

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи

Мухтаров Амир Амангельдыевич

**Разработка моделей и методов оптимального размещения  
базовых станций при проектировании беспроводных  
широкополосных сетей**

Специальность 05.13.18 —  
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Першин Олег Юрьевич

Москва — 2022

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение</b> . . . . .	5
<b>Глава 1. Внедрение БШС на нефтегазовых месторождениях</b> . .	10
1.1 Этапы проектирования БШС . . . . .	12
1.2 Анализ современных беспроводных широкополосных технологий передачи данных . . . . .	14
1.2.1 Wi-Fi . . . . .	14
1.2.2 LTE . . . . .	18
1.2.3 5G NR . . . . .	20
1.3 Выбор протокола беспроводной широкополосной сети для решения задачи синтеза топологий . . . . .	23
1.4 Определение параметров БШС, необходимых для решения задач размещения базовых станций . . . . .	24
1.4.1 Энергетический потенциал канала связи . . . . .	25
1.4.2 Модель потерь в свободном пространстве . . . . .	27
1.4.3 Модель распространения SUI . . . . .	29
1.4.4 Модель двух лучевого распространения . . . . .	30
1.4.5 Модель Окамура-Хата . . . . .	31
1.4.6 Расчет параметров БС, необходимых для задачи оптимизации . . . . .	32
1.5 Оценка характеристик производительности сети с помощью стохастических моделей массового обслуживания . . . . .	34
1.5.1 Время передачи пакета в канале . . . . .	34
1.5.2 Расчет межконцевой задержки . . . . .	41
1.6 Выводы . . . . .	45
<b>Глава 2. Размещение базовых станций БШС для покрытия         линейной территории</b> . . . . .	46
2.1 Актуальность внедрения БШС для телекоммуникационного покрытия линейного участка . . . . .	46
2.2 Математические модели синтеза топологии сети для охвата линейного участка в виде задачи целочисленного линейного программирования . . . . .	51

	Стр.
2.2.1 Постановка задачи . . . . .	52
2.2.2 Модель целочисленного линейного программирования . .	53
2.3 Математические модели синтеза топологии сети для охвата линейного участка в виде экстремальной задачи в комбинаторной форме . . . . .	59
2.3.1 Постановка задачи . . . . .	60
2.3.2 Дерево ветвлений для перебора элементов в множестве $\Gamma$ .	62
2.3.3 Метод ветвей и границ для задачи размещения БС . . . .	65
2.3.4 Построения последовательности топологий для итерационной процедуры моделирования БШС . . . . .	70
2.4 Сравнительная оценка полученных моделей . . . . .	71
2.5 Выводы . . . . .	76
 <b>Глава 3. Размещение базовых станций БШС для</b>	
<b>обслуживания множества рассредоточенных объектов .</b>	<b>79</b>
3.1 Актуальность внедрения БШС для обслуживания рассредоточенных объектов . . . . .	79
3.2 Математическая модель задачи проверки допустимого решения при заданных местах размещения станций. . . . .	80
3.2.1 Постановка задачи . . . . .	81
3.2.2 Модель линейного программирования . . . . .	82
3.3 Математическая модель оптимальной задачи выбора набора размещаемых станций и определения мест их размещения . . . .	88
3.3.1 Постановка задачи. . . . .	88
3.3.2 Модель частично целочисленного линейного программирования . . . . .	90
3.4 Выводы . . . . .	96
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>98</b>
<b>Список сокращений и условных обозначений . . . . .</b>	<b>100</b>
<b>Словарь терминов . . . . .</b>	<b>101</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>102</b>

Список рисунков . . . . .	119
Список таблиц . . . . .	120
Приложение А. Сравнения оценок «недопокрытия» для задачи 2, 3 и 4 . . . . .	122
Приложение Б. Численный пример оптимального размещения базовых станций сети с линейной топологией в виде задачи целочисленного линейного программирования . . . . .	123
Приложение В. Метод ветвей и границ на примере задачи размещени двух базовых станций . . . . .	126
Приложение Г. Численный пример оптимального размещения базовых станций сети с линейной топологией в виде экстремальной задачи в комбинаторной форме . . . . .	131

## Введение

В настоящее время заметна тенденция бурного развития информационных технологий во всех сферах деятельности человека. Основными перспективными направлениями являются: цифровая трансформация транспортного комплекса, глобальная цифровизация нефтегазового сектора страны, переход к малолюдным технологиям. Это подход подразумевает не только оснащение современным технологичным оборудованием, но и глобальное изменение в подходах управления, сбора информации и средств коммуникаций. Уже сейчас основными современными информационными технологиями, встречающимися на пути трансформации являются: большие данные (Big Data), предиктивные модели на искусственных нейронных сетях (Artificial Neural Network), системы распределенного реестра (Blockchain), промышленный интернет вещей (Industrial internet of things, IIoT), технологии виртуальной и дополненной реальности (Virtual Reality, VR), мониторинг распределенных объектов с помощью беспилотных летательных аппаратов БПЛА (Unmanned Aerial Vehicle, UAV). В совокупности данные технологии создают необходимость в эффективной передаче больших объемов высокоскоростного трафика. Одним из путей решения данной проблемы является внедрение беспроводных технологий.

В настоящее время беспроводные технологии являются неотъемлемой частью процесса «цифровизации». Активное использование беспроводных сетей основывается на ряде их преимуществ по сравнению с кабельными сетями:

- организация связи в труднодоступных регионах;
- быстрый ввод в эксплуатацию по системе подключение типа «Подключил и Работай» (Plug-&Play);
- сокращение капитальных затрат на создание сети;
- уменьшение затрат на эксплуатацию;
- высокая гибкость, мобильность, масштабируемость;
- упрощенные требования к обслуживанию оборудования.

В рамках этого процесса возникает актуальная научно – техническая проблема повышения качества проектирования беспроводной сети связи, осуществляющей сбор и передачу информации в центр управления с множества контролируемых объектов на некоторой территории и контроль самой территории.

Процесс проектирования современной беспроводных сетей связи состоит из последовательного решения взаимосвязанных задач:

- обследование местности;
- выбор типов технических средств и протоколов;
- выбор топологической структуры сети;
- анализ и оценка будущей беспроводной сети с помощью математического моделирования.

Данная работа посвящена проблеме оптимизации топологической структуры беспроводной широкополосной сети (БШС).

**Степень разработанности темы.** Создание и постоянное развитие современной инфраструктуры передачи данных является одной из основных задач цифровизации. Бурное развитие беспроводных сетей во всех областях деятельности человека: интеллектуальные транспортные системы вдоль автомобильных дорог, мониторинг нефтегазовых объектов, организация современного высокоскоростного покрытия в общественных зонах обосновывает целесообразность их использования. В настоящее время в России и за рубежом исследованию беспроводных сетей связи посвящен ряд работ, рассматривающие сети для контроля гражданских и промышленных объектов. Примерами таких объектов является жилые районы города, протяженные автомагистрали, железные дороги, трубопроводы и др. В частности, при исследовании проблемы синтеза топологии сети автор опирался на труды таких отечественных ученых как: В.М. Вишнеvский, О.Ю. Першин, В.М. Малыш, А.А. Ларионов, Ю. В. Гайдамака и другие. Наряду с отечественными работами диссертант обращался к трудам зарубежных авторов: Е.С. Кавальканте, Х. Лиу, А.Б. Рейз, Д.Ли, Д.П. Хейман, С. Шен, Д. Бендель, У. М. Амин, Б. Брахим, Х.Э. Кызылѐз и другие.

В работах указанных авторов рассматриваются задачи оптимального синтеза топологии сети и исследуются вопросы анализа сетей, в том числе рассматриваются оценки характеристик сетей с помощью стохастических моделей сетей массового обслуживания.

Исследования доведены до разработки алгоритмов и программ, применимых для решения практических задач. Проведены численные эксперименты, позволяющие оценить характеристики вычислительных методов.

**Объектом исследования** являются БШС специальных типов, широко представленных на практике: БШС для контроля линейных траекторий и БШС

с ячеистой топологией (mesh) для контроля объектов, рассредоточенных на некоторой территории.

**Предметом исследования** является синтез топологической структуры беспроводной широкополосной сети.

**Цель диссертационного исследования** состоит в разработке моделей и методов оптимального размещения базовых станций для БШС указанных типов, определяющего топологию таких сетей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ современного состояния и перспектив развития БШС для обоснования актуальности исследований в области оптимизации их топологии.
2. Проанализирована методика проектирования современных БШС с целью определения технологических требований к решению задачи синтеза оптимальной топологии сети, а также расчета параметров БШС, необходимых для решения задач размещения базовых станций.
3. Построены математические модели для задачи оптимального размещения базовых станций БШС с линейной топологией, разработан алгоритм типа метода ветвей и границ (МВиГ) для решения указанной задачи, предложена итерационная процедура нахождения последовательности лучших решений в размещении базовых станций в рамках комплексного проектирования сети.
4. Разработаны математические модели для проектирования и анализа БШС с ячеистой топологией.

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

1. Построены математические модели в виде экстремальной комбинаторной задачи и задачи целочисленного линейного программирования (ЦЛП) для оптимального размещения базовых станций при проектировании БШС с линейной топологией.
2. Разработан специальный алгоритм МВиГ для решения сформулированной экстремальной комбинаторной задачи размещения базовых станций вдоль линейной территории.
3. Разработана итерационная процедура нахождения последовательности лучших решений для задачи размещения базовых станций в рамках комплексного проектирования БШС с линейной топологией.

4. Разработан программный комплекс для ЭВМ расчета комбинаторной задачи.
5. Разработаны математические модели для задач проектирования БШС с ячеистой топологией.

**Область исследования.** Диссертационная работа соответствует содержанию специальности 05.13.18, а именно следующим пунктам специальности:

1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.
2. Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей.
3. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели.
4. Разработка программного комплекса решения задачи поиска оптимального размещения базовых станций.

**Практическая значимость.** Разработанные модели и методы позволяют повысить качество и эффективность проектирования БШС для распространенных типов таких сетей.

**Методы исследования.** В работе использованы теория и методы оптимизации на конечных множествах и теории массового обслуживания. При разработке программного обеспечения использовались методы объектно-ориентированного программирования, метода построения бинарного поиска.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель в виде задачи ЦЛП для оптимального размещения базовых станций при проектировании БШС с линейной топологией.
2. Математическая модель в виде экстремальной комбинаторной задачи для оптимального размещения базовых станций при проектировании БШС с линейной топологией.
3. Специальный алгоритм МВиГ для решения сформулированной экстремальной комбинаторной задачи.
4. Итерационная процедура нахождения последовательности лучших решений для задачи размещения базовых станций в рамках комплексного проектирования БШС с линейной топологией.
5. Математические модели для задач проектирования БШС с ячеистой топологией;



**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследования представлены и обсуждены на научных конференциях «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России» (Москва, 17-21 сентября 2018); «13-е Всероссийское совещание по проблемам управления» (Москва, 17-20 июня 2019); «International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications» (Москва, 22-27 сентября 2019), «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России» (Москва, 24-26 сентября 2019); «Conference Management of Large-Scale System Development» (Москва, 1-3 октября 2019); «Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems» (Москва, 13-17 апреля 2020); «Computer-aided technologies in applied mathematics» (Томск, 7-9 сентября 2020); «International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications» (Москва, 14-18 сентября 2020); «Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems» (Москва, 19-23 апреля 2021); «5th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies» (Астрахань, 4-7 октября 2021)

**Личный вклад.** Основные результаты диссертации, выносимые на защиту получены автором самостоятельно.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журнале, рекомендованных ВАК, 3 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 10 — в сборниках трудов конференции. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 4 приложений. Полный объём диссертации составляет 135 страниц, включая 28 рисунков и 31 таблицу. Список литературы содержит 0 наименований.

## Глава 1. Внедрение БШС на нефтегазовых месторождениях

### ПЕРЕДЕЛАТЬ

Цифровая трансформация является первостепенной задачей для развития нефтегазового комплекса. Переход производства к новой модели управления «Индустрия 4.0» позволит бизнесу сохранить лидирующие позиции и не утратить производственного потенциала [1, 2]. Неотъемлемой частью такой трансформации является внедрение беспроводных технологий [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Современные беспроводные широкополосные сети связи (БШС), обладая рядом преимуществ, нашли свое широкое применение в задачах мониторинга и управления различных производственных или гражданских объектов, технологических установок, движущихся транспортных средств и т.п. К ряду таких преимуществ можно отнести возможность получения информации с любой точки контролируемой территории, быстрый ввод в эксплуатацию, сокращение капитальных затрат на создание и эксплуатацию сети, высокая гибкость, мобильность и масштабируемость.

Нефтегазовые объекты часто расположены в труднодоступной местности на обширной территории в несколько километров. Данный фактор является ключевым преимуществом беспроводных технологий для развертывания по сравнению с кабельными коммуникациями.

Беспроводная связь в автоматизации промышленного производства способствует осуществлению производственных процессов более экономически эффективно, гибко и надежно, а также позволяет реализовывать новые концепции автоматизации [8]. Для управления большими объемами на месторождениях применение беспроводных каналов связи в режиме 60/24/7, позволяющая операторам принимать обоснованные управленческие решения, своевременно диагностировать и устранять неисправности, а также оптимизировать работу АСУ ТП в целом [9].

Не маловажную роль на месторождениях играет безопасность. Технологические объекты на нефтяных или газовых месторождениях, оснащенных широкополосным подключением, позволяют соответствовать современным концепциям и требованиям в сфере безопасности персонала и безопасности имущества, включая охрану с использованием беспроводных камер видеонаблюдения. Для предоставления доступа к объекту могут использоваться

дополнительные возможности, такие как считывание номерных знаков и распознавание лиц. А благодаря использованию тепловых камер можно контролировать риски отключения и перегрузки даже с помощью периодических снимков оборудования на промысле.

Внедрение БШС особенно хорошо подходит для систем видеонаблюдения, поскольку позволяют расположить камеры там, где они нужны, а не там, где удобно для подключения к проводной сети.

В данном исследовании в рамках цифровой трансформации «Индустрия 4.0» представлены модели и методы оптимизации при проектировании беспроводных сетей на месторождениях (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 — Задача синтеза топологии при проектировании БШС в рамках цифровой трансформации "Индустрия 4.0".

## 1.1 Этапы проектирования БШС

Для обеспечения высокого качества беспроводной связи необходимо проводить грамотное проектирование БШС. Существуют различные подходы к проектированию беспроводных сетей. Для одних задач является максимальной зона покрытия, для других – достижения максимальной производительности передачи данных, для третьих – нахождения баланса между зоной охвата и производительностью [10]. В диссертации будут предложены модели и методы оптимального размещения базовых станций (БС) БШС, целью которых является максимальная зона охвата. Процесс проектирования современной БШС, как правило, для такого подхода имеет следующие основные этапы (Рисунок 1.2):

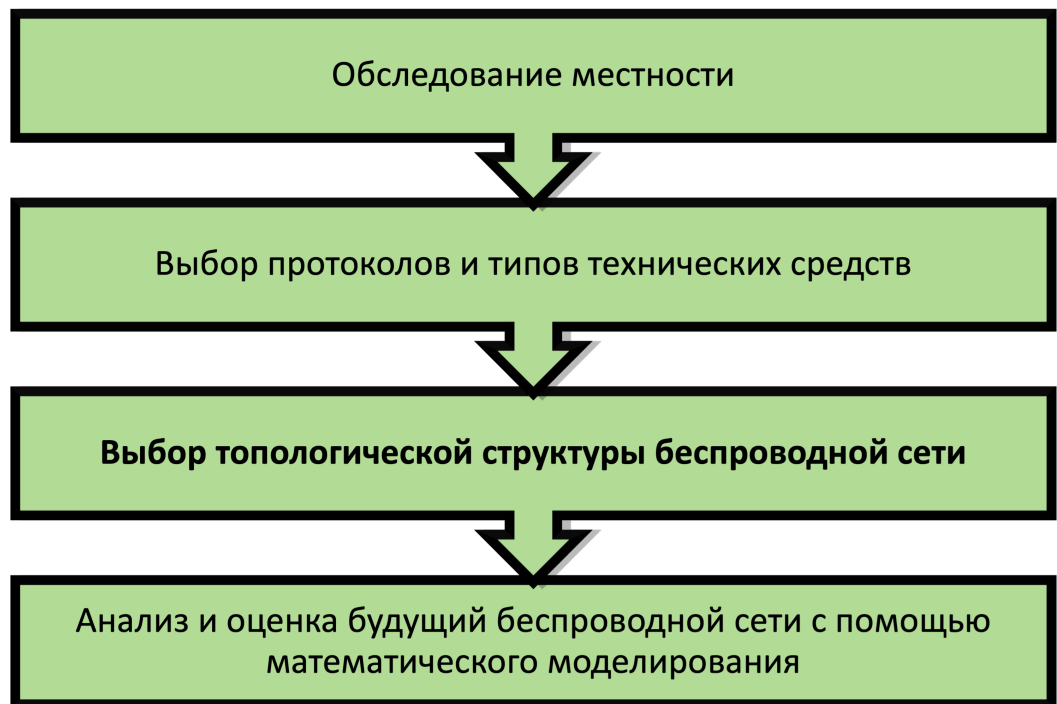


Рисунок 1.2 — Этапы проектирования БШС.

Любое проектирование БШС всегда начинается с первоначального обследования местности. В данный этап входят задачи радиобследования и радиопланирования. оценки реальных размеров области контроля, наличие стационарных инженерно-технических сооружений, мешающих передаче сигнала, такими как металлические конструкции, перекрытия, стены и т.д. При развертывании БШС в открытой местности также немаловажную роль играет наличие перепада высот. В ходе выполнения комплекса работ на местности,

определяются возможные точки размещения оборудования [11]. На основе результатов данного этапа проводится выбор типов моделей оборудования для дальнейшего их размещения и организации сети.

Производительность и дальность действия беспроводных сетей не безграничны. При их проектировании стоит учитывать множество параметров: частота, скорость, мощность излучения [10]. На этапе выбора оборудования необходимо определиться с протоколом будущей БШС и подготовить необходимый комплекс технических средств для развертывания будущей сети. БС является основополагающим устройством будущей сети, которая отвечает за покрытие заданной области. Покрытие в свою очередь зависит от мощности передатчика устройства, усиления антенн, чувствительности приемного устройства.

После определения множества возможных точек размещения БС на этапе обследования местности и выборе возможных типов и моделей оборудования можно переходить непосредственно к размещению БС и определению топологической структуры сети. Этап выбора топологической структуры будущей сети является ключевой проблемой данной диссертации. В рамках данной проблемы будут предложены модели и методы оптимального размещения БС для организации БШС.

После решения задачи синтеза топологии, для полученного размещения решаются задачи оценки характеристик производительности БШС. Для расчета оценок широко применяется аппарат теории массового обслуживания (ТМО). Примерами таких задач являются расчет надежности всех элементов сети [12, 13, 14], оценка характеристик качества канала, вероятности потери пакетов, пропускной способности, времени доставки сообщений в сети [15, 16, 17, 18, 19, 20], оценка межконцевой задержки сети [18, 19]. В работе [21] рассматривают стохастическую модель марковской цепи для оценки качества передачи данных автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) в условиях помех и прерываний. Одним из современных направлений в исследовании характеристик производительности БШС является использование ТМО в совокупности с методами машинного обучения (МО) [22, 23].

Описанная процедура проектирования БШС является общей для большинства внедрения беспроводных коммуникационных сетей. В зависимости от конкретных целей, которые преследуют проектировщики, план работ может требовать содержание конкретных этапов и подзадач проектирования. В общем

же случае проектирование БШС будет происходить согласно данной последовательности этапов. В изложенной концепции важным является представление места результатов исследования данной диссертации в глобальной задаче комплексного проектирования.

## **1.2 Анализ современных беспроводных широкополосных технологий передачи данных**

Существуют множество различных протоколов БШС, используемых на месторождении. Любая сеть имеет свои преимущества для конкретной задачи. Исходя из специфики таких задач, можно выделить два больших класса. Первый класс – это сети, узлами которого являются измерительные устройства (сенсоры) АСУ ТП. Такие сети называют ячеистые сенсорные сети. Для таких сетей характерны низкоскоростной трафик, малое энергопотребление, высокие требования к надежности передачи, а также надежности, непосредственно, оборудования. Вторым классом сетей являются БШС, для которых характерны высокая скорость передачи, большая дальность передачи сигнала от нескольких десятков метров до нескольких сотен метров. Примерами таких сетей являются сети второго уровня, объединяющие кластеры сенсорных сетей для передачи данных в центр управления. Также примером является БШС сбора мультимедийного трафика с беспроводных камер видеонаблюдения.

### **1.2.1 Wi-Fi**

Семейство протоколов IEEE 802.11 или Wi-Fi является одним из популярных протоколов среди беспроводных сетей широкополосного доступа. Широкое применение Wi-Fi не могло не отразиться и на нефтегазовом секторе [24, 25, 26, 27].

Стандарт определяет два типа топологий. Первая топология в стандарте называется независимой (Independent Basic Service Set, IBSS) на основе "точка-точка". Такую сеть также называют Ad-Hoc сетью. Передача в сети произво-

дится на основе децентрализованного алгоритма доступа. Хотя и не существует главной базовой станции, в сети Ad-Нос в каждый момент времени любой узел может взять ведущую роль базовой станции. Следующий тип – централизованная топология. Такой тип сети называют Infrastructure Basic Service Set или просто BSS [28]. Узлы сети могут обмениваться только с базовой станцией, обеспечивающее взаимодействие между всеми конечным узлами сети.

Стек протоколов стандарта IEEE 802.11 соответствует общей структуре 802 (Рисунок 1.3). Физический уровень практически соответствует физическому уровню в модели OSI. Канальный уровень во всех протоколах 802.x разбит на два или более подуровня. Подуровень управления доступа к среде обеспечивает адресацию и механизмы управления доступом к каналам. Подуровень MAC выступает в качестве интерфейса между физическим уровнем и подуровнем управления логическим соединением (LLC). Задача LLC состоит в том, чтобы сделать различия стандартов 802.11x невидимыми для сетевого уровня [29]. На уровне MAC протокола 802.11 определяются два типа доступа к среде передачи данных: функция распределенной координации (Distributed Coordination Function, DCF) и функция централизованной координации (Point Coordination function, PCF), работающий только в режиме IBSS [30].



Рисунок 1.3 — Часть стека протоколов 802.11

**Развитие стандарта.** Первый стандарт в 1997 году поддерживал скорость передачи до 1,2 Мбит/с с рабочем диапазоном частот 2,4 ГГц. Уже в 1999

году стандарт 802.11b скорость передачи достигала 11 Мбит/с. В тот же 1999 год одновременно вышел 802.11a, поддерживающий способ модуляции OFDM – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов. Данный метод модуляции пришел на смену методов прямой последовательности для расширения спектра (direct sequence spread spectrum, DSSS) и псевдослучайная перестройка рабочей частоты (frequency-hopping spread spectrum, FHSS). Протокол работает в диапазоне частот 5 ГГц. Данное введение позволило увеличить скорость до 54 Мбит/с. В 2003 году появился 802.11g, в котором OFDM стал совместим с 802.11b DSSS. В 2009 году, в рамках стандарта 802.11n была завершена работа над методами передачи данных SU-MIMO (Single User – Multiple Input Multiple Output), которые одновременно используют несколько антенн на приемнике и передатчике, что дает очередной выигрыш в скорости. Благодаря четырем антеннам и более широким каналам стандарт 802.11 теперь определяет скорости до 600 Мбит/с [29, 31]. В 2013 году появился стандарт 802.11ac с максимальной теоретической скоростью беспроводного соединения 3,47 Гбит/с. В данном стандарте представлена технология одновременная передача по нескольким антеннам сразу четырем клиентам MU-MIMO (Multi User – Multiple Input Multiple Output). В 2021 была представлена сеть шестого поколения Wi-Fi 6, стандарт получил название IEEE 802.11ax. Скорость передачи достигает 9608 Мбит/с. Стандарт работает на частотах 2,4 ГГц и 5 ГГц. Реализован новый тип модуляции – 1024-QAM. Теперь MU-MIMO работает для одновременной передачи до восьми клиентам. Кроме того, Wi-Fi 6 обеспечивает эффективную работу в сетях IoT, существенно повышая эффективность работы с малыми объемами данных и эффективно используя батарею маломощных измерительных устройств за счет сокращения обмена служебной информацией.

**Беспроводной широкополосный доступ вдоль протяженных автомобильных дорог.** Обеспечение безопасности на автодорогах, в том числе на промысле, является актуальной задачей на сегодняшний день. Одним из методов ее решений является создание современной инфраструктуры передачи мультимедийной информации вдоль протяженных автомагистралей [32]. Для реализации такой сети разработан стандарт IEEE 802.11p/WAVE. Протокол разработан для обмена данными между высокоскоростными транспортными средствами, а также между транспортными средствами и придорожной инфраструктурой. Такие сети называются V2X (Vehicle-to-everything). 802.11p



работает в диапазоне 5,85–5,925 ГГц для движущихся объектов на скорости до 200 км/ч мимо неподвижных базовых станций на расстоянии до 1 км. Протокол IEEE 802.11p входит в состав стандарта Wireless Access in Vehicular Environ (WAVE) и является своего рода интерфейсом для связи с IEEE 1609. В совокупности два этих стандарта определяют интерфейс и набор дополнительных функций для обеспечения связи между движущимися объектами [33].

**Ячеистая топология стандарта 802.11.** Стандарт поддерживает MESH топологию. Все нововведения относятся к MAC уровню и рассматриваются вопросы маршрутизации пакетов в рамках mesh-сети. Фактически в стандарте рассматриваются сетевой и транспортный уровень модели OSI. Пакет уровня MAC содержит дополнительный MESH - заголовок в отличие от стандартных заголовка пакетов 802.11. В заголовке указывается время жизни пакеты при пересылке через несколько узлов сети [34]. Такой подход помогает решить проблему наличия циклов при выборе пути передачи. Протоколы маршрутизации делят на два класса: проактивный – каждый узел строит свою таблицу маршрутизации и делится информацией об изменении топологии сети со своими соседями и реактивный – таблицы маршрутизации не строятся, маршрут составляется по мере необходимости. Стандарт 802.11s определяет гибридный протокол маршрутизации по умолчанию – HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol). Также стандарт позволяет разработчикам оборудования использовать альтернативные методы маршрутизации. Режим энергосбережения в 802.11s является опциональным [30]. Точки доступа MESH-сети (MESH Access Point, MAP) всегда активны, так как в любой момент времени могут обратиться устройства, не поддерживающие непосредственно 802.11s. Необходимость возникает в случае IoT, когда всегда устройства имеют автономное питание (измерительные устройства, датчики) [34].

При внедрении беспроводных технологий необходимо учитывать специфику выполняемых задач будущей сети. Для каждой конкретной цели существуют свои требования к скорости передачи данных, дальности связи, потребляемой мощности, помехозащищённости, надежности и т.д. Чтобы учесть специфику данных задач разработано множество беспроводных решений, охватывающее дальность связи от несколько сантиметров до десятков километров и скоростей передачи от единиц Кбит/с до сотен Мбит/с.

### 1.2.2 LTE

Сеть LTE (Long-Term Evolution) состоит из двух компонентов:

- сети радиодоступа E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network);
- архитектура ядра сети SAE (System Architecture Evolution)

Сеть радиодоступа E-UTRAN состоит из базовых станций сети eNodeB (или eNB, evolved Node B). Интерфейс X2 позволяет соединить узлы eNodeB по принципу «каждый с каждым» для переключения устройств между базовыми станциями.

Основным компонентом архитектуры SAE является Evolved Packet Core (EPC), в состав которого входят следующие логические элементы [35]:

1. MME (Mobility Management Entity) – узел управления мобильностью абонентского терминала, взаимодействует с базовыми станциями с помощью протоколов плоскости управления C-plane через интерфейс S1-C;
2. UPE (User Plane Entity) – выполняет сжатие заголовков IP-протоколов, шифрование потоков данных, терминацию пакетов данных плоскости пользователя, коммутацию пакетов данных при обеспечении мобильности пользователя. Передача данных пользователей происходит согласно протоколам плоскости пользователя U-plane, взаимодействие с eNode происходит с помощью интерфейса S1-U.

Архитектура сети LTE представлена на рисунке 1.4. Интерфейс S1 необходим для соединения базовой станции eNodeB с узлами MME/UPE.

Базовые станции eNB выполняют функции управления радиоресурсами (Radio Resource Management, RRM): управление радиоканалами (Radio Bearer Control), управление доступом (Radio Admission Control), управление мобильностью (Connection Mobility Control), динамическое распределение ресурсов (Dynamic Resource Allocation).

LTE в России работает на частотах в диапазоне 800, 1800 и 2600 МГц. В нижних диапазонах, где всё отлично с покрытием, проблема найти полосу достаточной для полноценного LTE ширины. В верхних обычно хорошо с частотным ресурсом, но площадь покрытия в 5-6 раз меньше при прочих равных.

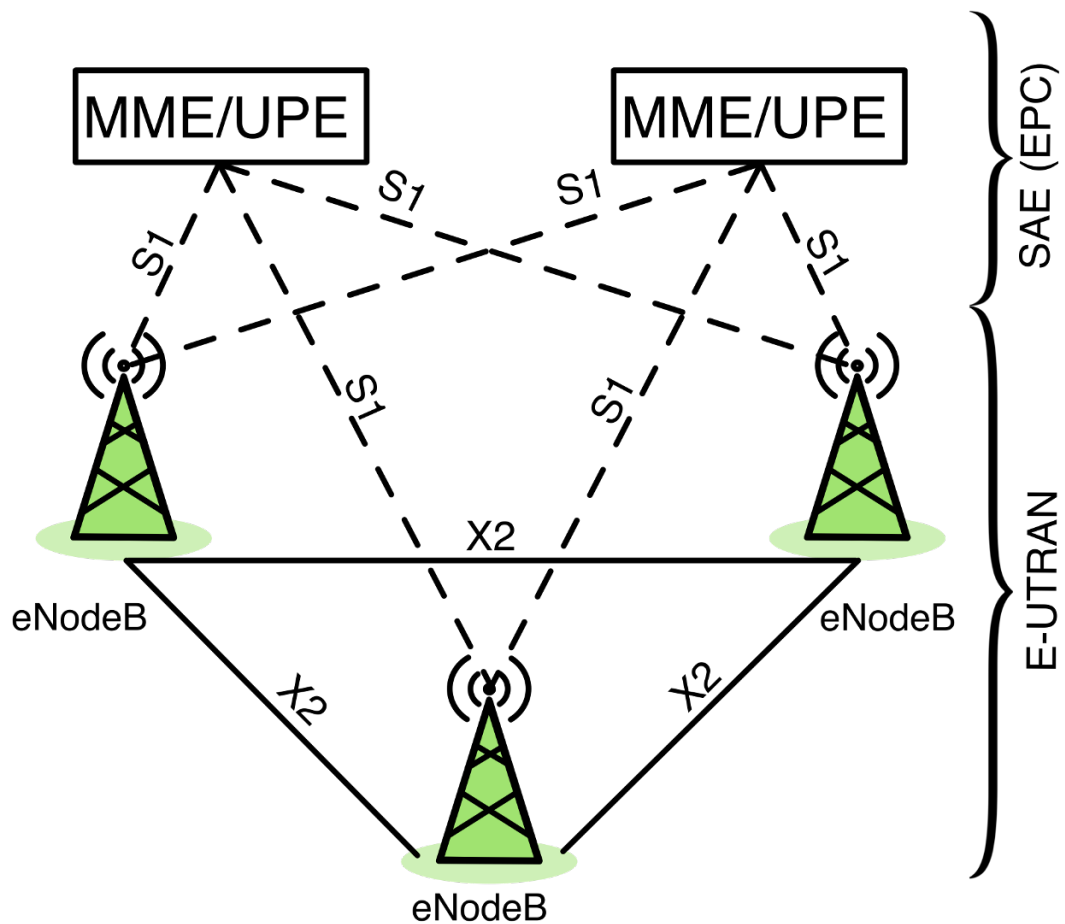


Рисунок 1.4 — Архитектура сети LTE.

В 2010-е годы переход к 4G LTE-A (LTE-Advanced) предоставил возможность передачи на скоростях в нисходящем канале до 100 Мбит/с для мобильных и 1 Гбит/с для малоподвижных абонентов. Такая скорость дала возможность передачи высокоскоростного мультимедийного трафика. В сетях LTE-Advanced из архитектуры сети LTE исчезло понятие контроллера радиосети (Radio Network Controller, RNC), который выполнял функцию по управлению коммуникационными ресурсами. Управляющие функции перешли к базовым станциям, которые теперь, помимо обслуживания радиочасти, стали принимать решение о маршрутизации всего поступившего к ним трафика от абонентов. Данное введение позволяет организовывать соединения между близкими абонентами напрямую, минуя ядро сети, что существенно разгружает межузловую нагрузку на опорной сети.

### 1.2.3 5G NR

Принято выделять три основные области применения для сетей 5G:

1. eMBB (enhanced Mobile BroadBand) – предоставление усовершенствованного широкополосного мобильного доступа для сценариев, где приоритетом являются пользовательская скорость передачи данных, трафик на единицу площади, мобильность, энергоэффективность и эффективность использования спектра;
2. mMTC (massive Machine-Type Communication) – развертывание крупномасштабной системы межмашинной связи с высокой плотностью соединений, характеризуется большим количеством подключенных устройств, передающих низкоскоростной трафик, который нечувствителен к задержкам;
3. URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communication) – предоставление высоконадежного соединения с очень низкой задержкой передачи данных.

Международный союз электросвязи МСЭ-R определил показатели главных эксплуатационных характеристик сети, достижение которых позволяет отнести ее к сети 5-го поколения. Требования к ключевым показателям эффективности сетей 5G/IMT-2020 определены в 3GPP TR 38.913 [36]:

- пиковая скорость передачи данных в канале вниз (DL) 20 Гбит/с и в канале вверх (UL) 10 Гбит/с;
- пиковая спектральная эффективность для DL – 30 бит/с/Гц и для UL – 15 бит/с/Гц;
- сквозная задержка на уровне управления (control plane latency) 10 мс, на уровне пользователя (user plane latency) для услуг типа eMBB 4 мс в UL/DL и для услуг типа URLLC 0,5 мс в UL/DL;
- вероятность потери пакета  $10^{-5}$  для пакета размеров 32 байт со сквозной задержкой в сети в 1 мс для услуг URLLC;
- максимально возможное ослабление радиосигнала между передатчиком и приемником (Maximum Coupling Loss, MaxCL), при котором данные могут быть успешно приняты 164 дБ при скорости передачи данных равной 160 бит/с;
- плотность подключенных устройств: 1 млн на 1 км<sup>2</sup>;

- срок работы батареи устройства: 10 – 15 лет для устройств IoT/M2M/D2D;
- скорость передвижения абонентского устройства – до 500 км/ч и беспрерывное обслуживание при хэндовере.

