I \quad (3.25)$$

где  $I = \{1, \dots, n\}$  – множество планируемых мест размещения базовых станций (БС);  
 $J = \{1, \dots, m\}$  – множество абонентов, абонентских станций (АС);

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j - \text{я АС обслуживается БС, расположенной на } i - \text{ом месте;} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases};$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если БС, расположена на } i - \text{ом месте;} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases};$$

$c_{ij}$  – стоимость обслуживания  $j$ -го абонента, обслуживаемого  $i$ -ой базовой станции;

$f_i$  – фиксированная стоимость установки базовой станции на  $i$ -м планируемом месте размещения;

$w_j$  – величина обращений каждого  $j$ -го абонента;

$s_i$  – емкость базовой станции, размещенной на  $i$ -м планируемом месте размещения.

При решении задач размещения базовых станций в большинстве случаев используется метод Лагранжевых релаксаций [62, 77]. Использование метода Лагранжевых релаксаций упрощают решение задач с множеством дополнительных ограничений, путем перехода к решению двойственной задачи. В нашем случае, релаксация применяется к ограничениям (3.22) и (3.23). Релаксированная задача легко решается и ее оптимальное решение дает оценку снизу (в задачах на минимум) для целевой функции исходной задачи. Если разрыв двойственности равен нулю, то данный метод позволяет найти и доказать единственное оптимальное решение задачи. При условии, что нижняя оценка не может быть точно определена, то ее множество значений могут быть использованы в методе ветвей и границ или служить начальным значением для решения с использованием эвристических методов [26, 40].

Задачу расстановки базовых станций можно охарактеризовать как задачу NP-трудную. Задачи класса NP решаются способами, которые можно условно разбить на две группы. К первой группе относятся способы, в которых максимально сокращается объема перебора, однако при этом и не исключается экспоненциальное время работы. К таким методам можно отнести метод Лагранжа [8, 28], методы ветвей и границ, методы отсечений, методы «неявного» перебора [7]. Во вторую группу можно включить способы, использующие так называемое

«снижение требований». Эти способы не преследуют цель найти точное решение за экспоненциальное время, результатом их применения является нахождение субоптимального (близкого к точному) решения за приемлемое время. При решении задач второй группы используют эвристические алгоритмы математически не всегда обоснованные, дающие хороший практический результат.

Задача расположения базовых станций для сетей мобильной связи 5G должна решаться в режиме реального времени, для этого программное обеспечение, представленное в 4 главе, использует как точные методы перебора, так эвристический метод. В ходе диссертационного исследования были опробованы следующие методы: полного перебора, ветвей и границ, поиска по соседству. Рассмотрим эти методы.

### 3.3.1 Метод полного перебора

Наиболее сложным с точки зрения вычислений является метод полного перебора, его использование при решении нашей задачи весьма трудоёмко. Однако, использование метода полного перебора наглядно показывает ход решения задачи и обеспечивает точное решение. В диссертационной работе при разработке алгоритма расстановки базовых станций метод использовался при проверке результатов для задач малой размерности: алгоритм считался верным при совпадении его результатов с результатами полного перебора. Общее количество вариантов решений, которые были обработаны алгоритмом при решении методом полного перебора, составило  $m^k$ .

Использование метода полного перебора обеспечило оптимальное решение для минимизации целевой функции стоимости и демонстрации процесса поиска при решении задач малой размерности.

Однако, использование данного метода, для решения диссертационной задачи с учетом ее большой размерности, не приемлемо так, как экспоненциальная зависимость времени расчета от количества входных данных существенно затрудняет решение поставленной задачи.

### 3.3.2 Метод ветвей и границ

Метод ветвей и границ основан на последовательном разбиении множества решений на подмножества (ветвления) и вычислении оценок (границ), это позволяет исключать заведомо неприемлемые (не удовлетворяющие критериям качества) подмножества. На каждом шаге подмножества проверяются на наличие оптимального решения. Проверка целевой функции осуществляется посредством оценки снизу вверх. Если значение найденных решений в текущей итерации лучше чем оценка снизу, то данное подмножество может не учитываться. Если оценка снизу лучше, то решение переходит в разряд лучшего. По окончании работы метода лучшая целевая функция является результатом работы.

При решении задач размещения базовых станций 5G использование метода ветвей и границ сводится к решению двойственных задач по отношению к ограничениям (3.22), условиям (3.23) – (3.25) остаются неизменными [71]. Задача содержит множители  $\lambda_j, j \in J$  и записывается в следующем виде:

$$Z_D(\lambda) = \sum_{j \in J} \lambda_j + \min_{x,y} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} (c_{ij} - \lambda_j) x_{ij} + \sum_{i \in I} f_i y_i \quad (3.26)$$

При условии  $i \in \text{argmin}\{c_{ij}: i \in I\}$  оптимальные множители Лагранжа могут находиться в интервале  $[\lambda^{\min}, \lambda^{\max}]$ , где:

$$\lambda_j^{\min} = \min \{c_{ij}: i \in I/\{j\}\}, \quad \lambda_j^{\max} = \max \{c_{ij}: i \in I\} \quad (3.27)$$

Задача Лагранжа в виде (3.26) сводится к двоичной задаче:

$$\lambda_0 = \min_y \{ \sum_{i \in I} (f_j - v_i) y_i : \sum_{i \in I} s_i y_i \geq d(J), y_i \in [0,1] \forall i \in I \}, \quad (3.28)$$

где  $v_i = \max_x \{ \sum_{j \in J} (\lambda_j - c_{ij}) x_{ij} : \sum_{j \in J} w_j x_{ij} \leq s_i, 0 \leq x_{ij} \leq 1, \forall j \in J \}$ .

Следовательно, функция Лагранжа  $Z_D(\lambda)$  и граница двойственной задачи  $Z_D = \max \{ Z_D(\lambda) : \lambda \in [\lambda^{\min}, \lambda^{\max}] \}$  могут быть найдены за псевдополиномиальное время.

Для поиска наилучшей нижней границы метод использует ряд условий.

Приблизительное значение нижней границы вычисляется с помощью субградиентной оптимизации. Инициализация множителей Лагранжа в корневом



узле происходит при условии  $\lambda = \lambda^{\min}$ , где  $\lambda$  находится по формуле (3.27). В других, не корневых узлах дерева инициализация множителей производится исходя из значений, найденных в корневом узле. Для оптимизации вычислений ограничено количество субградиентных шагов: 350 в корневом узле и 30 в дочерних узлах. В каждом узле начальный размер шага имеет значение  $a_t$ , который равен 2, в случае если после пяти итераций изменение нижней границы не привело к улучшению, то шаг делится на два.

Верхние границы и допустимые значения находят, решая транспортную задачу работы базовой станции  $i \in I$  при  $y_i^t=1$ . В корневом узле вероятное решение находится после каждого субградиентного шага. В других узлах транспортная задача решается один раз по окончании субградиентной процедуры. Процедура использует функцию Лагранжа  $y^t$ , для решения которой используются лучшие множители, найденных в результате использования субградиентного метода. Сгенерированные ранее различные множества базовых станций сохраняются в хэш-таблице, это необходимо для того, чтобы исключить периодически повторяющиеся решения одной и той же транспортной задачи. Максимально в таблице может содержаться 1009 хэш-значений, эти значения определяют общую стоимость решений.

В качестве переменной ветвления  $y_i$ , выбирается переменная, показывающая «относительную частоту использования». Соединения разрываются в произвольном порядке, рассматриваемый узел заменяется двумя дочерними узлами, значение переменных  $y_i$ , в которых будут соответственно 0 и 1.

На следующем шаге, для поиска наилучшей нижней границы, решается задача для узла, который содержит наименьшую нижнюю границу и вычисления, для которого еще не производили. Соединения так же разрываются в произвольном порядке.

Для дальнейшей оптимизации задачи, исследование с использованием метода Лагранжа применяется при улучшении наилучшего допустимого решения, найденного в течение процесса поиска. Если текущее решение Лагранжа принимает значение  $y^t$  двоичная переменная  $y_i$  принимается равной  $1-y_i^t$  и граница

Лагранжа вычисляется заново. При условии, что значение новой границы больше, чем существующая наилучшая глобальная верхняя граница, то переменная  $u_i$  может быть установлена значению  $u_i^f$ . Если после определенного субградиентного шага происходит улучшение допустимого решения, то в корневом узле выполняется исследование. В узлах дерева ветвлений, в которых отсутствуют улучшения исследования по методу Лагранжа выполняются только после завершения субградиентной процедуры.

Использование метода ветвей и границ позволяет получить оптимальное решение для различных задач размещения базовых станций. Задачи небольшой размерности решаются за приемлемое время с достоверным результатом.

Использование данного метода затруднительно в следствии того, что время работы и количество входных данных находятся в экспоненциальной зависимости и сложности с выбором оптимального способа определения нижних границ и процедуры ветвления.

Метод ветвей и границ достаточно статичен, он не обладает возможностью изменения параметров настройки для ускорения обработки информации и улучшения их качества.

Как и метод полного перебора, метод ветвей и границ использовался для проверки разработанного алгоритма расстановки базовых станций малой размерности. Для решения реальных задач расстановки базовых станций 5G данный метод не подходит из-за того, что деревом ветвлений имеет большие размеры с десятками миллионов вершин и значительных разрывов целочисленности.

### 3.3.3 Метод ветвей и отсечений

При решении задач размещения базовых станций возможно использование модифицированного метода ветвей и границ, такого как метод «ветвей и отсечений» (branch-and-cut). Метод ветвей и отсечений – это комбинация метода ветвей и границ с методом отсекающих плоскостей. На рисунке 3.2 показана общая

структура работы метода ветвей и отсечения. Для решения задачи минимизации функции (2.1), множество возможных решений  $S$  разбивается на два подмножества  $S = S_0 \cup S_1$ , для которых вычисляются нижние границы  $u_0$  и  $u_1$ . Если найденная нижняя граница  $u_k$  больше по объективному максимальному значению функции, чем некоторая известная верхняя граница, то подмножество  $S_k$  дальше не рассматривается.

Присутствие булевых переменных в задаче размещения, приводит к тому, что процедура ветвления осуществляется при помощи присваивания некоторой переменной  $y_i$  значения 0 или 1. Таким образом создается бинарное дерево ветвлений или дерево поиска. Используя верхние и нижние границы, каждое повторение метода ветвей и отсечений уменьшает дерево поиска до возможного минимума. Нижние границы локальны и представляют собой допустимое решение для текущей подзадачи и ее дочерних узлов. Нижние границы вычисляются путем релаксации. Верхние границы глобальны, получаются путем нахождения разрешенных решений. Они являются допустимым решением для исходной первоначальной проблемы.