По спецификациям 3GPP диапазоны 5G/IMT-2020 разделены на два поддиапазона (Frequency Range) FR1 (450–6000 МГц) и FR2 (24,25 – 52,6 ГГц). Также документами ассоциации GSMA частоты на 3 группы: ниже 1 ГГц (частотный диапазон FR1), в полосе 1 – 6 ГГц (частотный диапазон FR1) и свыше 6 ГГц (частотный диапазон FR2) [37].

В отличие от предыдущих поколений, где для каждого нового поколения сетей связи (2G, 3G, 4G) разрабатывался новый радиоинтерфейс, для технологии 5G/IMT-2020 планируется применять как новый радиоинтерфейс (New Radio или NR согласно спецификациям 3GPP), так и эволюцию стандарта LTE-A. Стандарт LTE-A продолжает эволюционировать, приближаясь по своим характеристикам к возможностям стандарта NR. В стандарте LTE-A уже реализована поддержка активных антенных систем, использование более эффективного кодирования и модуляции, агрегация нескольких частотных каналов, уменьшенная задержка на уровне радиоинтерфейса. Новый радиоинтерфейс NR изначально разрабатывался для обеспечения более высоких скоростей передачи данных и меньших задержек, более эффективного использования частотного ресурса [37].

Чтобы обеспечить интеграцию с существующими устаревшими системами 4G и обеспечить независимое развертывание 5G RAN и 5G Core, 3GPP определил набор параметров архитектуры.

Для обеспечения интеграцию с существующими сетями 4G/LTE 3GPP определил несколько вариантов развёртывания (Deployment Options) сетей 5G NR. Существует варианты совместного развёртывания с существующими сетями LTE-A – класс Non-Standalone (NSA). Внедрение новых полноценных сетей 5G NR относятся к классу Standalone (SA). Большинство операторов не смогут единовременно перевести все имеющиеся сети LTE на 5G из-за огромных затрат и связанных с этим проблем обратной/прямой совместимости между системами [38, 39, 40, 41]. Варианты архитектуры определяются в соответствии с различными сценариями развёртывания сетей.

На рисунке 1.5 представлены варианты развёртывания сетей 5G. Все варианты размещения содержат различные типы базовых станций: eNB – базовая

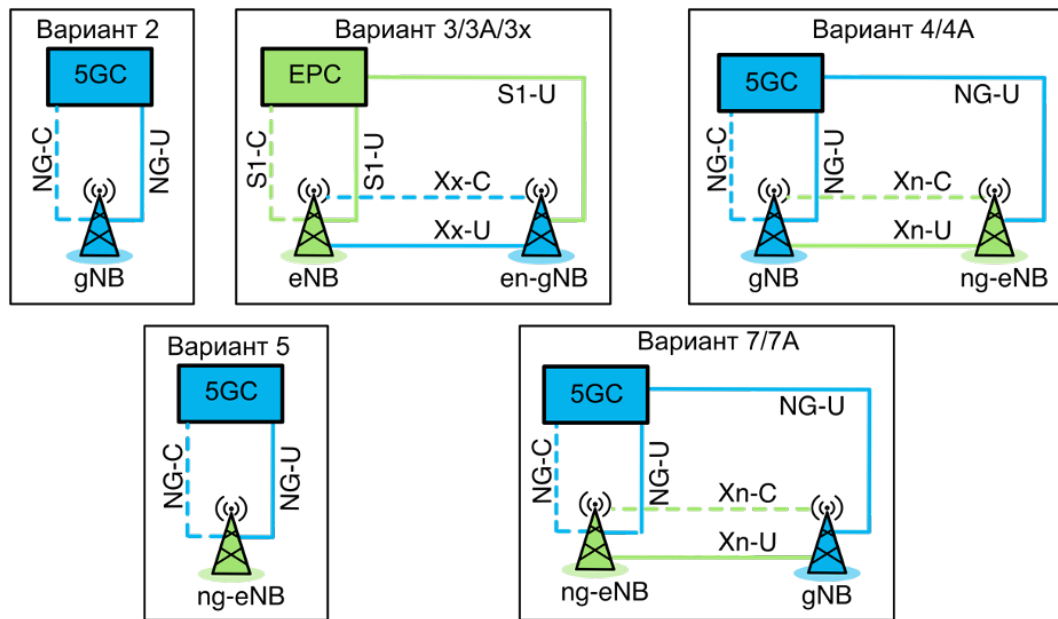


Рисунок 1.5 — Сценарии развертывания 5G NR

станция существующей сети LTE, gNB – базовая станция новой сети 5G NR, en-gNB и ng-eNB – базовые станции, которые обеспечивает стандарт сети LTE для конечных пользователей и подключены к ядру 5GC новой сети 5G NR. Здесь NG-C, NG-U – протоколы интерфейса между gNB/eLTE eNB и функциями плоскости управления (Control Plain, CP) и плоскости пользователя (User Plane, UP), соответственно. Интерфейсы S1-C (плоскость управления) и S1-U (плоскость пользователя) – интерфейсы сетей LTE для связи базовой станции с EPC. Xx – межсетевой интерфейс между узлом LTE eNB и узлом gNB, и интерфейс Xn – межсетевой интерфейс между двумя узлами gNB.

Варианты развертывания 5G :

- Вариант 2. Сценарий развертывания новой сети SA NR, наиболее привлекателен в областях, где нет устаревшей системы LTE и требуется развертывание полноценной системы доступа 5G NR. В SA NR базовые станции gNB (Next Generation NodeB) подключаются к ядру 5GC (5G core);
- Вариант 3/3A/3x. Сценарий развертывания NSA NR в существующий EPC сети LTE. Предполагается, что данный сценарий будет самым распространенным на практике [42]. Передача пользовательских данных сети NR от базовой станции en-gNB будет происходить непосредственно к EPC или через базовую станцию LTE eNB;
- Вариант 4/4A. Сценарий развертывания сети NSA NR, в которой имеющиеся базовые станции LTE eNB усовершенствованы до ng-eNB и

вместо ядра EPC используется 5GC. Якорной точкой для терминирования NG-C являются базовые станции сети радиодоступа NR (gNb). Данная архитектура является финальной версией перехода к сценарию комбинированного использования сети 5G/LTE;

- Вариант 5. Сценарий развертывания особенно подходит для областей, где нет устаревшей системы LTE и развернуты развитые системы доступа E-UTRA. При данном сценарии развертывания базовые станции ng-eNB подключаются к 5GC;
- Вариант 7/7A. Сценарий может использоваться как промежуточный этап, в котором имеющиеся базовые станции eNB и ядро EPC сети LTE возможно обновить до ng-eNB и 5GC. В качестве основных базовых станций выступают ng-eNB, которые подключаются к 5GC. LTE построена более полно и, следовательно, более надежна для обработки сигналов. Базовые станции gNB подключаются через ng-eNB или непосредственно напрямую к 5GC.

### **1.3 Выбор протокола беспроводной широкополосной сети для решения задачи синтеза топологий**

Задача размещения узлов БШС для ячеистых сенсорных сетей не актуально, так как ее узлами являются измерительные приборы. Выбор мест их размещения осуществляется на основе конкретного технологического процесса, который осуществляется на объекте. В силу малых дальностей связей, также неактуально говорить о выборе мест размещений точек доступа (шлюзов) сенсорных сетей. На практике, точки доступа размещаются по месту в блок-боксе местной автоматики. Целесообразно решать задачу для сетей дальнего радиуса связи. В силу глобальной цифровизации месторождения, растет спрос на внедрения новых сетей, осуществляющих надежную и эффективную передачу высокоскоростного трафика. К их числу относятся не только технологические данные с объектов, но и данные с мобильных переносных устройств, камер видеонаблюдения и т.д. На сегодняшний день хоть WiMAX широко распространен в нефтегазовой промышленности, к сожалению сам стандарт утратил свои лидерские позиции. С ростом популярности сотовых сетей LTE и 5G, WiMAX

потерял все свои преимущества. Еще одна причина падения популярности – развитие Wi-Fi. Ведущие вендеры не стремятся развивать технологию, а значит и сам стандарт не будет эволюционировать в ближайшее время.

Для решения синтеза топологии решено использовать семейство протоколов IEEE 802.11. Исходя из вышеизложенного анализа, стандарт может поддерживать работу сетей внутри помещений (Indoor), на открытой местности (Outdoor). Позволяет организовать связь между движущимися объектами, и объединять узлы в самоорганизующие Mesh сети. В совокупности все эти аспекты позволяет сделать вывод о целесообразности выбора Wi-Fi для организации телекоммуникационной связи на месторождении.

#### **1.4 Определение параметров БШС, необходимых для решения задач размещения базовых станций**

удалить это

- добавить модель Окамура-Хата
- добавить еще модели, характерные для сотовых сетей.

Этап выбора топологической структуры беспроводной сети состоит из решения задач оптимального размещения БС. В дальнейшем для решения данных задач необходимо будет ввести параметры БС: радиус связи – максимальная теоретическая дальность связи базовой станции с соседней станцией, удовлетворяющей требуемому качеству передачи сигнала; и радиус покрытия – максимальный теоретический радиус зоны покрытия БС для связи с устройствами. Данные параметры рассчитываются исходя из конфигурации БС. Далее будет представлен метод расчета. Все технические характеристики для расчета берутся из технического паспорта БС.

В БШС в большинстве случаев используются радиоволны сантиметрового диапазона. Отличительной чертой распространения данных радиоволн является почти полное отсутствие явления дифракции и прямолинейность распространения. Волны практически не огибают преград при распространении, поэтому существенное влияние оказывают рельеф местности, преграды и погодные условия.



Для расчета дальности действия связи используют модели распространения радиосигнала [43, 44, 45, 46]. Существуют различные модели, которые можно объединить в три основные категории [47]:

- теоретические модели. Данные модели обычно основана на физическом предположении об идеальных условиях;
- эмпирические модели. Это наборы уравнений, разработанные на основе различных данных полевых измерений. Одним из основных недостатков таких моделей является то, что они не могут использоваться для различных ситуации без изменений, поскольку они точны только для случая с теми же характеристиками, в которых проводились измерения;
- детерминированные модели. Модели очень сложны, поскольку они требуют детального знания местоположения, размеров и физических параметров всех препятствий в данной области. Такое детальное исследование может приводить к чрезмерным накладным расходам, которые в большинстве случаев могут быть лишними.

#### 1.4.1 Энергетический потенциал канала связи

Для оценки производительности канала связи используется уравнение энергетического потенциала, который учитывает все усиления и потери уровня сигнала при его распространении от передатчика к приемнику через беспроводную среду передачи, кабели, разъемы, различные препятствия (Рисунок 1.6) [10].

В определении энергетического потенциала беспроводной линии связи участвуют следующие параметры:

- эффективная изотропно-излучаемая мощность передатчика (Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP), являющаяся суммой выходной мощности передатчика и коэффициента усиления антенны за вычетом потерь в антенном кабеле разъемах передающего тракта;
- потери при распространении в свободном пространстве;
- чувствительность приемника, потери в антенном кабеле и коэффициент усиления антенны приемника.

Полное уравнение можно записать следующим образом:

$$P_{tr} - L_{tr} + G_{tr} - L_{fs} + G_{recv} - L_{recv} = SOM + P_{recv}, \quad (1.1)$$

где:

- $P_{tr}$  – мощность передатчика, дБм;
- $L_{tr}$  – потери сигнала на антенном кабеле и разъемах передающего тракта, дБ;
- $G_{tr}$  – усиление антенны передатчика, дБ;
- $L_{fs}$  – потери в свободном пространстве, дБ;
- $G_{recv}$  – усиление антенны приемника, дБ;
- $L_{recv}$  – потери сигнала на антенном кабеле и разъемах приемного тракта, дБ;
- $P_{recv}$  – чувствительность приемника, дБм;
- $SOM$  – запас на замирание сигнала, дБ.

Энергетический потенциал указывает на качество канала передачи радиосигналов.

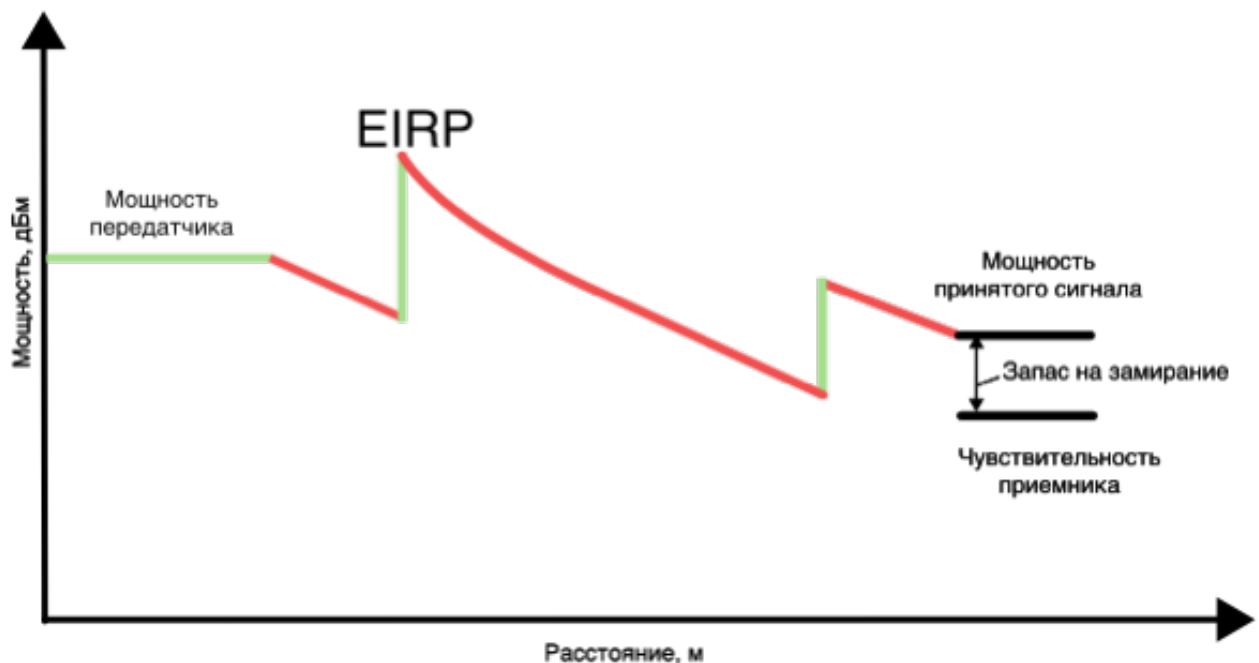


Рисунок 1.6 — Энергетический потенциал линии связи.

На стороне передатчика выходной мощностью является величина, равная мощности, подводимой к антенне. Данная величина из паспортной документации устройства имеет различные значения в зависимости от каждого поддерживаемого оборудованием стандарта и конкретных скоростей. В реальной условиях значения мощностей, как правило могут незначительно

отклоняться от паспортных значений. Предельная мощность передатчика определяется государственными органами. Для примера, для БШС семейства протоколов IEEE 802.11 не превышает 100 мВт или, выражая в децибеллах, не более 20 дБм [48].

Затухание сигнала могут происходить в кабелях антенны, зависящие от типа кабеля и рабочей частоты. При подключении антенны желательно обходиться минимальной длиной кабеля. Потери сигнала в антенном кабеле принимают 0,1...2 дБ/м. В технической документации в потерях кабеля также учтена величина затухания в кабельных разъемах.

Усиление антенны описывает фокусирование переданного или полученного сигнала. Значения даны относительно полуволнового диполя или теоретического изотропного излучателя [8].

К потерям при распространении относятся все виды затухания сигнала, которые имеют место при его распространении от антенны передатчика к антенне приемника. Самая простая оценка потерь в свободном пространстве получается, если предположить, что сигналы передаются во всех направлениях, то есть мощность излучается одинаково во всех направлениях, и в зоне передачи или вокруг нее нет препятствий, которые могли бы повлиять на распространение электромагнитных сигналов [49].

Существуют большое количество моделей распространения. Каждая имеет свои плюсы и минусы. В зависимости от конкретных задач при проектировании возможно использовать наиболее подходящую. Ниже будут представлены модели распространения, широко используемые для сетей IEEE 802.11.

#### 1.4.2 Модель потерь в свободном пространстве

При распространении сигнала от передатчика к приемнику часть сигнала рассеивается, по этой причине мощность на приемной стороне будет уменьшаться с увеличением расстояния от передающей антенны. Данное затухание сигнала называют потерями в свободном пространстве (Free Space Path Loss, *FSPL*).

Потери при распространении между двумя неизотропными антеннами в свободном пространстве (в воздухе) можно выразить из уравнения Фрииса (1.2):

Мощность принимаемой антенны рассчитывается из уравнения передачи Фрииса:

$$\frac{P_{recv}}{P_{tr}} = G_{tr} G_{recv} \left( \frac{c}{4\pi R f} \right)^2, \quad (1.2)$$

где  $c$  – скорость света,  $f$  – частота,  $R$  расстояние между приемной и передающей антенной.

$$L_{fs} = 20 \lg F + 20 \lg R - G_{tr} - G_{recv} + K, \quad (1.3)$$

где  $F$  – центральная частота, на котором работает канал связи,  $R$  – расстояние между приемной и передающей антенной и  $K$  – константа.

Константа  $K$  зависит от размерностей частоты и расстояния:

- для частоты, выраженной в ГГц, и расстояния, выраженная в км, константа  $K$  равна 92.45;
- для частоты, выраженной в МГц, и расстояния, выраженная в км, константа  $K$  равна 32.4;
- для частоты, выраженной в МГц, и расстояния, выраженная в м, константа  $K$  равна -27.55.

Потери  $L_{fs}$  выразим из уравнения энергетического потенциала канала связи (1.1) как:

$$L_{fs} = P_{tr} - L_{tr} + G_{tr} + G_{recv} - L_{recv} - SOM - P_{recv}. \quad (1.4)$$

Запас на замирание сигнала, SOM, учитывает все возможные факторы отрицательно влияющие на дальность связи. К таким факторам относятся:

- температурный дрейф чувствительности приемника и выходной мощности передатчика;
- влияние погодных условий на передачу сигнала: туман, снег, дождь;
- потери в антенно-фидерном тракте, возникающие из-за рассогласования фидера и антенны.

Приемник испытывает совокупное воздействие всех этих физических факторов, которые различаются в зависимости от положения приемника и передатчика в среде распространения.

Минимальная значения величины запаса на замирание (System Operating Margin, *SOM*) должна быть не меньше 10 дБ. Считается, что 10-ти децибелльный запас по усилению достаточен для инженерного расчета, но на практике зачастую используют значение 20...30 дБ [10].

Максимально возможную дальность связи между приемником и передатчиком выводится из уравнений (1.3) и (1.4):

$$R = 10^{\frac{L_{fs} - 20 \lg F + G_{tr} + G_{recv} - K}{20}}. \quad (1.5)$$

### 1.4.3 Модель распространения SUI

Модель распространения SUI (Stanford University Intern) предложена рабочей группой, занимающаяся исследованием беспроводной широкополосной сети IEEE 802.16 [50]. Модель включена в стандарты IEEE и широко используется в WiMax, а также в LTE [51]. Подходит для использования в сельской местности с различным типом рельефа, а также в небольших населенных пунктах. Модель испытана на равнинах, пересеченной, холмистой местности и лесных массивах. SUI модель используется для диапазона частот 1900 МГц – 11 ГГц [52]. Высоты антенн БС в диапазоне от 10 до 80 м, высота антенны мобильного устройства — от 2 до 10 м, расстояние между БС и устройством от 0,1 до 8 км.

Грубая оценка потери сигнал описывается с помощью модели SUI как

$$L_0 = A + 10\gamma \lg(R/R_0), \quad (1.6)$$

$$A = 20 \lg\left(\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right)$$

и

$$\gamma = a - bh_t + \frac{c}{h_t},$$

где  $R$  – дальность связи,  $R_0$  – минимальная разрешенная дальность (100 м),  $\lambda = c/f$  – длина волны,  $f$  – частота в МГц,  $h_t$  – высота антенны БС. Параметры  $a, b$  и  $c$ , определяющие следующие типы местности (Таблица 1):

- тип А – холмистая местность или густые лесные массивы;
- тип В – пересеченная местность или полугустые лесные массивы;
- тип С – открытые поля.

Таблица 1 — Численные значения параметров модели SUI.

Параметры модели	Местность А	Местность В	Местность С
a	4,6	4	3.6
b	0,0075	0,0065	0.005
c	12,6	17,1	20

Формула (1.6) была получена эмпирически для несущей частоты 2 ГГц и высоты приемника 2 м. Для использования модели с другими частотами и высотами необходимо добавить поправочные коэффициенты

$$L_{fs} = L_0 + \Delta L_f + \Delta L_h + s, \quad (1.7)$$

где  $\Delta L_f$  – корректирующий коэффициент для частот выше 2 ГГц  $\Delta L_h$  – корректирующий фактор высоты антенны устройства (м)  $s$  – корректирующий фактор теневого эффекта, имеющий значения в диапазоне  $8,2 < S < 10,6$  дБ. Параметр  $\Delta L_f$  рассчитывается

$$\Delta L_f = 6 \lg (f/2000),$$

параметр  $\Delta L_h$  выбирается исходя из выбора типа местности

$$\Delta L_h = \begin{cases} -10,8 \lg (h_r/2) & \text{для типа А и В,} \\ -20 \lg (h_r/2) & \text{для типа С,} \end{cases}$$

где  $h_r$  – высоты антенны устройства.

Из уравнений (1.3) и (1.7) можно вывести дальность действия связи:

$$R = 10^{\left(\frac{L_{fs}-L_0-\Delta L_f-\Delta L_h-s-A}{10\gamma} + \lg R_0\right)} \quad (1.8)$$

#### 1.4.4 Модель двух лучевого распространения

Двух лучевая модель описывает мощность принятого сигнала как интерференцию двух копий переданного сигнала: первая – луч прямой видимости, вторая – отраженная от поверхности [53]. Два луча электромагнитных волн

от передатчика приходят в приемник с определенной разностью фаз и амплитуд. Разность фаз происходит из-за дополнительного времени распространения волны, отраженного от земли [54, 55, 56, 57].

Мощность принимаемого сигнала, в соответствии с двухлучевой моделью равна

$$P_{recv} = \frac{P_{tr} \cdot G_{tr} \cdot G_{recv} \cdot h_{tr}^2 \cdot h_{recv}^2}{R^4}, \quad (1.9)$$

где  $P_{recv}$  – чувствительность приемника,  $P_{tr}$  – мощность передатчика,  $G_{tr}$  – усиление антенны передатчика,  $G_{recv}$  – усиление антенны приемника,  $h_{tr}$  – высота передатчика,  $h_{recv}$  – высота приемника,  $R$  – расстояние между приемником и передатчиком.

Потери в свободном пространстве из формулы (1.9) вычисляются как:

$$L_{fs} = 40 \lg R - 10 \lg G_{tr} - 10 \lg G_{recv} - 20 \lg h_{tr} - 20 \lg h_{recv}, \quad (1.10)$$

Тогда из формул (1.3) и (1.10) дальность рассчитывается как

$$R = 10^{\frac{L_{fs} + 10 \lg G_{tr} + 10 \lg G_{recv} + 20 \lg h_{tr} + 20 \lg h_{recv}}{40}}. \quad (1.11)$$

#### 1.4.5 Модель Окамура-Хата

Модель распространения [58] сигнала используется для частотного диапазона 150 – 1500 МГц, расстояние между БС и абонентским устройством 1 – 100 метров, высота антенн БС 30–200 метров, высоты антенн абонентских устройств 1 – 10 метров, дальности телекоммуникационной связи 1–20 км.

Модель Окамура-Хата учитывает особенности территории и плотность застройки: открытая сельская местность, пригородная местность и городская местность. Для каждого случая выражается свой расчет потерь.

Городская (Urban) местность.

$$L_u = 69.55 + 26.16 \lg f_c - 13.82 \lg h_b - a(h_m) + \\ + (44.9 + 6.55 \lg h_b) \lg R, \quad (1.12)$$

$$L_{fs} = L_u, \quad (1.13)$$

где  $f_c$  – несущая частота,  $h_b$  – высота антенн БС,  $h_m$  – высота антенны абонентского устройства,  $a(h_m)$  – поправочный коэффициент.

Поправочный коэффициент  $a(h_m)$  выражается для малых и средних городов

$$a(h_m) = (1.1 \lg f_c - 0.7)h_m - (1.56 \lg f_c - 0.8) \quad (1.14)$$

и для больших городов

$$a(h_m) = \begin{cases} 8.29(\lg(1.54h_m))^2 - 1.1, & 150 \leq f_c \leq 200, \\ 3.2(\lg(11.75h_m))^2 - 4.97, & 400 \leq f_c \leq 1500. \end{cases} \quad (1.15)$$

Пригородная местность.

$$L_{fs} = L_u - 2(\lg(f_c/28))^2 - 5.4. \quad (1.16)$$

Сельская (открытая) местность.

$$L_{fs} = L_u - 4.78(\lg(f_c))^2 + 18.33 \lg(f_c) - 40.94. \quad (1.17)$$

#### 1.4.6 Расчет параметров БС, необходимых для задачи оптимизации

Используя любую из представленных моделей распространения (уравнения (1.5), (1.8) или (1.11)) можно рассчитать теоретическое максимальную дальность связи  $R_{jq}$  между базовыми станциями и радиусом покрытия  $r_j$  с предположением об отсутствии препятствий, отражений, влияния контуров местности и т. д. Это допущение приемлемо для нашего случая с открытой местностью.

Для расчета дальности связи  $R_{jq}$  (Рисунок 1.7), базовые станции  $s_j$  и  $s_q$  будут рассматриваться как станции *передатчик* и *приемник*, соответственно. Будем считать, что станции оборудованы направленными антеннами с усилениями  $G_{tr}^R$  и  $G_{recv}^R$ .



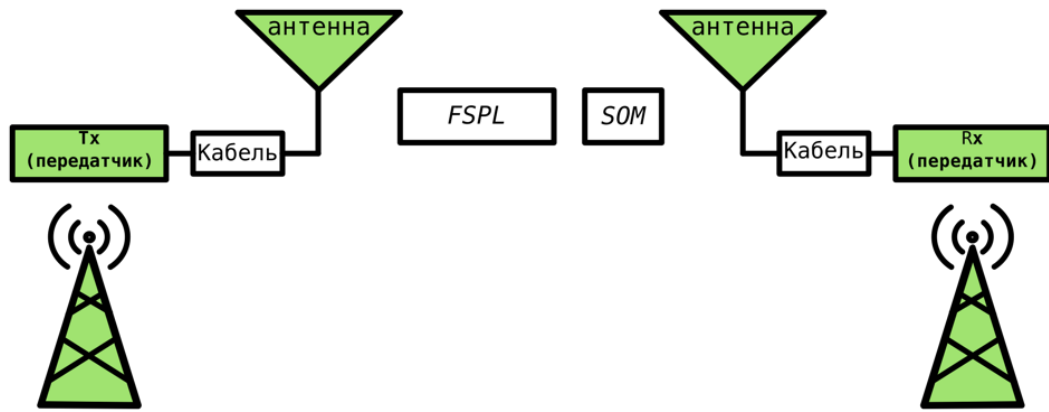


Рисунок 1.7 — Соединение между станциями.

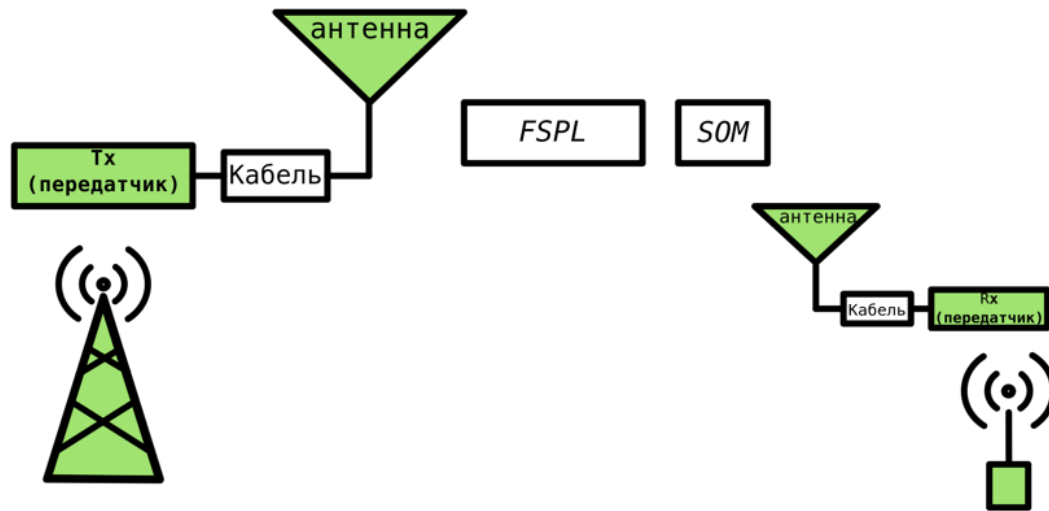


Рисунок 1.8 — Покрывтие станции

Каждая базовая станция оснащена всенаправленной антенной с заданным усилением антенны  $G_{tr}^r$ . Данная антенна необходимо для покрытия заданной области.

При вычислении радиуса покрытия  $r_j$  (Рисунок 1.8) базовая станция будем считать *передатчиком*, а пользовательское устройство *приемником*.

В приложения А и Б представлены примеры использования модели распространения в свободном пространстве (Free space propagation model) для решения задачи оптимизации.

## **1.5 Оценка характеристик производительности сети с помощью стохастических моделей массового обслуживания**

В данной работе рассматривается задача области телекоммуникационного покрытия при проектировании БШС. С увеличением дальности телекоммуникационного покрытия сети ухудшается качества передачи: уменьшается мощность передаваемого сигнала, и в свою очередь падает пропускная способность. В связи с этим одной из важнейших задач при проектировании является оценки характеристик производительности будущей сети. Одной из такой характеристикой является время межонцовой задержки. Данная характеристика представляет собой время необходимое для передачи пакета через сеть от источника до места назначения.

### **1.5.1 Время передачи пакета в канале**

#### **Структура кадра Wi-Fi**

Основой стандарта 802.11 является распределенная функция координации DCF (Distributed coordination function). Согласно данному механизму, станция, желающая передать пакет данных, слушает шумы в передающей среде в течение заранее определённого периода времени. Если передающая среда свободна, станция может передавать пакеты. В противном случае станция ждет определенное количество времени, прежде чем опять предпринять попытку отправки пакета.

Время передачи пакета в беспроводной среде, главным образом зависит от коллизии. Протокол 802.11 борется с данной проблемой с помощью метода множественного доступа к среде с прослушиванием среды и избеганием коллизий (CSMA/CA, Carrier-sense multiple access with collision avoidance), когда станции выполняют процедуру отсрочки (backoff procedure) передачи для всех узлов, которые ожидают передачи. Для решений проблемы "скрытой станции" стандарт поддерживает механизм RTS/CTS (Рисунок 1.9).

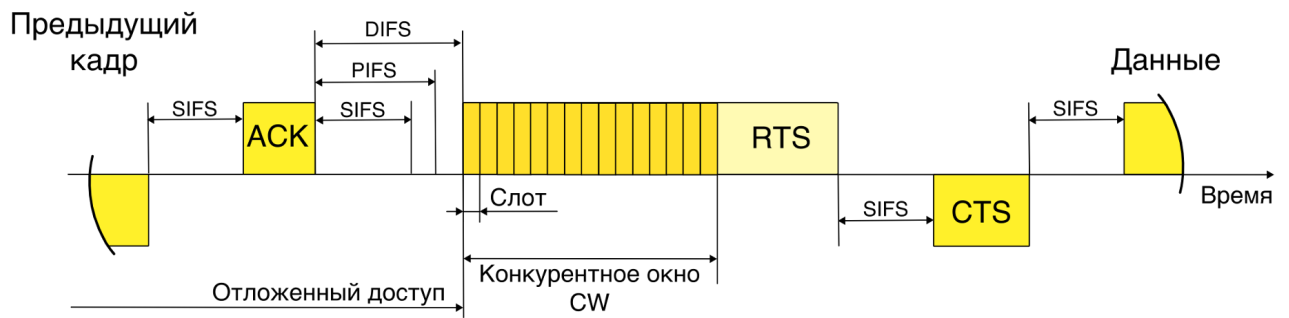


Рисунок 1.9 — Процедура Backoff

На MAC-подуровне для определения состояния среды передачи существуют межкадровые интервалы (Inter Frame Space, IFS) – периоды ожидания между передачей кадров. В стандарте определено несколько типов межкадровых интервалов:

- уменьшенный межкадровый интервал (Reduced IFS, RIFS), используется в некоторых случаях, когда необходимо уменьшить накладные расходы при передаче;
- короткий межкадровый интервал (Short IFS, SIFS), необходим беспроводному устройству для обработки принятого кадра и ответом об его получении;
- межкадровый интервал функции (PCF IFS, PIFS);
- межкадровый интервал функции (DCF IFS, DIFS);
- арбитражный межкадровый интервал (Arbitration IFS, AIFS), используется устройствами для получения доступа к среде с помощью метода EDCA, поддерживающими QoS (Quality Of Service);
- расширенный межкадровый интервал (Extended IFS, EIFS), является самым длинным интервалом, используется устройством в случае, если кадр пришел с ошибкой.

В течение времени равному интервалу DIFS, станция, желающее передать кадр должна определить состояние среды. По истечению времени DIFS, если среда свободна, начинается процедура отсрочки. Станция начинает период молчания случайной длины, равномерно распределенного в интервале  $[0, CW]$ , где  $CW$  – это окно конкуренции (Contention Window) равное целому числу из интервала  $CW_{min} \ll CW \ll CW_{max}$ . Далее в соответствии с алгоритмом RTS/CTS каждый узел сети, перед тем как послать данные в «эфир», сначала отправляет специальное короткое сообщение, которое называется RTS (Ready To Send). Это говорит о готовности узла к отправке данных. Такое RTS-сооб-

щение, содержащее информацию о продолжительности предстоящей передачи и об адресате, доступно всем узлам в сети, если только они не скрыты от отправителя. Это позволяет другим узлам задержать передачу на время, равное объявленной длительности сообщения NAV (Network Allocation Vector). Приемная станция, получив сигнал RTS, отвечает посылкой сигнала CTS (Clear To Send), свидетельствующего о готовности станции к приему информации через интервал SIFS. После успешном получении кадра CTS передающая станция выжидает время SIFS и посылает пакет данных. По завершению приемная станция должна послать передатчику кадр ACK, подтверждающий безошибочный прием. Если подтверждение нет, передатчик делает вывод об ошибке [29]. В таком случае отправитель удваивает период молчания и повторяет передачу кадра, продолжая экспоненциально увеличивать длину паузы. Увеличение  $CW$  происходит, пока кадр успешно не будет передан или не будет достигнуто максимальное число повторов.

В 802.11e добавили функцию гибридной координации HCF, основанная на DCF и PCF. В стандарте появился расширенный распределенный доступ к каналу (Enhanced distributed channel access, EDCA). Метод обеспечивает доступ к среде, используя 8 уровней приоритетов пользователей (user priority, IP) и 4 категории доступа (access categories, AC): background (AK\_BK), best effort (AK\_BE), video (AK\_VI), voice (AK\_VO). На беспроводном устройстве, реализующем QoS, поддерживается четыре независимые очереди (Рисунок 1.10). Вместо одного таймера DIFS назначаются различные таймеры AIFS и продолжительность  $CW$  для каждой категории AC. Когда станция в сети желает начать передачи, она ждет, пока NAV уменьшится до 0. После, в случае, если канал свободен, станция ждет время AIFS и сразу отсчитывает  $CW$  до завершения.

Функция HCF обеспечивает возможность передавать станции сразу последовательность кадров. Когда станция получает доступ к среде передачи, ей выделяется определенный период времени TXOP (transmission opportunity). Интервал TXOP – это время, в течение которого станция может отправлять кадры после того как получит доступ к среде передачи. TXOP необходим для того, чтобы увеличить пропускную способность высокоприоритетных данных, таких как видео и голос.

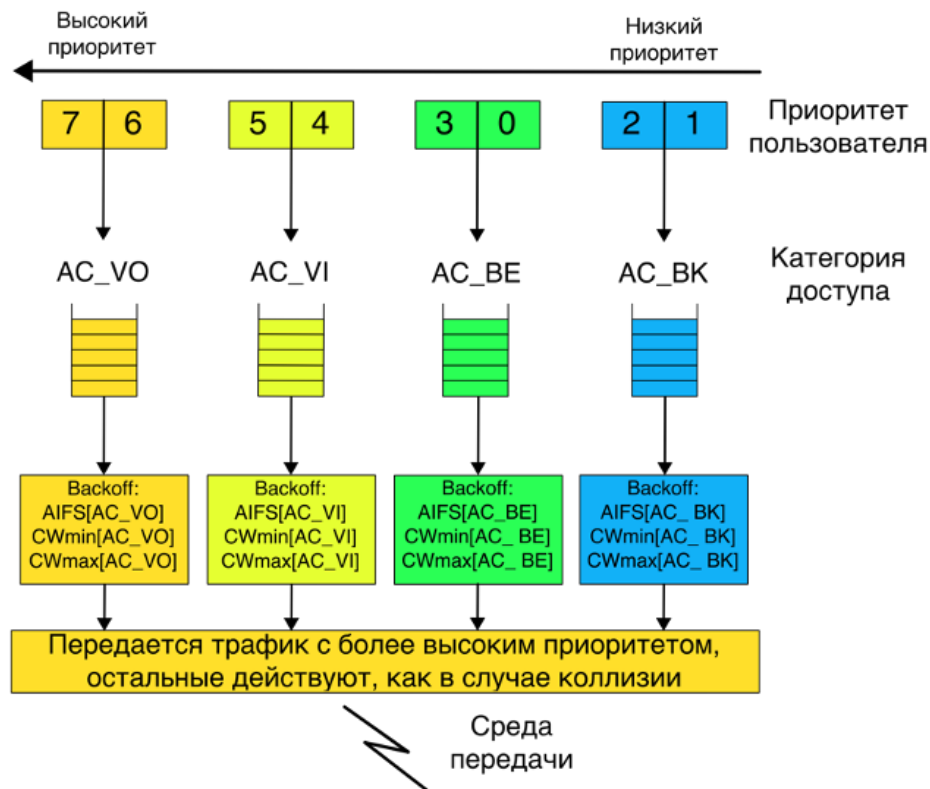


Рисунок 1.10 — Очереди с поддержкой QoS

## LTE

### Дать описание кадра на канальном уровне

При формировании информационного ресурса в стандарте LTE используются два метода. Первый метод – мультиплексирование с ортогональным частотным разнесением (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), используется для нисходящего канала DL от базовой станции к абонентскому устройству. Второй метод – мультиплексирование с частотным разнесением с передачей на одной несущей (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA), используется для восходящего канала UL от абонентского устройства к базовой станции.

Стандарт LTE на физическом уровне использует технологию Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), решающая проблему межсимвольной интерференции при высокоскоростной передачи с многолучевым распространением сигнала. Технология OFDM предполагает передачу широкополосного сигнала посредством независимой модуляции узкополосных поднесущих. Один OFDM символ содержит набор модулированных поднесущих. Во временной области OFDM-символ включает поле данных и циклический префикс, повторно

передаваемый в конце предыдущего символа. Данный префикс необходим для борьбы с межсимвольной интерференции в приемнике, вследствие многолучевого распространения сигнала. Отраженный сигнал, приходящий с задержкой, попадает в зону префикса и не накладывается на полезный сигнал. В LTE принят шаг между поднесущими  $\Delta f = 15$  кГц, что соответствует длительности OFDM-символа 66,7 мкс [59].

Для формирования группового сигнала восходящих каналов в сетях LTE используется схема мультиплексирования с частотным разнесением с передачей на одной несущей SC-FDMA. Эта схема может работать в системах, функционирующих как в режиме с временным дуплексированием, так и в режиме с частотным дуплексированием.

Существующий канальный ресурс состоит из ресурсных блоков, каждый из которых включает 12 последовательных поднесущих в частотной области, занимающих полосу 180 кГц, и одного интервала 0,5 мс во временной области. Таким образом, каждый блок ресурсов состоит из  $7 \cdot 12 = 84$  ресурсных элементов в случае обычного циклического префикса и  $6 \cdot 12 = 72$  ресурсных элементов в случае расширенного циклического префикса [59].

Стандарт поддерживает две структуры кадров: частотный дуплекс (Frequency Division Duplex, FDD) и временной дуплекс (Time Division Duplex, TDD). Практически вся обработка на физическом уровне идентична для FDD и TDD, разница между ними в основном заключается в структуре кадров, как показано на рисунке 1.11. Передача по радиоканалу осуществляется кадрами длиной  $T_{\text{кадр}} = 10$  мс. Все временные параметры в спецификации LTE привязаны к минимальному временному кванту  $T_s = 1/(2048 \cdot \Delta f)$ , где  $\Delta f$  – шаг между поднесущими.

В случае работы FDD имеются две несущие частоты: для передачи по восходящей линии связи ( $f_{UL}$ ) и для передачи по нисходящей линии связи ( $f_{DL}$ ). Каждый кадр состоит из 10 субкадров восходящей линии связи и 10 субкадров нисходящей линии связи [60]. Передача по восходящей и нисходящей линиям связи может происходить одновременно в пределах одной соты. Каждый субкадр состоит из двух смежных слотов длительностью 0,5 мс. При полномдуплексном режиме радиоканалы в восходящем и нисходящем каналах передаются параллельно, но с оговоренным в стандарте сдвигом [34].

В случае работы TDD имеется только одна несущая частота. Передачи по восходящей и нисходящей линиям связи всегда разделены во времени [60].

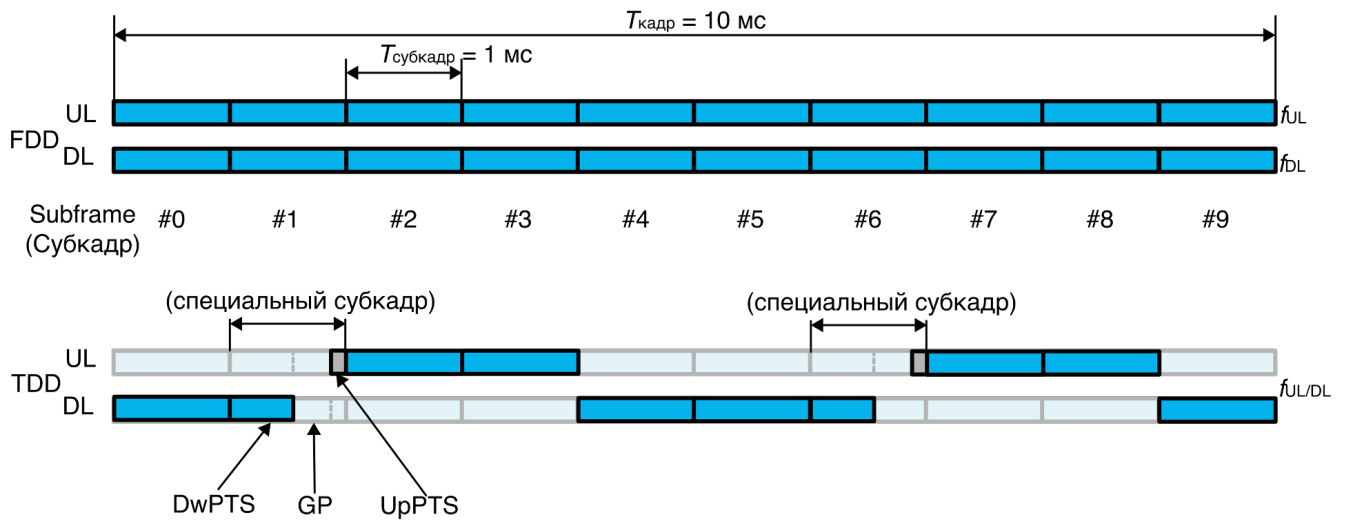


Рисунок 1.11 — Структура кадра LTE

Для обеспечения асимметрии трафика восходящего и нисходящего каналов, в TDD поддерживаются 7 различных конфигураций, соответствующих разным соотношениям восходящего и нисходящего каналов (таблица 2). Буква «D» соответствует субкадру нисходящей линии связи, «U» соответствует субкадру восходящей линии связи, а «S» соответствует специальному субкадру. Как видно из таблицы, в субкадрах 0 и 5 всегда осуществляется передача «вниз», а в субкадре, следующем за специальным, всегда осуществляется передача «вверх».

Конфигурация вверх-вниз	Периодичность вверх-вниз	Номер субкадра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 мс	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 мс	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 мс	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 мс	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 мс	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Таблица 2 — Конфигурации кадра в LTE при временном дуплексе (TDD)

Важной частью любой системы TDD является обеспечение достаточно больших защитных периодов, в течение которых оборудование может переключаться между передачей и приемом без перекрытия передаваемых и принимаемых сигналов. В LTE защитные периоды создаются путем разделения одного или двух субкадров, называемых специальными субкадрами. Информация в специальных субкадрах разделена на три поля: часть нисходящего канала

(Downlink Pilot Time Slot, DwPTS), защитный период (Guard Period, GP) и часть восходящего канала (– Uplink Pilot Time Slot, UpPTS).

Проверить терминологию субкадр и подкадр

## 5G NR

В сетях 5G NR передача данных в восходящем UL и нисходящем DL направлениях организуется на основе кадров (frame) длительностью  $T_f = 10$  мс. Каждый кадр делится на 10 субкадров (subframe) длительностью  $T_{sf} = 1$  мс. Каждый субкадр содержит  $2^\mu$  слотов. [61, 62].

Одной из ключевых особенностей 5G, открывающая многие преимущества, является тот факт, что расстояние между поднесущими может принимать различные значения, в отличие от LTE, где значение фиксировано и равно 15 кГц. В зависимости от  $\mu$  (таблица 3) в сетях 5G-NR используются OFDM поднесущие с различной шириной спектра: 15кГц, 30кГц, 60кГц, 120кГц и 240кГц. Количество слотов определяется шириной спектра поднесущей и составляет 1, 2, 4, 8 или 16 слотов, в отличие от сетей LTE, где используется единая структура с двумя слотами на каждый субкадр.

$\mu$	Интервалы поднесущих, $\Delta f$ , кГц	Циклический префикс	Количество слотов
0	15	Обычный	1
1	30	Обычный	2
2	60	Обычный, Расширенный	4
3	120	Обычный	8
4	240	Обычный	16

Таблица 3 — Интервалы поднесущих

Использование различных частот открывает широкие возможности для гибкой настройки сети при предоставлении тех или иных услуг. Так для приложений критичных к уровню задержек, целесообразно использовать поднесущие с широким спектром при меньшей длительности символа, и наоборот, при передаче трафика широкополосного доступа в интернет и низкоскоростного



трафика интернета вещей – использовать узкий спектр поднесущих. Уплотнение развертывания за счет уменьшения размерами сот и использование высоких частот с большей пропускной способностью может привести к уменьшению задержки радиointерфейса.

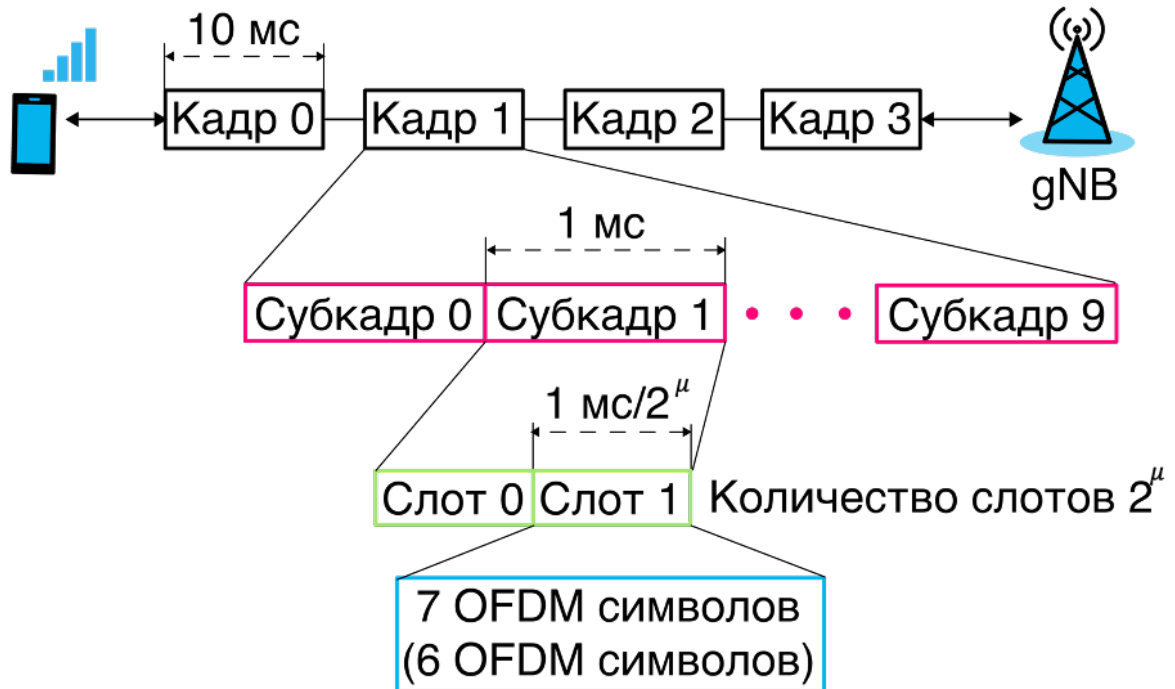


Рисунок 1.12 — Структура кадра 5G NR

### 1.5.2 Расчет межконцевой задержки

Как уже было отмечено ранее, любая сеть обязана гарантировать качество обслуживания QoS. При проектировании БШС важно оценить характеристики производительности будущей сети. Одной из таких характеристик сети является межконцевая (сквозная) задержка [16, 18, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 15, 71], характеризующее максимальное время передачи пакетов в сети от источника до места обозначения.

Для расчета сквозной задержки сети часто используют стохастические модели массового обслуживания [16, 18, 63, 69, 15, 71]. Рассмотрим специальный случай БШС. Все БС связаны последовательно между собой в сеть, образуя линейную топологию. Для расчета межконцевой задержки представим БШС как многофазную сеть массового обслуживания (СеМО) с кросс-трафиком и

узлами  $M/M/1$  (Рисунок 1.13). Кросс-трафик подразумевает поступление пакетов с некоторой заданной интенсивностью  $\lambda$  на каждую фазу СеМО. Узлами сети являются БС. Согласно символике Дж. Кендала, обозначение  $M$  указывает на показательное распределение случайной величины [72, 73]. Каждая такая БС характеризуется случайными величинами входящего потока пакетов и временем их обслуживания, принадлежащие экспоненциальному закону распределения. Каждый узел имеет один обслуживающий прибор. Для такой СеМО принято допущение о бесконечном размере буфера, в котором пакеты ожидают своего обслуживания. Данное допущение позволяет получить аналитическое решение, которое возможно использовать для произвольного размера СеМО данной топологии.

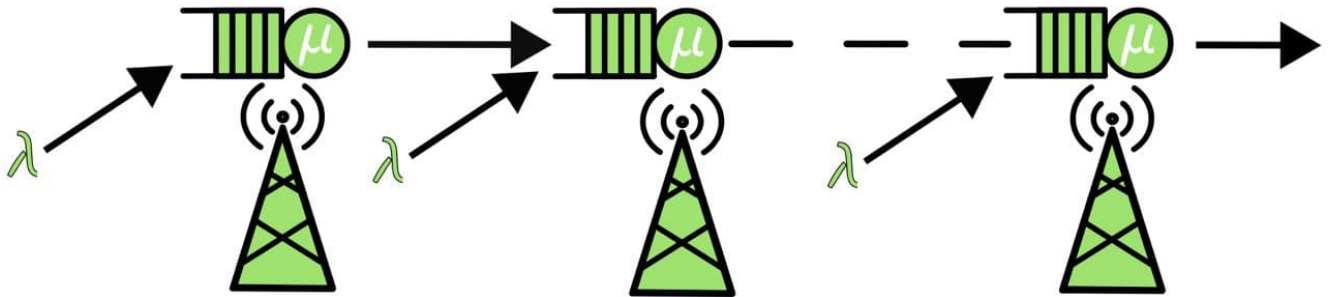


Рисунок 1.13 — СеМО с кросс-трафиком и узлами  $M/M/1$

На вход каждой станции поступает пуассоновский поток. Пуассоновский процесс представляет собой случайный процесс, характеризующийся экспоненциально распределенным временем между событиями. Это один из наиболее важных случайных процессов в теории вероятностей, который широко используется для моделирования поведения трафика и входов во многих коммуникационных сетях и системах [70, 71, 69, 68].

В пуассоновском процессе события происходят непрерывно и независимо друг от друга. Функция распределения имеет вид [72, 73]:

$$P(X < x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

Для входящего потока, интервалы между поступлениями заданы случайной величиной с экспоненциальным распределением и интенсивностью  $\lambda$ . Время обслуживания на узле задано также экспоненциальным распределением и интенсивностью  $\mu$ .

По теореме Бурке [74], поток на выходе узла  $M/M/1$ , а значит на входе каждой последующей фазы тоже пуассоновский. Интенсивность на выходе каждой фазы равна суммарной интенсивности всех входящих потоков с интенсивностями  $\lambda$ .

Пропускная способность на практике часто составляет половину от заданной в спецификации оборудования [10, 75]. Интенсивность времени обслуживания рассчитывается по формуле:

$$\mu_j = 0.5 \cdot p_j / w,$$

где:  $p_j$  - пропускная способность  $j$ -ой станции, Мбит/с;  $w$  - средний размер пакета, Мбит.

Для каждой станции коэффициент загрузки равен:

$$\rho_j = \frac{\sum \lambda}{\mu_j} = \frac{q \cdot \lambda}{\mu_j} < 1,$$

где  $q$  - число входящих потоков. Условие  $\rho_j < 1$  является необходимым и достаточным условием существования стационарного режима функционирования СеМО.

Далее по формуле Литтла [76] можно рассчитать время задержки на каждой станции:

$$\overline{T}_j = \frac{\rho_j}{1 - \rho_j} \cdot \frac{1}{q \cdot \lambda}.$$

Тогда межконцевая задержки в сети равна

$$\overline{T} = \sum \overline{T}_j. \quad (1.18)$$

Существуют более сложные модели очередей для оценок характеристик с более сложными видами распределения входящего трафика и времени обслуживания. Адекватные оценки дают модели с коррелированными входным потоком [77, 78, 16, 15]. Для аппроксимации времени обслуживания в беспроводных каналах используют фазовые распределения [78, 16, 15, 79, 80]. К сожалению, такие модели труднорешаемы и использование их в задачах оптимизации нецелесообразно в связи с большими временными затратами на расчет. Исследования таких СеМО представлены в работе [81], в которой был предложен метод калибровки моделей массового обслуживания с помощью имитационного моделирования в среде NS-3 БШС протокола IEEE 802.11n. На вход поступали

пакеты, сгенерированные по экспоненциальному закону. С помощью NS-3 была получена выборка, для которой было восстановлено РН-распределения по трем моментам для случая с узлами  $M/PH/1/N$  и экспоненциальное распределение по среднему значению для случая с узлами  $M/M/1/N$ . По умолчанию в NS-3 размер буфера MAC-уровня составляет  $N = 500$  [82]. Сравнение моделей представлено на рисунке 1.14. Также представлено модель  $M/M/1$  с бесконечным буфером. Как видно их графиков СеМО с узлами  $M/M/1$  показывает достаточное приближение. Выбор модели с бесконечным буфером обусловлен тем, что **производители оборудования не указывают в документации размер выделенной памяти для хранения пакетов**. Из результатов сравнения видно, что  $M/M/1/N$  и  $M/M/1$  отличаются несущественно. Потери пакетов, часто происходят не из-за переполнения буфера памяти, а коллизий и потерь в беспроводном канале. Существенным преимуществом СеМО с узлами  $M/M/1$  над другими более сложными моделями является наличие быстрого аналитического решения.

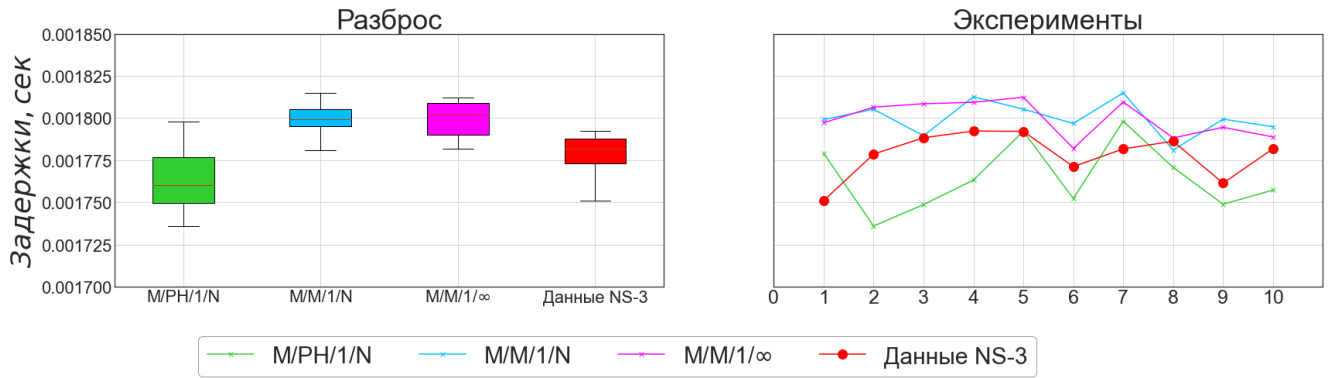


Рисунок 1.14 — Сравнение моделей массового обслуживания с данным NS-3

В данном исследовании было решено использовать аналитическую модель СеМО с узлами  $M/M/1$  для задачи оптимального размещения. Согласно предложенной концепции проектирования, в дальнейшем полученную БШС, после этапа синтеза топологии, можно будет проверить на более сложных моделях. Этап включает в себя математическое, имитационное моделирование для оценок характеристик производительности как время задержек, длины очередей, пропускная способность, вероятность потери пакетов и т.к. Такой подход проектирования позволяет провести комплексную проверку соответствия QoS для полученного размещения БС.

## 1.6 Выводы

В главе представлены следующие результаты исследования:

1. Обоснована актуальность внедрения БШС в рамках цифровой трансформации нефтегазового сектора «Индустрия 4.0».
2. Представлены этапы комплексного проектирования БШС и место в ней задачи синтеза топологий.
3. Проведен анализ современных беспроводных широкополосных технологий на нефтегазовых месторождениях. Все беспроводные технологии можно разбить на две группы: организация сети для сенсоров с низкоскоростным трафиком и сети дальнего радиуса действия, включающей мультимедийный трафик.
4. Проведен обзор моделей для расчета дальности телекоммуникационной связи. Представлены модели затухания сигнала в свободном пространстве, используемые для сетей семейства протоколов IEEE 802.11.
5. Был проведен анализ работы MAC-уровня сети IEEE 802.11 для оценки времени передачи пакетов в канале.
6. Оценка задержек в каналах БШС проводится с использованием стохастических моделей массового обслуживания. Проведен анализ моделей очередей, широко используемых для оценки производительности сетей телекоммуникации. Для расчета была выбрана аналитическая модель СеМО с пуассоновским входным потоком и экспоненциальным временем обслуживания на фазах.

## **Глава 2. Размещение базовых станций БШС для покрытия линейной территории**

В данной главе представлены математические модели синтеза топологии БШС. Рассматриваются задачи оптимального размещения базовых станций, максимизирующее телекоммуникационного покрытия вдоль линейного участка. Под линейным участком подразумевается территория вдоль протяженного объекта, которую необходимо покрыть БШС. Примерами таких объектов могут являться: автомобильные и железные дороги, тоннели метрополитена, магистральные нефте- и газопроводы.

### **2.1 Актуальность внедрения БШС для телекоммуникационного покрытия линейного участка**

Эффективным способом повышения технико-экономических показателей при проектировании БШС является оптимизация ее топологии, а именно решение задачи выбора оптимального набора базовых станций. В этой главе представлена задача, в которой необходимо обеспечить максимальное телекоммуникационное покрытие для охвата протяженного линейного участка.

Цифровая трансформация не обошла стороной транспортную отрасль. Весь мир активно участвует в развитии интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Создание современной инфраструктуры передачи мультимедийной информации: голос, данные, видео вдоль протяженных магистралей является одной из важнейших проблем при создании новых и функционировании существующих транспортных магистралей [32]. Одним из перспективных направлений является организация на транспортных участках автомобильных сетей (Vehicular ad hoc network, VANET) [83, 84] (Рисунок 2.1). VANET позволяет объединить транспортные средства для обмена друг с другом (vehicle-to-vehicle, V2V) и с инфраструктурой (vehicle-to-infrastructure, V2X).

Развертывание и развитие сетей беспроводной связи вдоль протяженных магистралей требует решения ряда сложных организационно-технических задач в условиях жестких ограничений на использование частотных, экономиче-

ских и аппаратных ресурсов. В связи с этим возрастает актуальность решения проблемы оптимального размещения базовых станций вдоль транспортных магистралей, являющаяся одной из важнейших при проектировании БШС этого класса [32].

Организации БШС вдоль автодорог посвящено ряд зарубежных и отечественных работ. Большинство работ касаются проблемы размещения придорожных объектов (Roadside Unit, RSU) или БС вдоль автодорог. В [85, 86] предложены модели, использующие генетический алгоритм для решения задачи о максимальном покрытии. Максимизация покрытия БШС с учетом ограничения стоимости БС представлена в работах [87, 88]. В работах [89, 90, 91] предложены новые модели размещения БС с учетом характеристик трафика на дорожных участках. В [92] Рейз А. и др. представили задачу размещения БС для протокола IEEE 802.11p/Wave, позволяющая организовать связь для объектов движущихся на скоростях до 200 км/ч. В [93] для задачи развертывания узлов RSU вдоль автодорог представили модель на основе муравьиного алгоритма, максимизирующую телекоммуникационное покрытие. В работах [85, 94] в качестве ограничений учитываются временные ограничения при размещении БС. В [95] предлагают жадный алгоритм для минимизации RSU с условием ограничения задержек между любыми двумя узлами сети. В [96] предложен алгоритм развертывания RSU вдоль дорог сети миллиметрового диапазона, максимизирующий покрытие и учитывающий ограничение по показателю уровня принимаемого сигнала. В работе [97] представлена модель эгоистичного выбора базовых станций в беспроводной сети в игровой постановке, где каждый игрок стремится увеличить свою величину отношения «сигнал к интерференции плюс шум». В работе [98] представлены задача размещения RSU вдоль линейного участка протяженной автомагистрали в виде модели ЦЛП.

=====

В нефтегазовом секторе страны сегодня можно отметить резкий тренд цифровизации. Внедрение современных информационных технологий в производственные процессы в рамках перехода к «Индустрии 4.0» является главным перспективным направлением зарубежных и отечественных компаний. Данное требование подразумевает рост большого объема данных, требующих современных и надежных телекоммуникационных средств связи. Большинство объектов нефтегазовой отрасли в России охватывают огромные площади и находятся на

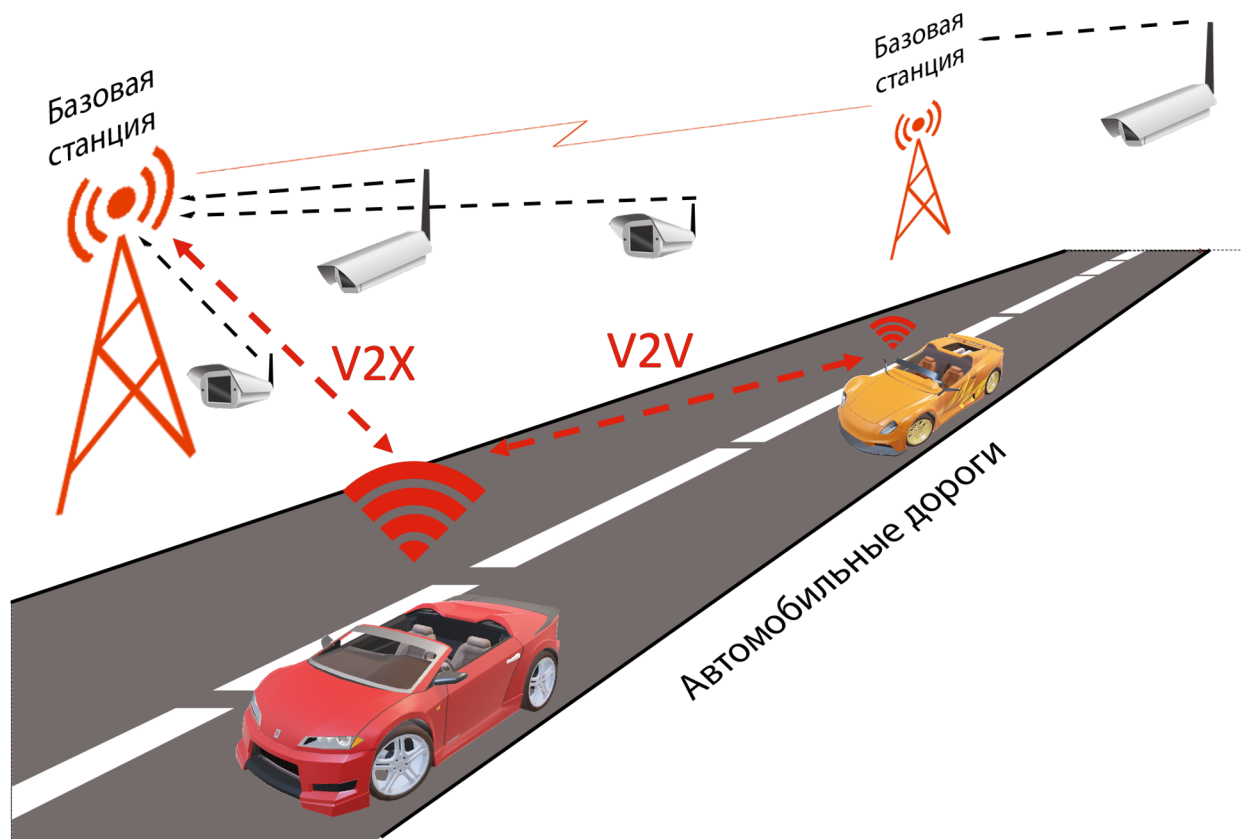


Рисунок 2.1 — Беспроводная сеть вдоль автомобильных дорог

удалении в труднодоступных регионах, поэтому наилучшим способом организации связи является внедрение БШС.

Ключевым объектом на нефтегазовом промысле, для которого можно развернуть БШС с линейной топологии, являются магистральные и промысловые трубопроводы, предназначенные для транспортировки товарной нефти или газа из района промысла, производства до места потребления. В общем случае под местами потребления понимают нефтебазы, перевалочные базы, пункты налива в цистерны и заводы [99] (Рисунок 2.2). В зависимости от географических особенностей и климатических условий магистральные трубопроводы могут прокладываться в подземном, наземном или надземном типах. Перед производством стоит задача не только сбора данных технологического процесса системами автоматизации, но и обеспечение норма безопасности и экологического контроля прилегающей территории.