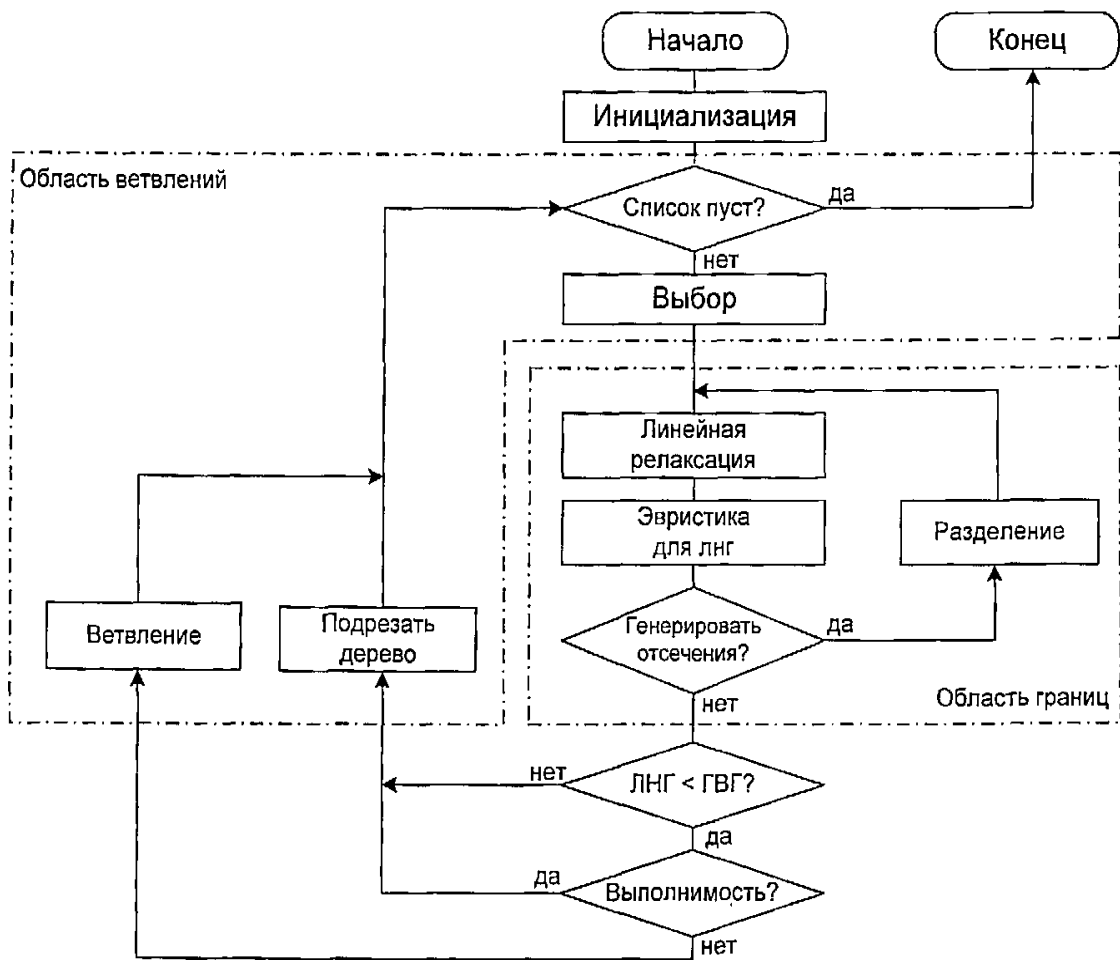


Рисунок 3.2 – Метод ветвей и отсечений

Метод можно разделить на две части, в первой части происходит разбиение на подмножества, это область ветвлений, во второй части — вычисление оценок (область границ). В первой части список активных узлов рассматривается исходя из поставленных задачи и условия, что наибольшее значение нижней границы (локальной нижней границы) равно бесконечности. При отсутствии активных узлов «локальная нижняя граница» (на рисунке 3.2 «ЛНГ») является оптимальным значением. В противном случае выбирается задача из списка подзадач, и происходит вычисление границ. При вычислении границ решается линейная релаксация выбранной задачи. Если в результате вычисления оптимальное значение — целочисленное, оно принимается за лучшую нижнюю границу, если значение дробное для поиска лучшей нижней границы применяются эвристические

методы. На следующем шаге рассматривается необходимость генерации отсекающих плоскостей. При генерации отсекающих плоскостей начинается стадия разделения, вследствие которой улучшается текущая нижняя граница путем исключения части решений полученных с помощью линейной релаксации. Созданные отсекающие плоскости добавляются к текущей подзадаче, и повторно применяется линейная релаксация.

Создание отсекающих плоскостей прекращается, при условии невозможности сгенерировать новые отсечения, это происходит если подзадача имеет недопустимое решение, или оптимальное решение релаксации больше, чем самая меньшая найденная нижняя граница. Формируются две новые подзадачи посредством приравнивания некоторой переменной к значению 0 или 1 и увеличению количества узлов. Новые узлы включаются в список активных узлов.

Если локальная нижняя граница может быть улучшена, все активные узлы из списка, в которых глобальная верхняя граница (на рисунке 3.2 «ГВГ») больше, чем локальная нижняя граница, удаляются. Использование отсекающих плоскостей и допустимых решений обеспечивая процесс поиска оптимального решения.

Применение метода ветвей и отсечений обеспечивает более высокую скорость сходимости и позволяет решать задачи, размерность которых составляет 50 базовых станций и 50 абонентских станций. При этом дальнейшее увеличение размерности задач размещения базовых станций, происходит генерирование все большего числа отсечений, что приводит к значительному увеличению времени работы метода и ухудшается качество конечного решения.

### 3.3.4 Метод поиска по соседству

Методом решения задач размещения базовых станций, принципиально отличающимся от метода типа ветвей и границ, является метод поиска по соседству, этот метод можно отнести к эвристическим.

Если  $I(S)$  множество работающих базовых станций в возможном решении, а  $F(j)$ ,  $j \in J$  – устройство, обслуживающее  $j$ -го абонента, то решение  $S$  может быть представлено в виде  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ . В данном выражении каждое подмножество  $S_i$  является потенциальным местоположением базовой станции с множеством абонентских станций работающих с этой базовой станцией согласно решения  $S$ . В некоторых случаях  $S_i$  может быть пустым подмножеством, при условии, что на месте кандидате не размещено ни одной базовой станции. Стоимость каждого подмножества  $S_i$  можно описать следующим выражением:

$$C(S_i) = \begin{cases} \sum_{j \in S_i} c_{ij} + f_i, & \text{если } S_i \neq \emptyset \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3.29)$$

Стоимость самого решения  $S$  равна:

$$C(S) = \sum_{i=1}^n C(S_i) \quad (3.30)$$

Суть метода состоит в поочередном использовании двух структурных схем, обеспечивающих замену существующего решения  $S$  на улучшенное решение  $S'$ : схемы «обмена абонентами» и схемы «перемещение базовых станций». Решения, полученные на основе этих двух схем, используют для локального поиска, поиск начинается с некоторого допустимого решения и продолжает до нахождения оптимального значения [63].

Схема «обмена абонентами» используется для распределения абонентов между базовыми станциями, уже размещенных на планируемых местах их расстановки. Обмен абонентами происходит на так называемых графах улучшения для абонентов в результате поиска по специальным маршрутам или циклам.

Обмен абонентами между работающими базовыми станциями происходит несколькими способами:

1. Циклический обмен одного абонента. В существующем решении  $S$  определяется такая последовательность абонентов  $R = (j_1, j_2, \dots, j_q)$ , что каждый клиент  $j_r$  назначается другой работающей базовой станции из множества  $S$ , т.е.  $F(j_r) \neq F(j_s)$  при  $r \neq s$ . В частном случае клиент  $j_1$ , назначенный базовой станции  $F(j_1)$ , отключается от нее и назначается базовой станции  $F(j_2)$ . В свою очередь клиент  $j_2$ ,

назначенный базовой станции  $F(j_2)$ , отключается от нее и назначается базовой станции  $F(j_3)$ . Такой обмен происходит до тех пор, пока клиент  $j$  не окажется подключенным к первоначальной станции  $F(j_1)$ . Использование циклического обмена  $R$  позволяет найти допустимое решение при условии, что для каждой базовой станции, участвующей в циклическом обмене, выполняется требование по производительности. Циклический обмен  $R$  называется выгодным, если новое решение  $S'$ , полученное из предыдущего решения  $S$  в результате обмена, по стоимости меньше предыдущего.

2. Замена маршрута для одного абонента  $P=(j_1, j_2, \dots, j_{q-1}, F_q)$  похожа на циклический обмен одного абонента, но при этом последний элемент последовательности  $F_q$  определяет местоположение базовой станции и  $F(j_r) \neq F(j_s) \neq F_q$  при  $r \neq s$ . При такой обмене исключаются перемещения абонентов от базовой станции  $F_q$  к базовой станции  $F(j_1)$ .

Схема замены маршрута для одного абонента создает новое вероятное решение  $S'$  из существующего решения  $S$ . Множество всех новых решений, получаемых из решения  $S$ , при помощи возможных обменов  $R$  или  $P$ , создает множество решений смежных с решением  $S$  для многократного обмена одного абонента.

3. Циклический обмен нескольких абонентов представляет собой последовательность  $U=\{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{iq-1}, U_{iq}\}$  для  $q$  множеств абонентов, при которой  $U_{ir} \subseteq S_{ir}$  для  $r=1, \dots, q$ , т.е. каждое подмножество  $U_{ir}$  из последовательности  $U$  принадлежит другому подмножеству  $S_i$ .

Каждый циклический обмен несколькими абонентами  $U$  однозначно дает новое решение  $S'=\{S'_1, \dots, S'_2\}$  смежное с решением  $S$ , которое получено с помощью подмножеств абонентов, движущихся вдоль последовательности.

5. Замена маршрута для нескольких абонентов подобна схеме циклического обмена нескольких абонентов, но в данной схеме отсутствуют подмножества элементов, перемещающихся от  $S_{iq}$  к  $S_{i1}$ .

Возможность применения и выгодность описанных способов следует из условия:  $R$  называется выгодным, если новое решение  $S'$ , полученное из

предыдущего решения  $S$  в результате обмена, по стоимости меньше предыдущего. При этом недостатком является вероятность существования большого количества решений для абонентов, найденных по соседству. Решить эту проблему возможно уменьшив размеры соты, что неприемлемо с точки зрения стоимости.

Вторая схема называется «перемещение базовых станций» и используется для улучшения разрабатываемой конфигурации расстановки базовых станций. Множество решений при использовании данной схемы получается в результате использования для конкретного абонента одной из нескольких соседних базовых станций с возможным обменом планируемых мест размещения станций.

Данная схема использует три возможности использования базовых станций: установка новой базовой станции, закрытие существующей базовой станции, перемещение базовой станции на новое место. Перемещение базовых станций оправдано только в том случае, если оно необходимо для получения требуемого решения, с уменьшением общей стоимости проекта.