Трубопроводы являются самым безопасным способом транспортировки нефти. К сожалению, одной из главных проблем при таком выборе транспортировке являются случайные утечки. Так к особо уязвимым участкам трубопроводной инфраструктуры относятся регулирующая арматура, ловуш-



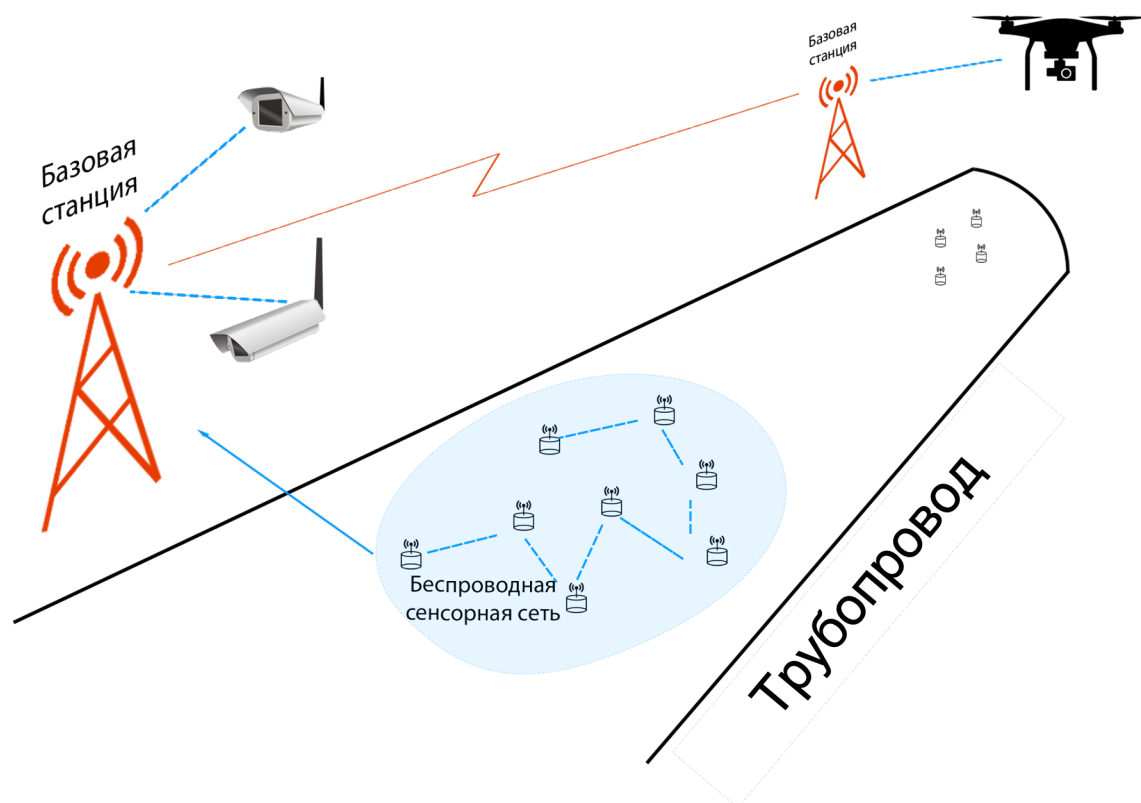


Рисунок 2.2 — Беспроводная сеть вдоль нефте- и газопроводов

ки для скребков, приемники скребков, счетчики и манометры. Позднее или несвоевременное обнаружение утечек для нефтегазовой компании может нанести миллионы финансовых убытков, а также нанести ущерб окружающей среде. В работе [100] представлена интеллектуальная система мониторинга за магистральными трубопроводами в реальном времени с помощью БШС, способной обнаруживать акты вандализма в трубопроводной системе

Сегодня обеспечение безопасности персонала это задача, которая включает безопасность не только в течение рабочего процесса на технологических объектах, непосредственного, но и в течение всего времени нахождения на промысле.

Также одним из направлений цифровизации месторождений является внедрение высокоскоростных локальных сетей для организаций связи для мобильных обходчиков. **Доделать**

Эффективным средством прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций на магистральных трубопроводах, экологической защиты, а также достижения промышленной безопасности является мониторинг нефтепровода, с помощью современных беспроводных сетей связи, включающие беспроводное

технические средства для диагностики состояния трубопроводов, изменений, происходящих под влиянием геологических процессов на опасных участках [101, 102, 103, 104, 103].

=====

Еще одним примером развертывания БШС для охвата линейного объекта является организация телекоммуникационного покрытия на линиях метрополитена [105, 106, 107, 108, 109]. Компания Radwin развернула свои базовые станции в тоннелях московского метро, использующий проприетарный протокол передачи данных Wi-Fi 5ГГц [106, 107]. Оценка нагрузки сети Wi-Fi в московском метро [105]. В работах [109, 108] авторы представили свою эмпирическую модель распространения сигнала, учитывающая отражения в тоннелях, и представили свой алгоритм расстановки базовых станций внутри тоннеля. Основными критериями размещения являются минимизация средней плотности БС и обеспечение уровня принимаемого сигнала не ниже заданного порога при любом расположении состава в тоннеле. Модель распространения основывается на методе геометрической оптики и учитывает как геометрические, так и физические характеристики стен тоннелей.

=====

Безопасность на месторождении является самой важной задачей любого предприятия. Большинство нефтяных месторождений в России охватывают огромные площади и находятся на удалении в труднодоступных регионах. Сегодня обеспечение безопасности персонала это задача, которая включает безопасность не только в течение рабочего процесса на технологических объектах, непосредственного, но и в течение всего времени нахождения на промысле. Важными объектами, требующие постоянного контроля являются промышленные автодороги. С учетом большой удаленности технологических объектов на промысле друг от друга для контроля над промышленными автодорогами целесообразно организовать системы беспроводного видеонаблюдения на дорогах [32] (Рисунок 2.1). Одним из наиболее перспективных решений на транспортных участках является организация автомобильных сетей (Vehicular ad hoc network, VANET) [83, 84]. Для развертывания таких сетей хорошо подходит БШС. Организации БШС вдоль автодорог посвящено ряд зарубежных и отечественных работ. Большинство работ касаются проблемы размещения придорожных объектов (Roadside Unit, RSU) или другими словами БС вдоль автодорог. В [85, 86] предложены модели, использующие генетический алгоритм для решения

задачи о максимальном покрытии. Максимизация покрытия БШС с учетом ограничения стоимости БС представлена в работах [87, 88]. В работах [89, 90, 91] предложены новые модели размещения БС с учетом характеристик трафика на участках. В [92] представлена задача размещения БС для протокола IEEE 802.11p/Wave, позволяющая организовать связь для объектов движущихся на скоростях до 200 км/ч. В [93] предложена модель размещения БС с помощью муравьиного алгоритма. В работах [85, 94] в качестве ограничений учитываются временные ограничения при размещении БС. В [95] предлагают жадный алгоритм для минимизации RSU с условием ограничения задержек между любыми двумя узлами сети. В работе [98] представлена задача размещения RSU вдоль линейного участка протяженной автомагистрали.

## **2.2 Математические модели синтеза топологии сети для охвата линейного участка в виде задачи целочисленного линейного программирования**

В середине прошлого века с появлением первых компьютеров свою широкую популярность приобрела область математики, задачей которой является поиск экстремальных решений на допустимых множествах. Это положило начало математическому программированию. Сегодня одним из наиболее интересных классов задач математического программирования являются задачи ЦЛП. Эти задачи формулируются как задачи линейного программирования (ЛП) с дополнительным ограничением целочисленности переменных. Для задач ЛП существуют эффективный алгоритм решения - симплекс-метод, предложенный Д. Данцигом [110]. Добавление ограничения целочисленности портит свойство выпуклости и полиномиальности задачи ЛП. [\[Ссылка\]](#). Основная проблема, возникающая при решении практических задач на конечных множествах – «проклятие размерности» [111]. С увеличением размерности пространства количества данных возрастает экспоненциально. Для решения задач целочисленного программирования распространены методы отсечения и комбинаторные методы [112, 113].

Идея методов отсечения заключается в решении задачи ЛП без учета целочисленности. Если полученное решение оптимальное решение не является

целочисленным, то вводятся дополнительные ограничения, отсекающие нецелочисленные вершины многогранника и вновь повторяется процедура поиска. Существующие алгоритмы отсекаются отличаются друг от друга способами формирования дополнительных ограничений для отсека нецелочисленности. Методы отсека имеют общий существенный недостаток. Практический опыт показал плохую сходимость. Для повышения эффективности вычислительных алгоритмов были предложены комбинаторные методы, основанные на упорядоченном переборе наиболее перспективных вариантов.

Одним из наиболее популярных комбинаторных методов для решения не только целочисленных, но и частично целочисленных задач ЛП является метод ветвей и границ (МВиГ). Впервые данный метод был предложен Лэнд и Дойгом в работе [114]. Существуют различные методы типы ветвей и границ. Все они основаны на последовательном разбиении допустимого множества на подмножества и вычислении оценок, позволяющие отбрасывать подмножества, не содержащие решение задачи.

Для практических задач существуют готовые коммерческие продукты, эффективно решающие задачу оптимизацию общего вида. Можно выделить наиболее популярные из них: MatLab Optimization ToolBox, Gurobi Optimizer, GLPK, CPLEX. Подробный обзор коммерческих, бесплатных и продуктов с открытым исходным кодом для задач линейного программирования представлен в работах [115, 116, 117].

В данной секции будет представлена математическая модель в виде задачи целочисленного линейного программирования для решения задачи максимизации телекоммуникационного покрытия участка при развертывании базовых станций БШС.

### 2.2.1 Постановка задачи

Проблема формулируется следующим образом. Для контроля над заданным линейным участком необходимо разместить базовые приемопередающие станции таким образом, чтобы максимизировать покрытие с ограничением на суммарную стоимость размещенных станций. Необходимо, чтобы любая БС в

сети могла быть связана со шлюзами на концах участка через систему размещенных станций.

Задано множество станций  $S = \{s_j\}$ . Каждой станции приписаны параметры  $s_j = \{r_j, \{R_{jq}\}, c_j\}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;  $q = \overline{1, m}$ ;  $q \neq j$ . Каждая БС содержит два модуля радиосвязи - для подключения абонентов и для связи с соседними станциями. Первая характеризуется параметром  $r_j$  - максимальный радиус покрытия станции, вторая характеризуется множеством  $\{R_{jq}\}$  - матрица радиусов связи между  $j$ -ой и  $q$ -ой базовыми станциями. Параметр  $c_j$  - это стоимость.

Задан линейный участок длиной  $L$  с концами в точках  $a_0$  и  $a_{n+1}$ . Внутри отрезка  $[a_0, a_{n+1}]$  задано конечное множество точек  $A = \{a_i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ; эти точки соответствуют набору свободных мест, где могут быть размещены станции. Каждая точка  $a_i$  определяется своей одномерной координатой  $l_i$ .

Заданы станции специального вида  $s_{m+1}$  - шлюзы. Данные шлюзы размещены на концах  $a_0$  и  $a_{n+1}$  данного линейного участка. Для данных станций параметр радиуса покрытия  $r_{m+1} = 0$ . Радиус связи и стоимость не заданы.

Требуется разместить станции таким образом, чтобы максимизировать покрытие с условием ограничения на суммарную стоимость  $C$ .

### 2.2.2 Модель целочисленного линейного программирования

Перед тем как перейти к постановке задачи оптимизации в виде модели целочисленного линейного программирования, необходимо подготовки параметры БС: радиус связи между станциями  $R_{jq}$  и радиус телекоммуникационного покрытия  $r_j$  с помощью уравнений расчета дальности связи, представленных в главе 1.

Пусть  $y_i^+$  и  $y_i^-$ ,  $i = \overline{0, n+1}$  определяют охват покрытия (справа и слева, соответственно) станций, покрывающих точку  $a_i$  (Рисунок 2.3). Параметры  $y_i^+$  и  $y_i^-$  могут принимать только неотрицательные целые значения.

Величины покрытия для шлюзов  $y_0^+, y_0^-, y_{n+1}^+, y_{n+1}^-$  равны 0.

Целевая функция будет представлена как:

$$f = \sum_{i=1}^n (y_i^- + y_i^+) \rightarrow \max \quad (2.1)$$

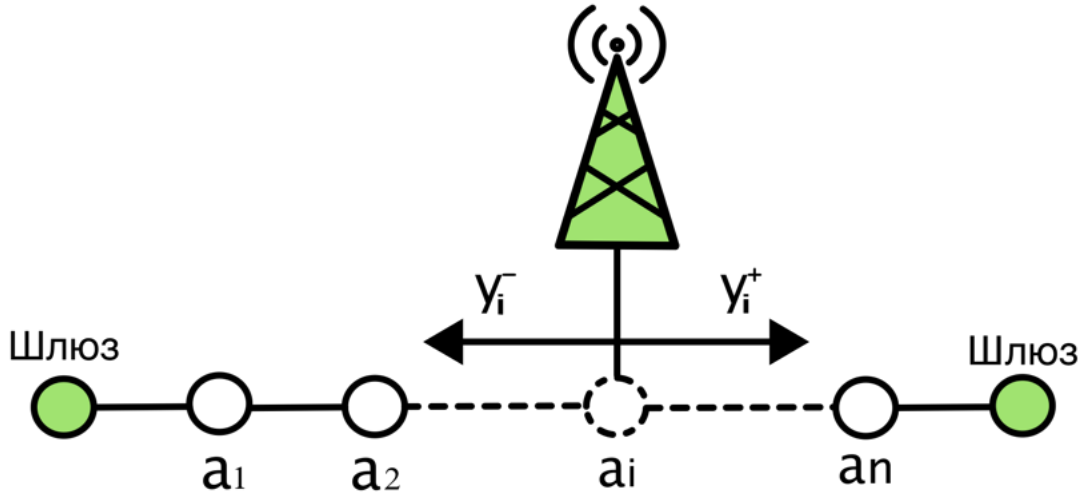


Рисунок 2.3 — Охват покрытия станции

Также введем бинарные переменные  $x_{ij}$ . Тогда  $x_{ij} = 1$ , если станция  $s_j$ , размещенная на точке  $a_i$ , и  $x_{ij} = 0$  в противном случае;  $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, m}$ .

Введем двоичные переменные  $e_i$ . Тогда  $e_i = 1$ , если какая-либо станция находится в точке  $a_i$ , и  $e_i = 0$  в противном случае;  $i = \overline{1, n}$ . Для точек размещения шлюзов  $a_0$  и  $a_{n+1}$  переменные  $e_0 = 1$  и  $e_{n+1} = 1$ , соответственно.

Сформулируем следующую систему ограничений задачи.

По определению (2.2):

$$e_i = \sum_{j=1}^m x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.2)$$

Каждая станция должна быть размещена только в одной точке. (2.3):

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq 1, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.3)$$

Значения покрытий не превышают радиус покрытия станции, размещенной в точке  $a_i$ , и равны 0, если в точке  $a_i$  нет станции (2.4) и (2.5):

$$y_i^+ \leq \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot r_j, \quad i = \overline{1, n}; \quad (2.4)$$

$$y_i^- \leq \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot r_j, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.5)$$

Общая область покрытия между любыми двумя точками  $a_i$  и  $a_k$ , где расположены станции, не может превышать расстояние между этими точками (2.6) и (2.7).

$$y_i^+ + y_k^- \leq \frac{l_k - l_i}{2} \cdot (e_i + e_k) + (2 - e_i - e_k) \cdot L, \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{i+1, n+1}; \quad (2.6)$$

$$y_i^- + y_k^+ \leq \frac{l_i - l_k}{2} \cdot (e_i + e_k) + (2 - e_i - e_k) \cdot L, \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{i-1, 0}, \quad (2.7)$$

где  $l_k$  и  $l_i$  - координаты точек  $a_i$  и  $a_k$ , соответственно. Это условие исключает влияние пересечений покрытий станций при вычислении общего значения покрытия между станциями (Рисунок 2.4).

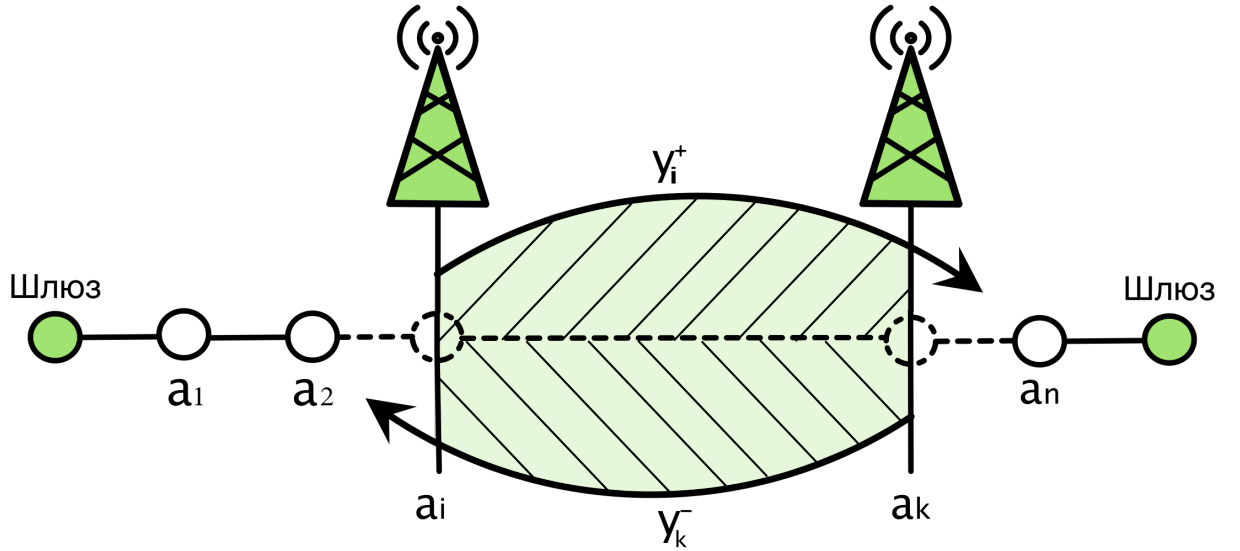


Рисунок 2.4 — Область покрытия между любыми двумя точками

Согласно условиям задачи, станция, расположенная в  $a_i$ , должна быть связана хотя бы с одной станцией слева и одной станцией справа, включая станции на конечных точках  $a_0$  и  $a_{n+1}$ .

Введем бинарные переменные  $z_{ijkq}, i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}; k = \overline{1, n}, k \neq i; q = \overline{1, m}, q \neq j$ .

Переменная  $z_{ijkq} = 1$ , если в точке  $a_i$  размещена станция  $s_j$  и данная станция связана со станцией  $s_q$ , размещенная в точке  $a_k$ ; и  $z_{ijkq} = 0$  в противном случае.

Переменная  $z_{ij0(m+1)} = 1$ , если станция  $s_j$ , размещенная в точке  $a_i$ , связана со шлюзом  $s_{m+1}$  в точке  $a_0$ ;  $z_{ij0(m+1)} = 0$  в противном случае.

Переменная  $z_{ij(n+1)(m+1)} = 1$ , если здесь находится станция  $s_j$  в точке  $a_i$  и она связана со шлюзом  $s_{m+1}$  в точке  $a_{n+1}$ ;  $z_{ij0(m+1)} = 0$  в противном случае.

Станции должны быть размещены в обеих точках  $a_i$  и  $a_k$ , (2.8) и (2.9):

$$z_{ijkq} \leq e_i, \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}; \quad k = \overline{1, n}, k \neq i; \quad q = \overline{1, m}, q \neq j; \quad (2.8)$$

$$z_{ijkq} \leq e_k, \quad k = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}; \quad i = \overline{1, n}, i \neq k; \quad q = \overline{1, m}, q \neq j. \quad (2.9)$$

Стоит отметить, БШС работает в полудуплексном режиме. Переменная  $z_{ijkq}$  говорит только о наличии связи для передачи от БС  $s_j$  до БС  $s_q$ . Чтобы обеспечить связь в обоих направлениях, необходимо проверять условия для  $z_{ijkq}$  (от  $s_j$  до  $s_q$ ) и для  $z_{kqij}$  (от  $s_q$  до  $s_j$ ).

Необходимо обеспечить коммуникационную связь справа от БС (2.10) и (2.11). Станция  $s_j$  в точке  $a_i$  должна быть связана с любой станцией, расположенной в точке  $a_k$ , справа от  $a_i$  ( $k > i$ ) или с правым шлюзом  $s_{m+1}$  (2.10)

$$\sum_{k=i+1}^n \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq j}}^m z_{ijkq} + z_{ij(n+1)(m+1)} = x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.10)$$

Требуется чтобы станция, размещенная справа от  $s_j$  или правый шлюз  $s_{m+1}$  были связаны с размещаемой станцией  $s_j$  (2.11)

$$\sum_{k=i+1}^n \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq j}}^m z_{kqij} + z_{(n+1)(m+1)ij} = x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.11)$$

Необходимо обеспечить коммуникационную связь слева от БС (2.12) и (2.13). Станция  $s_j$  в точке  $a_i$  должна быть связана с любой станцией, расположенной в точке  $a_k$ , слева от точки  $a_i$  ( $k < i$ ) или с левым шлюзом  $s_0$  (2.12)

$$z_{ij0(m+1)} + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq j}}^m z_{ijkq} = x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.12)$$

Требуется чтобы станция, размещенная слева от  $s_j$  или левый шлюз  $s_0$  были связаны с размещаемой станцией  $s_j$  (2.13)



$$z_{0(m+1)ij} + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq j}}^m z_{kqij} = x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.13)$$

Неравенства (2.8) и (2.9) и равенства (2.10) — (2.13) обеспечивают условие симметрии связи между базовыми станциями, расположенными в точках  $a_i$  и  $a_k$ ,  $\forall i, k$  (Рисунок 2.5).

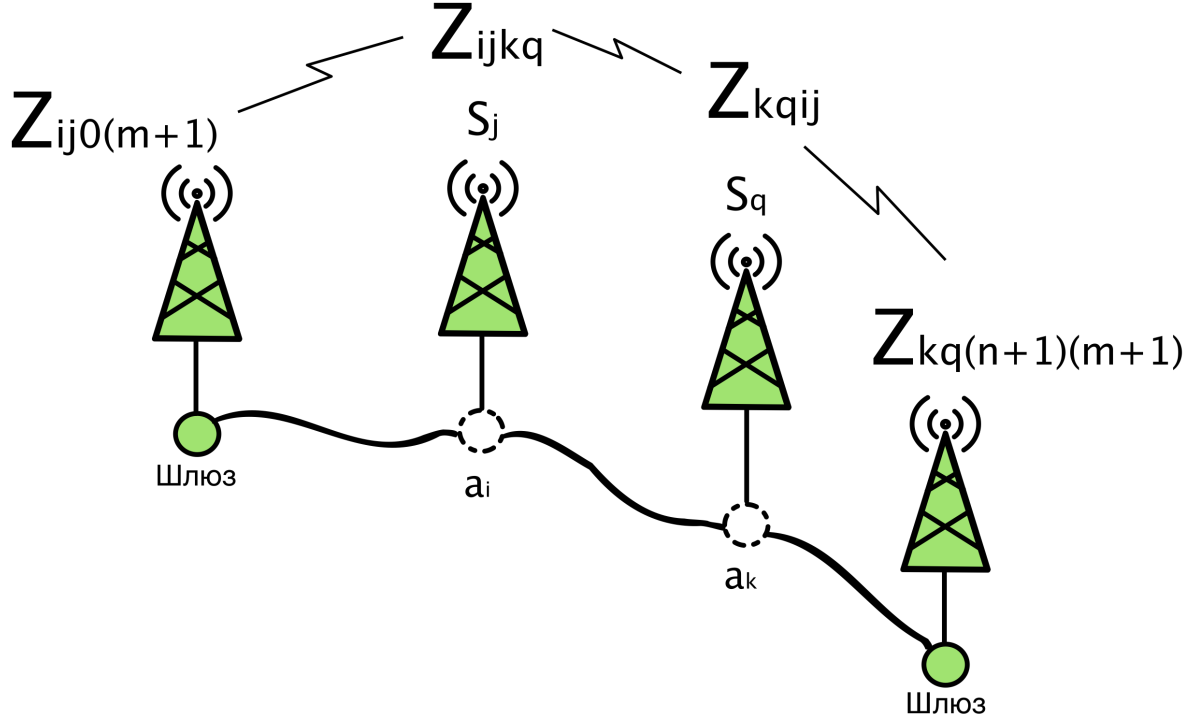


Рисунок 2.5 — Связь между базовыми станциями

Если станции  $s_j$  и  $s_q$  связаны, то максимальный радиус связи размещенных станций должен быть не меньше расстояния между точками  $a_i$  и  $a_k$ , где расположены станции  $s_i$  и  $s_q$  (Рис. 2.6). Формально это можно записать как (2.14) и (2.15).

$$\forall i = \overline{1, n}:$$

$$z_{ijkq}(R_{jq} - (a_i - a_k)) \geq 0, \quad k = \overline{0, i-1}; \quad j = \overline{1, m}; \quad q = \overline{1, m}, q \neq j; \quad (2.14)$$

$$z_{ijkq}(R_{jq} - (a_k - a_i)) \geq 0, \quad k = \overline{i+1, n+1}; \quad j = \overline{1, m}; \quad q = \overline{1, m}, q \neq j. \quad (2.15)$$

Стоимость размещения должна удовлетворять бюджетному ограничению  $C$ :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot c_j \leq C. \quad (2.16)$$

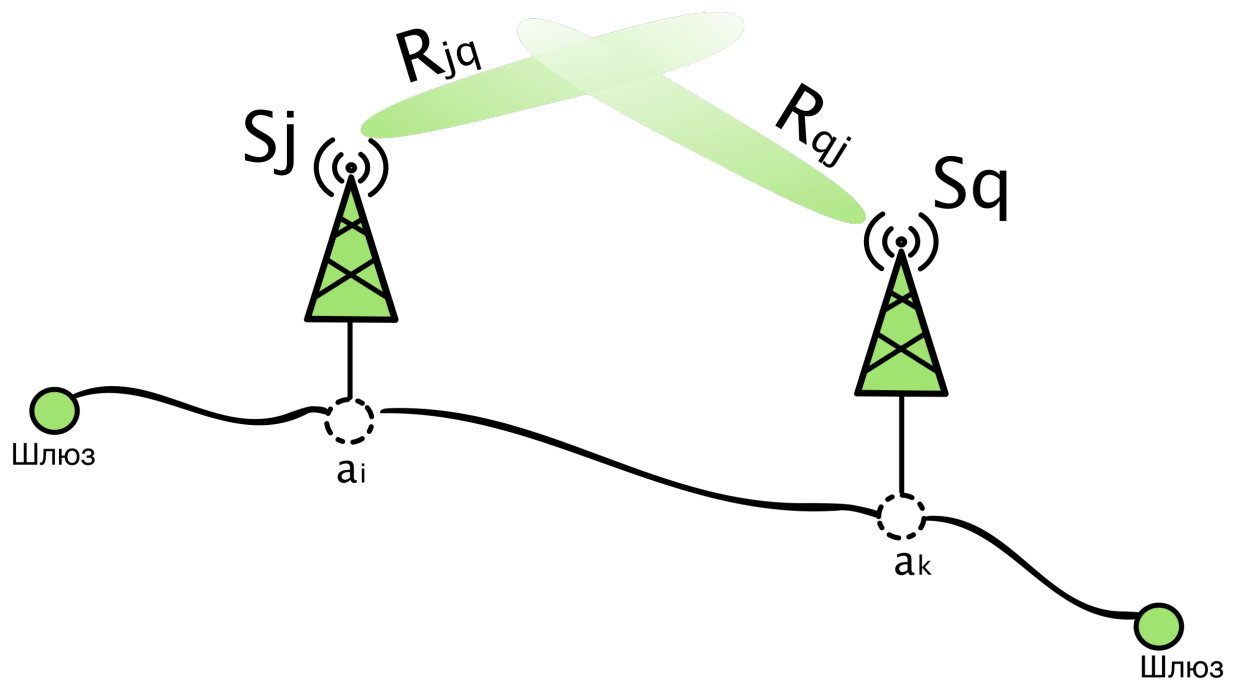


Рисунок 2.6 — Обеспечение связи с соседней станцией

Работа [98] содержит доказательство NP-трудности для частного случая задачи ЦЛП, когда вдоль линейной территории размещают множество однотипных станций с одинаковыми параметрами. Задача называется NP-трудной, если ей соответствующая задача распознавания NP-полна [111]. Представленная в данном исследовании модель (2.1) – (2.16) рассматривает общий случай размещения, когда вдоль линейного участка размещают множество различных станций с разными техническими параметрами. Следовательно, данная задача является также NP-трудной.

Математическая модель рассчитывалась в пакете Optimization Toolbox MATLAB. Числовой пример решения полученной математической модели задачи ЦЛП представлен в приложении Б. В приложении также представлена методика расчета дальности связи для обеспечения коммуникации между базовыми станциями и охвата зоны покрытия.

### **2.3 Математические модели синтеза топологии сети для охвата линейного участка в виде экстремальной задачи в комбинаторной форме**

В данной главе была уже представлена математическая модель задачи размещения базовых станций в виде задачи ЦЛП. К сожалению, модели в общем виде не учитывают специфику конкретной задачи. В большинстве практических случаях, поиск решения получается не самым быстрым. Еще одной сложностью при решении задачи в виде ЦЛП является случаи, когда невозможно представить ограничения задачи в линейном виде.

При проектировании телекоммуникационных сетей важным этапом является оценка характеристик производительности сетей. Такие оценки необходимо учитывать при решении задачи синтеза топологии. Одной из таких характеристик является межконцевая задержка сети. Данную характеристику при наличии кросс-трафика в сети, т.е. с поступлением пакетов на все узлы сети, невозможно представить в линейном виде для модели ЦЛП. Для того чтобы учесть специфику размещения базовых станций БШС и использовать характеристику производительности сети в качестве ограничения задачи, в работе будет представлена задача размещения базовых станций в виде комбинаторной модели в экстремальной форме. Будет предложен алгоритм типа ветвей и границ для решения комбинаторной задачи телекоммуникационного покрытия заданного участка.

Алгоритм на основе метода ветвей и границ основан на следующих построениях, позволяющих уменьшить время перебора:

1. Ветвление. Разбиение исходного множества на попарно не пересекающиеся дочерние подмножества в ходе поиска оптимального решения.
2. Получение нижних границ. Исследования текущей вершины на возможность закрытия.

Особенность задачи дискретного программирования состоит в том, что они имеют переборный характер. Основная идея комбинаторных алгоритмов – выделить из множества допустимых решений подмножества, не содержащие оптимальных решений [118], для сокращения времени перебора всех возможных вариантов.

### 2.3.1 Постановка задачи

Пусть задано множество станций  $S = \{s_j\}$  с параметрами  $s_j = \{r_j, \{R_{jq}\}, p_j, c_j\}, j = 1, \dots, m; q = 1, \dots, m; j \neq q$ . Каждой БС приписаны параметры  $r_j$  – максимальный радиус покрытия станции,  $\{R_{jq}\}$  – матрица радиусов связи между  $j$ -ой и  $q$ -ой базовыми станциями. Также заданы параметры:  $p_j$  – пропускная способность БС и  $c_j$  – стоимость.

Задан отрезок  $\alpha$  длины  $L$  с концами в точках  $a_0$  и  $a_{n+1}$ . Внутри отрезка  $\alpha = [a_0, a_{n+1}]$  задано множество возможных точек размещения станций  $A = \{a_i\}, i = 1, \dots, n$  с координатами  $l_i$ . Точка  $a_0$  имеет координату  $l_0 = 0$ , точка  $a_{n+1}$  имеет координату  $l_{n+1} = L$ . На концах отрезка в вершинах  $a_0$  и  $a_{n+1}$  стоят станции специального вида – шлюзы  $s_0$  и  $s_{m+1}$ , соответственно, для которых радиусы покрытия, пропускные способности и стоимости не задаются. Радиусы связи для обеспечения соединения с размещаемыми БС задаются как  $R_{0j}$  и  $R_{(m+1)j}$ , соответственно. Требуется разместить станции таким образом, чтобы максимизировать область покрытия отрезка  $L$  при выполнении требования на наличия связи каждой станции со станциями на концах отрезка (шлюзами) через систему размещенных станций, а также выполнении ограничений на величину времени межконцевой задержки  $T$  и суммарную стоимость размещения  $C$ .

### Формулировка в виде экстремальной задачи на конечном множестве

**Допустимой расстановкой** станций назовем такой возрастающий по величине координат  $l_i$  набор пар  $P = \{a_i, s_j\}, a_i \in A, i \neq 0, i \neq n+1; s_j \in S$ , для которого выполняются **требования**:

1. Для каждой пары  $(a_i, s_j)$ :

- а) слева: либо найдется такая пара  $(a_k, s_q)$ , что,  $l_i - l_k \leq R_{jq}$  и  $l_i - l_k \leq R_{qj}$ , либо  $l_i - l_0 \leq R_{j0}$  и  $l_i - l_0 \leq R_{0j}$ ;
- б) справа: либо найдется такая пара  $(a_t, s_g)$ , что,  $l_t - l_i \leq R_{jg}$  и  $l_t - l_i \leq R_{gj}$ , либо  $l_{n+1} - l_i \leq R_{j(m+1)}$  и  $l_{n+1} - l_i \leq R_{(m+1)j}$ .

Данное требование гарантирует, что любая станция может быть связана со станциями на концах отрезка либо через промежуточные станции, либо непосредственно.

2. Сумма задержек по всем размещенным станциям меньше заданной величины  $T$  – средней межконцевой задержки по времени по всей системе станций:

$$\sum_{j \in S_\sigma} \overline{T}_j \leq T,$$

где  $S_\sigma$  – множество размещенных станций,  $\overline{T}_j$  – среднее время задержки на станции. Расчет времени задержки с помощью модели массового обслуживания описан в параграфе 1.5.2.

3. Суммарная стоимость размещенных станций меньше заданного бюджетного ограничения  $C$ .

Каждой допустимой расстановке станций  $P$  соответствует величина покрытия  $z(P)$ , определяемая как суммарная длина всех таких участков  $\tau, \tau \subset \alpha$ , что каждая точка этих участков попадает в зону покрытия, по крайней мере, одной станции, входящих в набор пар  $P$ .

В дальнейшем для удобства описания алгоритмов введем понятие «недопокрытия» отрезка  $\alpha$ :

$$f(P) = L - z(P)$$

«Недопокрытие» – это суммарная область заданного участка  $L$ , которая не охвачена телекоммуникационным покрытием БШС. Численно равна разности между суммарным покрытием размещенных базовых станций и длиной всего участка  $L$ .

Пусть  $G$  – множество всех допустимых расстановок  $P$ . Тогда можно сформулировать задачу в виде экстремальной задачи на конечном множестве.

### **Задача 1.**

Требуется найти такую допустимую расстановку  $P^*$ , что

$$P^* = \operatorname{argmin}_{P \in G} f(P) \quad (2.17)$$

Обозначим через  $\Gamma$  все множество вариантов размещения станций, обязательно допустимых, из множества  $S$  на заданном множестве  $A$  возможных точек их размещения.

### 2.3.2 Дерево ветвлений для перебора элементов в множестве $\Gamma$

Опишем процедуру построения бинарного дерева поиска (дерева ветвлений) для полного перебора без повторений всех элементов множества  $\Gamma$ . Данная процедура будет использована при построении дерева поиска в алгоритме МВиГ решения **задачи 1**.

Предполагается, что в множестве  $S$  станции упорядочены по не убыванию радиусов покрытия. Описываемая процедура использует известный прием разбиения множества  $G$  на подмножества с использованием некоторого параметра. Процесс формирования и последовательность исследования подмножеств обычно представляется с помощью дерева поиска, представляющего собой ориентированное от корня «дерева ветвлений», где каждому подмножеству соответствует вершина на дереве. Множеству  $\Gamma$  соответствует корневая вершина.

#### Процесс разбиения исходного множества на дочерние подмножества

Выбор способа ветвления дерева связан со спецификой задачи. В случае **задачи 1** спецификой является размещение множества станций  $S$  на множестве возможных точек размещения  $A$ . На каждом узле дерева будем применять дихотомическое ветвление.

**Процедура 1.** Пусть  $G_0$ , где нижний индекс – номер итерации, исходное множество  $\Gamma$ . На каждой итерации, начиная с итерации  $\nu = 0$ , текущее подмножество  $G_\nu$  разбивается на два подмножества  $G_\nu^1$  и  $G_\nu^2$ . Множество  $G_\nu$  обычно называется «материнским», а множества  $G_\nu^1$  и  $G_\nu^2$  – «потомками» множества  $G_\nu$  или «дочерними» множествами (Рисунок 2.7.)

В качестве параметра разбиения используется переменная  $\pi_{ij}$ , принимающей два значения 0 и 1:

- $\pi_{ij} = 1$ , если наложено условие, что на месте  $a_i$  может быть расположено БС  $s_j$ ;
- $\pi_{ij} = 0$ , если наложено условие, что на месте  $a_i$  БС  $s_j$  располагаться не будет.

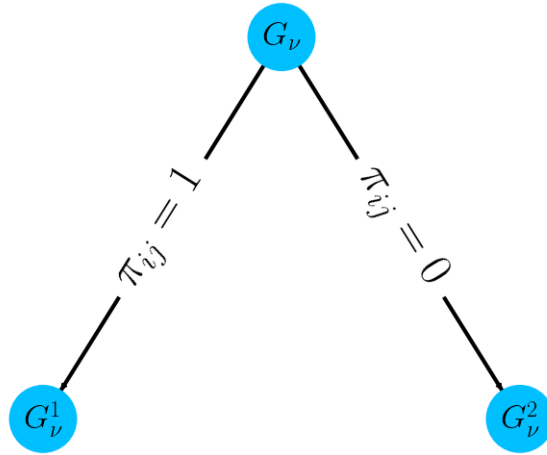


Рисунок 2.7 — Ветвление бинарного дерева

На каждой  $\nu$ -ой итерации в процессе ветвления для множества  $G_\nu^1$  задано условие  $\pi_{ij} = 1$ , а для множества  $G_\nu^2$  задано условие  $\pi_{ij} = 0$ .

Все дочерние множества удовлетворяют следующим условиям:

$$G_\nu^1 \cup G_\nu^2 = G_\nu; \quad (2.18)$$

$$G_\nu^1 \cap G_\nu^2 = \emptyset. \quad (2.19)$$

**Выбор переменной для разбиения на  $\nu$ -ой итерации.** На этапе разбиения любого множества  $G_\nu$  все множество переменных  $\Pi = \{\pi_{ij}\}$  можно разделить на три подмножества:

- $\Pi^+$  – «фиксированные» переменные, для которых  $\pi_{ij} = 1$ ;
- $\Pi^-$  – «запрещенные» переменные, для которых  $\pi_{ij} = 0$ ;
- $\Pi^f$  – «свободные» переменные, для которых значения на данной итерации еще не заданы.

Правило выбора переменной для разбиения множества  $G_\nu$ . Для разбиения множества  $G_\nu$  на каждой итерации выбирается переменная из множества  $\Pi^f$  с наименьшим индексом  $j$  среди всех переменных с наименьшим индексом  $i$ . Таким образом, сначала определяется незанятое место размещения  $a_i$  с наименьшим номером (индексом  $i$ ) и на нем размещается еще не размещенная станция  $s_j$  с наименьшим номером (индексом  $j$ ).

### Движение по дереву ветвлений.

После разбиения очередного подмножества  $G_v$  на два подмножества  $G_v^1$  и  $G_v^2$ , последним на дереве ветвлений присваиваются порядковые индексы  $G_{v+1}$  и  $G_{v+2}$ , соответственно (Рисунок 2.8). При формировании дерева ветвлений различаются два типа шагов: «прямой» и «обратный». Прямой шаг – это движение «в глубину» по той же ветви дерева, реализующее очередное разбиение множества  $G_v$  на два потомка, и обратный шаг, реализующий переход от множества  $G_v$  к одному из ранее сформированных подмножеств. Обратный шаг делается в том случае, когда: либо получено множество  $G_v$ , состоящее из единственного элемента, либо множество  $G_v$  при данном наборе значений переменных  $\pi_{ij}$ , выделяющих данное подмножество  $G_v$  из множества  $G_0$ , пусто. В этих случаях соответствующая вершина дерева называется «закрытой».

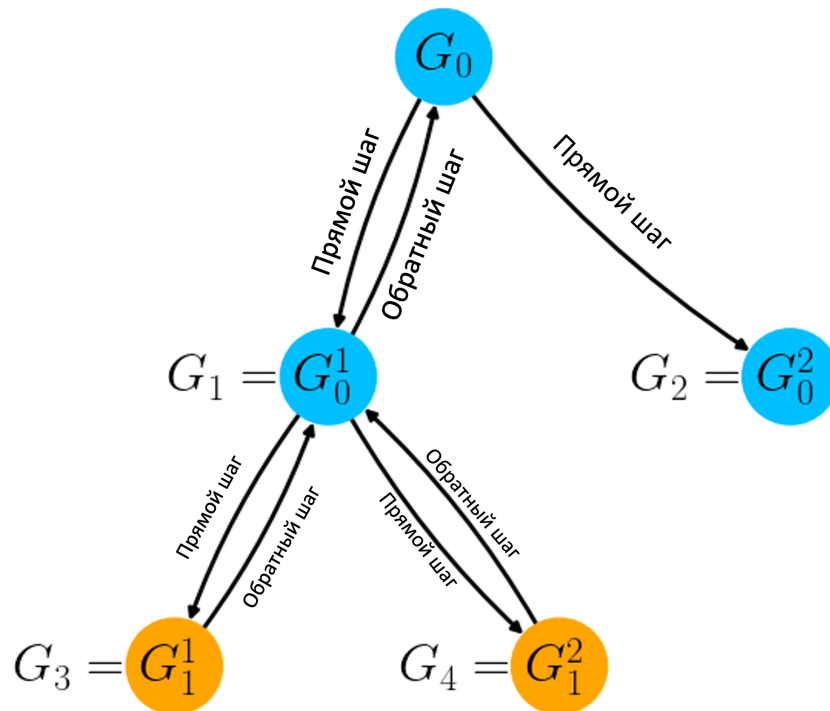


Рисунок 2.8 — Движение по дереву поиска

Для движения по дереву будем использовать правило **LIFO**. На основании этого правила прямые шаги будут выполняться до тех пор, пока не будет получена закрытая вершина. На дереве ветвлений это соответствует продолжению движения по той же ветви дерева. При этом из двух множеств  $G_v^1$  и  $G_v^2$  первым будет исследоваться на возможность закрытия соответствующей вершины множество  $G_v^1$  (левый дочерний узел дерева). Если вершина не будет закрыта, то



из неё будет продолжено дальнейшее движение по той же ветви – выполнение прямого шага. Если вершина будет закрыта, то выполняется обратный шаг: для продолжения движения будет выбрана незакрытая вершина с наибольшим порядковым номером  $\nu$  среди всех висячих вершин дерева (последняя сформированная вершина из нерассмотренных). Процедура будет завершена, когда все вершины дерева будут закрыты.

Выполнение условия (2.18) и (2.19) гарантирует, что в результате завершения работы *процедуры 1* будут просмотрены все элементы множества  $\Gamma$  без повторений. Эти же условия определяют фундаментальное свойство дерева ветвлений: на каждой итерации объединение множеств  $G_\nu$  всех висячих вершин дерева дает исходное множество  $G_0$  корневой вершины.

### 2.3.3 Метод ветвей и границ для задачи размещения БС

Для построения алгоритма типа ветвей и границ для решения **задачи 1** с использованием *процедуры 1* достаточно разработать методы исследования вершин дерева на возможность их закрытия.

В соответствии с техникой МВиГ закрытие вершины в результате исследования, соответствующего ей множества  $G_\nu$  возможно в трех случаях.

**Случай 1.** Множество  $G_\nu$  – пусто, т.е. доказано, что в множестве  $G_\nu$  при данном наборе фиксированных и запрещенных переменных  $\pi_{ij}$  нет ни одной допустимой расстановки  $P$ .

**Случай 2.** Доказано, что в множестве  $G_\nu$  не может быть допустимой расстановки  $P$  с меньшим значением целевой функции (2.17), чем у лучшей расстановки  $\hat{P}$  из уже найденных. Значение функции  $f(\hat{P})$  называется «рекордом», а расстановка  $\hat{P}$  – «рекордным решением». В качестве начального рекорда принимается число заведомо большее искомого оптимального решения, например, длина всего отрезка  $L$ .

**Случай 3.** Найдено оптимальное решение **задачи 1** на множестве  $G_\nu$ . Прежде, чем рассмотреть эти три случая, запишем важное свойство любого множества  $G_\nu$ , являющееся следствием принятого правила выбора свободной переменной для разбиения очередного множества  $G_\nu$  при прямом шаге.

## Исследование случаев 1 – 3

**Свойство 1.** Пусть для исследуемого множества  $G_v$ ,  $v > 0$ , точка  $a_k$  – любое из мест, на которых уже размещена станция из множества  $S$  в соответствии с набором фиксированных и запрещенных переменных  $\pi_{ij}$ , выделяющим данное множество из множества  $G_0$ . Тогда для всех мест «слева» от  $a_k$ , т.е. точек  $a_i$ ,  $i < k$ , размещение станций уже определено. В ходе движения по дереву ветвлений на точках либо были размещены станции при условии  $\pi_{ij} = 1, \forall i, j$ , либо эти точки  $a_i$  остались пустыми при условии  $\pi_{ij} = 0, \forall i, j$ .

### Случай 1.

Проверка текущего множества  $G_v$  на пустоту состоит в установлении факта невозможности выполнения **требования 1 – 3**, введенных ранее при определении допустимой расстановки.

**Проверка выполнения условия связи между размещенными БС** Построим алгоритм проверки выполнения **требования 1**.

Рассмотрим проверку для множества  $G_v$ ,  $v > 0$ . Пусть множество  $G_v$  образовано разбиением материнского множества при помощи переменной  $\pi_{kt} = 1$ , и множество содержит более одного распределения  $P$ . Алгоритм проверки состоит из **3 шагов**.

**Шаг 1.** Проверяем, что каждый из радиусов  $R_{th}$  и  $R_{ht}$ , где  $h$  – индекс станции, размещенной на ближайшей к точке  $a_k$  слева точке  $a_d$ , больше расстояния  $l_k - l_d$ .

**Шаг 2.** Проверяем, что как радиус  $R_{tj}$ , так и максимальный радиус  $R_{jt}$  среди еще нераспределенных станций не меньше расстояния между точкой  $a_k$  и ближайшей к ней точкой справа  $a_i$ . Если все станции распределены, то множество  $G_v$  состоит из единственного варианта распределения и этот случай будет рассмотрен далее.

**Шаг 3.** Проверяем, что, если количество нераспределенных станций больше 1, то расстояние между двумя любыми смежными точками  $a_i, i = k+1, \dots, n$ , не больше, чем второй по величине после максимального радиус связи у еще не распределенного множества станций, а расстояние между точками  $a_{n+1}$  и  $a_n$  не больше, чем максимальный радиус связи среди нераспределенных станций. Если осталась только одна нераспределенная станция, то проверяем, что среди

еще незанятых точек справа от точки  $a_k$  есть, по крайней мере, одна такая точка, что расстояния от этой точки до точки  $a_k$  и одновременно от этой точки до точки  $a_{n+1}$  не больше, чем радиус связи у нераспределенной станции.

Если в результате проверки оказывается, что, хотя бы на одном из шагов получен отрицательный результат, то множество  $G_v$  – пусто, соответствующая этому множеству на дереве поиска вершина должна быть закрыта и далее выполняется шаг обратного хода в соответствии с **Процедурой 1**.

Если множество  $G_v$  образованно разбиением материнского множества при помощи переменной  $\pi_{kt} = 0$  и  $a_v$  – точка с наибольшим индексом, среди точек, на которых уже размещены станции (с учетом точки  $a_0$ ), то надо проверить, что расстояние между точками  $a_v$  и  $a_k$  не больше, чем максимальный радиус среди радиусов связи у еще нераспределенных станций. Если проверка отрицательна, то множество  $G_v$  – пусто, соответствующая этому множеству на дереве поиска вершина должна быть закрыта и выполняется шаг обратного хода в соответствии с **Процедурой 1**.

Проверка **требований 2 и 3** сводится к установлению факта не превышения суммарных величин стоимости и межконцевой задержки заданным ограничениям.

**Случай 2.** Построим оценку величины «недопокрытия» для множества  $G_v$ , полученного из материнского множества добавлением условия  $\pi_{kt} = 1$ . Частичным «недопокрытием» назовем величину  $\Delta(k, d, p, t)$ , которая вычисляется по формуле:

$$\Delta(k, d, p, t) = \max\{(a_k - a_d) - (r_p + r_t), 0\}. \quad (2.20)$$

Частичное «недопокрытие» (2.20) определяется для любых двух точек  $a_d$  и  $a_k$  ( $k > d$ ), на которых расположены станции  $s_p$  и  $s_t$  при условии, что между этими точками нет других станций. Для любой расстановки  $P$  «недопокрытие»  $f(P)$  вычисляется как сумма всех «недопокрытий»  $\Delta(k, d, p, t)$  между местами размещения станций, включая концы отрезка  $\alpha$ , на которых стоят станции особого типа  $s_0$  и  $s_{m+1}$ .

Построим нижнюю оценку  $W(G_v)$  для недопокрытий  $f(P)$  расстановок  $P$  множества  $G_v$ , т.е.

$$W(G_v) \leq f(P), P \in G_v.$$

Если  $W(G_v) \geq f(\hat{P})$ , то множество  $G_v$  не может содержать расстановки, лучше уже найденной расстановки  $\hat{P}$ , тогда соответствующая множеству  $G_v$  вершина на дереве поиска должна быть закрыта и далее выполняется шаг обратного хода в соответствии с *процедурой 1*.

Построим оценку «недопокрытия» для множества  $G_v$ , полученного из материнского множества добавлением условия  $\pi_{kt} = 1$ . Оценку будем искать в виде суммы

$$W(G_v) = w_1(G_v) + w_2(G_v). \quad (2.21)$$

Величина  $w_1(G_v)$  вычисляется как сумма все частичных «недопокрытий» слева от вершины  $a_k$  и величины радиуса покрытия размещаемой станции  $r_t$ . Оценку  $w_2(G_v)$  вычислим «для недопокрытия» справа на части  $\beta$  до конца отрезка  $\alpha$  (точки  $a_{n+1}$ ). Данную оценку получим релаксацией условий, определяющих допустимую расстановку станций на участке  $\beta$ . Найдем такое подмножество  $S_\beta$  множества станций  $S$ , состоящее из еще не размещенных станций и дающее минимальное «недопокрытие» на участке  $\beta$  при выполнении только условий 2) – 4). Для этого сформулируем следующую задачу булевого программирования. **Добавить описание переменной  $x$ .**

### Задача 2.

$$z = |\beta| - \sum_{x_j \in S_\beta} 2r_j x_j \rightarrow \min.$$

при условии:

$$\sum_{x_j \in S_\beta} c_j x_j \leq C, \quad (2.22)$$

$$\sum_{x_j \in S_\beta} x_j \leq m, \quad (2.23)$$

$$x_j \in \{0, 1\},$$

где  $|\beta|$  – длина отрезка  $\beta$ ,  $m$  – число свободных мест для размещения станций на отрезке  $\beta$ ,  $r_j$  – радиус покрытия станции  $s_j$ ,  $c_j$  – стоимость станции  $s_j$  и  $C$  – бюджетное ограничение.

Эффективность использования оценки в методе ветвей и границ определяется точностью оценки и временем ее вычисления. Задача 2 – это задача ЦЛП, являющаяся трудно решаемой [119]. На основании задачи 2 можно получить

две оценки менее точные, но имеющие более эффективные методы решения. Заметим, что при снятии ограничения (2.22) или (2.23) задача 2 представляет собой целочисленную задачу о ранце с эффективным псевдополиномиальным алгоритмом решения [119]. При этом с точки зрения точности оценки, более перспективным представляется снятие ограничения (2.23), так как на практике, обычно, число возможных мест размещения станций существенно меньше числа размещенных станций, полученного в результате решения задачи. Назовем задачу, полученную снятием ограничения (2.23), задачей 3.

Задачу 2 при снятии условия целочисленности на переменные назовем задачей 4. Задача 4 есть задача линейного программирования.

Задача 3 и задача 4, являясь оценками целевой функции решения задачи 2, могут служить оценками  $w_2(G_v)$ . Если множество  $G_v$  получено из материнского добавлением условия  $\pi_{kt} = 0$ , то оценка  $W(G_v)$  равна оценке материнского множества.

В приложении А приведены результаты вычислительного эксперимента, показывающего время решения задач 2, 3, 4 и относительную точность задачи 3 и 4 по отношению к задаче 2.

Перейдем к рассмотрению случая 3. Рассматривается только для множеств  $G_v$ , состоящих из единственной расстановки  $P$ , для которой «недопокрытие»  $f(P)$  вычисляется как сумма всех «недопокрытий»  $\Delta(k, d, p, t)$  между местами, где размещены станции, включая концы отрезка  $\alpha$ , на которых стоят станции  $s_0$  и  $s_{m+1}$ .

Если для найденной расстановки  $P$  выполняются **требования 1–3**, которые для единственной расстановки легко проверяются, и

$$f(P) < f(\hat{P}), \quad (2.24)$$

то  $f(P)$  принимается за новый рекорд  $f(\hat{P})$ , расстановка  $P$  становится новым рекордным решением  $\hat{P}$  и выполняется шаг обратного хода в соответствии с **Процедурой 1**, если неравенство (2.24) не выполняется, то рекорд остается прежним и выполняется шаг обратного хода.

Работа алгоритма МВиГ заканчивается, когда все вершины дерева поиска закрыты, при этом решение задачи:

$$P^* = \hat{P}, f(P^*) = f(\hat{P}).$$

### 2.3.4 Построения последовательности топологий для итерационной процедуры моделирования БШС

При проектировании БШС надо найти ее оптимальную топологию среди всех топологий, для которых будут выполняться все требования к показателям, исследуемым и рассчитываемым на этапе моделирования сети. Для решения этой задачи воспользуемся идеей метода построения последовательности планов [120]. Данный подход позволяет для задач на конечных множествах найти не одно любое экстремальное решение, а множество лучших решений [121, 122].

Рассмотрим задачу 1. Требуется найти такую допустимую расстановку  $P^*$ , что

$$f(P^*) = \min\{f(P), P \in G\}.$$

Построим для этой задачи последовательность  $\Gamma = P^1, P^2, \dots, P^k$  допустимых расстановок (решений) множества  $G$  для заданного  $k$ , в которой каждое решение не лучше предыдущего и не хуже последующего.

$$\begin{aligned} f(P^1) &= f(P^*), \\ f(P^2) &= \text{extr}\{f(P), P \in G \setminus P^1\}, \\ &\dots \\ f(P^k) &= \text{extr}\{f(P), P \in G \setminus P^1 \cup P^2 \cup \dots P^k\}, \end{aligned}$$

Теперь воспользуемся следующей процедурой. Будем последовательно, начиная с первой расстановки, выполнять этап моделирования БШС. Как только будет получена расстановка, удовлетворяющая всем требованиям этапа моделирования, задача нахождения оптимальной топологии среди всех топологий будет решена. Для такой топологии выполняются все требования к показателям, исследуемые на этапе моделирования сети. Действительно, для всех предыдущих расстановок эти условия не выполняются, а все последующие расстановки в последовательности  $\Gamma$  не могут быть лучше по критерию  $f(P)$ .

## Построение последовательности размещений на основании МВиГ

С помощью МВиГ, описанного в параграфе 2.3.3 можно записать последовательность расстановок станций. Заменяя неравенство (2.24) на нестрогое и записывая все рекорды, полученные в процессе работы алгоритма, можно получить последовательность расстановок, где каждая расстановка не хуже предыдущей и не лучше последующей. Для получения последовательности  $\Gamma$  достаточно «перевернуть» полученную последовательность, где первый элемент станет последним.

Недостатком такой процедуры является то, что для исследования на этапе моделирования будут отобраны только расстановки не хуже первого рекорда и среди них может не оказаться расстановки, удовлетворяющей критериям моделирования.

Для расширения множества  $\Gamma$  необходимо чтобы в результате решения **задачи 1** получалось не только оптимальное решение, но и все решения не хуже оптимального на величину  $d$ . Для решения такого варианта задачи достаточно неравенство (2.24) в алгоритме МВиГ заменить следующим неравенством

$$f(P) \leq f(\hat{P}) + d, \quad (2.25)$$

где  $d = \varepsilon \cdot L > 0$ ,  $\varepsilon$  – заданное отклонение в процентах, и запоминать все рекорды, полученные в процессе решения задачи.

На основании неравенства (2.25) можно построить итерационную процедуру, увеличивая величину  $d$ , если при данном ее значении допустимого решения на этапе моделирования не найдено. В **приложении Г** представлены результаты численного примера.

## 2.4 Сравнительная оценка полученных моделей

Для решения задачи оптимального размещения базовых станций вдоль линейной территории были представлены математическая модель целочисленного линейного программирования и комбинаторная модель в экстремальной

форме, для которой представлен специальный алгоритм на основе метода ветвей и границ, учитывающий специфику задачи – размещение вдоль линейной территории и обеспечения связи между всеми размещенными станциями.

В обеих моделях предполагается, что из заданного множества БС может быть размещено любое количество станций, удовлетворяющих условиям задачи. Через систему размещенных БС необходимо обеспечить связь между левым и правым плюзом. Для задачи ЦЛП размещение должно удовлетворять бюджетному ограничению. И для задачи в комбинаторной форме задача должна удовлетворять бюджетному ограничению и ограничению на время межконцевой задержки сети.

Для того чтобы сравнить полученные модели, рассмотрим частный случай задачи максимизации покрытия с размещением всех имеющихся БС. Опустим бюджетное ограничение для обеих задач и для комбинаторной модели также ограничение на время задержки в сети. Вместо данных ограничений, добавим условие размещения всех имеющихся  $m$  станций. Такая постановка позволит зафиксировать множество вариантов размещения, необязательно только допустимых. Общее количество  $\gamma$  вариантов расстановки  $m$  станций по  $n$  точкам размещения равна

$$\gamma = C_n^m \cdot m! . \quad (2.26)$$

Для задачи ЦЛП условие размещения  $m$  станций будет выглядеть следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} = m. \quad (2.27)$$

Для задачи в комбинаторной форме данное условие гарантируется, когда число пар в наборе  $P = \{(a_i, s_j), a_i \in A, i \neq 0, i \neq n+1; s_j \in S\}$  равна мощности множества размещения  $|S|$ .

Так как теперь количество размещаемых мест зафиксировано, в уравнении (2.21) для оценки "недопокрытия" справа  $w_2(G_v)$  вместо труднорешаемой задачи 2 воспользуемся уравнением:

$$w_2(G_v) = \max\{(l_{n+1} - l_k) - (r_t + \sum_{j \in S_v} 2 \cdot r_j), 0\}, \quad (2.28)$$



где  $S_\beta$  подмножества еще не размещенных станций,  $r_t$  – радиус покрытия размещаемой станции  $S_t$ ,  $l_k$  – координата точки размещения  $a_k$ .

**Пример решения комбинаторной задачи.** В приложении В представлен пример решения задачи размещения двух БС по трем точкам методом полного перебора и методом ветвей и границ. На рисунке 2.9 представлено дерево полного перебора. Общее количество размещения двух станций по трем точкам равно  $\gamma = 6$  (формула (2.26)). Каждый узел пронумерован согласно правилам *процедуры 1*. В закрытых вершинах (листьях), либо получена расстановка БС, либо на данном множестве  $G_v$  набор фиксированных и запрещенных переменных  $\pi_{ij}$  нет допустимого размещения (обозначено символом  $\emptyset$ ).

Расстановка, $P$	Недопокрытие, $f(P)$	Номер узла дерева, $v$
$P_1$	11	3
$P_2$	<b>1</b>	<b>5</b>
$P_3$	11	9
$P_4$	11	11
$P_5$	6	15
$P_6$	21	19

Таблица 4 — Решение полным перебором

В таблице 4 представлены полученные в ходе решения расстановки. Все расстановки пронумерованы в соответствии с порядком их нахождения. Оптимальным решением  $P^*$  с минимальным значением функции (2.17) является допустимая расстановка  $P_2$ . Общее количество пройденных узлов составило 24.

**Решение с помощью МВиГ.** На рисунке 2.10 представлено дерево решения задачи методом ветвей и границ. Теперь закрытие вершины осуществляется в случаях:

- получен новый рекорд размещения;
- оценка недопокрытия больше рекорда, полученного на предыдущих итерациях;
- нет допустимого размещения БС.

В таблице 5 представлено решение МВиГ. Оптимальное решение получено на 5-ом узле дерева с недопокрытием  $f(P) = 1$ . В ходе движения по дереву

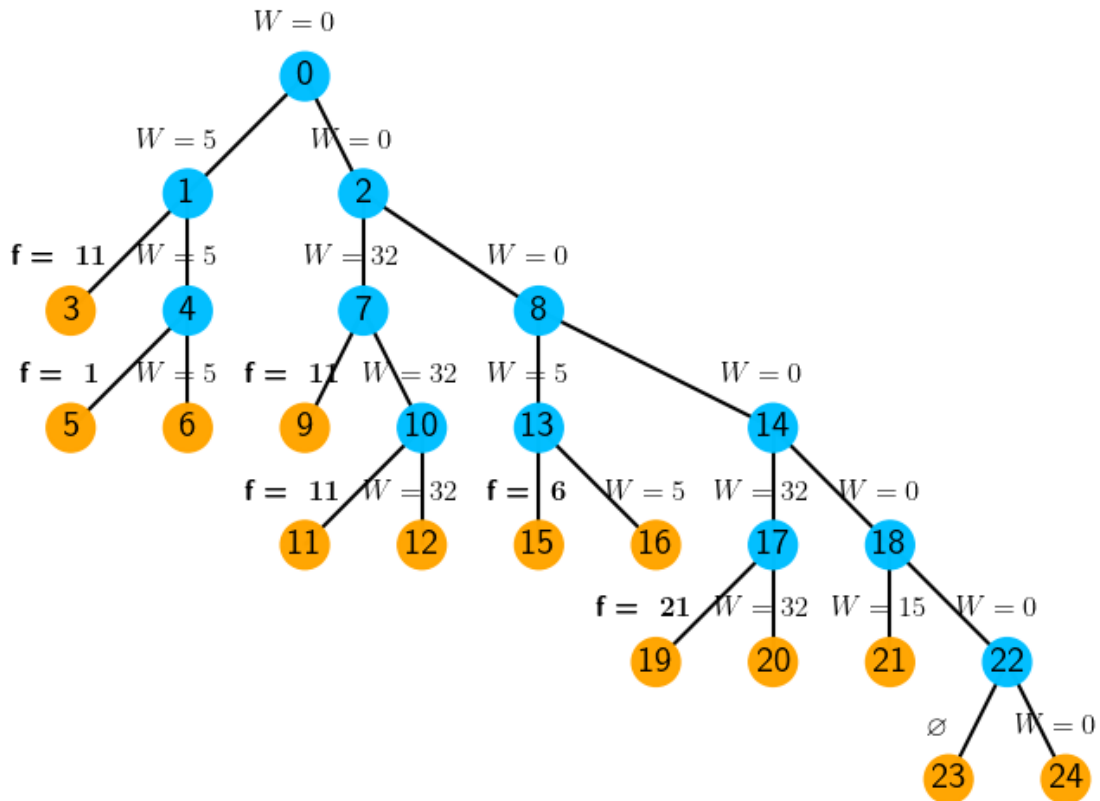


Рисунок 2.9 — Решение задачи методом полного перебора

поиска, последующие оценки недопокрытия были больше полученного рекорда и данные вершины закрывались. В итоге общее количество узлов составило 16.

Оценка недопокрытия, $W(G_v)$	Недопокрытие, $f(P)$	Номер узла дерева, $v$
11	Рекорд	3
1	<b>Рекорд</b>	5
32		7
5		9
32		11
15		13

Таблица 5 — Решение полным перебором

**Сравнение модели ЦЛП и комбинаторной модели** Теперь перейдем к решению задач большей размерности. Для различных случаев числа мест размещения  $m$  и числа станций  $n$  сравним результаты решения задачи представленными моделями. Оценка сравнения с помощью времени счета необъективна, так как алгоритм МВиГ и комбинаторная модель написаны на интерпретируемом языке Python. Коммерческие продукты представляют быстрые и

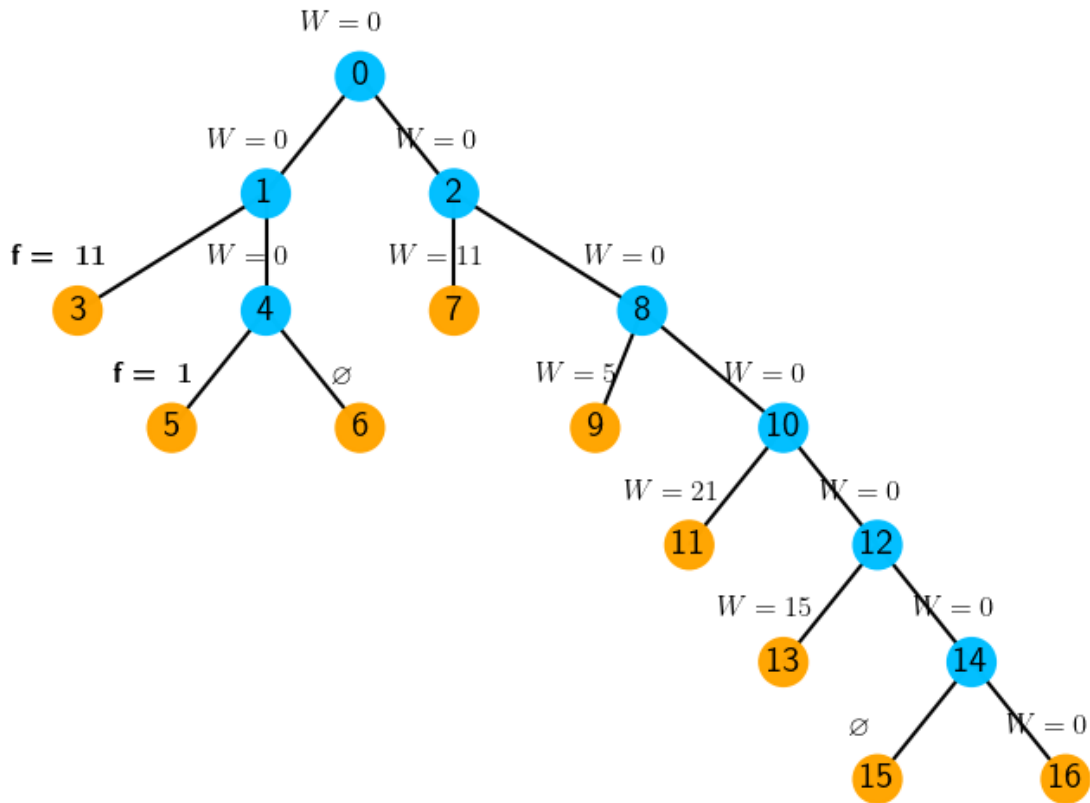


Рисунок 2.10 — Решение задачи методом ветвей и границ

качественные инструменты. Написание производительного кода для предложенных в данной диссертации моделей является отдельной не простой задачей, выходящей за рамки данного исследования. Коммерческие продукты решающие задачи ЦЛП основаны на алгоритме, предложенный Алисой Лэнд и Элисон Дойг [114], в котором процедура поиска целочисленного решения также использует МВиГ. Поэтому для сравнения моделей будет использована характеристика – число просмотренных вершин в ходе поиска оптимального решения. Для сравнения также будут представлены решения задачи в комбинаторной форме методом полного перебора (МПП).

Для каждого набора станций и мест размещения было рассчитано по 10 примеров с различными параметрами БС. В таблице приводятся усредненные показатели числа просмотренных вершин дерева поиска по каждому 10 примерам. Результаты решения задачи максимизации покрытия влияют не только от количества точек размещения  $n$ , но также от их координат. Примем, что для каждой размерности для всех 10 примеров координаты фиксированные для всех моделей: МПП, МВиГ и ЦЛП.

Жирным цветом в колонках пройденных узлов в ходе движения по дереву поиска МПП, МВиГ и ЦЛП выделены минимальные значения для фиксиро-

Таблица 6 — Результаты численного решения.

Число точек размещения, $n$	Число станций, $m$	Количество вариантов размещения, $\gamma$	Количество пройденных узлов дерева поиска, $\nu$		
			МПП	МВиГ	ЦЛП
7	4	840	3122	360	<b>275</b>
7	5	2 520	16 114	560	<b>45</b>
7	6	5 040	59 564	364	<b>19</b>
8	4	1 680	4954	434	<b>189</b>
8	5	6 720	6720	<b>852</b>	878
8	6	20 160	15 9170	592	<b>185</b>
9	4	3 024	9 882	<b>458</b>	5511
9	5	15 120	58 190	<b>768</b>	1236
9	6	60 480	366 512	<b>720</b>	13294
10	4	5 040	14 868	<b>800</b>	6243
10	5	30 240	113 932	<b>414</b>	8043
10	6	151 200	828 952	<b>40 872</b>	71587
11	4	7 920	23 482	<b>354</b>	15538
11	5	55 440	204 894	<b>9 138</b>	74440
11	6	332 640	1 592 500	<b>88 002</b>	413 767

ванных значений  $n$  и  $m$  (размерностей задачи). Как видно из результатов сравнения, при увеличении размерности задачи разработанный алгоритм метода ветвей и границ для комбинаторной модели показывает лучшие результаты по сравнению с математической моделью ЦЛП.

## 2.5 Выводы

Данная глава посвящена задачам оптимального размещения базовых станций в рамках комплексного проектирования беспроводных сетей связи. Спецификой моделей оптимизации является размещение станций для максимального телекоммуникационного покрытия вдоль протяженного объекта.