В результате исследования рассматривались три типа перемещений:

1. При открытии новой базовой станции исследовалась возможность установки станции на место, где отсутствует зона охвата существующими базовыми станциями. Для каждого неиспользуемого  $i$ -го планируемого места установки определяется множество  $U_i = \{j \in J \mid c_{ij} - c_{F(j)} < 0\}$ . Тогда для  $z_i$  будет верно выражение  $z_i = \sum_{j \in U} (c_{ij} - c_{F(j)}) + f_i$ . Сортировка неиспользуемых мест планируемой установки производится в порядке уменьшения сохраненных оценок  $z_i$  до тех пор, пока не будет найдено лучшее решение, существующее решение заменяется на новое лучшее смежное решение и исследования в окрестностях по соседству прекращается.

2. Закрытие базовой станции происходит вследствие того, что абонентов данной станции могут обслуживать соседние станции с удовлетворяющим качеством связи. При отключении базовой станции происходит распределение ее клиентов среди оставшихся работающих базовых станций. Для каждого используемого  $i$ -того места планируемой установки используется оценка  $z_i = -f_i + \sum_{j \in S_i} (c_{Si} - c_{ij})$ , которая означает что,  $S_i$  является ближайшим источником



среди всех базовых станций для  $j$ -го клиента. Возможные переключения между базовыми станциями, связанные с оставшимися местами планируемой установки оцениваются по степени уменьшения оценок  $z_i$  до тех пор, пока не будет найдено лучшее решение.

3. Метод перемещений базовой станции на другое место использует выше упомянутые методы (открытия и закрытия станций). Так при возможном перемещении происходит закрытие базовой станции, расположенной на одном месте предполагаемой установки и открытие ее на другом. При этом происходит перераспределение целой группы абонентов. При выполнении двух условий  $W(S_i) \leq S_h$  и  $\sum_{j \in S_i} c_{hj} + f_h < C(S_i)$  перемещение обоснованно и может быть выполнено для любой пары с  $i$ -го места пре на  $h$ - место среди используемых или неиспользуемых планируемых мест на размещение.

Метод поиска по соседству дает возможность получить достаточно точное решение за соизмеримое время. Однако использование большого числа вспомогательных методов для поиска решения делает программную реализацию данного метода очень сложной.

Таким образом, можно сделать вывод, что современные методы оптимизации не обладают алгоритмами, обеспечивающими точное решение задач расстановки базовых станций за полиномиальное время [18]. Использование различных эвристических методов при решении задач размещения базовых станций является обоснованным, так как это задачи NP-трудные, наилучшим образом задачу размещения базовых станций можно решить, используя эвристический генетический алгоритм.

### 3.5 Выводы по третьему разделу

1. Для усовершенствованного метода решения задач многокритериальной оптимизации избраны три частных критерия: надежности передачи данных  $N$ , которая характеризуется полной вероятностью неработоспособности системы  $Q$ , пропускной способности сети  $V$ , которая представлена коэффициентом

использования емкости сети и относительным отклонением коэффициента использования емкости сети от нормируемого; материальных затрат при создании сети  $S$ , который характеризуется коэффициентом использования капитальных средств  $K_{ИКЗ}$  на строительство или модернизацию сети. Усовершенствованный метод позволяет работать с заданиями, при решении которых другие методы неприемлемы из-за большого количества альтернативных и пересекающихся значимостей.

2. При решении задачи многокритериальной оптимизации, с учетом уменьшения меры неопределенности, применялись методы равных вероятностей, Гурвица, минимаксный метод, метод Сэвиджа, что является целесообразными для сужения области возможных решений в условиях неопределенности или частичной неопределенности. Область Парето формируют только в том случае, если как минимум варианты решений трех методов для транспортной ТКМ совпадают

3. В ходе диссертационной работы для решения задач размещения базовых станций сетей 5G рассматривались различные методы, такие как: метод «неявного» перебора, метод отсечений, метод ветвей и границ. Результат исследования показал, что использование этих методов обосновано для проверки разработанного алгоритма расстановки базовых станций малой размерности.

4. На основе анализа доступных источников было установлено, что диссертационная задача оптимального размещения базовых станций 5G является NP-трудной. Решение данной задачи точными методами затруднительно и для её решения целесообразно использовать эвристические методы. Методом, который дает наиболее достоверные результаты за относительно небольшое время, является эвристический генетический алгоритм.

## РАЗДЕЛ 4

### РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СЕТЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

#### 4.1 Особенности генетического алгоритма для решения оптимизационных задач

Впервые для решения математических задач генетический алгоритм был предложен в 1975 году в Мичиганском университете Джоном Холландом, основой для разработки алгоритма послужили работы Ч. Дарвина (теория эволюции) и исследования Л.Дж.Фогеля, А.Дж. Оуэнса, М.Дж.Волша по эволюции простых автоматов, предсказывающих символы в цифровых последовательностях (1966). Предложенный Холландом алгоритм получил название «репродуктивный план Холланда» и впоследствии он стал одним из базовых алгоритмов, используемых в эволюционных вычислениях. Дальнейшую разработку идеи Холланда продолжили его ученики Кеннет Де Йонг из университета Джорджа Мейсона (Вирджиния) и Дэвид Голдберг из лаборатории ГА Иллинойса [72]. Проведенные Дэвидом Голдбергом исследования поведения групп тестовых функций, с описанием всех операторов, позволили усовершенствовать алгоритм, который впоследствии получил название «генетический алгоритм».

Генетический алгоритм – это стохастический метод глобального поиска, который имитирует естественную биологическую эволюцию. Генетический алгоритм оперирует целым рядом потенциальных решений, применяя принцип выживания наиболее приспособленных особей для получения лучших из лучших приближений к решению [42]. В каждом поколении создается новый набор аппроксимаций в процессе отбора особей в соответствии с их уровнем пригодности в проблемной области и с использованием операторов скрещивания, заимствованных из естественной генетики [11].

Генетические алгоритмы находят широкое применение в различных областях науки, о чем свидетельствуют различные публикации и монографии [27].

Генетические алгоритмы являются адаптивными методами поиска и используются для решения задач оптимизации. Естественный отбор и механизм генетического наследования, являются основой генетического алгоритма, при этом используются биологическая терминология в упрощенном виде и основные понятия линейной алгебры.

Особенности генетических алгоритмов заключаются в следующем:

1. Исходные параметры задачи кодируются, и обрабатывается закодированная форма.
2. Процедура поиска оптимального решения производится из некоторой популяции, а не из одной точки.
3. Возможные варианты решения задачи применяют вероятностные правила выбора.

Проанализировав различные способы нахождения оптимального размещения базовых станций, в диссертационной работе было принято решение использовать стандартный генетический алгоритм и рекомендации к его применению [21, 26,32].

В диссертационной работе были использованы следующие определения при описании генетического алгоритма:

Ген – набор параметров (особей), закодированных в бинарном виде.

Хромосома – упорядоченная последовательность генов.

Популяция – конечное множество.

Поколение – новая популяция, образованная в процессе работы алгоритма.

Функция силы – целевая функция оценки, используемая для оценки альтернативных решений между собой и нахождения лучшего решения.

Генетический алгоритм состоит из следующих этапов:

1. Формирование начального множества особей, т.е. образование исходной популяции.
2. Оценка конкурентоспособности особи с остальными в заданной метрике.
3. Отбор наиболее сильных хромосом.
4. Процесс скрещивания и мутации.

5. Создание новой популяции.
6. Выбор лучшего решения (хромосомы).

Структурная схема генетического алгоритма для оптимального размещения базовых станций для сетей пятого поколения представлена на рисунке 4.1.

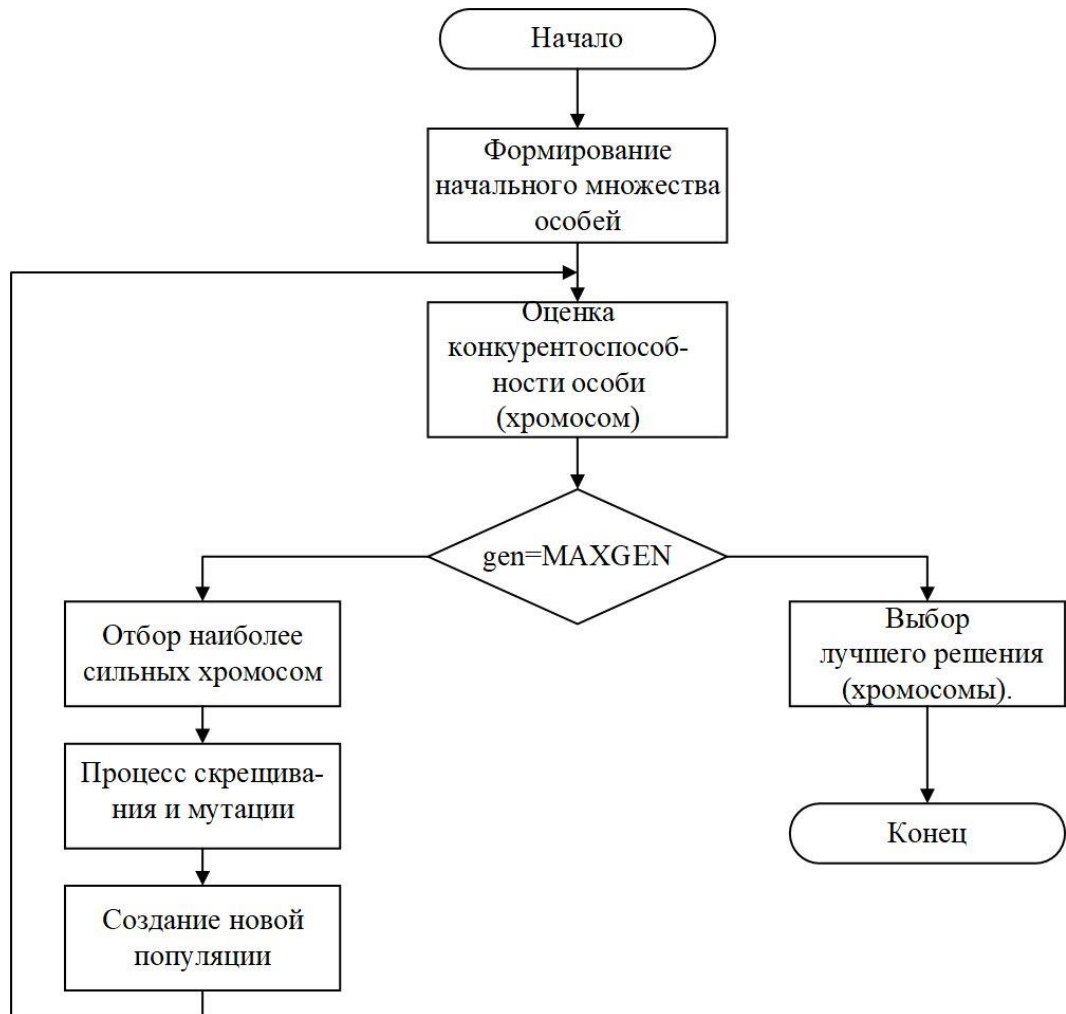


Рисунок 4.1 – Структурная схема генетического алгоритма для оптимального размещения базовых станций сетей пятого поколения

На первом этапе в разработке генетического алгоритма для оптимального размещения базовых станций для сетей пятого поколения происходит набор особей, которые называются популяцией, то есть определяются различные варианты расстановки базовых станций и формируются начальные множества особей. При этом число вариантов расстановки может меняться в зависимости от требований к проектируемой сети. Особь представляет собой набор переменных,

которые называют генами. Гены объединены в одну строку и формируют хромосому – решение задачи. Необходимо определить представленные хромосомы. В решении данной задачи используется бинарное представление в виде множества  $\{0,1\}$ .