В главе были представлены следующие результаты:

1. Представлена актуальность БШС с линейной топологией. Примерами таких сетей на месторождениях могут являться сети вдоль протяженных магистральных трубопроводов для организации связи как для сбора данных в составе АСУ ТП, а также организации высокоскоростной телекоммуникационной сети для сбора мультимедийного трафика с беспроводных камер видеонаблюдения. В рамках цифровизации месторождений набирает свой интерес задача внедрения современных высокоскоростных локальных сетей для мобильных обходчиков. Еще одним примером использования сетей с линейной топологии является организация телекоммуникационного покрытия вдоль промышленных автодорог для обеспечения безопасности обслуживающего персонала.
2. Представлена математическая модель задачи размещения станций в виде ЦЛП. Целевая функция модели представляет собой суммарное телекоммуникационное покрытие участка, которое необходимо максимизировать. Также представлены ограничения равенства и неравенства модели, удовлетворяющие требованиям размещения – обеспечение любой БС телекоммуникационной связью со шлюзами на концах участка через системы размещения станций и бюджетному ограничению стоимости размещения.
3. Представлена математическая модель задачи размещения станций в виде экстремальной задачи в комбинаторной форме. Такой подход позволяет учитывать специфику конкретной задачи, что позволяет быстрее найти оптимальное решение. В такой постановке, в ходе поиска оптимального решения возможно проверять условие ограничения на время межконцевой задержки в сети, которое нелинейную зависимость от количества каналов в сети.
4. Для решения комбинаторной модели задачи размещения предложен алгоритм типа ветвей и границ. Описана процедура построения бинарного дерева поиска, учитывающая специфику размещения множества станций  $S$  на множества  $A$  возможных точек размещения. Представлены различные модели оценки недопокрытия, необходимые для получения рекордов и возможности закрытия вершин дерева, для которых множество допустимых размещений пусто. Сравнительная оценка для частного случая размещения, когда необходимо разместить все имеющиеся станции показало, что с увеличением размерности зада-

чи количество пройденных узлов комбинаторной модели существенно меньше чем в модели ЦЛП.

5. После нахождения оптимального решения на этапе синтеза топологии при проектировании БШС, полученное размещение попадает на этап математического моделирования, включающие в себя оценку различных характеристик сети, работу протокола, расчет надежности и т.д. В том случае, если проверка требований, предъявляемые к сети на этапе моделирования, проходит неуспешно, данное размещение становится невозможным. Для того чтобы было возможно проверять не только оптимальное решение, но и размещения не хуже оптимального на заданное отклонение, было предложена процедура нахождения последовательности топологий сети для итерационной процедуры комплексного проектирования БШС. Процедура нахождения последовательности лучших решений задачи выбора и размещения базовых станций основана на разработанном алгоритме МВиГ.

Результаты исследования, представленные в этой главе, были опубликованы в работах [123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130]. [Добавить астраханскую.](#)

### **Глава 3. Размещение базовых станций БШС для обслуживания множества рассредоточенных объектов**

В данной главе будут представлены модели задачи синтеза топологии при развертывании БШС на плоскости для телекоммуникационного покрытия множества рассредоточенных объектов.

#### **3.1 Актуальность внедрения БШС для обслуживания рассредоточенных объектов**

Построение современной инфраструктуры передачи информации для обслуживания множества объектов промышленного или гражданского назначения, рассредоточенных на некоторой территории, является актуальной задачей при создании единой систем контроля и управления указанными объектами. Создание такой инфраструктуры позволяет обеспечить оперативный контроль и управление объектами путем передачи необходимой информации с сенсоров и датчиков объектов в соответствующий внешнее приемное устройство. Для создания подобной инфраструктуры эффективно используются сети широкополосной беспроводной связи, необходимым этапом проектирования которых является решение задачи определения мест размещения базовых станций [72].

В работах [131, 132, 133] представлены задачи максимального телекоммуникационного покрытия рассредоточенных объектов с использованием БПЛА.

В работе [102] предложен новый протокол сенсорной сети на базе IEEE 802.11 для мониторинга случаев загрязнений углеводородами. В работе [134] исследуются различные протоколы сенсорных сетей для мониторинга над газораспределительной сети. Вся сеть разделена на более мелкие, управляемые сегменты, каждый из которых имеет свою базовую станцию для отправки пакетов в центральный пункт управления. В [135] решают задачу размещения мощностей с помощью генетического алгоритма. Авторы занимаются развертыванием устройств распределенных вычислений, серверов, вблизи устройств конечных пользователей. Связующим звеном между конечным пользователем и сервером являются базовые станции.

В настоящей работе строятся и исследуются две математические модели задач размещения базовых станций, которые применимы на этапе синтеза топологии сети в процессе комплексного проектирования мультимедийных сетей. Предлагается модель для проверки существования допустимого решения при условии выполнении технологических ограничений для предложенной на предыдущих этапах схемы расстановки станций и модель для оптимизационной задачи. Оптимизационная задача состоит в выборе множества станций из заданного набора типов станций с различными характеристиками и их расстановки на избыточном множестве возможных мест размещения. В поставленной задаче рассматривается задача обслуживания объектов, расположение которых задано их координатами на плоскости. Особенностью такой задачи в широком классе задач оптимального размещения мощностей является наличие условия на наличие информационной связи между станциями и внешним приемным устройством (шлюзом), выполнение которого гарантирует поступление всей информации с контролируемых объектов в центр управления.

Предложена задача оптимального размещения базовых станций, принадлежащая к широкому классу задач размещения мощностей (Location Allocation Problem). В рамках широкого класса задач размещения мощностей в данных задачах размещения присутствуют специфика на связь между всеми узлами сети.

### **3.2 Математическая модель задачи проверки допустимого решения при заданных местах размещения станций.**

Модели задачи оптимизации, которые исследуются в диссертации, предлагается использовать при проектировании БШС на этапе синтеза топологии. После ввода в эксплуатацию сети часто требуется модернизировать, так как любое производство непрерывно развивается. Со временем, телекоммуникационную сеть требует усовершенствование своей инфраструктуры: масштабирование с целью увеличения покрытия сети, демонтаж оборудования, смена протоколов и т.д. Любое изменение приводит к тому, что необходимо провести качество обслуживания сети QoS, надежность и в целом проверить возможно ли обеспечить телекоммуникационное покрытие будущей сети. В данном параграфе будет представлена задача оптимизации при уже заданных размещения базовых



станций. В такой постановке возможность сбора такой информации с множества рассредоточенных объектов и поиска кратчайшего пути передачи пакетов от множества объектов к шлюзу через множества размещенных станций.

### 3.2.1 Постановка задачи

Задано множество узлов БШС рассредоточенных на плоскости. Все множество можно разбить на две категории:

- объекты, с которых необходимо собирать информацию, являются оконечными узлами сети;
- станции для сбора и передачи на шлюз данных с объектов, являются промежуточными узлами сети;

Под объектом понимается любое устройство с антенной для передачи пакетов в канале. К ним можно отнести измерительные устройства, шлюзы сенсорных сетей и т.д. В частности, объектами могут быть любые стационарные абонентские устройства сети 802.11n.

Задано множество вершин  $A = \{a_i\}, i = \overline{0, n}$  на некоторой территории. Каждая вершина  $a_i$  имеет координаты  $\{x_i, y_i\}$ .

Множество  $A$  состоит из двух подмножеств:

- $A_1$  — множество вершин, соответствующее объектам; с которых необходимо собирать информацию.
- $A_2$  — множество мест, где размещены базовые станции. В дальнейшем вершину из  $A_2$  будем идентифицировать не только как место размещения, но и как соответствующую станцию.

С вершин  $A_1$  необходимо собирать информацию. Каждой вершине  $a_i \in A_1$  приписана величина  $v_i$  — максимальный объем информации в единицу времени, который генерирует расположенный на этой вершине объект. В дальнейшем будем считать, что каждая вершина из  $A_1$  является, непосредственно, объектом. В дальнейшем вершины  $a_i \in A_2$  будем идентифицировать не только как место размещения, но и как соответствующую станцию.

По определению:

$$A_1 \cup A_2 = \emptyset;$$

$$A_1 \cap A_2 = A.$$

Все вершины пронумерованы так, что:

$$A_1 = \{a_i\}, i = \overline{1, n_1};$$

$$A_2 = \{a_i\}, i = \overline{n_1 + 1, n}.$$

Каждой станции, размещенной на вершине множества  $A_2$  приписаны три параметра  $s_i = \{\{r_{ij}\}, \{R_{ij}\}, \vartheta_i\}$ , где:

- $\{r_{ij}\}$  – множество радиусов телекоммуникационного покрытия станции. Параметр  $r_{ij}$  характеризует дальность связи между станцией размещенной в вершине  $a_i, a_i \in A_2$  и объектом в вершине  $a_j, a_j \in A_1$ ;
- $\{R_{ij}\}$  – множество радиусов связи станции. Параметр  $R_{ij}$  характеризует дальность связи между станциями  $s_i$  и  $s_j, i = \overline{n_1 + 1, n}, j = \overline{n_1 + 1, n}, i \neq j$ ;
- $\vartheta_i$  – объем информации в единицу времени, который может быть получен от объектов, обслуживаемых станцией.

Также станция специального вида – шлюз  $s_0 = \{\{R_{0j}\}, \vartheta_0\}$ , размещенная на вершине  $a_0$  с координатами  $\{x_0, y_0\}$ . Данная станция не имеет телекоммуникационного покрытия и служит для сбора всей информации в сети. По условию задачи величина  $\vartheta_0$  больше суммы величин  $\vartheta_i$  всех вершин множества  $A_1$ .

Задано условие, со шлюзом и между собой могут быть связаны только вершины множества  $A_2$ , то есть только станции.

Требуется проверить, что при заданных наборе и размещении станций на множества  $A_2$  вся имеющаяся информация с объектов множества  $A_1$  может быть собрана и передана системой станций до шлюза  $s_0$ .

### 3.2.2 Модель линейного программирования

Перед тем как приступить к задаче оптимизации, необходимо подготовить правила составления графа сети, в соответствии с постановкой задачи.

## Построение матрицы смежности

Составим граф  $H = \{A, E\}$  для возможного потока информации между вершинами множества  $A = A_1 \cup A_2$ . По определению, каждой вершине  $a_i \in A_2$  соответствует станция  $s_i$  со своим набором параметров  $s_i = \{\{r_{ij}\}, \{R_{ij}\}, \vartheta_i\}$ .

Матрица смежности  $E = \{e_{ij}\}$  графа  $H$  строится по следующим правилам:

- $e_{ij} = 1$ , если расстояние между  $i$ -ым объектом вершины  $a_i \in A_1$  и  $j$ -ой станцией, размещенной на вершине  $a_j \in A_2$  не более радиуса покрытия для станции соответствующего этой вершине типа;
- $e_{ij} = 1$ , если расстояние между  $i$ -ой станцией на вершине  $a_i \in A_2$  и  $j$ -ой станцией на вершине  $a_j \in A_2$ , не более минимального из радиусов связей этих станций;
- $e_{i0} = 1$ , если расстояние от вершины  $a_i \in A_2$  до шлюза не более минимального из радиусов связей станции и шлюза;
- $e_{ij} = 0$ , во всех остальных случаях.

## Формулировка в виде задачи линейного программирования

С помощью полученной матрицы смежности, необходимо подготовить условия ограничения для величины потока в каналах.

Введем переменные  $x_{ij} \geq 0$ , определяющее количество информации, передаваемой в единицу времени по дуге  $e_{ij}$  графа  $H$ .

Каждый объект множества  $A_1$  генерирует пакеты объемом  $\vartheta_i$  в единицу времени. Для канала  $e_{ij}, i = \overline{1, n_1}, j = \overline{n_1 + 1, n}$  величина потока равна весу  $\vartheta_i$ :

$$\sum_{a_j \in \Gamma^+(a_i)} x_{ij} = \vartheta_i, \forall a_i, i = \overline{1, n_1}, \quad (3.1)$$

где  $\Gamma^+(a_i)$  – множество вершин на графе  $H$ , в которые входят дуги, исходящие из вершины  $a_i$ .

Для каждой вершины  $a_i, a_i \in A_2$  необходимо обеспечить выполнения условия баланса между потоком входящем в эту вершину от объектов множества

$A_1$ , а также других станций множества  $A_2$  и выходящего потока из данной вершины.

Сумма входящих и выходящих потоков для любой вершины  $a_i$  множества  $A_2$  должна быть равна нулю:

$$\sum_{a_j \in \Gamma_1^-(a_i)} x_{ji} + \sum_{a_j \in \Gamma_2^-(a_i)} x_{ji} - \sum_{a_j \in \Gamma_2^+(a_i)} x_{ij} = 0, \forall a_i \in A_2. \quad (3.2)$$

Здесь множество  $\Gamma_1^-(a_i)$  – вершины множества  $A_1$ , из которых выходят дуги, входящие в вершину  $a_i$ ,  $\Gamma_2^-(a_i)$  – вершины множества  $A_2$ , из которых выходят дуги, входящие в вершину  $a_i$ ,  $\Gamma_2^+(a_i)$  – вершины множества  $A_2$ , в которые входят дуги, исходящие из вершины  $a_i$ .

Необходимо чтобы на выходе сети собирался весь трафик. Через систему станций на вершинах  $a_j, a_j \in A_2$ , вся информация от объектов на вершинах  $a_i, a_i \in A_1$  поступала на шлюз  $s_0$ :

$$\sum_{a_j \in \Gamma_2^-(a_0)} x_{j0} = \sum_{a_i \in A_1} \vartheta_i; \quad (3.3)$$

Поток объема информации в каналах ограничен сверху. В случае каналов передачи от объектов на вершинах  $A_1$  до станций на вершинах  $A_2$  поток ограничен объемом сгенерированного трафика на объекте  $\vartheta_i$ :

$$x_{ij} \leq \vartheta_i, \forall a_i \in A_1, a_j \in A_2. \quad (3.4)$$

Объем информации входящий на станцию на вершине  $a_j, a_j \in A_2$  ограничен пропускной способностью  $\vartheta_j$  станции :

$$\sum_{a_i \in \Gamma^-(a_j)} x_{ij} \leq \vartheta_j, \forall a_j \in A_2. \quad (3.5)$$

Если к системе уравнений ограничений (3.1) — (3.5) добавить целевую функцию

$$\sum_{(a_i, a_j) \in A} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (3.6)$$

где  $c_{ij}$  – стоимость потока в ребре, тогда данная модель является задачей о потоке минимальной стоимости. Задача о потоке минимальной стоимости играет одну из основных ролей в области оптимизации сетей [136]. Она используется

для нахождения минимальной стоимости потока с множества узлов поставок до множества узлов потребителей в направленном графе с ограничениями на пропускную способность и целевой функцией стоимости, зависящей от пути потока в графе. Задача имеет широкий спектр приложений в различных областях: задачах транспортировки, расписания, ресурсного планирования, телекоммуникации, проектировании сетей и маршрутизации [136, 137, 138].

С момента публикации Данцигом симплекс-метода [110], изначально разработанного для задач транспортировки, были получены много новых усовершенствованные моделей, большой обзор метод представлен автором в [136]. Одним из популярных методов решения является сетевой симплекс-метод, который представляет собой версию хорошо известного симплекс метода ЛП, использующий графовое представление задачи о потоке минимальной стоимости. Метод симплекс-типа применяется для решения задач потока минимальной стоимости. Сетевой симплекс алгоритм с наилучшей стоимостью был разработан Орлином [139] в сочетании с древовидной структурой данных Тарьяна [140]. Алгоритм симплекс-метода основана на концепции нахождения минимального остовного дерева. Более подробно алгоритм нахождения решения в виде остовного дерева представлен в работах [137, 136, 141, 138].

Для нахождения допустимого решения задачи (3.1) — (3.6) (или доказательства, что допустимого решения не существует) можно найти возможный граф передачи потока информации от объектов до шлюза, если ввести единичные стоимости  $c_{ij}$  передачи потока  $w_{ij}$  по ребру  $e_{ij}$  задача (3.1) — (3.6) является задачей поиска кратчайшего пути от передачи информации к шлюзу.

проверить эту задачу

### Пример решения задачи ЛП

На рисунке 3.1 представлен пример заданного размещения базовых станций. Задано множество рассредоточенных объектов  $A_1, |A_1| = 5$ . Задано множество базовых станций и точки их размещения  $A_2, |A_2| = 3$ . Координаты множества  $A, A = A_1 \cup A_2$  представлены в таблице 7 и мощности узлов сети представлены в таблице 8. Необходимо проверить, возможно ли при данном

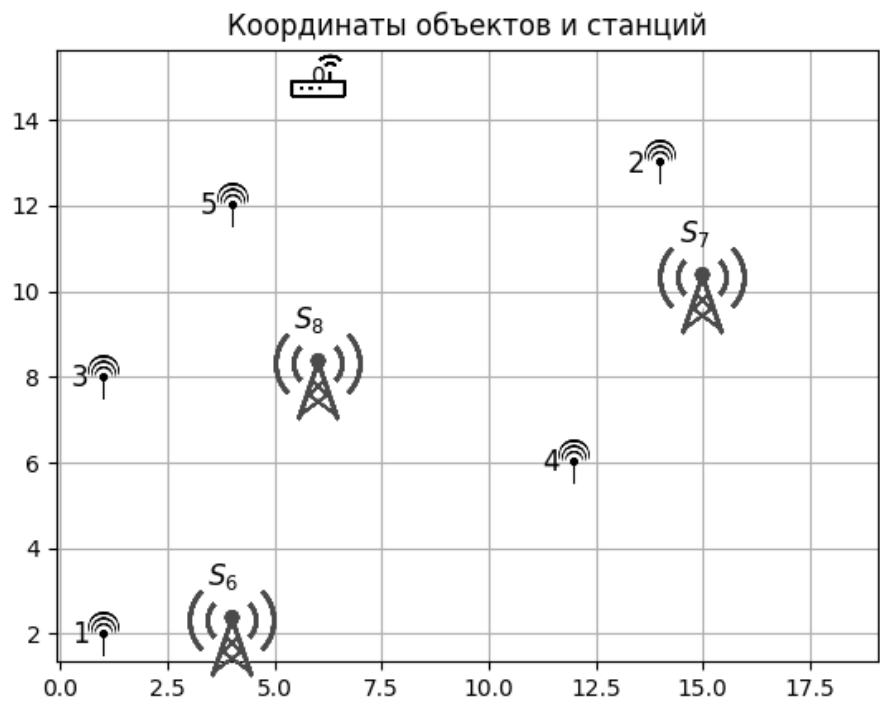


Рисунок 3.1 — Заданное размещение.

наборе базовых станций собрать всю информации с объектов и передать ее на шлюз  $s_0$ , размещенной в точке  $a_0$ .

$a_0$	(6, 15)	Координаты шлюза
$a_1$	(1, 2)	Координаты объектов
$a_2$	(14, 13)	
$a_3$	(1, 8)	
$a_4$	(12, 6)	
$a_5$	(4, 12)	
$a_6$	(4, 2)	Координаты размещения станций
$a_7$	(15, 10)	
$a_8$	(6, 8)	

Таблица 7 — Координаты вершин

$\vartheta_0$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_4$	$\vartheta_5$	$\vartheta_6$	$\vartheta_7$	$\vartheta_8$
$\infty$	11	12	13	14	15	110	120	130

Таблица 8 — Мощности узлов графа

По паспортным характеристиками оборудования и уравнениями представленными в разделе 1.4 были получены параметры станции: радиус телекоммуникационного покрытия  $r_{ij}$  и радиус связи между станциями  $R_{ij}$ . С помощью этих параметров была получена матрица смежности  $E$  граф потока  $H$  (таблица 9).

	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
$a_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_1$	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$a_2$	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$a_3$	0	0	0	0	0	0	1	0	1
$a_4$	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$a_5$	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$a_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$a_7$	1	0	0	0	0	0	0	0	1
$a_8$	1	0	0	0	0	0	1	1	0

Таблица 9 — Матрица смежности графа потока  $H$

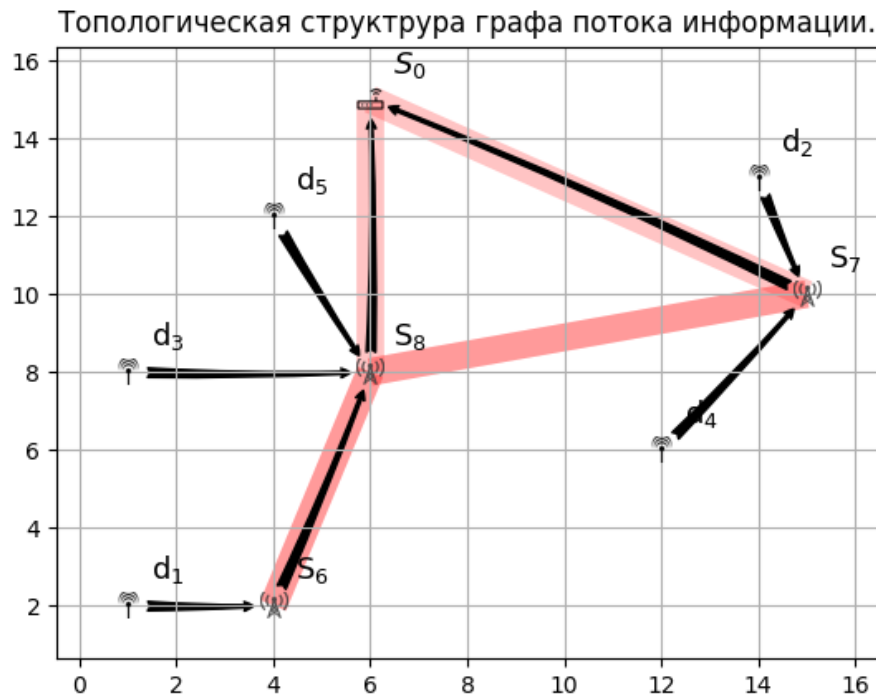


Рисунок 3.2 — Допустимое решение.

Теперь можно решить задачу ЛП (3.1) — (3.6). На рисунке 3.2 представлен полученный граф допустимого решения. Жирными линиями представлена те-

телекоммуникационная связь между объектами и станциями. Стрелками указан полученный граф потока информации от объектов до шлюза. Математическая модель была подготовлена на языке Python, задачи ЛП была рассчитана с использованием библиотеки с открытым исходным кодом NetworkX. [проверить текст](#)

### 3.3 Математическая модель оптимальной задачи выбора набора размещаемых станций и определения мест их размещения

В данном параграфе будет представлена оптимизационная задача размещения типов базовых станций БШС для обеспечения телекоммуникационного покрытия рассредоточенных объектов. Задача имеет ту же постановку как для модели ЛП, теперь только множество вершин  $A_2$  задаются свободными. Необходимо разместить базовые станции из заданного множества типов станция для развертывания БШС на плоскости.

#### 3.3.1 Постановка задачи.

Задано множество вершин  $A = \{a_i\}$ ,  $i = \overline{0, n}$  на некоторой территории. Каждая вершина  $a_i$  имеет координаты  $\{x_i, y_i\}$ . Множество  $A$  состоит из двух подмножеств:

- $A_1$  – множество вершин, с которых необходимо собирать информацию;
- $A_2$  – множество возможных мест размещения базовых станций.

Каждой вершине  $a_i$  приписана величина  $v_i$  – максимальный объем информации, снимаемой с объекта, расположенного на этой вершине.

По определению

$$A_1 \cup A_2 = A;$$

$$A_1 \cap A_2 = \emptyset.$$



Все вершины пронумерованы так, что:

$$A_1 = \{a_i\}, i = \overline{1, n_1};$$

$$A_2 = \{a_i\}, i = \overline{n_1 + 1, n}.$$

Задано множество типов базовых станций  $S = \{s_j\}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , которые необходимо разместить на множестве точек  $A_2$ .

Каждому типу станции приписаны четыре параметра  $s_j = \{\{r_{ji}\}, \{R_{ji}\}, \vartheta_j, c_j\}$ , где:

- $\{r_{ji}\}$  – множество радиусов покрытия. Параметр  $r_{ji}$  характеризует телекоммуникационную связь для обеспечения соединения между  $j$ -ой станцией и объектом, размещенный в координате  $a_i$ ,  $j = \overline{n_1 + 1, n}$ ,  $i = \overline{1, n_1}$ ;
- $\{R_{ji}\}$  – радиус связи между  $j$ -ой и  $i$ -ой станциями. Параметр характеризует максимальную дальность связи  $j$ -ой станции, обеспечивающее заданное качество соединения с  $i$ -ой станцией,  $j = \overline{n_1 + 1, n}$ ,  $i = \overline{n_1 + 1, n}$ ,  $j \neq i$ ;
- $\vartheta_j$  – пропускная способность;
- $c_j$  – стоимость.

Задана станция специального вида (шлюз)  $s_0 = \{\{R_{0j}\}, \vartheta_0\}$  с координатами  $\{x_0, y_0\}$ . Шлюз уже имеет свое расположение, стоимость размещения  $c_0 = 0$ . Параметр шлюза  $\{R_{0j}\}$ ,  $j = \overline{n_1 + 1, n}$  радиус связи необходим для соединения с размещаемыми станциями. Полагается, что шлюз не имеет соединения напрямую с объектами. По шлюзу  $s_0$  позволяет собрать данные со всех объектов, размещенных в точках  $a_i$ ,  $i = \overline{1, n_1}$ , в данной постановке задачи пропускная способность шлюза равна  $\vartheta_0 = \infty$ .

Множества вершин  $A_1$  будем идентифицировать как размещенные на них объекты. Множества вершин  $A_2$ , на которых будут размещены станции, будем рассматривать, непосредственно, как сами базовые станции.

Требуется разместить станции таким образом, чтобы вся информация с объектов на вершинах множества  $A_1$  могла быть собрана и передана системой БС, размещенных на выбранных в результате решения задачи в вершинах множества  $A_2$ , до шлюза  $s_0$  и итоговая стоимость размещения была бы минимальной.

Задано условие, что информация с вершин множества  $A_1$  может передаваться непосредственно только на вершины множества  $A_2$ , а со шлюзом и между собой могут быть связаны только вершины множества  $A_2$ .

### 3.3.2 Модель частично целочисленного линейного программирования

На этапе обследования местности проектировании БШС были отобраны точки, куда возможно расставить БС. Необходимо отметить, что в данной постановке на этапе синтеза топологии, рассматривается более общий случай, когда размещаются не множества имеющихся базовый станций, а выбираются их типы. Так результатом данного этапа будут набор типов станций и их места размещения.

#### Построение матрицы смежности

На каждой вершине  $a_i, i = \overline{n_1 + 1, n}$  может разместиться одна из  $m$ -типов БС. Вместо каждой такой вершины  $a_i$  введем  $m$  вершин с координатами вершины  $\{x_i, y_i\}$ , и различными параметрами, соответствующими различным типам станций. Обозначим такую группу вершин, записанных с одинаковыми координатами вместо вершины  $a_i$ , как  $D_i$ . Каждой вершине из  $D_i$  поставим в соответствие набор параметров только одного типа станции из  $S$ , т.е. на данной вершине может стоять либо станция приписанного типа либо никакая. Обозначим расширенное множество вершин  $A_2$  через  $A_2D = \{a_i\}, i = \overline{n_1 + 1, n \cdot m}$ .

Составим граф  $H = \{AD, E\}$ , описывающий сеть для передачи потока информации между вершинами расширенного множества  $AD = A_1 \cup A_2D$  и шлюзом  $s_0$  в вершине  $a_0$ . Матрица смежности  $E = \{e_{ij}\}$  графа  $H$ , где каждое ребро  $e_{ij}$  определяет возможность передачи информации между вершинами, строится по следующим правилам. **проверить индексы для ребра между устройством и станцией.**

- $e_{ij} = 1$ , если расстояние между  $i$ -ой вершиной ( $a_i \in A_1$ ) и  $j$ -ой вершиной ( $a_j \in A_2D$ ) не более радиуса покрытия  $r_{ji}$ , приписанного этой вершине станции;
- $e_{ij} = 1$ , если вершины  $a_i$  и  $a_j$  принадлежат разным множествам  $D_i$  и  $D_j$  и расстояние между ними не больше минимального из радиусов связи  $\min\{R_{ij}, R_{ji}\}$ , приписанных данным вершинам станциям;
- $e_{i0} = 1$  ( $a_i \in A_2D$ ), если расстояние от вершины до шлюза не больше минимального радиуса связей  $\min\{R_{i0}, R_{0i}\}$ ;
- $e_{ij} = 0$ , во всех остальных случаях.

### Формулировка в виде ЧЦЛП

С помощью полученного графа потока, опишем ограничения для задачи частично целочисленного линейного программирования (ЧЦЛП).

Введем булевы переменные  $z_{ij} = \{0, 1\}$ ,  $i = \overline{1, n_1}, j = \overline{n_1 + 1, n \cdot m}$ , определяющее наличие соединения между объектом в точке  $a_i, a_i \in A_1$  и станцией, размещенной в точке  $a_j, a_j \in A_2D$ .

Все объекты, размещенные на вершинах  $A_1$ , оснащены антеннами для передачи сигнала в беспроводной среде. Каждая объект одновременно может поддерживать соединение только с одной БС. Данное условие можно записать в виде ограничения равенства (3.7)

$$\sum_{a_j \in \Gamma_2^+(a_i)} z_{ij} = 1, \forall a_i, i = \overline{1, n_1}, \quad (3.7)$$

где  $\Gamma^+(a_i)$  – множество вершин на графе  $H$ , в которые входят дуги, исходящие из вершины  $a_i$ .

Введем потоковые переменные  $x_{ij} \in \mathbb{R}^+$ , определяющее количество информации, передаваемой в единицу времени по дуге  $e_{ij}$  графа  $H$ .

Потоки информации объектов с вершин  $A_1$  должны поступать на станции. Также на станции может поступать потоки с других станций. Необходимо, чтобы сумма входящих и выходящих потоков для любой  $j$ -ой вершины множества

$A_2D$  был равен нулю (3.8) **проверить индексы**

$$\sum_{a_i \in \Gamma_1^-(a_j)} z_{ij} \cdot \vartheta_i + \sum_{a_i \in \Gamma_2^-(a_j)} x_{ij} - \sum_{a_i \in \Gamma_2^+(a_j)} x_{ji} = 0, \forall a_j \in A_2. \quad (3.8)$$

Здесь множество  $\Gamma_1^-(a_i)$  – вершины множества  $A_1$ , из которых выходят дуги, входящие в вершину  $a_i$ ,  $\Gamma_2^-(a_i)$  – вершины множества  $A_2D$ , из которых выходят дуги, входящие в вершину  $a_i$ ,  $\Gamma_2^+(a_i)$  – вершины множества  $A_2D$ , в которые входят дуги, исходящие из вершины  $a_i$ .

Через систему станций вся информация от объектов должна поступить на шлюз  $s_0$  (3.9)

$$\sum_{a_j \in \Gamma_2^-(a_0)} x_{j0} = \sum_{a_i \in A_1} \vartheta_i, \quad (3.9)$$

здесь  $\Gamma_2^-(a_0)$  — подмножество вершин множества  $A_2D$ , дуги которых входят в шлюз  $a_0$ .

Введем булевы переменные  $y_{ij} = \{0,1\}$  для потока  $x_{ij}$ , исходящего из вершины  $a_i$ ,  $a_i \in A_2D$  в вершину  $a_j$ ,  $a_j \in A_2D$ . Данная переменная характеризует наличие соединения между вершинами.

Поток информации  $w_{ij}$  между вершинами множества  $A_2D$  может передаваться только при наличии соединения  $y_{ij}$ . Также данный поток ограничен пропускной способностью  $\vartheta_i$  базовой станции (3.10)

$$\sum_{a_j \in \Gamma_2^-(a_i)} x_{ij} \leq y_{ij} \cdot \vartheta_i, \forall a_i \in A_2D. \quad (3.10)$$

Каждая станция может иметь только одно соединение для передачи потока информации в единицу времени. Необходимо обеспечить условие, что в каждом множестве  $D_i$  может быть размещено не более одной станции. Оба этих требования можно записать в виде ограничения неравенства (3.11)

$$\sum_{a_j \in \Gamma_2^-(a_i)} y_{ij} \leq 1, \forall D_i. \quad (3.11)$$

Целевая функция задачи минимизации стоимости размещения (3.12)

$$\sum_{a_i \in A_2D} \sum_{a_j \in \Gamma_2^-(a_i)} c_i \cdot y_{ij} \rightarrow \min. \quad (3.12)$$

Задача (3.7) — (3.12) представляет собой частично целочисленную задачу линейного программирования с  $m \cdot |A_2|$  булевыми переменными.

## Пример решения задачи ЧЦЛП

Рассмотрим пример для оптимизационной задачи выбора набора размещаемых станций и определения мест их размещения.

Задано множество рассредоточенных объектов  $A_1$ ,  $|A_1| = 8$ , параметры которых представлены в таблице 10, и множество точек возможного размещения базовых станций 11 (Рисунок 3.3). Задано множество типов станций  $S$ ,  $|S| = 2$  (таблица 12). Задана станция специального вида шлюз с параметрами, представленными в таблице 13. Вся информация с объектов должна быть собрана и передана на шлюз. Необходимо разместить станции таким образом, чтобы минимизировать их суммарную стоимость.



Рисунок 3.3 — Множество  $A$ .

Вместо каждой такой вершины  $a_i$  из множества возможных точек размещения базовых станций  $A_2$  необходимо ввести  $|S| = 2$  вершин с координатами точки  $a_i$  и различными параметрами, соответствующими различным типам станций. Полученное расширенное множество  $A_2D$  представлено в таблице 14.

Точки размещения станций, $A_2$	Координаты	$\vartheta$	$P_{tr}$	$G_{tr}$	$L$
№	м	1/с	дБм	дБ	дБ
$a_1$	(22, 15)	11	10	1	0
$a_2$	(1, 20)	11	10	1	0
$a_3$	(19, 27)	11	10	1	0
$a_4$	(14, 6)	12	10	1	0
$a_5$	(25, 27)	13	10	1	0
$a_6$	(15.2, 10.1)	15	10	1	0
$a_7$	(1, 15)	17	10	1	0
$a_8$	(0, 25)	19	10	1	0

Таблица 10 — Рассредоточенные объекты

$A_2$	Координаты
$a_9$	(18, 14)
$a_{10}$	(4, 3.5)
$a_{11}$	(5, 20)
$a_{12}$	(10, 14)
$a_{13}$	(25, 20)

Таблица 11 — Точки размещения станций

S	$\vartheta$	$P_{tr}$	$G_{tr}$	$P_{recv}$	$L$	$c$
№	1/с	дБм	дБ	дБм	дБ	у.е.
$s_1$	1300	20	4	-79	1	70
$s_2$	1400	18	3	-81	1	80

Таблица 12 — Типы станций

Используя уравнения потерь в свободном пространстве и уравнение энергетического баланса необходимо рассчитать радиус телекоммуникационного покрытия и радиус связи станция, чтобы получить граф потока  $H$ . Запас на замирание сигнала  $SOM = 30$  и несущая частота  $f = 5537$ . В таблице 3.4 представлена матрица смежности  $E$  полученного графа  $H$ .

Решением задачи ЧЦЛП (3.7) — (3.12) является размещение, представленное на рисунке 3.4. Были размещены базовые станции типы  $s_3$  в точках  $a_11$ ,  $a_12$  и  $a_13$ . Жирным цветом представлены возможные соединения базовых станций,

Шлюз	Координаты	$\vartheta$	$P_{tr}$	$G_{tr}$	$P_{recv}$	$L$
№	м	1/с	дБм	дБ	дБм	дБ
$s_0$	(8, 32)	$\infty$	20	4	-79	1

Таблица 13 — Параметры шлюза

Множество $A_2$	$a_9$		$a_{10}$		$a_{11}$		$a_{12}$		$a_{13}$	
Множество типов станций $S$	$s_1$	$s_2$	$s_1$	$s_2$	$s_1$	$s_2$	$s_1$	$s_2$	$s_1$	$s_2$
Расширенное множество $A_2D$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	$a_{16}$	$a_{17}$	$a_{18}$

Таблица 14 — Матрица смежности

	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	$a_{16}$	$a_{17}$	$a_{18}$
$a_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
$a_2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$a_3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$a_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
$a_5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$a_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
$a_7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
$a_8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$a_9$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$a_{10}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$a_{11}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
$a_{12}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
$a_{13}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
$a_{14}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
$a_{15}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
$a_{16}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
$a_{17}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
$a_{18}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Таблица 15 — Матрица смежности

стрелками граф потока информации от объектов до шлюза. Математическая модель была подготовлена на языке Python, задача ЧЦЛП решалась в коммерческом продукте Gurobi Optimatation.

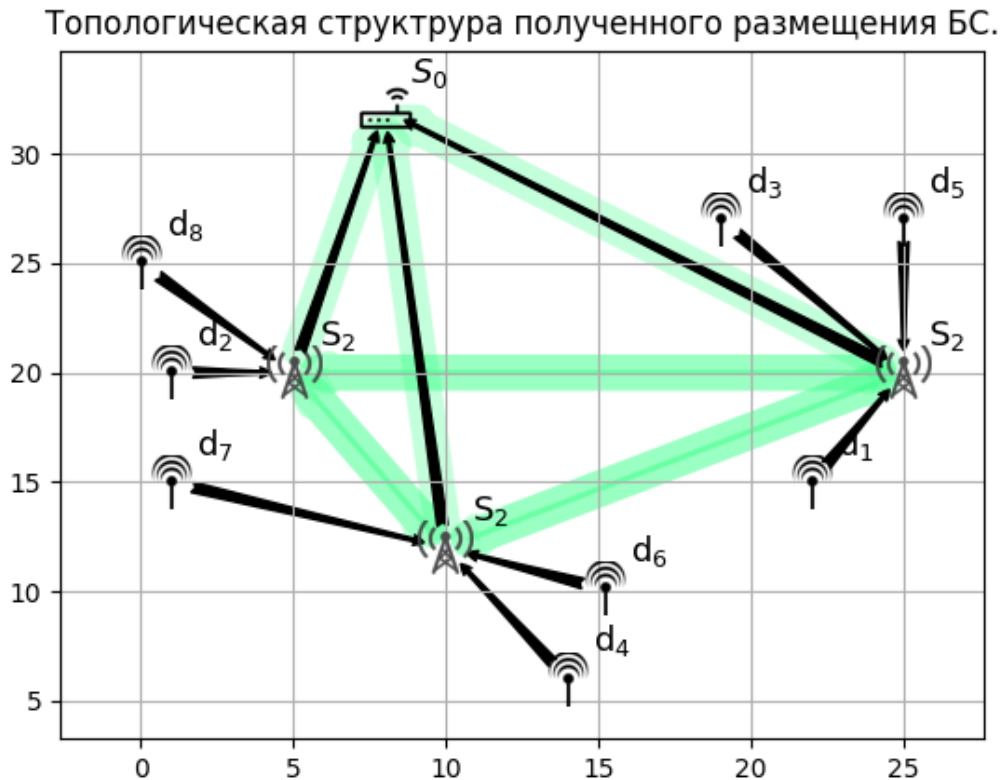


Рисунок 3.4 — Решение задачи ЧЦЛП.

### 3.4 Выводы

В работе рассмотрены задачи размещения базовых станций при проектировании беспроводных широкополосных сетей связи для покрытия множества рассредоточенных объектов.

- Предложена формулировка задачи в виде математической модели линейного программирования при заданных местах размещения станция для проверки условия допустимой передачи потока от множества объектов до точки корневого узла сети;
- Предложена математическая модель экстремальной задачи в виде частично целочисленного линейного программирования оптимального размещения станций из имеющегося набора типов станций на избыточном множестве возможных мест размещения;
- Предложены алгоритмы построения графа информационных потоков, позволяющий формализовать задачи в виде соответствующих моделей математического программирования.



В Приложении ?? приведены результаты вычислительного эксперимента. Результаты исследования по данной главе были опубликованы в работах [142, 143, 144, 145, 146].

## Заключение

Создание и развитие современной структуры передачи данных являются неотъемлемой частью производства. В рамках комплексного проектирования беспроводных средств связи в данной работе исследуются проблемы синтеза топологии беспроводных сетей связи.

Основные результаты данного диссертационного исследования следующие:

1. В ходе исследования был проведен анализ современного состояния и тенденций развития БШС на месторождениях.
2. Был проведен анализ методики проектирования современных БШС. В рамках такой методики были исследованы проблемы синтеза топологии БШС.
3. Был проведен анализ проблем проектирования БШС вдоль протяженных участков: трубопроводные магистрали, протяженные автомобильные дороги. Для телекоммуникационного покрытия таких объектов были предложены модели максимального покрытия.
4. Была предложена математическая модель ЦЛП для размещения базовых станций с линейной топологией.
5. Была представлена математическая модель экстремальной задачи в комбинаторной форме.
6. Для комбинаторной модели был разработан специальный алгоритм типа МВиГ. Представлены результаты сравнения поиска оптимального решения с помощью МВиГ с алгоритмами решения задачи в общем виде.
7. В рамках комплексного проектирования была представлена итерационная процедура нахождения последовательности лучших решений задачи оптимального размещения для случая, когда найденное оптимальное решение построение топологии сети не удовлетворяет некоторым критериями функционирования БШС, проверяемых на этапе моделирования процессов передачи данных.
8. Предложены формулировка задачи ЛП проверки допустимого потока при заданных мест размещения станций.

9. Предложена математическая модель ЧЦЛП оптимального размещения станция из имеющегося множества типов станций на избыточном множестве типов станций.

Поставленные в начале данной диссертационной работы цели были достигнуты, а соответствующие им задачи решены. В качестве перспектив дальнейшего исследования можно выделить следующие:

- внедрение программных реализаций в состав итерационной процедуры комплексного проектирования беспроводных сетей связи;
- применение предложенного МВиГ в решении более общих задач оптимального размещения базовых станций, в которых кроме времени межконцевой задержки необходимо учитывать не только других характеристик производительности БШС;
- исследование влияний реальной среды на физический уровень канала передачи данных для расчета оценок дальности телекоммуникационной связи.

Результаты исследования, изложенные в диссертации, были получены в рамках выполнении работ при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант №19-07-00919.

## Список сокращений и условных обозначений

DL	Down Link, нисходящая линия связи
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power, эффективная изотропно-излучаемая мощность передатчика
FSPL	Free Space Path Loss, уравнение потерь в свободном пространстве
LIFO	Last Input, First Out, последним пришёл — первым ушёл
QoS	Quality Of Service, качество обслуживания
RSU	Roadside Unit, придорожные стационарные объекты телекоммуникационной связи
SOM	System Operating Margin, запас на замирание сигнала
UL	Up Link, восходящая линия связи
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communications, сверхнадежная передача данных с малой задержкой
V2V	Vehicle-To-Vehicle, беспроводная связь для обмена данными между движущимися транспортными средствами
V2X	Vehicle-To-Infrastructure, беспроводная связь для обмена данными между транспортным средством и инфраструктурой
VANET	Vehicular Ad Hoc network, автомобильная самоорганизующаяся сеть
АСУ ТП	автоматизация систем управления технологических процессов
БПЛА	беспилотный летательный аппарат
БС	базовая станция
БШС	беспроводная широкополосная сеть
ИТС	Интеллектуальная транспортная система
ЛП	линейное программирование
МВиГ	метод ветвей и границ
МПП	метод полного перебора
СеМО	сеть массового обслуживания
ТМО	теория массового обслуживания
ЦЛП	целочисленное линейное программирование
ЧЦЛП	частично целочисленное линейное программирование

## Словарь терминов

**Радиус связи** : максимальная теоретическая дальность связи базовой станции с соседней станцией, удовлетворяющей требуемому качеству передачи сигнала

**Радиус покрытия** : максимальный теоретический радиус зоны покрытия БС для связи с устройствами.

**Межконцевая задержка** : время необходимое для передачи пакета через сеть от источника до места назначения.

**Линейный участок** : заданная территория вдоль некоторого протяженного объекта, которую необходимо покрыть телекоммуникационной сетью.

**Недопокрытие** : область, которая не охвачена телекоммуникационным покрытием сети и численно равно разности между суммарным покрытием размещенных базовых станций и длиной всего участка.

## Список литературы

- [1] N.A. Eremin, V.E. Stolyarov и V.I. Shulyatikov. — «Use of control systems in oil and gas fields». — В: *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry* 9 (2020), с. 17–29. — DOI: 10.33285/0132-2222-2020-9(566)-17-29.
- [2] A Dmitrievskiy и др. — «On the Draft Strategy for Digital Modernization of the Oil and Gas Complex of the Russian Federation». — В: 241 (дек. 2020), с. 9–13.
- [3] Nikolai Eremin и V.E. Stolyarov. — «A gas well as a key object of a digital field». — В: *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry* 554 (сент. 2019), с. 5–14. — DOI: 10.33285/0132-2222-2019-9(554)-5-14.
- [4] Srinidhi Hiriyannaiah и др. — «A Multi-layered Framework for Internet of Everything (IoE) via Wireless Communication and Distributed Computing in Industry 4.0». — В: *Recent Patents on Engineering* 14.4 (2020), с. 521–529. — DOI: 10.2174/1872212113666190624120121.
- [5] Sathyan Munirathinam. — «Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT)». — В: *Advances in Computers* 117.1 (2020), с. 129–164. — DOI: 10.1016/bs.adcom.2019.10.010.
- [6] M. Carmen Lucas-Estañ и др. — «Emerging trends in hybrid wireless communication and data management for the industry 4.0». — В: *Electronics (Switzerland)* 7.12 (2018). — DOI: 10.3390/electronics7120400.
- [7] Hongfang Lu и др. — «Oil and Gas 4.0 era: A systematic review and outlook». — В: *Computers in Industry* 111 (2019), с. 68–90. — DOI: 10.1016/j.compind.2019.06.007.
- [8] *ГОСТ Р МЭК 62657-2-2016 Сети промышленной коммуникации. Беспроволочные коммуникационные сети. Часть 2. Обеспечение совместимости.* — М.: Стандартинформ, 2016. — 68 с.
- [9] A.N. Dmitrievsky и др. — «Intelligent innovations for wells construction and operation of oil and gas fields». — В: (март 2021), с. 96–104.

- [10] Е.В. Смирнова и др. — *Технология современных беспроводных сетей Wi-Fi*. — Под ред. А.В. Пролетарский. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — 446 с.
- [11] Р.А. Дунайцев и К.Ф. Короткин. — «Радиообследование и радиопланирование беспроводных локальных сетей Wi-Fi». — В: *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании* (2017), с. 270—274.
- [12] Г. Ж. Уанкпо и др. — «Математическая модель анализа надежности неоднородной дублированной системы передачи данных». — В: *Современные информационные технологии и ИТ-образование* 16.2 (2020), с. 285—294.
- [13] Achyutha Krishnamoorthy, Anu Nuthan Joshua и Dmitry Kozyrev. — «Analysis of a Batch Arrival, Batch Service Queuing-Inventory System with Processing of Inventory While on Vacation». — В: *Mathematics* 9.4 (2021), с. 1—29. — DOI: 10.3390/math9040419.
- [14] Dmitry Kozyrev и Dmitry Radkevich. — «Reliability estimation of a broadband wireless network with linear topology and cross redundancy». — В: *AIP Conference Proceedings* 2116 (2019). — DOI: 10.1063/1.5114073.
- [15] Andrey Larionov и др. — «A Multiphase Queueing Model for Performance Analysis of a Multi-hop IEEE 802.11 Wireless Network with DCF Channel Access». — В: *Communications in Computer and Information Science* 1109 (2019), с. 162—176. — DOI: 10.1007/978-3-030-33388-1\_14.
- [16] Vladimir Vishnevsky и др. — «Methods of performance evaluation of broadband wireless networks along the long transport routes». — В: *Communications in Computer and Information Science* 601 (2016), с. 72—85. — DOI: 10.1007/978-3-319-30843-2\_8.
- [17] Vladimir Vishnevsky и др. — «Review of methodology and design of broadband wireless networks with linear topology». — В: *Indian Journal of Pure and Applied Mathematics* 47.2 (2016), с. 329—342. — DOI: 10.1007/s13226-016-0190-7.
- [18] Danmeng Wang. — «Delay prediction with enhanced queueing models and survival analysis». — В: *2016 3rd International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2016*. — IEEE, нояб. 2017, — С. 1101—1105. — ISBN: 9781509055210. — DOI: 10.1109/ICSAI.2016.7811115. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7811115/>.

- [19] Werner Sandmann. — «Delays in a series of queues with correlated service times». — В: *Journal of Network and Computer Applications* 35.5 (2012), с. 1415—1423. — DOI: 10.1016/j.jnca.2011.10.009.
- [20] Hendrik Baumann и Werner Sandmann. — «Multi-server tandem queue with Markovian arrival process, phase-type service times, and finite buffers». — В: *European Journal of Operational Research* 256.1 (2017), с. 187—195. — DOI: 10.1016/j.ejor.2016.07.035.
- [21] В. Т. Еременко и др. — В: *Информационные системы и технологии* 78.4 (2013), с. 96—105.
- [22] Attila Lovas и Miklós Rásonyi. — «Markov chains in random environment with applications in queuing theory and machine learning». — В: *Stochastic Processes and their Applications* 137 (2021), с. 294—326. — DOI: 10.1016/j.spa.2021.04.002.
- [23] Rinda Parama Satya Hermanto и др. — «Waiting-Time Estimation in Bank Customer Queues using RPROP Neural Networks». — В: *Procedia Computer Science* 135 (2018), с. 35—42. — DOI: 10.1016/j.procs.2018.08.147.
- [24] *Интеллектуальная частная беспроводная сеть для работы SMARTField*. — URL: [https://comptek.ru/materials/rajant/RU\\_rajant-oil-and-gas-brochure-012820\\_digital.pdf](https://comptek.ru/materials/rajant/RU_rajant-oil-and-gas-brochure-012820_digital.pdf).
- [25] *Решения Cisco ускоряют цифровую трансформацию нефтегазовой отрасли и помогают добывать нефть за Полярным кругом*. — URL: [https://www.cisco.com/c/ru\\_ru/about/press/press-releases/2020/03-05.html](https://www.cisco.com/c/ru_ru/about/press/press-releases/2020/03-05.html).
- [26] *Wireless Connectivity Solutions for Oil and Gas*. — URL: [https://www.cambiumnetworks.com/wp-content/uploads/2017/03/BR\\_oilGasUtilities\\_01162018\\_pages.pdf](https://www.cambiumnetworks.com/wp-content/uploads/2017/03/BR_oilGasUtilities_01162018_pages.pdf).
- [27] *Industrial Communication Solutions for the Oil and Gas Industry*. — URL: <https://www.gegridsolutions.com/communications/pdf/ics%20oil%20&%20gas-web.pdf>.
- [28] В. Олифер и Н. Олифер. — *Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Юбилейное издание*. — СПб: Питер, 2020. — 1008 с.
- [29] Э. Таненбаум и Д. Уэзеролл. — *Компьютерные сети. 5-е изд.* — СПб: Питер, 2022. — 960 с.



- [30] 802.11 WG - Wireless LAN Working Group. — *IEEE 802.11-2020 - IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)*. — 2020. — URL: [https://standards.ieee.org/standard/802\\_11-2020.html](https://standards.ieee.org/standard/802_11-2020.html).
- [31] David D Coleman и David A Westcott. — «CWNA: Certified Wireless Network Administrator Study Guide». — В: *CWNA: Certified Wireless Network Administrator Study Guide* (2018). — DOI: 10.1002/9781119549406.
- [32] В.М. Вишневикий и др. — «Методы исследования и проектирования широкополосных беспроводных сетей вдоль протяженных транспортных магистралей». — В: *T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт 9.5* (2015), с. 9—15.
- [33] IEEE 1609 Working Group. — *IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture*. — 2014, — С. 1—78. — ISBN: 9780738187563. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8686445>.
- [34] В. М. Вишневикий, С.Л. Портной и Шахнович И.В. — *Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G*. — Москва: Техносфера, 2009. — 472 с.
- [35] В. О Тихвинский, С. В. Терентьев и В. П. Высочин. — *Сети мобильной связи LTE/LTE Advanced: технологии 4G, приложения и архитектура*. — Москва: Издательский дом Медиа паблшер, 2014, — С. 384. — ISBN: 978-5-88405-097-5.
- [36] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; *Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies; (Release 16)*. — 2020. — URL: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38\\_series/38.913/](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.913/).
- [37] Приказ Минкомсвязи России № 923 «Об утверждении Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации». — Москва, 2019.
- [38] Stephane Teral. — «5G Best Choice Architecture». — В: *IHS Markit Technology* January (2019), с. 1—17. — URL: [https://cdn.ihs.com/www/prot/pdf/0519/IHSMarkit\\_5G\\_Best\\_Choice\\_Architecture.pdf](https://cdn.ihs.com/www/prot/pdf/0519/IHSMarkit_5G_Best_Choice_Architecture.pdf).

- [39] Mirza Golam Kibria и др. — «Next Generation New Radio Small Cell Enhancement: Architectural Options, Functionality and Performance Aspects». — В: *IEEE Wireless Communications* 25.4 (2018), с. 120—128. — DOI: 10.1109/MWC.2018.1700277. — arXiv: 1802.10267.
- [40] Guangyi Liu и др. — «5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective». — В: *IEEE Communications Magazine* 58.11 (2020), с. 83—89. — DOI: 10.1109/MCOM.001.2000230.
- [41] Amine El Rhayour и Tomader Mazri. — «5G Architecture: Deployment scenarios and options». — В: *2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies, ISAECT 2019* (2019). — DOI: 10.1109/ISAECT47714.2019.9069723.
- [42] Ethem Alpaydm. — «5G PPP Architecture Working Group: View on 5G Architecture». — В: *Version 3.0, June 2019* June (2019), с. 21—470. — URL: [https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2019/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper\\_v3.0\\_PublicConsultation.pdf](https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2019/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper_v3.0_PublicConsultation.pdf).
- [43] Rida El Chall, Samer Lahoud и Melhem El Helou. — «LoRaWAN network: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in Lebanon». — В: *IEEE Internet of Things Journal* 6.2 (2019), с. 2366—2378. — DOI: 10.1109/JIOT.2019.2906838.
- [44] Yaokun Zhang и Tianfeng Yan. — «Loss Correction of Wireless Model in Complex Multi Wall Environment». — В: *Journal of Physics: Conference Series* 1757.1 (2021). — DOI: 10.1088/1742-6596/1757/1/012137.
- [45] Giuseppe Caso и Luca De Nardis. — «On the applicability of multi-wall multi-floor propagation models to WiFi fingerprinting indoor positioning». — В: *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST* 159 (2015), с. 166—172. — DOI: 10.1007/978-3-319-27072-2\_21.
- [46] Taewon Kang и Jiwon Seo. — «Practical simplified indoor multiwall path-loss model». — В: *International Conference on Control, Automation and Systems* 2020-Octob (2020), с. 774—777. — DOI: 10.23919/ICCAS50221.2020.9268260.

- [47] О. О. Oni и F. E. Idachaba. — «Review of Selected Wireless System Path loss Prediction Models and its Adaptation to Indoor Propagation Environments». — В: *Lecture Notes in Engineering and Computer Science* 2228 (2017), с. 562—567.
- [48] ГКРЧ Нормы 18-13. Радиопередающие устройства гражданского назначения. Требования на допустимые уровни побочных излучений. — М., 2013.
- [49] Evgenii Krouk и Sergei Semenov. — «Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications». — В: *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications* (2010), с. 1—662. — DOI: 10.1002/9780470976777.
- [50] Ms Mollel и M Kisangiri. — «Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Mobile Communication». — В: *Computer Engineering and Intelligent Systems* 5.9 (2014), с. 1—11. — URL: <http://iiste.org/Journals/index.php/CEIS/article/view/15435>.
- [51] Aymen Zreikat и Milan Dordevic. — «Performance Analysis of Path loss Prediction Models in Wireless Mobile Networks in Different Propagation Environments». — В: *Proceedings of the 3rd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science* (2017). — DOI: 10.11159/vmw17.103.
- [52] Umut Can Cabuk и др. — «Path Loss Estimation of Air-to-Air Channels for FANETs over Rugged Terrains». — В: *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2020 - Proceedings* (2020). — DOI: 10.1109/SIU49456.2020.9302160.
- [53] Miguel Gutierrez Gaitan и др. — «Experimental evaluation of the two-ray model for near-shore WiFi-based network systems design». — В: *IEEE Vehicular Technology Conference 2020-May* (2020). — DOI: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129548.
- [54] Michael Rademacher, Markus Kessel и Karl Jonas. — «Experimental Results For the Propagation of Outdoor IEEE802.11 Links». — В: *VDE ITG-Fachbericht Mobilkommunikation* (2016).

- [55] Manlio Bacco, Erina Ferro и Alberto Gotta. — «UAVs in WSNs for agricultural applications: An analysis of the two-ray radio propagation model». — B: *Proceedings of IEEE Sensors 2014-December*.December (2014), с. 130—133. — DOI: 10.1109/ICSENS.2014.6984950.
- [56] Erich Zochmann, Ke Guan и Markus Rupp. — «Two-ray models in mmWave communications». — B: *IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, SPAWC 2017-July* (2017), с. 1—5. — DOI: 10.1109/SPAWC.2017.8227681.
- [57] Sinan. Kurt и Bulent Tavli. — «Path-Loss Modeling for Wireless Sensor Networks». — B: *Ieee Antennas and Propagation Magazine* 59 (2017), с. 18—37.
- [58] Masaharu Hata. — «Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services». — B: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 29.3 (1980), с. 317—325. — DOI: 10.1109/T-VT.1980.23859.
- [59] Erik Dahlman, Stefan Parkvall и Johan Skold. — «4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband». — B: *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband* (2013), с. 1—510. — DOI: 10.1016/C2013-0-06829-6.
- [60] A David и др. — «LTE : The Evolution of Mobile Broadband». — B: *IEEE communications magazine* 47.4 (2009), с. 44—52.
- [61] Shao Yu Lien и др. — «5G New Radio: Waveform, Frame Structure, Multiple Access, and Initial Access». — B: *IEEE Communications Magazine* 55.6 (2017), с. 64—71. — DOI: 10.1109/MCOM.2017.1601107.
- [62] Aymen Omri и др. — «Synchronization procedure in 5G NR systems». — B: *IEEE Access* 7 (2019), с. 41286—41295. — DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2907970.
- [63] Jia Liu и др. — «End-to-End Delay Modeling in Buffer-Limited MANETs: A General Theoretical Framework». — B: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15.1 (2016), с. 498—511. — DOI: 10.1109/TWC.2015.2475258. — arXiv: 1509.06969.
- [64] Gongpu Chen и др. — «Joint scheduling and channel allocation for end-to-end delay minimization in industrial WirelessHART Networks». — B: *IEEE Internet of Things Journal* 6.2 (2019), с. 2829—2842. — DOI: 10.1109/JIOT.2018.2875508.

- [65] Inès Hosni и Fabrice Théoleyre. — «Self-healing distributed scheduling for end-to-end delay optimization in multihop wireless networks with 6TiSCh». — В: *Computer Communications* 110 (2017), с. 103—119. — DOI: 10.1016/j.comcom.2017.05.014.
- [66] Antonio Capone и др. — «Minimizing end-to-end delay in multi-hop wireless networks with optimized transmission scheduling». — В: *Ad Hoc Networks* 89 (2019), с. 236—248. — DOI: 10.1016/j.adhoc.2019.01.004.
- [67] Nasim Abbas и Fengqi Yu. — «Performance analysis of end-To-end delay and reliability for linear wireless multimedia sensor networks». — В: *Proceedings of 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, ITOEC 2017* 2017-January (2017), с. 554—558. — DOI: 10.1109/ITOEC.2017.8122358.
- [68] Hafez Seliem и др. — «On the End-to-End Delay in a One-Way VANET». — В: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68.9 (2019), с. 8336—8346. — DOI: 10.1109/TVT.2019.2916936.
- [69] Filippo Malandra и Brunilde Sanso. — «A Markov-Modulated End-to-End Delay Analysis of Large-Scale RF Mesh Networks with Time-Slotted ALOHA and FHSS for Smart Grid Applications». — В: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 17.11 (2018), с. 7116—7127. — DOI: 10.1109/TWC.2018.2860965.
- [70] Anders Ellersgaard Kalor и др. — «Network slicing in industry 4.0 applications: Abstraction methods and end-to-end analysis». — В: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14.12 (2018), с. 5419—5427. — DOI: 10.1109/TII.2018.2839721.
- [71] Yan Gao и др. — «Characterization and Optimization of Delay Guarantees for Real-Time Multimedia Traffic Flows in IEEE 802.11 WLANs». — В: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 15.5 (2016), с. 1090—1104. — DOI: 10.1109/TMC.2015.2407395.
- [72] В. М. Вишнеvский. — *Теоретические основы проектирования компьютерных сетей*. — Москва: Техносфера, 2003. — 512 с.
- [73] Leonard Kleinrock. — *Theory, Volume 1, Queueing Systems*. — USA: Wiley-Interscience, 1975. — ISBN: 0471491101.

- [74] Paul J. Burke. — «The Output of a Queuing System». — В: *Operations Research* 4.6 (1956), с. 699—704. — DOI: 10.1287/opre.4.6.699.
- [75] С. С. Владимиров. — *Беспроводные системы передачи данных. Расчет параметров БСПД на основе технологий 802.11 и 802.16 : практикум*. — СПб: СПб- ГУТ, 2019. — 27 с.
- [76] John D. C. Little. — « A Proof for the Queuing Formula:  $L = \lambda W$  ». — В: *Operations Research* 9.3 (1961), с. 383—387. — DOI: 10.1287/opre.9.3.383.
- [77] V. M. Vishnevskii и A. N. Dudin. — «Queueing systems with correlated arrival flows and their applications to modeling telecommunication networks». — В: *Automation and Remote Control* 78.8 (2017), с. 1361—1403. — DOI: 10.1134/S000511791708001X.
- [78] Vladimir Vishnevsky и др. — «State reduction in analysis of a tandem queueing system with correlated arrivals». — В: *Communications in Computer and Information Science* 800 (2017), с. 215—230. — DOI: 10.1007/978-3-319-68069-9\_18.
- [79] Ken'ichi Kawanishi и Tetsuya Takine. — «The M/PH/1+D queue with Markov-renewal service interruptions and its application to delayed mobile data offloading». — В: *Performance Evaluation* (2019). — DOI: 10.1016/j.peva.2019.102002.
- [80] Ozancan Dogan и Nail Akar. — «The Multi-Source Probabilistically Preemptive M/PH/1/1 Queue with Packet Errors». — В: *IEEE Transactions on Communications* (2021). — DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3106347.
- [81] A A Larionov, A A Mukhtarov и A M Sokolov. — «The calibration method of a tandem queueing model with PH service time using NS-3 simulation of a multihop wireless network». — В: *Journal of Physics: Conference Series* 2091.1 (2021), с. 012030. — DOI: 10.1088/1742-6596/2091/1/012030.
- [82] *ns3::WifiMacQueue Class Reference*. — URL: [https://www.nsnam.org/doxygen/classns3\\_1\\_1\\_wifi\\_mac\\_queue.html](https://www.nsnam.org/doxygen/classns3_1_1_wifi_mac_queue.html).
- [83] Renzo Massobrio, Jamal Toutouh и Sergio Nesmachnow. — «Multi-Objective Evolutionary Algorithms for Smart Placement of Roadside Units in Vehicular Networks». — В: *Evolutionary Multi-Objective System Design* (2020), с. 85—114. — DOI: 10.1201/9781315366845-5.

- [84] Claudia Campolo, Antonella Molinaro и Riccardo Scopigno. — «Vehicular ad hoc networks standards, solutions, and research». — B: *Vehicular Ad Hoc Networks Standards, Solutions, and Research* (2015), с. 1—544. — DOI: 10.1007/978-3-319-15497-8.
- [85] Evellyn S. Cavalcante и др. — «Roadside unit deployment for information dissemination in a VANET: An evolutionary approach». — B: *GECCO'12 - Proceedings of the 14th International Conference on Genetic and Evolutionary Computation Companion* (2012), с. 27—34. — DOI: 10.1145/2330784.2330789.
- [86] Abdelkrim KHireddine и Ouamri Mohamed Amine. — «Base station Placement Optimization Using Genetic Algorithms Approach». — B: *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology* 12.1 (2020), с. 1. — DOI: 10.1504/ijcaet.2020.10006440.
- [87] Mohamed Ben Brahim, Wassim Drira и Fethi Filali. — «Roadside units placement within city-scaled area in vehicular ad-hoc networks». — B: *2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE 2014 - Proceedings* (2014), с. 1010—1016. — DOI: 10.1109/ICCVE.2014.7297500.
- [88] V. M. Vishnevsky, Andrey Larionov и R. V. Smolnikov. — «Optimization of topological structure of broadband wireless networks along the long traffic routes». — B: *Communications in Computer and Information Science* 601 (2016), с. 30—39. — DOI: 10.1007/978-3-319-30843-2\_4.
- [89] Hai-qing Liu и др. — «A Connectivity-based Strategy for Roadside Units Placement in Vehicular Ad Hoc Networks». — B: *International Journal of Hybrid Information Technology* 7.1 (2014), с. 91—108. — DOI: 10.14257/ijhit.2014.7.1.08.
- [90] Zhenguo Gao и др. — «Optimal and Greedy Algorithms for the One-Dimensional RSU Deployment Problem with New Model». — B: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67.8 (2018), с. 7643—7657. — DOI: 10.1109/TVT.2018.2837033.
- [91] Ali Jalooli, Min Song и Wenye Wang. — «Message coverage maximization in infrastructure-based urban vehicular networks». — B: *Vehicular Communications* 16 (2019), с. 1—14. — DOI: 10.1016/j.vehcom.2019.02.001.

- [92] Andre B. Reis и др. — «Deploying roadside units in sparse vehicular networks: What really works and what does not». — В: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 63.6 (2014), с. 2794—2806. — DOI: 10.1109/TVT.2013.2292519.
- [93] Abderrahim Guerna, Salim Bitam и Carlos T. Calafate. — «AC-RDV: a novel ant colony system for roadside units deployment in vehicular ad hoc networks». — В: *Peer-to-Peer Networking and Applications* 14.2 (2021), с. 627—643. — DOI: 10.1007/s12083-020-01011-3.
- [94] Chunyan Liu, Hejiao Huang и Hongwei Du. — «Optimal RSUs deployment with delay bound along highways in VANET». — В: *Journal of Combinatorial Optimization* 33.4 (2017), с. 1168—1182. — DOI: 10.1007/s10878-016-0029-5.
- [95] Haizhou Bao и др. — «Minimal road-side unit placement for delay-bounded applications in bus Ad-hoc networks». — В: *2017 IEEE 36th International Performance Computing and Communications Conference, IPCCC 2017* 2018-January (2018), с. 1—7. — DOI: 10.1109/PCCC.2017.8280441.
- [96] Ioannis Mavromatis и др. — «Efficient millimeter-wave infrastructure placement for city-scale ITS». — В: *IEEE Vehicular Technology Conference* 2019-April (2019). — DOI: 10.1109/VTCSpring.2019.8746518. — arXiv: 1903.01372.
- [97] Ю. В. Чиркова. — «Задача выбора и размещения базовых станций в беспроводной сет». — В: *Управление большими системами: сборник трудов*. 87 (2020), с. 26—46.
- [98] Roman Ivanov и др. — «On a problem of base stations optimal placement in wireless networks with linear topology». — В: *Communications in Computer and Information Science* 919 (2018), с. 505—513. — DOI: 10.1007/978-3-319-99447-5\_43.
- [99] С.В. Дейнеко и др. — *Основное технологическое оборудование и процессы транспорта нефти и нефтепродуктов*. — Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2018.
- [100] Laith M. Fawzi и др. — «Two levels alert verification technique for smart oil pipeline surveillance system (SOPSS)». — В: *International Journal of Computing and Digital Systems* 8.2 (2019), с. 115—124. — DOI: 10.12785/ijcds/080203.