На втором этапе происходит отбор наиболее сильных хромосом, то есть тех хромосом, которые будут принимать участие в создании нового поколения. Суть отбора состоит в том, чтобы отобрать наиболее сильные особи и передать их гены следующему поколению особей. Определенное количество пар особей (родители) отбирается на основании их силы. Для отбора необходимо вычислить оценку родительских хромосом, самыми перспективными для дальнейшего участия в создании новых особей являются те хромосомы, у которых наименьший уровень силы, данный способ называется селекцией. Функция силы всегда принимает положительные значения.

На третьем этапе происходит проверка условия завершения алгоритма, завершение происходит только при наступлении условия:

$$\text{gen}=\text{MAXGEN} \quad (4.1),$$

где  $\text{gen}$  – номер текущего поколения;  $\text{MAXGEN}$  – максимальное количество поколений (итераций) заданное в начале алгоритма (максимальное значение можно либо увеличивать, либо уменьшать).

Алгоритм может считаться завершенным, когда прекращается поиск минимального значения целевой функции, то есть, когда номер текущего поколения (итерации) достигнет максимального числа поколений (итераций), которое было задано в начале работы алгоритма.

При отсутствии максимального числа итераций на четвертом этапе происходит отбор наиболее сильных хромосом, эти хромосомы будут принимать участие в создании нового поколения. Суть отбора заключается в следующем, происходит выявление наиболее сильных особей и их гены передаются следующему поколению особей. Аналогично второму отбирается некоторое

количество пар особей (родители) на основании их силы. Для отбора необходимо произвести оценку родительских хромосом, самыми перспективными, для дальнейшего участия в создании новых особей, являются те хромосомы, у которых самый маленький уровень силы, данный способ называется селекцией [17].

Необходимо отметить, что хромосомы, участвующие в селекции, выбираются из числа наилучших особей, упорядоченных по степени ухудшения функции приспособленности. Другая половина родительских хромосом выбирается случайным образом из хромосом, незадействованных в селекции. Такой способ отбора предоставляет возможность создавать потомков как наилучшим, так и наихудшим особям, что увеличивает скорость сходимости на начальных итерациях алгоритма и позволяет в некоторых случаях выходить из локальных оптимумов. В результате процесса селекции создается новая родительская популяция.

Если бы отсутствовал этап отбора, то количество особей росло бы по экспоненциальному закону, в следствии чего требовалось бы, большое количество оперативной памяти и времени на обработку каждого нового поколения популяции. Следовательно, после появления новых особей необходимо очистить популяцию от наименее удачных особей. Именно это происходит на этапе отбора [68].

После создания новой родительской популяции происходит процесс скрещивания и мутации, это приводит к возникновению новых потомков от предыдущей созданной популяции. Для скрещивания и мутации применяются генетические операторы, которые уже встроены в среду MATLAB, для скрещивания этот оператор `recombineindividuals (crossover)`, а мутации – `applymutation` [70].

Основной оператор для создания новых хромосом в генетическом алгоритме – это `crossover` (скрещивание). Как и его аналог в природе, `crossover` приводит к созданию новых особей, на основе существующих, в которых имеются некоторые части генетического материала обоих родителей.

В результате скрещивания возникает множество вариантов популяций, один из которых – одноточечный кроссовер. Рассмотрим алгоритм работы кроссовера:

исходными данными являются две особи, выбранные из популяции и определенная случайным образом точка разрыва в их хромосомах. Хромосомы особей обмениваются правыми частями, в результате чего появляются новые возможные решения оптимизационной задачи.

Точка разбиения родителей выбирается случайным образом. Не обязательно при таком скрещивании (Рисунок 4.2) создавать двух детей, чаще всего выбирают одного из них.

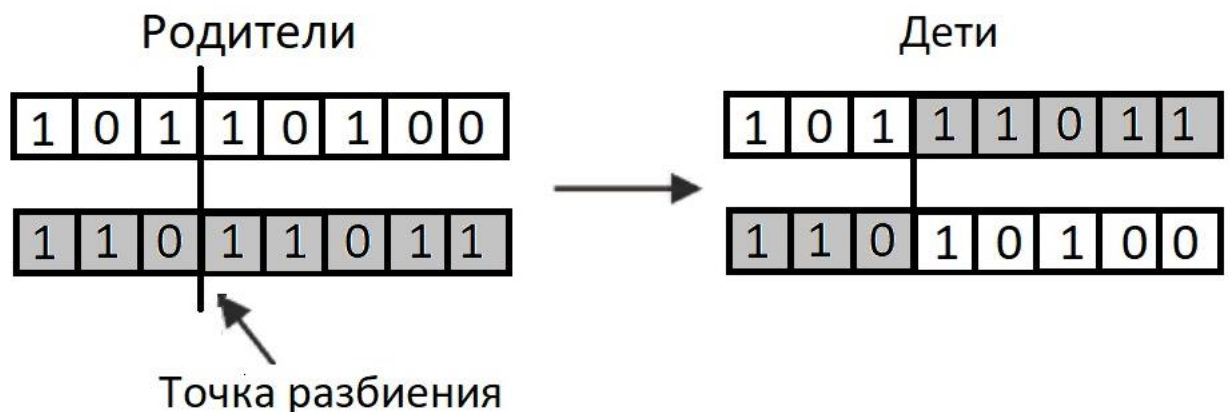


Рисунок 4.2 – Пример скрещивания хромосом в генетическом алгоритме

Так же можно использовать многоточечное разбиение, хромосомы родителей разбиваются на несколько участков.

Для оператора мутации чаще всего используют побитовую мутацию, когда в хромосоме (или в нескольких хромосомах) инвертируют один бит или несколько битов. Вероятность мутации как правило очень мала моделируется случайным образом на интервале  $[0,1]$ .

Процесс мутации случаен и невозможно предугадать какие особи получатся в результате мутации, они могут быть как более удачные, так и менее.

Для задачи размещения базовых станций мутация объясняется как изменение подключения абонентов к базовым станциям, то есть если до мутации, клиент был подключен к БС 1-го типа, а после мутации переподключён к БС 2-го типа или к двум базовым станциям сразу, при этом выполняются условия попадания в радиус действия.



Следует заметить, что генетические алгоритмы относят к эволюционным и эвристическим методам поиска решений, которые использует случайность как средство исследования, они являются неточными, часто называемыми «мягкими вычислениями».

#### 4.2 Программная реализация оптимальной расстановки базовых станций для сетей пятого поколения

Результатом диссертационной работы является разработка программного обеспечения, которое решает задачу оптимальной расстановки базовых станций различных типов для сетей пятого поколения. Разработанное программное обеспечение позволит визуализировать полученные результаты, подтвердить теоретические предпосылки о возможности применения предложенных в работе методов и алгоритмов, кроме того, полученные численные данные помогут существенно сократить затраты времени на планирование или адаптацию сотовой сети пятого поколения с учетом требования оптимальных показателей качества и наименьшей стоимостью.

В качестве программного комплекса был выбран пакет прикладных программ для решения технических задач Matlab. Matlab является высокоуровневым языком с интерактивной средой для программирования, численных расчетов и визуализации результатов [20,30].

Рассмотрим структуру генетического алгоритма в среде MATLAB применительно к задаче оптимального размещения базовых станций.

В начале работы программы первой части назначаются переменные и устанавливаются их начальные параметры [39]:

Переменная NIND – определяет количество различных вариантов расстановки БС (начальное количество особей), число вариантов расстановки варьируется и может меняться в большую или меньшую сторону применительно к требованиям проектируемой сети мобильной связи;

Переменная MAXGEN – определяет количество поколений (итераций);

Переменная NVAR – описывает количество используемых переменных.

На начальном этапе необходимо определить типы базовых станций. Как рассматривалось выше в работе, существует несколько видов базовых станций, основными являются базовые станции следующих типов: макро, микро, пико и фемтосоты. Так как в диссертационной работе расстановка базовых станций осуществляется в зоне городской застройки, то целесообразно использовать 2 типа базовых станций это микро и пикосоты. Микросота (базовая станция первого типа, БС1) - это компактная базовая станция, чаще всего используемая операторами мобильной связи. Радиус покрытия достигает до 5 километров, без учета потерь распространения сигнала, вес - до 50 кг. В районах плотной застройки ресурсов производительности микро базовых станции недостаточно, для решения проблемы улучшения качества обслуживания, в потенциальных местах большой концентрации абонентов устанавливаются пикосоты (базовая станция второго типа БС2). Пикосоты представляют собой несамостоятельные базовые станции, они подключаются к операторскому контролеру макро базовой станции и являются выносным элементом, осуществляющим прием и передачу сигнала, радиус действия такой станции до 1км.

Переменная PRECI при использовании двоичного кода резервирует количество разрядов для каждой переменной.

Переменная GGAP является точкой разбиения родительских хромосом, которая выбирается случайным образом.

Переменные M, N, P – количество потенциальных мест расстановки базовых станций первого и второго типа и количество потенциальных абонентов.

Следующим шагом является создание начальной популяции из NIND хромосом: Chrom = crtbp (NIND, M+N). Начальная популяция будет первым случайным вариантом расстановки базовых станций, не учитывающий ограничения и требования к качеству услуг, определенных в предыдущих разделах диссертационной работы. Из общего количества базовых станций двух типов произвольным образом производится выборка случайного числа БС1 и БС2.

Для оценки качества решений создается две переменные ObjV=[] и Stoimost=[]. Переменная ObjV описывает качественные показатели услуг

мобильной связи, переменная *Stoimost* является стоимостной характеристикой выбранного варианта расположения базовых станций сетей 5G.

После назначения переменных и определения их начальных параметров начинается главный цикл, при выполнении которого происходит оценка родительских хромосом, с учетом расстояния радиуса  $R_1$  и  $R_2$  от каждой базовой станции до каждого абонента. Если расстояние больше, чем радиус зоны покрытия для принятой местности, то это расстояние объявляется переменной *inf* – бесконечно большой. Затем осуществляется поиск и подключение абонентов к базовой станции первого типа (микросота), при этом следует учитывать, что суммарный трафик всех абонентов не должен превышать производительность базовой станции [50, 51]. Далее происходит подключение оставшихся абонентов к базовой станции второго типа, в этом случае учитываются ограничения (2.25-2.29) к поставленной задаче. Затем для данного варианта построения сети происходит оценка показателей качества сети *QoS*, рассмотренных в третьем разделе.

```
gen = 0; (2.25-2.29).
```

```
Proizv2=BaseNet.Proizv2;
```

```
[ObjV]=Net(Chrom,BaseNet,M,N,P);
```

```
Stoimost=[Stoimost;min(ObjV)];
```

```
FitnV = ranking(ObjV).
```

Затем, используя принципы генетического алгоритма, происходит селекция, мутация и отбор особей с помощью функций:

```
SelCh = select('sus', Chrom, FitnV, GGAP);
```

```
SelCh = recomb('hovsp',SelCh,0.7);
```

```
SelCh1 = mut(SelCh,0.4).
```

Значение целевой функции рассчитывается с учетом потерь распространения (2.31), если при выполнении алгоритма использовался разрыв поколений, т.е. количество потомков меньше, чем численность популяции, необходимо вернуть потомство в последнюю популяцию, это достигается с помощью функции повторной вставки.

```
[ObjVSel]=Net(SelCh1,BaseNet,M,N,P);
```

Stoimost=[Stoimost;min(ObjVSel)];

[ChromObjV]=reins(Chrom,SelCh1,1,[1 0.5],ObjV,ObjVSel);

Работа алгоритма считается законченной в том случае, если счетчик поколений станет равным максимальному количеству поколений (итераций), которое задается в начале алгоритма т.е.  $gen = MAXGEN$ .

Результатом работы программы является визуальная схема, которая выводится на экран. На схеме отображается конфигурация расположения базовых станций первого и второго типа, абоненты и абонентские устройства, подключенные к каждому типу базовых станций и информация об их количестве, количество абонентов, не подключенных и не обслуживаемых сетью, число потенциальных клиентов в зоне работы базовых станций. Вследствие анализа расстановки базовых станций, учета количества подключенных, не подключенных и необслуживаемых абонентских станций, на схему выводится стоимость данной конфигурации подключения базовых станций.

#### 4.3. Исследование полученных результатов на основе созданного программного обеспечения

В результате тестирования и последующего анализа разработанного алгоритма были решены задачи различных размерностей. Для обоснования необходимости учета, в задаче оптимальной расстановки базовых станций сетей пятого поколения, коэффициента распространения сигнала, проведены исследования двух вариантов расположения базовых станций.

Важной характеристикой работы программного обеспечения является решение определенного количества задач за допустимое время. Первый эксперимент заключается в анализе времени работы алгоритма при увеличении числа потенциальных абонентов, при этом количество потенциальных мест расстановки базовых станций обоих типов остается постоянным. Результаты представлены на рисунке 4.3.

Таблица 4.1 – Результаты времени работы решения задачи оптимального размещения БС при увеличении числа абонентов

Количество мест расстановки БС	40	40	40	40	40	40
Количество абонентов	100	300	400	500	700	1000
Время работы алгоритма, сек	255,45	124,11	443,06	476,85	492,90	1245,30



Рисунок 4.3 – Зависимость времени работы алгоритма от числа потенциальных абонентов

На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод, что при увеличении количества абонентов увеличивается время работы алгоритма, причем в среднем на каждые сто абонентов время работы увеличивается на 1,5 с.

Следующий эксперимент заключается в определении зависимости времени работы алгоритма от увеличения количества мест расположения базовых станций, при этом число абонентов оставалось постоянной величиной ( $P=800$ ), а оценка стоимости построения сети производилась в зависимости от количества мест расстановки БС. Результаты представлены в таблице 4.2 и на рисунках 4.4, 4.5.

Таблица 4.2 – Результаты стоимости построения сети, времени работы алгоритма при увеличении числа места расположения БС.

Количество мест расстановки БС	20	25	40	50	70
Стоимость	1594,68	884,052	125,99	124,12	115,99
Время работы алгоритма, сек	255,45	124,11	443,06	476,85	492,90

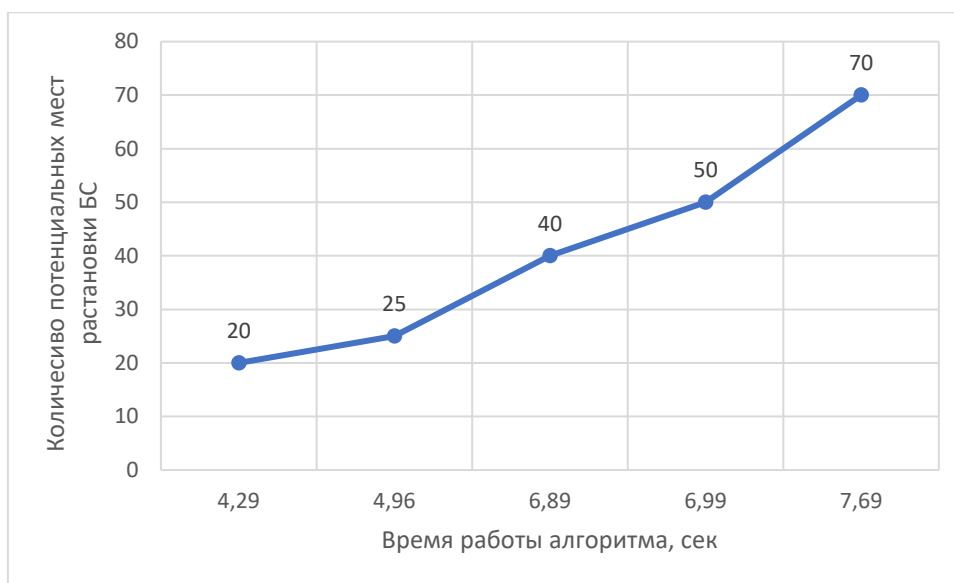


Рисунок 4.4 – Зависимость времени работы алгоритма от количества потенциальных мест расстановки базовых станций

Анализ данных, которые были получены по результатам двух экспериментов, дает возможность сделать вывод, что рост числа количества потенциальных мест расстановки базовых станций влияет на скорость решения задачи в меньшей степени, чем увеличение количества абонентов. Полученные результаты свидетельствуют об экспоненциальной зависимости времени работы алгоритма от размерности исходных данных.

Оценивая стоимость проектируемой сети, можно сделать вывод, что при увеличении количества планируемых мест расстановки базовых станций уменьшается стоимость сети. Этому способствует сокращение количества неподключенных абонентов, и как следствие уменьшение суммы штрафов за отсутствие подключения в зоне работы базовой станции.

Таблица 4.3 – Зависимость стоимости проектируемой сети и время работы алгоритма от количества потенциальных мест расстановки базовых станций.

Количество поколений	20	25	40	50	70
Время работы алгоритма, сек	255,45	124,11	443,06	476,85	492,90
Значение целевой стоимости	1594,68	884,052	125,99	124,12	115,99
Количество неподключенных абонентов	0	10	15	22	32



Рисунок 4.5 – Зависимость стоимости проектируемой сети от количества потенциальных мест расстановки базовых станций

При увеличении количества поколений (итераций) значительно увеличивается время работы алгоритма (Рисунок 4.6), но при этом улучшается качество решения задачи оптимальной расстановки базовых станций, о чем свидетельствуют значения функции стоимости, при увеличении итераций уменьшается количество не подключенных абонентов (Рисунок 4.7).

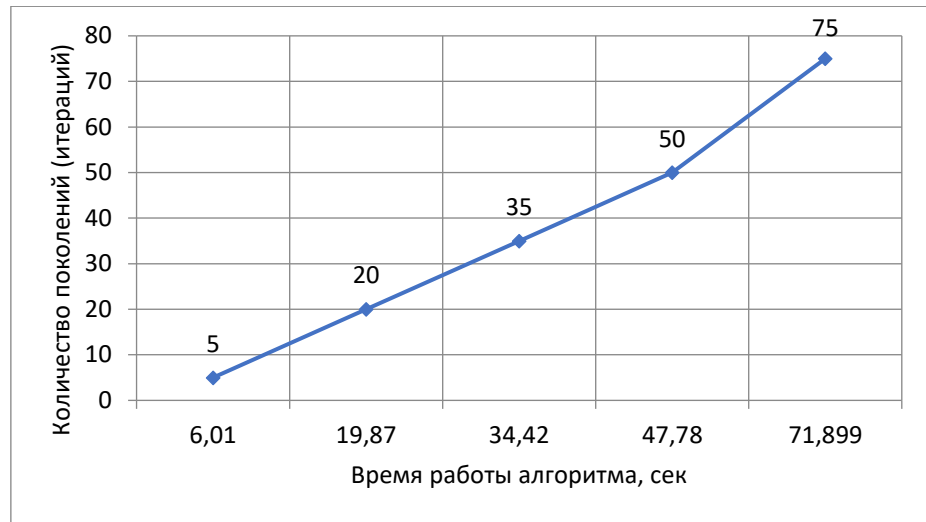


Рисунок 4.6 – Зависимость количества поколений от времени работы алгоритма

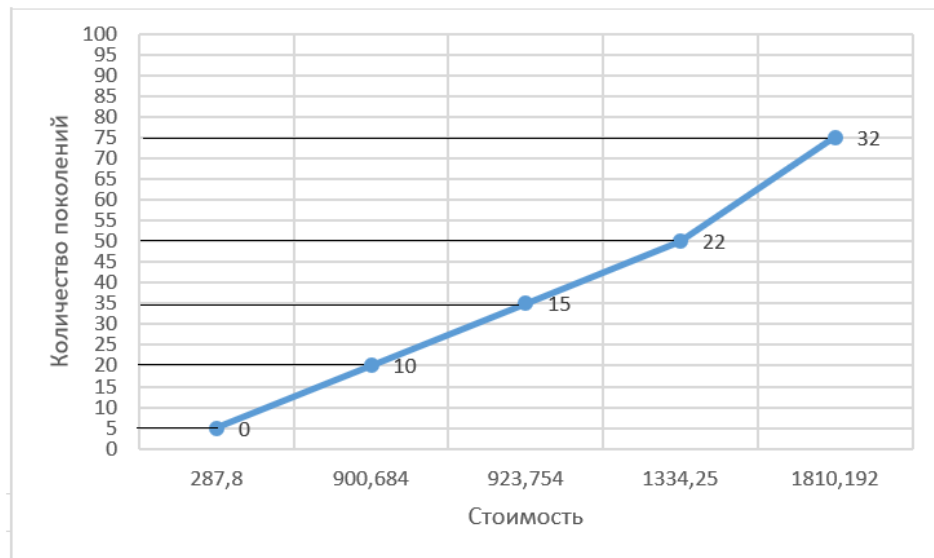


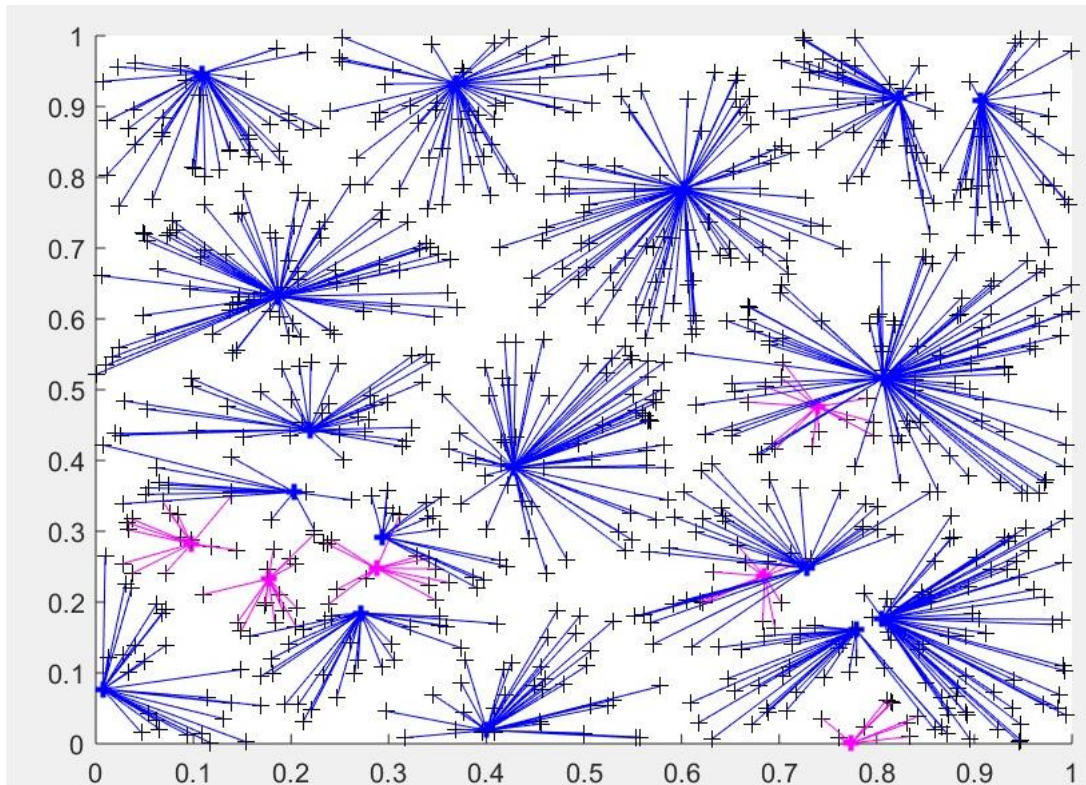
Рисунок 4.7 – Зависимость количества поколений от значения целевой функции стоимости

Таким образом, разработанный генетический алгоритм обеспечивает оптимальное соотношение между качеством полученного решения и временем, потраченным на его поиск.

Расчет схем расстановки базовых станций, с использованием разработанного программного обеспечения, учитывает требования к качественным характеристикам сетей мобильной связи пятого поколения

Визуализация полученных результатов с учетом и без учета коэффициента распространения сигнала представлена на (Рисунок 4.8, 4.9).





Общее значение функционала SUM=287800.00  
 Количество станций первого типа БС1 - 17  
 Количество станций второго типа БС2 - 6  
 Общее количество потенциальных клиентов - 800  
 Общее количество клиентов в "освещенной" зоне - 800  
 Количество клиентов, подключенных к БС2 - 75  
 Количество клиентов, обслуживаемых сетью - 800  
 Количество клиентов, НЕ обслуживаемых сетью - 0

Рисунок 4.8 – Схема расстановки базовых станций для сети пятого поколения с учетом коэффициента распространения  $g_{km}$ .

Из схемы расстановки базовых станций наглядно видно, что из всех 800 потенциальных абонентов, к базовым станциям первого типа (их количество составило 17), подключено 725 абонентов, а к базовым станциям второго типа (6 шт.) – 75 абонентов, при этом стоимость такой сети составляет 287800,00 у.е., что является минимальным значением из всей выборки. Подключения базовых станций второго типа происходит только в том случае, если исчерпан ресурс производительности макро базовых станций (БС1).

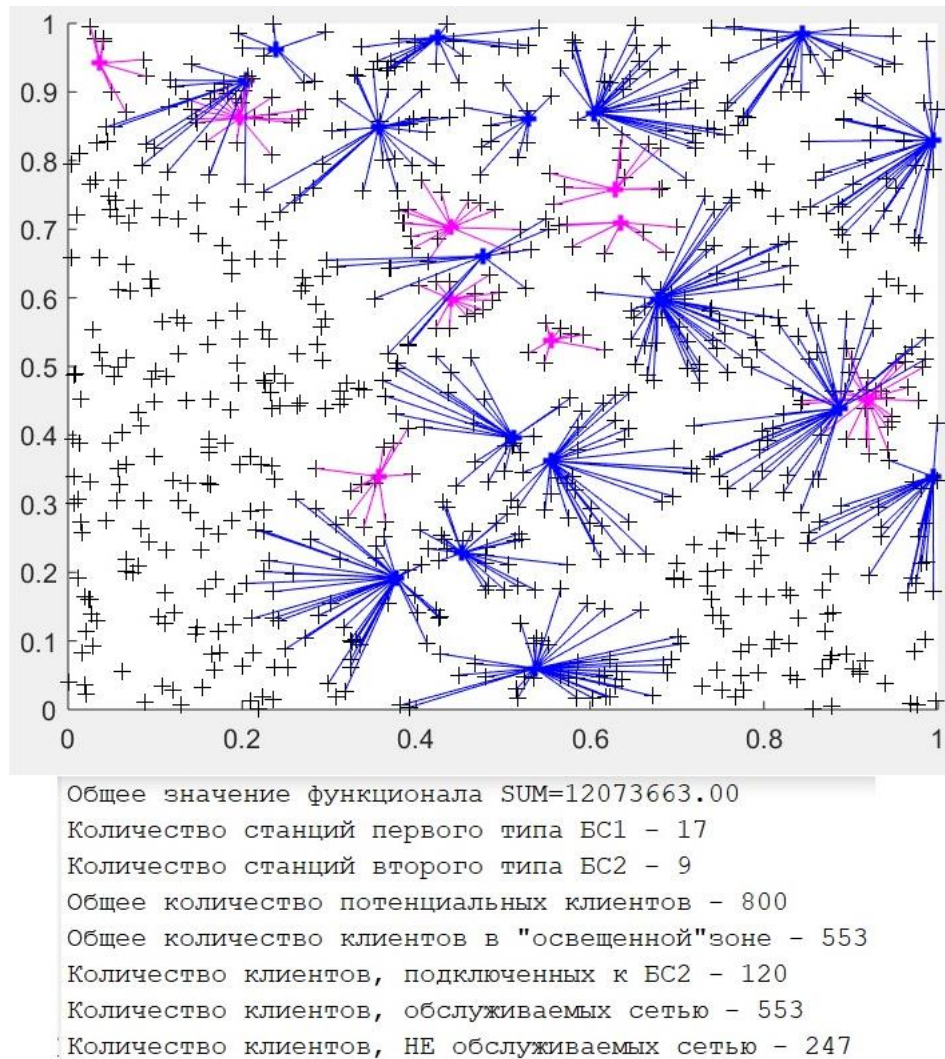


Рисунок 4.9 – Схема расстановки базовых станций для сети пятого поколения без учета коэффициента распространения  $g_{km}$  и типа местности.

На рисунке 4.9 изображена схема подключения абонентов без учета коэффициента распространения сигнала и типа местности. Анализ схемы показывает, что расстановка базовых станций происходит неравномерно, при этом не учитывается радиус действия базовых станций за счет коэффициента распространения сигнала, 257 абонентов из 800 не были подключены, в следствии чего значение целевой функции (стоимость проектируемой сети) из-за штрафов за каждого неподключенного абонента составила 12073663.0 у.е.

#### 4.4. Выводы по четвертому разделу

1. Предложен модифицированный метод вычислений, использующий генетический алгоритм, для решения задач расстановки базовых станций в сетях пятого поколения. Представлена структурная схема генетического алгоритма с учетом нашего метода вычислений.

2. Предложена программная реализация оптимальной расстановки базовых станций сети мобильной связи 5G с учетом рассмотренных в диссертационной работе критериев качества.

3. Проведены исследования полученных результатов, представленных в виде таблиц и графиков.

4. Представлена визуализация оптимального размещения базовых станций в сетях пятого поколения с учетом коэффициента распространения сигнала и без него, которая подтверждает теоретические обоснования предложенных методов в диссертационной работе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение научно-практической задачи совершенствования территориального планирования систем сотовой связи 5G на основе усовершенствованных методов оптимальной расстановки базовых станций для сетей пятого поколения с учетом критериев качества QoS.

Основные научные результаты, полученные в работе, можно сформулировать следующим образом.

1. Рассмотрена структура существующих стандартов сотовой связи, выполнен анализ качества обслуживания абонентов с целью определения эффективности функционирования сети. Анализ качества обслуживания абонентов показал, что заявленные требования не выполняются, что свидетельствует о низкой эффективности существующих методов планирования радиосетей.

2. Рассмотрена эволюция операторов сотовой связи, определены тенденции развития радиотехнологий в мире, вследствие чего сформулированы требования к сетям нового поколения (5G). Это позволило определить направление, в котором необходимо проводить повышение эффективности функционирования сетей сотовой связи.

3. Выполнен анализ методов частотно-территориального планирования сетей сотовой связи, в результате которого предлагается использовать усовершенствованный метод кластерного частотно-территориального планирования для сети 5G.

4. Проведенный анализ математических моделей расчета затухания в пространстве, в зависимости от условий распространения радиоволн, показал, что большинство моделей, которые применялись в прошлых поколениях связи, непригодны для использования в 5G. Это объясняется тем, что они разработаны для частот ниже 2 ГГц. В работе предлагается использовать канальную модель распространения сигналов SUI, которая хорошо подходит для проектирования,

разработки и тестирования беспроводных сетей фиксированного доступа в диапазоне 1-5 ГГц.

5. Определены ключевые показатели качества предоставляемых услуг и производительности сети. Для усовершенствованного метода решения задач многокритериальной оптимизации определены три частных критерия: функциональная надежность  $N$ , пропускная способность  $V$ , капитальные затраты  $C$ . Усовершенствованный метод позволяет работать с задачами, в которых другие методы уже неприменимы из-за обилия альтернатив и пересечения их значимости.

6. Предложена модифицированная постановка задачи размещения базовых станций, учитывающая потери сигналов в радиоканале на основе канальной модели SUI.

7. Рассмотрены эвристические алгоритмы, позволяющие решать задачу синтеза топологической структуры беспроводной сети. Этими алгоритмами являются генетический алгоритм и алгоритм муравьиной колонии. Предложена программная реализация, обеспечивающая решение задач размещения базовых станций различной размерности, позволяющая определить конфигурацию сети и рассчитать суммарную стоимость построения такой сети, учитывая критерии показателей качества. Однако, следует отметить, что предложенная программная реализация является лишь дополнительным модулем к программному комплексу и не является полноценным программным обеспечением для планирования и оптимизации сетей пятого поколения.

8. Проведенное компьютерное моделирование размещения базовых станций с применением разработанного метода, показало улучшение зоны покрытия сети на 30,1%, что подтверждает теоретическое обоснование и возможность его применения для поставленной задачи.

Результаты исследования используются в учебном процессе кафедры «Автоматика и телекоммуникации» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет».

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- 2G – второе поколение сотовой связи;
- 3G – третье поколение сотовой связи;
- 4G – четвертое поколение сотовой связи;
- 5G – пятое поколение сотовой связи;
- АС – абонентская станция;
- БС – базовая станция;
- ПО – программное обеспечение;
- ССС – системы сотовой связи;
- ТП – территориальное планирование;
- ТфОП – сеть телефонной связи общего пользования;
- 3GPP (The 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) - партнерский проект ETSI, занимающийся стандартизацией в области сетей 3G;
- AUC – центр аутентификации сети GSM;
- BSS (BaseStationSystem) – система базовых станций;
- BSC – контроллер базовых станций;
- BTS – базовая станция;
- CDMA(Code Division Multiple Access) – множественный доступ с кодовым разделением каналов;
- DRX – режим энергосбережения абонентских устройств LTE;
- EDGE (Enhanced Data GSM Environment) – технология высокоскоростной пакетной передачи данных для второго поколения сотовой связи;
- EIR – регистр идентификация абонентского оборудования;
- E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) – сеть радиодоступа;
- GSM (Global System for Mobile Telecommunications) – глобальная система мобильной связи;
- HLR – база данных, которая содержит информацию об абоненте сети GSM;
- IMT 2020 – стандарт пятого поколения сотовой связи;
- IoT (Internet of things) – интернет вещей;

LTE (Long Term Evolution) – технология высокоскоростной пакетной передачи данных для третьего поколения сотовой связи;

MGW – коммутационное поле сети UMTS;

MSC – центр коммутации мобильной связи сети UMTS;

MIMO (Multiple Input Multiple Output) – метод пространственного кодирования сигнала;

NodeB – базовая станция системы сотовой связи стандарта UMTS;

NSS (Network Switching System) – система коммутации;

PDN Gateway – входной-выходной шлюз;

QoS (Quality of Service) – качество услуг связи;

RAN – радиointерфейс;

PCRF (Policy and Charging Rules Function) – узел учета времени работы абонентов и определение стоимости за оказанные услуги связи;

PDN Gateway – входной-выходной шлюз сети LTE;

RNC (Radio Network Controller) – контроллер сети радиодоступа системы UMTS;

SAE (System Architecture Evolution) или Serving Gateway – обслуживающий шлюз сети LTE;

SGSN – узел обработки пакетной информации в сети UMTS;

SMS – передача текстовых сообщений;

SUI – канальная модель распространения сигналов;

VLR – визитный регистр местоположения;

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – технология беспроводного широкополосного доступа на базе стандарта IEEE 802.16.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.Д. Разработка и исследование моделей множественного доступа и алгоритмов управления потоками трафика для гетерогенных беспроводных сетей [Электронный ресурс] / С.Д. Андреев // Дис. доктора технических наук: 05.12.13 / ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ». – Москва, 2018, - 32 с. – Режим доступа: [http://fs.guap.ru/dissov/andreev\\_sd/full.pdf](http://fs.guap.ru/dissov/andreev_sd/full.pdf)/Загл. с экрана.
2. Андрианов В.И., Соколов А.В. Сотовые, пейджинговые и спутниковые средства связи. – СПб.: ВНУ-Петербург, Арлит, 2001. – 399с.
3. Андрианов В.И., Соколов А.В. Средства мобильной связи – СПб.:Петербург, Арлит, 1998. – 256 с.
4. Антух А.Э. Приближенное построение множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации методом роя частиц [Электронный ресурс] / Антух А.Э., Семенихин А.С., Хасанова Р.В. // Научно-техническое издание «Наука и образование». – 2010. – №4 – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/141969.html>.
5. Бабков В.Ю. Подходы к планированию и оптимизации сетей LTE: учебник. [Электронный ресурс] / В.Ю. Бабков // - Санкт – Петербург, 2012. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/56362470-Podhody-k-planirovaniyu-i-optimizacii-setey-lte-v-yu-babkov.html>
6. Бабков В.Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. Учебное пособие для вузов/ В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, П.А. Михайлов. – 2-е изд.,испр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 224 с.
7. Береснев В.Л. Алгоритм неявного перебора для задачи типа размещения и стандартизации / В.Л. Береснев // Управляемые системы. Новосибирск, Институт математики Сиб.отд. АН СССР. - Вып. 12. - С. 24-34.
8. Береснев В.Л. Дискретные задачи размещения и полиномы от булевых переменных / В.Л. Береснев / - Новосибирск: Изд-во Инст. математики, 2005. — 408 с.



9. Береснев А.В. Алгоритм локализации абонентской нагрузки в пространстве и времени в сотовых системах подвижной радиосвязи стандарта GSM. Журнал радиоэлектроники. 2002г. №11.
10. Бойко М.П. Системи стільникового зв'язку : конспект лекцій. / М.П. Бойко - Одеса : ОНАЗ, 2004. 76 с.
11. Бугров, Д.А. Применение эволюционного метода для оптимизации магистральной сети связи / Д.А. Бугров, Н.Л. Сторожук // Электросвязь. - 2007. -№ 5. - С . 30-33.
12. Бузов А.Л. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Учебн. пособие / А.Л. Бузов, М.А. Быховский, Н.В. Васехо и др. Под ред. д.т.н., проф. М.А. Быховского. - М.: Эко-Трендз, 2006.- 376с.:илл.
13. Весоловски Кшиштоф. Системы подвижной радиосвязи / Пер. с польского Н.И. Рудицкого. Под ред. А.И. Дедовского. М.: Горячая линия -Телеком. 2006. - 536 с.
14. Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. WiMAX: Путь к 4G: Энциклопедия. - Москва, 2009. 472 с.
15. Вишневский, В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, И.В. Шахнович, С.Л. Портной. -М.: Техносфера, 2005. - 456 с.
16. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 432с.
17. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.
18. Гэри М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. - М.:Мир, 1982. - 416 с.
19. Дмитриев В.Н., Пищин О.Н., Сорокин А.А. Способы организации высокоскоростных сетей передачи информации при помощи подвижных базовых станций / Телекоммуникационные и информационные системы / Труды междунар. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007.-512 с. (С.139-143). ISSN 5-7422-1583-5.

20. Дьяконов В.П., В.В. Круглов MATLAB 6.5 SPI/7/7 SPI1/7 SP2 +Simulink5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики/ Серия «Библиотека профессионала». —М: СЛОН-ПРЕСС , 2010. – С. 249-258.

21. Ермолаев С.Ю. Генетический подход к задаче оптимального размещения базовых станций в сетях IEEE 802.16-2004 / С.Ю. Ермолаев, В.Г. Карташевский // Труды 12-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2010). - Москва, 2010. - С 255-257.

22. Ермолаев С.Ю. Оптимальное размещение базовых станций / С.Ю. Ермолаев // TelecommunicationSciences. - 2010. - Т. 1, №1. - С. 82-90.

23. Зыбин В.А. Исследование новых возможностей использования технологии WiMAX / В.А. Зыбин, В.В. Крылов // Труды научной конференции по радиофизике. - Нижний Новгород, 2006. - С. 66-67.

24. Иванов А. Оборудование WiMAX - решение компании Alvarion / А.Иванов, С. Портной // Первая миля. - 2009. - № 2. - С. 32-39.

25. Казаковцев, Л.А. Задача выбора оптимального размещения элементов беспроводной сети / Л.А. Казаковцев, М.Н. Гудыма, А.А. Ступина, Ю.И. Кириллов //Современные проблемы науки и образования [электронное издание].–2013.– вып.3.– URL <http://elibrary.ru/download/29613015.pdf>.

26. Казаковцев, Л.А. Модификация генетического алгоритма с жадной эвристикой для непрерывных задач размещения и классификации / Л.А. Казаковцев, А.А. Ступина, В.И. Орлов // Системы управления и информационные технологии.– 2014.–№2.–С.35-39.

27. Карпенко А.П. Методы оптимизации: базовый курс [Электронный ресурс]: конспект лекций / А.П. Карпенко // МГТУ им. Н.Э.Баумана. – Москва, 2010.– Режим доступа:<http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/base.cou>.

28. Кочетов Ю.А. Лагранжевы релаксации в задаче выбора оптимального состава системы технических средств / Ю.А. Кочетов, М.Г. Пашенко // Управляемые системы. - ИМ СО РАН, 1993. - вып.31. - С. 26-39.

29. Куракова Т.П. Использование миллиметрового диапазона волн для мобильной связи поколения 5G/ Т.П. Куракова// Проектирование и технология электронных средств. - 2016, №4. –С. 3-7.
30. Куракова Т.П. Моделирование радиоканалов миллиметрового диапазона частот/ Т.П. Куракова, В.К. Сарьян //Труды НИИР. -2017, №1. –С.33-39.
31. Ланге О. Оптимальные решения / О. Ланге. – М.: Прогресс, 1967. – 286с.
32. Лютиков Б.Г. Модифицированный генетический алгоритм выбора конфигурации оборудования проектируемой телекоммуникационной сети / Б.Г. Лютиков, Д.В. Морозов, В.П. Морозов // Телекоммуникации. - 2008. - № 5. - С.10-12.
33. Мухин А.М Системы связи подвижной службы общего назначения / А.М. Мухин, Л. С. Чайников. / СПб.: Наука и техника, 2001. - 240с.
34. Одарченко Р.С. Исследования основных недостатков базовых станций разных поколений сотовой связи / Р.С. Одарченко / Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2016. №3. С. 81-89
35. Одарченко Р.С., Абакумова А.О. Метод балансирования нагрузки в опорной сети сотового оператора. / Р.С. Одарченко Наукоємні технології. 2016. №32 (4). С. 369-375
36. Одарченко Р.С., Харлай Л.О. Метод резервирования ресурсов и балансирования нагрузки в транспортной сети с учетом основных характеристик сетей. Технічні науки та технології. 2018. №1(11). С. 89-96
37. Павловская К.А. Задача оптимального размещения базовых станций в сетях пятого поколения / К.А. Павловская // Сборник научных трудов ДОНИЖТ, 2019 №55 – Донецк, 2019. – С. 19-23.
38. Павловская К.А., Яремко И.Н. Анализ моделей расчёта потерь мощности сигнала в сетях сотовой связи 5G / К.А. Павловская, И.Н. Яремко // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2020. – Вып. 1 (21). – С. 140-146.

39. Павловская К.А. Применение генетического алгоритма для решения задач размещения базовых станций в сетях пятого поколения / К.А. Павловская // Информатика и кибернетика, Донецк, ДонНТУ, 2019. - № 4(18). - С. 29-34.
40. Павловская К.А., Лозинская В.Н., Яремко И.Н. Многокритериальная оптимизация построения сетей пятого поколения на основе системного анализа / К.А. Павловская, В.Н. Лозинская, И.Н. Яремко // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2019. – Вып. 4 (20). – С. 111-117.
41. Панченко, Т. В. Генетические алгоритмы [Текст] : учебно-методическое пособие / под ред. Ю. Ю. Тарасевича. — Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – С. 6.
42. Принятие проектных решений: [учеб. пособие] / В.М. Балыбин, В.С. Лунев, Д.Ю. Муромцев, Л.П. Орлова. – Тамбов: ТГТУ, 2003. – 80с.
43. Пятое поколение мобильной связи [Электронный ресурс] - Режим доступа — [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:5G\\_\(пятое\\_поколение\\_мобильной\\_связи\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:5G_(пятое_поколение_мобильной_связи)). Загл. с экрана.
44. Реализация генетического алгоритма в пакете matlab. [Электронный ресурс] - Режим доступа <https://studfile.net/preview/4031478/page:9/>- Загл. с экрана.
45. Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского / Л. Рутковский, Д. Рутковская, М. Пилиньский. — М.: Горячая линия - Телеком, 2006. — 383 с : ил.
46. Рыжков А.Е., Сиверс М.А., Воробьев В.О., Гусаров А.С., Слышков А.С., Шуньков Р.В. Системы и сети радиодоступа 4G: LTE, WiMax. – СПб: Линк, 2013. – 226 с.
47. Скрынников В.Г Проблемы планирования и обеспечения ЭМС сетей LTE. Сети мобильной связи LTE: технологии и практика: материалы семинара МСЭ для стран СНГ. 03-05 марта 2014, г. Москва
48. Скрынников В.Г., Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика. – М.: Издательство "Спорт и Культура – 2000", 2013.– 864 с.
49. Слюсар В.И. Синтез антенн на основе генетических алгоритмов. Часть 1 /В.И. Слюсар // Первая миля. - 2008. - № 6. - С. 16-23.

50. Слюсар В.И. Синтез антенн на основе генетических алгоритмов. Часть 2 /В.И. Слюсар // Первая миля. - 2009. - № 1. - С. 22-25.
51. Сотовая связь История Стандарты Технологии, 2G. GSM [Электронный ресурс] - Режим доступа <http://celnet.ru/2G.php/> - Загл. с экрана.
52. Сотовая связь История Стандарты Технологии, 3G. UMTS [Электронный ресурс] - Режим доступа <http://celnet.ru/3G.php/> - Загл. с экрана.
53. Стеклов В.К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: [підручник для вищ. навч. закладів] / Стеклов В.К., Беркман Л.Н., Кільчицький Є.В. – К.: Техніка, 2004. – 576 с.
54. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура. – М: Эко-Трендз, 2014.– 284 с.
55. Трифонов А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения [Электронный ресурс] /А.Г. Трифонов // Консультационный центр MATLAB компании Softline. – Режим доступа: [http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book\\_1/16.php./](http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/16.php/) Загл. с экрана.
56. Характеристики 5G [Электронный ресурс] - Режим доступа – [https://www.openairinterface.org/docs/workshop/5\\_OAI\\_Workshop\\_20180620/KALTENBERGER\\_5G%20New%20Radio%20in%20OpenAirInterface.pdf](https://www.openairinterface.org/docs/workshop/5_OAI_Workshop_20180620/KALTENBERGER_5G%20New%20Radio%20in%20OpenAirInterface.pdf) Загл. с экрана.
57. Чеботарёва Д.В. Выбор оптимальной топологии транспортной сети мобильной связи с учетом противоречивых показателей качества. [Электронный ресурс] / Д.В. Чеботарева, Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2013. № 766. С. 124-131. Режим доступа: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/23421/1/21-124-131.pdf>
58. Чеботарёва Д.В. Применение методов многокритериальной оптимизации при планировании сетей сотовой связи / Д.В. Чеботарёва, В.М. Безрук // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. 2008. № 618. С. 117.
59. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления / И.Г. Черноруцкий. – СПб.: Питер, 2004. – 256с.
60. Шебанова Л.О. Анализ критериев оптимальности функционирования транспортных телекоммуникационных сетей. [Электронный ресурс]/ Л.О.

Шебанова, В.В. Турупалов // Науковий журнал «Проблеми телекомунікацій». – 2010. – № 2 (2). – с. 23 – 32. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102\\_shebanova\\_analisis.pdf/](http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_shebanova_analisis.pdf/) Загл. с экрана.

61. Яремко И.Н., Павловская К.А., Анализ модели распространения радиоволн SUI для решения задач построения сетей сотовой связи 5G / И.Н. Яремко, К.А. Павловская // Сборник научных трудов ДОНИЖТ, 2020 №56 – Донецк, 2020. – С. 26-31.

62. Ahuja R.K. A multi-exchange heuristic for the single source capacitated facility location problem [Электронный документ] / R.K. Ahuja, J.B. Orlin, S. Pallottino, M.P. Scaparra, M.G. Scutella // - Режим доступа: <http://www.compass2.di.unipi.it/TR/files/TR-02-ll.ps.gz> Загл. с экрана.

63. Barcelo J. A heuristic Lagrangean algorithm for the capacitated plant location problem / J. Barcelo, J. Casanovas // European Journal of Operational Research. - 1984.-№ 15. - P . 212-226.

64. E. Amaldi E., Capone A., Malucelli F. Planning UMTS base station location: optimization models with power control and algorithms. IEEE Trans. Wireless Commun., 2:939-952, Sept. 2003.

65. Erceg V. Channel models for fixed wireless applications / V. Erceg, K.V.S Hari, et al. // Tech. Rep. IEEE 802.16a-03/01, June 2003.

66. Ericsson. More than 50 billion connected devices [Электронный ресурс] // White paper. — 2011. — Режим доступа: [https://www.akos-rs.si/files/Telekomunikacije/Digitalna\\_agenda/Internetni\\_protokol\\_Ipv6/More-than-50-billion-connected-devices.pdf/](https://www.akos-rs.si/files/Telekomunikacije/Digitalna_agenda/Internetni_protokol_Ipv6/More-than-50-billion-connected-devices.pdf/) Загл. с экрана.

67. ETSI TR 136 913 V14.0.0 (2017-04) LTE: Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE Advanced): [Электронный ресурс] / - Режим доступа: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/136900\\_136999/136913/09.00.00\\_60/tr\\_136913v\\_090000p.pdf/](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/136900_136999/136913/09.00.00_60/tr_136913v_090000p.pdf/) Загл. с экрана.

68. Freisleben B. Genetic local search algorithm for solving symmetric and asymmetric traveling salesman problems / B. Freisleben, P. Merz // Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1996, IEEE Press, pp.616-621.

69. G.K.Stiiber. Principles of Mobile Communication, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996.
70. Global Optimization Tool box. [Электронный ресурс] - Режим доступа <https://docs.exponenta.ru/gads/index.html/>- Загл. с экрана.
71. Gortz S. A subgradient-based branch-and-bound algorithm for the capacitated facility location problem [Электронный документ] / S. Gortz, A. Klose. – Режим доступа: [http://www.imf.au.dk/publications/wp/2009/imf-wp-2009-01 .pdf](http://www.imf.au.dk/publications/wp/2009/imf-wp-2009-01.pdf). - 6.10.2009./ Загл. с экрана.
72. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. – Cambridge : The MIT Press, 1992. – 194 p
73. Jukka Lempiainen, Matti Manninen “Radio interface system planning for GSM/GPRS/UMTS”, Kluwer Academic publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow/ 2004.
74. Lee W. C. Y. Mobile cellular telecommunications systems. - Howard W. Sam's & C0.1989.
75. Lee W.C.Y., *Mobile Communications Design Fundamentals*, 2nd Edition, McGrawHill, New York, 1993.
76. Lenstra J.K. Complexity of scheduling under precedence constraints / J.K.Lenstra, K.A.H.G. Rinnooy // Operations Research. - 1978. - № 26. - P. 22-35.
77. Neebe A.W. An algorithm for the fixed-charge assigning users to sources problem / A.W. Neebe, M.R. Rao // Journal of the Operational Research Society. - 1983. -№34. - P . 1107-1113.
78. Recommendation ITU-R M.1645 (06/2003) Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000: [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1645-0-200306-1!!!PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1645-0-200306-1!!!PDFE.pdf)/Загл. с экрана.
79. REPORT ITU-R M.2134. Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s) [Электронный ресурс] / - Режим доступа: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itur/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itur/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf)/Загл. с экрана.

80. Stutzle T. MAX-MTN Ant System / T. Stutzle, H.H. Hoos // Future Generation Computer Systems. - Vol. 16, № 8. - 2000. - P. 889-914.

81. T.S. Rappaport, Wireless Communications, Principles and Practice, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1996.

82. Tombaz S. Energy-and cost-efficient ultra-high-capacity wireless access / S. Tombaz, A. Vastberg, J. Zander // IEEE Wireless Communications. — 2011. — Vol. 18, no. 5. — Pp. 18–24

83. Y.Okumura, E.Ohmori, T.Kawano, K.Fukuda, «Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service», Review of the Electrical Communication Laboratory, Vol. 16, №9-10, 1968, pp. 825-873.



## Приложение А

Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78  
эл. почта: donmtu.info@mail.ru

09.06.20 № 30-12/107  
На № \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.024.04  
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

## СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Павловской Ксении Александровны на тему: «Обоснование метода территориального планирования систем сотовой связи 5G на основе многокритериальной оптимизации», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Результаты диссертационных исследований Павловской К.А., а именно: метод определения мест расположения базовых станций сетей сотовой связи 5G с оптимальным показателем качества QoS, рекомендации по практическому использованию предложенного метода внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций по дисциплинам «Общая теория связи», «Системы и сети радиосвязи» для студентов направления подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Проректор по научно-педагогической работе  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», профессор

А.Б. Бирюков

Начальник учебного отдела  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», профессор

Б.В. Гавриленко

Заведующий кафедрой «Автоматизация телекоммуникации»  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», профессор

В.В. Турупалов

Соответствует оригиналу

Ученый секретарь Д 01.024.04

Т.В. Завадская



**МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ОПЕРАТОР СВЯЗИ»  
(ГП «РОС»)**

Юридический адрес: ул. Артема, д. 169к, г. Донецк, 83121  
Фактический адрес: ул. Марьинская, д. 1, г. Донецк, 83001; телефон: (062) 303-22-00  
т/с 40602810820000000042 в ЦРБ ДНР, ИНН банка 51000050, БИК банка 310101001  
e-mail: ros@phoenix-dnr.ru; https://phoenix-dnr.ru/ ИКЮЛ 51010289

Диссертационный совет Д 01.024.04  
при ГОУВПО «Донецкий Национальный  
Технический Университет»

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Павловской Ксении Александровны на тему: «Обоснование метода территориального планирования систем сотовой связи 5G на основе многокритериальной оптимизации», предоставленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Результаты диссертационных исследований Павловской К.А., а именно: метод определения мест расположения базовых станций сетей сотовой связи 5G с оптимальным показателем качества QoS, рекомендации по практическому использованию предложенного метода внедрены в производственный процесс ГП «РОС».

С уважением,

первый заместитель директора



**В.В. Климов**

Соответствует оригиналу  
Ученый секретарь Д 01.024.04  
*Т.В. Завадская* Т.В. Завадская