- [101] Mateusz Krzysztoń и Ewa Niewiadomska-Szynkiewicz. — «Intelligent Mobile Wireless Network for Toxic Gas Cloud Monitoring and Tracking». — В: *Sensors* 21.11 (май 2021), с. 3625. — DOI: 10.3390/s21113625.
- [102] Amjad Mehmood, Jaime Lloret и Sandra Sendra. — «A secure and low-energy zone-based wireless sensor networks routing protocol for pollution monitoring». — В: *Wireless Communications and Mobile Computing* 16.17 (2016), с. 2869–2883. — DOI: 10.1002/wcm.2734.
- [103] Tzu-Hsuan Lin и др. — «Buried Wireless Sensor Network for Monitoring Pipeline Joint Leakage Caused by Large Ground Movements». — В: *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 10.4 (2019), с. 04019023. — DOI: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000392.
- [104] Mutiu Adesina Adegboye, Wai Keung Fung и Aditya Karnik. — «Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: Principles and approaches». — В: *Sensors (Switzerland)* 19.11 (2019). — DOI: 10.3390/s19112548.
- [105] N. Yu. Alekseev и P. V. Zyuzin. — «Assessment of Applicability of Wi-Fi Analytics in Studies of Urban Public Transport Passenger Flow (Moscow Case Study)». — В: *World of Transport and Transportation* 19.3 (2021), с. 54–66. — DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-3-6.
- [106] *Moscow Metro delivers fast Wi-Fi to millions of passengers.* — URL: <https://www.radwin.com/wp-content/uploads/2018/07/case-study-Moscow-Metro-w.pdf> (дата обр. 28.02.2022).
- [107] Oleg Soykin и др. — «Wideband Dual-polarized Antenna for Wi-Fi Communication Networks». — В: *14th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2020* (2020). — DOI: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135260.
- [108] А. А. Адеркина и др. — «Радиопланирование систем беспроводной связи в тоннелях метрополитена». — В: *Радиотехнические и телекоммуникационные системы* 37.1 (2020), с. 41–53.
- [109] А. А. Адеркина и др. — «Измерение и анализ ослабления сигнала диапазона 5 ГГц при распространении вдоль участков метрополитена различного типа». — В: *Радиотехнические и телекоммуникационные системы* 41.1 (2021), с. 33–45.

- [110] G. B. Dantzig. — *Linear Programming and Extensions*. — Princeton University Press, 1963.
- [111] О.Ю. Першин. — *Оптимизации на конечных множествах и методы неявного перебора. Монография*. — Москва: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. — 85 с.
- [112] О. Г. Алексеев. — *Комплексное применение методов дискретной оптимизации*. — М: Наука, 1987. — 248 с.
- [113] А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов и Федоров В. В. — *Курс методов оптимизации*. — М: Наука, 1986. — 328 с.
- [114] A. H. Land и A. G. Doig. — «An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems». — В: *Econometrica* 28.3 (1960), с. 497. — DOI: 10.2307/1910129.
- [115] Bernhard Meindl и Matthias Templ. — «Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems». — В: *ESSnet on common tools and harmonised methodology for SDC in the ESS* 1.1 (2012), с. 1—14. — URL: <http://www.statistik.tuwien.ac.at/forschung/CS/CS-2012-1complete.pdf>.
- [116] Wen Yang Ku и J. Christopher Beck. — «Mixed Integer Programming models for job shop scheduling: A computational analysis». — В: *Computers and Operations Research* 73 (2016), с. 165—173. — DOI: 10.1016/j.cor.2016.04.006.
- [117] Rimmi Anand, Divya Aggarwal и Vijay Kumar. — «A comparative analysis of optimization solvers». — В: *Journal of Statistics and Management Systems* 20.4 (2017), с. 623—635. — DOI: 10.1080/09720510.2017.1395182.
- [118] И.Х. Сигал и А.П. Иванова. — *Введение в прикладное дискретное программирование. Модели и вычислительные алгоритмы*. — Москва: Физматлит, 2007. — 304 с.
- [119] М Гэри и Д Джонсон. — *Вычислительные машины и труднорешаемые задачи*. — Мир, 1982. — 416 с.
- [120] В. А. Емеличев и В.И. Комлик. — *Метод построения последовательности планов для решения задач дискретной оптимизации*. — Москва: Наука, 1981. — 208 с.

- [121] О. Ю. Першин. — «Метод нахождения последовательности лучших решений для задач оптимизации на конечных множествах и задача реконструкции сети». — В: *Автоматика и телемеханика* 12 (1999).
- [122] О. Ю. Першин. — «Метод нахождения последовательности лучших решений для задач оптимизации на конечных множествах и задача реконструкции сети». — В: *Автоматика и телемеханика* 6 (2002).
- [123] Р. Е. Иванов, А. А. Мухтаров и О.Ю. Першин. — «Задача оптимального размещения заданного множества базовых станций беспроводной сети связи с линейной топологией». — В: *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности* 549.4 (2019), с. 39—45.
- [124] R. Ivanov, A. Mukhtarov и O. Pershin. — «A Problem of Optimal Location of Given Set of Base Stations in Wireless Networks with Linear Topology». — В: *Communications in Computer and Information Science* 1141 CCIS (2019), с. 53—64. — DOI: 10.1007/978-3-030-36625-4\_5.
- [125] А. А. Мухтаров, Р. Е. Иванов и О. Ю. Першин. — «Математические модели задачи размещения базовых станций для контроля линейной территории». — В: *Proceedings of the 22nd International Scientific Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2019, Moscow)*. — 2019, — С. 205—212.
- [126] Amir Mukhtarov и др. — «On Optimal Placement of Base Stations in Wireless Broadband Networks to Control a Linear Section with End-to-End Delay Limited». — В: *Communications in Computer and Information Science* 1337 (2020), с. 30—42. — DOI: 10.1007/978-3-030-66242-4\_3.
- [127] В. М. Вишневский, А. А. Мухтаров и О.Ю. Першин. — «Задача оптимального размещения базовых станций широкополосной сети для контроля линейной территории при ограничении на величину межконцевой задержки». — В: *Материалы 23-й Международной научной конференции "Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь" (DCCN-2020, Москва)*. — 2020, — С. 148—155.
- [128] В. Е. Лазарева, А. А. Ларионов и А. А. Мухтаров. — «Расчёт межконцевых задержек и длин очередей в многошаговой тандемной сети

- с применением методов машинного обучения». — В: *Материалы Всероссийской конференции с международным участием "Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем"* (Москва, 2020). — 2020, — С. 43—48.
- [129] В. М. Вишнеvский, А. А. Ларионов и А. А. Мухтаров. — «Расчёт характеристик тандемной сети с фиксированными длинами входящих пакетов методом машинного обучения». — В: *Материалы 13-й конференции с международным участием "Новые информационные технологии в исследовании сложных структур"* (ICAM 2020, Томск). — 2020, — С. 82.
- [130] А. А. Mukhtarov и А. М. Sokolov. — «A base station placement of an wireless network with linear topology and a network performance evaluation with NS-3». — В: *Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 19–23 апреля 2021 года*. — 2021, — С. 425—430.
- [131] Cihan Tugrul Cicek, Hakan Gultekin и Bulent Tavli. — «The location-allocation problem of drone base stations». — В: *Computers and Operations Research* 111 (2019), с. 155—176. — DOI: 10.1016/j.cor.2019.06.010.
- [132] E. G. Medvedeva и др. — «Application of Clustering in Deployment of Mobile Access Points in Air-Ground Wireless Networks». — В: *Systems and Means of Informatics* (дек. 2020). — DOI: 10.14357/08696527200403. — URL: [http://www.ipiran.ru/journal\\_system/article/08696527200403.html](http://www.ipiran.ru/journal_system/article/08696527200403.html).
- [133] Emil M. Khayrov и др. — «Simulating uav’s movement for servicing user groups with a reference point in wireless networks». — В: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 12526 LNCS (2020), с. 415—425. — DOI: 10.1007/978-3-030-65729-1\_37.
- [134] Zaheer Abbas и др. — «Monitoring of Gas Distribution Pipelines Network Using Wireless Sensor Networks». — В: *Wireless Personal Communications* 117.3 (2021), с. 2575—2594. — DOI: 10.1007/s11277-020-07997-6.
- [135] S. Sabahat H. Bukhari и др. — «Novel Cost Efficient Resource Allocation Technique Based on Deadline and Budget Constraints for Edge Users». —

- B: *Wireless Personal Communications* (2021). — DOI: 10.1007/s11277-021-08453-9.
- [136] Péter Kovács. — «Minimum-cost flow algorithms: An experimental evaluation». — B: *Optimization Methods and Software* 30.1 (2015), с. 94—127. — DOI: 10.1080/10556788.2014.895828.
- [137] Z. Király и P. Kovács. — «Efficient implementations of minimum-cost flow algorithms». — B: (2012). — arXiv: 1207.6381. — URL: <http://arxiv.org/abs/1207.6381>.
- [138] Jincheng Jiang, Jinsong Chen и Chisheng Wang. — «Multi-granularity hybrid parallel network simplex algorithm for minimum-cost flow problems». — B: *Journal of Supercomputing* 76.12 (2020), с. 9800—9826. — DOI: 10.1007/s11227-020-03227-9.
- [139] James B. Orlin. — «A polynomial time primal network simplex algorithm for minimum cost flows». — B: *Mathematical Programming, Series B* 78.2 (1997), с. 109—129. — DOI: 10.1007/BF02614365.
- [140] Robert E. Tarjan. — «Dynamic trees as search trees via Euler tours, applied to the network simplex algorithm». — B: *Mathematical Programming, Series B* 78.2 (1997), с. 169—177. — DOI: 10.1007/BF02614369.
- [141] Michael Holzhauser, Sven O. Krumke и Clemens Thielen. — «A network simplex method for the budget-constrained minimum cost flow problem». — B: *European Journal of Operational Research* 259.3 (2017), с. 864—872. — DOI: 10.1016/j.ejor.2016.11.024. — arXiv: 1607.02284.
- [142] А.А. Мухтаров и Першин О. Ю. — «Задача оптимального размещения базовых станций широкополосной беспроводной сети.» — В: *Материалы Региональной научно-технической конференции «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России» (Москва, 2018)*. — 2019, — С. 177.
- [143] А. А. Мухтаров и О. Ю. Першин. — «Задача размещения базовых станций широкополосной связи для обслуживания заданного множества рассредоточенных объектов». — В: *Труды 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, 2019)*. — 2019, — С. 2992—2994.

- [144] А. А. Мухтаров и О. Ю. Першин. — «Оптимальное размещение базовых станций широкополосной беспроводной сети связи для обслуживания заданного множества рассредоточенных объектов». — В: *Труды 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019, Москва)*. — 2019, — С. 531—537.
- [145] А. А. Мухтаров и О. Ю. Першин. — «Оптимальное размещение базовых станций широкополосной беспроводной сети связи для обслуживания заданного множества рассредоточенных объектов». — В: *Материалы 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019, Москва)*. — 2019, — С. 610—612.
- [146] А.А. Мухтаров и Першин О. Ю. — «Математические модели задач оптимального размещения базовых станций беспроводной сети связи». — В: *Материалы 3-й Региональной научно-технической конференции, посвященной 110-летию А.И. Скобло и 105-летию Г.К. Шрейбера «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России» (Москва, 2019)*. — 2019, — С. 223.

## Список рисунков

1.1	Задача синтеза топологии при проектировании БШС в рамках цифровой трансформации "Индустрия 4.0". . . . .	11
1.2	Этапы проектирования БШС. . . . .	12
1.3	Часть стека протоколов 802.11 . . . . .	15
1.4	Архитектура сети LTE. . . . .	19
1.5	Сценарии развертывания 5G NR . . . . .	22
1.6	Энергетический потенциал линии связи. . . . .	26
1.7	Соединение между станциями. . . . .	33
1.8	Покрытие станции . . . . .	33
1.9	Процедура Vascoff . . . . .	35
1.10	Очереди с поддержкой QoS . . . . .	37
1.11	Структура кадра LTE . . . . .	39
1.12	Структура кадра 5G NR . . . . .	41
1.13	СеМО с кросс-трафиком и узлами $M/M/1$ . . . . .	42
1.14	Сравнение моделей массового обслуживания с данным NS-3 . . . . .	44
2.1	Беспроводная сеть вдоль автомобильных дорог . . . . .	48
2.2	Беспроводная сеть вдоль нефте- и газопроводов . . . . .	49
2.3	Охват покрытия станции . . . . .	54
2.4	Область покрытия между любыми двумя точками . . . . .	55
2.5	Связь между базовыми станциями . . . . .	57
2.6	Обеспечение связи с соседней станцией . . . . .	58
2.7	Ветвление бинарного дерева . . . . .	63
2.8	Движение по дереву поиска . . . . .	64
2.9	Решение задачи методом полного перебора . . . . .	74
2.10	Решение задачи методом ветвей и границ . . . . .	75
3.1	Заданное размещение. . . . .	86
3.2	Допустимое решение. . . . .	87
3.3	Множество $A$ . . . . .	93
3.4	Решение задачи ЧЦЛП. . . . .	96

## Список таблиц

1	Численные значения параметров модели SUI. . . . .	30
2	Конфигурации кадра в LTE при временном дуплексе (TDD) . . . . .	39
3	Интервалы поднесущих . . . . .	40
4	Решение полным перебором . . . . .	73
5	Решение полным перебором . . . . .	74
6	Результаты численного решения. . . . .	76
7	Координаты вершин . . . . .	86
8	Мощности узлов графа . . . . .	86
9	Матрица смежности графа потока $H$ . . . . .	87
10	Рассредоточенные объекты . . . . .	94
11	Точки размещения станций . . . . .	94
12	Типы станций . . . . .	94
13	Параметры шлюза . . . . .	95
14	Матрица смежности . . . . .	95
15	Матрица смежности . . . . .	95
16	Сравнения оценок «недопокрытия» для задачи ЦЛП и ЛП . . . . .	122
17	Точки размещения участка с длиной $L = 300$ . . . . .	123
18	Параметры базовых станций, шлюзов и объектов. . . . .	123
19	Рассчитанные радиусы связи между станциями . . . . .	124
20	Рассчитанные радиусы покрытия станций . . . . .	125
21	Решение задачи ЦЛП. . . . .	125
22	Решение полным перебором . . . . .	126
23	Решение методом ветвей и границ . . . . .	130
24	Координаты точек размещения . . . . .	131
25	Параметры базовых станций . . . . .	132
26	Параметры шлюзов . . . . .	133
27	Параметры устройств . . . . .	133
28	Рассчитанные радиусы покрытия . . . . .	133



29	Рассчитанные радиусы связи базовых станций . . . . .	134
30	Рассчитанные радиусы связи шлюзов . . . . .	134
31	Сравнения оценок «недопокрытия» для задачи ЦЛП и ЛП . . . . .	134

## Приложение А

### Сравнения оценок «недопокрытия» для задачи 2, 3 и 4

В таблице 16 приведены результаты вычислительного эксперимента, показывающего время решения задач 2, 3, 4 и относительную точность задачи 3, 4 по отношению к задаче 2.

Для непокрытого участка справа длины  $|\beta| = 50$ , варьируя количеством неразмещенных станций, а также количеством свободных мест размещения рассчитаем оценку недопокрытия при бюджетном ограничении  $C = 600$ .

Таблица 16 — Сравнения оценок «недопокрытия» для задачи ЦЛП и ЛП

Количество точек размещения, $m$	Количество свободных станций, $ S_\beta $	ЦЛП		Задача о ранце			ЛП		
		Время расчета, сек	Недопокрытие, $z$	Время расчета, сек	Недопокрытие, $z$	Точность, %	Время расчета, сек	Недопокрытие, $z$	Точность, %
5	6	0,3250	436,00	0,3214	426,00	97,71	0,0047	436,00	100,00
5	8	0,3218	431,00	0,3582	398,00	92,34	0,0045	431,00	100,00
8	10	0,3765	395,00	0,3621	375,00	94,94	0,0094	395,00	100,00
8	12	0,3746	390,00	0,2977	347,00	88,97	0,0094	390,00	100,00
12	15	0,3363	339,00	0,2960	309,00	91,15	0,0114	339,00	100,00
12	17	0,4072	336,00	0,3456	283,00	84,23	0,0136	336,00	100,00
18	20	0,3558	265,00	0,3407	265,00	100,00	0,0121	265,00	100,00
18	25	0,3794	260,00	0,3096	259,00	99,62	0,0169	257,60	99,08
25	30	0,3177	246,00	0,3576	246,00	100,00	0,0222	244,33	99,32
25	45	0,3539	229,00	0,3556	229,00	100,00	0,0494	226,40	98,86
30	50	0,2994	225,00	0,3146	225,00	100,00	0,0570	224,13	99,61
30	100	0,5179	223,00	0,5177	223,00	100,00	0,1513	218,75	98,09

Как видно из результатов расчетов в таблице 16, представляется целесообразным использовать задачу 3 в качестве оценки  $w_2(G_v)$  для решения задач большой размерности, так как время ее расчета в виде задачи линейного программирования существенно ниже с учетом высокой точности.

## Приложение Б

### Численный пример оптимального размещения базовых станций сети с линейной топологией в виде задачи целочисленного линейного программирования

В этой секции представлен численный пример решения данной задачи.

Задан линейный участок  $L$  с длиной 300 с количеством  $n = 7$  точек размещения. Координаты точек размещения представлены в таблице 17. Задан бюджет размещения  $C = 130$ . Центральная частота  $f = 2437$  МГц.

$a_i$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
Координата	29	40	95	139	181	230	273

Таблица 17 — Точки размещения участка с длиной  $L = 300$ .

Задано множества базовых станций  $m = 8$  с параметрами представленными в таблице 18. Также в таблице представлены параметры шлюзов и контролируемых объектов. Параметры объектов необходимы для расчета радиусов покрытия станций.

BS	$P_{tr}^R$	$G_{tr}^R$	$P_{recv}^R$	$P_{recv}^r$	$G_{recv}^r$	$c$
	дБм	дБ	дБм	дБм	дБ	у.е.
1	20	5	-69	-67	5	40
2	19	5	-67	-67	5	28
3	18	5	-69	-67	5	45
4	19	5	-69	-67	6	22
5	19	5	-67	-67	5	21
6	20	5	-69	-67	5	40
7	19	5	-67	-67	5	28
8	18	5	-69	-67	5	45
Шлюз	$G_{recv}^R$	$P_{recv}^R$		Объект	$P_{tr}^r$	$G_{tr}^r$
	дБ	дБм			дБм	дБ
	5	-69			15	2

Таблица 18 — Параметры базовых станций, шлюзов и объектов.

**Расчет радиса связи между станциями** Базовые станции оснащены направленной антенной с высоким коэффициентом усиления для связи с соседними станциями. Для расчета потерь между станциями  $j$  и  $q$  воспользуемся формулой (1.4):

$$L_{fs}^{jq} = P_{tr}^R(j) - L_{tr} + G_{tr}^R(j) + G_{tr}^R(q) - L_{recv} - SOM - P_{recv}^R(q).$$

Потери на кабелях приемника  $L_{recv}$  и передатчике  $L_{tr}$  примем равным 1 дБ и запас на замирания сигнала  $SOM = 10$  дБ.

Let us carry out an example of the calculation communication link between stations  $s_1$  and  $s_2$ : Для примера рассчитаем радиус связи между станциями  $s_1$  и  $s_2$ :

$$\begin{aligned} L_{fs}^{12} &= P_{tr}^R(1) - L_{tr} + G_{tr}^R(1) + G_{tr}^R(2) - L_{recv} - SOM - P_{recv}^R(2) = \\ &= 20 - 1 + 5 + 5 - 1 - 10 - (-69) = 87(dB). \end{aligned} \quad (Б.1)$$

Для расчета канала связи необходимо использовать формулу ???. Несущая частота  $f = 2437$  МГц и коэффициент для расчета потерь  $K = -27,55$ :

$$R_{jq} = 10^{\left(\frac{L_{fs}^{jq} - 20 \lg F - K}{20}\right)} = 10^{\left(\frac{87 - 20 \lg 2437 - (-27.55)}{20}\right)} = 174(m). \quad (Б.2)$$

В таблице 19 приведены расчеты максимальных радиусов связи между всеми станциями  $s_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  и шлюзом  $s_{m+1}$ .

$R_{jq}$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_{m+1}$
$s_1$	—	174	219	219	174	219	174	219	219
$s_2$	195	—	195	195	155	195	155	195	195
$s_3$	174	138	—	174	138	174	138	174	174
$s_4$	195	155	195	—	155	195	155	195	195
$s_5$	195	155	195	195	—	195	155	195	195
$s_6$	219	174	219	219	174	—	174	219	219
$s_7$	195	155	195	195	155	195	—	195	195
$s_8$	174	138	174	174	138	174	138	—	174

Таблица 19 — Рассчитанные радиусы связи между станциями

## Расчет радиуса покрытия

Расчет проводится аналогично расчета радиуса связи между станциями. Потери в свободном пространстве для канала между  $j$ -ой станции и контролируемым объектом

$$L_{fs}^j = P_{tr}^r(j) - L_{tr} - SOM - P_{RX}.$$

Пример расчета радиуса покрытия для 1-ой станции:

$$\begin{aligned} L_{fs}^1 &= P_{tr}^r + G_{tr}^r + G_{recv}^r(1) - L_{recv}(1) - SOM - P_{recv}^r(1) = \\ &= 15 + 2 + 5 - 1 - (-67) - 10 = 78 \text{ (дБ)}. \end{aligned} \quad (\text{Б.3})$$

$$r_1 = 10^{\left(\frac{78 - 20 \lg 2437 - (-27.55)}{20}\right)} = 77 \text{ (м)}.$$

Рассчитанные радиусы покрытия для всех станций  $s_j$ ,  $j = \overline{1, m}$  представлены в таблице 20).

STA	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$
$r_j$	77	77	77	87	77	77	77	77

Таблица 20 — Рассчитанные радиусы покрытия станций

Задача ЦЛП решена с помощью Optimization Toolbox MatLab. Таблица 21 содержит все полученные целочисленные решения.

$a_i$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	Покрытие	Цена
Координаты	29	40	95	139	181	230	273	м	у.е.
Целочисленное решение 1	$s_1$	$s_2$	$s_6$	—	—	—	$s_4$	286	130
Целочисленное решение 2	$s_4$	—	$s_5$	$s_7$	—	—	$s_2$	289	99
Оптимальное решение	$s_4$	$s_2$	—	—	$s_1$	—	$s_5$	300	111

Таблица 21 — Решение задачи ЦЛП.

## Приложение В

### Метод ветвей и границ на примере задачи размещения двух базовых станций

Рассмотрим пример решения задачи в комбинаторной задаче. Пусть задан отрезок  $\alpha$  длиной  $L = 50$  с концами в точках  $a_0$  и  $a_4$  с координатами  $l_0 = 0$   $l_4 = 50$ . Внутри данного отрезка имеется множество точек размещения  $A = \{a_i\}, i = 1, 2, 3$  с координатами  $l_1 = 20, l_2 = 30, l_3 = 40$ .

Задано множество БС  $S = \{s_j\}, j = 1, 2$ . Каждой станции приписаны параметры  $s_j = \{r_j, \{R_{jq}\}\}$ . Для  $s_1$  задано  $r_1 = 25, R_{10} = 62, R_{12} = 35, R_{14} = 31$ . Для  $s_2$  задано  $r_2 = 9, R_{20} = 31, R_{12} = 28, R_{24} = 39$ . На концах отрезка размещены шлюзы  $s_0$  и  $s_4$ . Радиус связи шлюзов для соединения с БС  $R_{01} = R_{41} = 62$  и  $R_{02} = R_{42} = 39$ .

Необходимо разместить БС  $s_1$  и  $s_2$ , т.е. найти такую расстановку  $P^*$ , которая минимизирует функционал недопокрытия  $f(P)$  (2.1).

#### Решение полным перебором.

Общее количество размещения двух станций по трем точкам равно  $\gamma = C_3^2 \cdot 2! = 6$ .

Таблица 22 — Решение полным перебором

Расстановка, $P$	Недопокрытие, $f(P)$	Номер узла дерева, $\nu$	Размещение		
			$a_1$	$a_2$	$a_3$
$P_1$	11	3	$S_1$	$S_2$	—
$P_2$	1	5	$S_1$	—	$S_2$
$P_3$	11	9	$S_2$	$S_1$	—
$P_4$	11	11	$S_2$	—	$S_1$
$P_5$	6	15	—	$S_1$	$S_2$
$P_6$	21	19	—	$S_2$	$S_1$
Количество пройденных узлов			24		

В таблице 22 представлены полученные в ходе решения расстановки. Все расстановки пронумерованы в соответствии с порядком их нахождения. Оптимальным решением  $P^*$  с минимальным значением функции (2.17) является допустимая расстановка  $P_2$ .

### Решение с помощью МВиГ.

Теперь решим пример данной задачи в соответствии с разработанным МВиГ. Так как мы не учитываем ограничения на стоимость и величину поддержку, допустимая расстановка должна удовлетворять только требованию 1, а также условию размещения всех имеющихся БС.

#### Исследование множества $G_0$ .

За начальный рекорд примем длину всего отрезка  $\hat{P} = L = 50$ .

Построение оценки  $W(G_0)$ :

$$W(G_0) = \max\{L - 2(r_1 + r_2), 0\} = \max\{50 - 2(25 + 9), 0\}.$$

Разбиваем множества  $G_0$  на два подмножества  $G_1 = G_0^1$  ( $\pi_{11} = 1$ ) и  $G_2 = G_0^2$  ( $\pi_{11} = 0$ ). Исследуем левое дочернее подмножество  $G_1$ . Правое подмножество  $G_2$  оставим для обратного шага.

#### Исследование множества $G_1$ .

Случай 1.

Проверка требования 1.

Шаг 1.

Проверяем, что каждый из радиусов  $R_{10}$  и  $R_{01}$  не меньше расстояния до левого шлюза  $s_0$ .

$$l_1 - l_0 \leq R_{10} \rightarrow 20 - 0 \leq 62;$$

$$l_1 - l_0 \leq R_{01} \rightarrow 20 - 0 \leq 62;$$

Шаг 2. Осталось неразмещенная БС  $s_2$ . Проверяем, что радиусы связи  $R_{12}$  и  $R_{21}$  не меньше расстояния до правой точки от  $a_1$  точка  $a_2$ .

$$l_2 - l_1 \leq R_{12} \rightarrow 30 - 20 \leq 35;$$

$$l_2 - l_1 \leq R_{21} \rightarrow 30 - 20 \leq 28.$$

Шаг 3.

Так как осталась только одна нераспределенная станция  $s_2$ , проверяем, что расстояние среди еще незанятых точек справа от точки  $a_1$  есть такая точка, что расстояния от этой точки до точки  $a_1$  и одновременно от этой точки до точки  $a_{n+1}$  не больше, чем радиус связи у нераспределенной станции.

Проверка точки  $a_2$ .

$$l_2 - l_1 \leq R_{21} \rightarrow 30 - 20 \leq 28;$$

$$l_4 - l_2 \leq R_{21} \rightarrow 50 - 20 \leq 31;$$

Проверка точки  $a_2$ .

$$l_3 - l_1 \leq R_{21} \rightarrow 40 - 20 \leq 28;$$

$$l_4 - l_3 \leq R_{21} \rightarrow 50 - 40 \leq 31;$$

Проверка обеспечения связи между размещаемыми БС произведена, можно приступить к оценке недопокрытия.

Случай 2.

Построение оценки  $W(G_1)$ :

$$W(G_1) = w_1(G_1) + w_2(G_1).$$

Недопокрытие слева от размещаемой БС  $s_1$ :

$$w_1(G_1) = \max\{(l_1 - l_0) - r_1, 0\} \rightarrow \max\{(20 - 0) - 25, 0\} = 0.$$

И оценка недопокрытия справа от размещаемой БС  $s_1$ :

$$w_2(G_1) = \max\{(l_4 - l_1) - (r_1 + 2r_2), 0\} \rightarrow \max\{(50 - 20) - (25 + 2 \cdot 9), 0\} = 0.$$

Итоговая оценка

$$W(G_1) = 0 + 0 = 0.$$

Разбиваем множества  $G_1$  на два подмножества  $G_3 = G_1^1$  ( $\pi_{22} = 1$ ) и  $G_4 = G_1^2$  ( $\pi_{22} = 0$ ). Исследуем левое дочернее подмножество  $G_3$ . Правое подмножество  $G_4$  оставим для обратного шага.

**Исследование множества  $G_3$ .**

Случай 1.

Проверка требования 1 проводится аналогичным образом. Перейдем к расчету оценки.



Случай 2.

Построение оценки  $W(G_3)$ :

$$W(G_3) = w_1(G_3) + w_2(G_3).$$

Недопокрытие слева от размещаемой БС  $s_2$ :

$$w_1(G_3) = w_1(G_1) + (l_2 - l_1) - (r_1 + r_2) \rightarrow 0 + \max\{(30 - 20) - (25 + 9), 0\} = 0 + 0 = 0$$

Оценка недопокрытия справа от размещаемой БС  $s_2$ :

$$w_2(G_3) = \max\{(l_4 - l_2) - r_2, 0\} \rightarrow \max\{(50 - 30) - 9, 0\} = 11.$$

$$W(G_3) = 0 + 11 = 11.$$

Все  $m$  станции размещены,  $f(P_1) = W(G_3)$ . Так как  $f(P_1) \leq f(\hat{P}) \rightarrow f(P_1) \leq 50$ , полученное недопокрытие  $f(P_1)$  принимается за новый рекорд.

Следующим этапом будет обратный шаг по дереву поиска, так как все станции размещены, то есть нет свободных переменных  $\pi_{ij}$  в множестве  $\Pi^f$ . Незакрытая вершина с наибольшим порядковым номером – вершина  $G_4$  с условием  $\pi_{22} = 0$ .

**Исследование множества  $G_4$ .**

Случай 2.

Оценка правого дочернего узла  $W(G_4)$  равна оценке материнского узла  $W(G_1)$ ,  $w_1(G_4) = w_1(G_1)$ ,  $w_2(G_4) = w_2(G_1)$ , и  $W(G_4) = W(G_1) = 0$ .

Разбиваем множества  $G_4$  на два подмножества  $G_5 = G_4^1$  ( $\pi_{32} = 1$ ) и  $G_6 = G_4^2$  ( $\pi_{32} = 0$ ).

**Исследование множества  $G_5$ .**

Случай 1. Успешная проверка требования 1.

Случай 2.

Построение оценки  $W(G_5)$ :

$$W(G_5) = w_1(G_5) + w_2(G_5).$$

Недопокрытие слева от размещаемой БС  $s_2$ :

$$w_1(G_5) = w_1(G_5) + (l_3 - l_1) - (r_1 + r_2) \rightarrow 0 + \max\{(40 - 20) - (25 + 9), 0\} = 0 + 0 = 0$$

Оценка недопокрытия справа от размещаемой БС  $s_2$ :

$$w_2(G_5) = \max\{(l_4 - l_3) - r_2, 0\} \rightarrow \max\{(50 - 40) - 9, 0\} = 1.$$

$$W(G_5) = 0 + 1 = 1.$$

Все  $m$  станции размещены,  $f(P_2) = W(G_5)$ . Так как  $f(P_2) \leq f(\hat{P})$ , полученное недопокрытие  $f(P_2)$  принимается за новый рекорд.

Таблица 23 — Решение методом ветвей и границ

№	Номер узла дерева, $\nu$	Оценка недопокрытия, $W(G_\nu)$	Недопокрытие, $f(P)$	Размещение		
				$a_1$	$a_2$	$a_3$
1	0	0	50	—	—	—
2	1	0	Рекорд	$s_1$	—	—
3	3	11		$s_1$	$s_2$	—
4	4	0		$s_1$	—	—
5	5	1	Рекорд	$s_1$	—	$s_2$
6	6	0	$\emptyset$	$s_1$	—	—
7	2	0		—	—	—
8	7	11		$s_2$	—	—
9	8	0		—	—	—
10	9	5		—	$s_1$	—
11	10	0		—	—	—
12	11	21		—	$s_2$	—
13	12	0		—	—	—
14	13	15		—	—	$s_1$
15	14	0		—	—	—
16	15	0		—	—	—
17	16	0	$\emptyset$	—	—	—

В ходе движения по дереву поиска исследования вершин происходило аналогичным образом как показано ранее. Оптимальным решением задачи стала расстановка  $P_2$  с недопокрытием  $f(P_2) = 1$ . В таблице 23 представлены полученные оценки в ходе движения по дереву ветвлений. Все вершины закрыты, количество пройденных узлов бинарного дерева поиска МВиГ составляет 16.

## Приложение Г

### Численный пример оптимального размещения базовых станций сети с линейной топологией в виде экстремальной задачи в комбинаторной форме

Дано:

- линейный участок  $L = 300$  метров;
- множество точек размещения  $|A| = 8$ ;
- множество БС  $|S| = 8$ ;
- протокол IEEE 802.11n;
- ограничение на суммарную стоимость  $T = 0.001$ с;
- интенсивность входящих пакетов  $\lambda = 1000$  1/с;
- средний размер входящих пакетов  $w = 1500$  байт;
- отклонение от оптимального решения,  $\varepsilon = 0.5$

Рассмотрим пример задачи оптимального размещения базовых станций вдоль линейного участка для организации БШС. В данном приложении будет представлен пример решения на базе семейства протоколов IEEE 802.11. Задан линейный участок  $L = 230$  метров. На данном участке задано множество точек размещения  $|A| = 6$  с координатами, представленными в таблице 24. Задано множество станций  $|S| = 5$ , таблице 25.

Задан линейный участок  $L = 300$  метров. На данном участке в ходе обследования местности были выбраны восемь возможных точек размещения базовых станций,  $|A| = 8$ . Координаты  $l_i$  точек размещения представлены в таблице 24.

Точки размещения, $a_i$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
Координаты, $l_i$	43	72	98	150	178	201	269	280

Таблица 24 — Координаты точек размещения

На рынке представлен широкий спектр технических устройств от компаний Cisco, Mikrotik и т.д. позволяющий организовывать сеть в открытой местности и учитывающий климатические сложности на нефтегазовых месторождениях, такие как предельные температуры, сила ветра и т.д. Под БС в

нашей задаче будем понимать точку доступа с антеннами для покрытия заданной области и антеннами для обеспечения связи с соседними станциями БШС.

В ходе этапа выбора комплекса технических средств были выбраны восемь БС. Множество станций  $|S| = 8$ . Каждой БС преписаны паспортные характеристики антенн, пропускная способность точки доступа и итоговая стоимость станции. Стоимость взята условная, чтобы не указывать реальные цены производителя на время написания диссертации и курс валют. Будем рассматривать БШС для задачи мониторинга, то есть с каналом передачи на верхний уровень, UpLink. Рабочая частота 2,4 ГГц. Для каждой БС будем использовать пропускную способность для модуляции и схемы кодирования MCS7. В таблице 25 представлены параметры БС. Здесь  $P_{tr}^R$  – мощность направленной антенны,  $G_{tr}^R$  – усиление направленной антенны,  $P_{recv}^R$  – чувствительность направленной антенны,  $L$  – потери в антенном кабеле и разъемах, передающего тракта,  $P_{recv}^r$  – чувствительность всенаправленной антенны,  $G_{recv}^r$  – усиление всенаправленной антенны,  $p$  – пропускная способность,  $c$  – стоимость

S	$P_{tr}^R$	$G_{tr}^R$	$P_{recv}^R$	$L$	$P_{recv}^r$	$G_{recv}^r$	$p$	$c$
№	дБм	дБ	дБм	дБ	дБм	дБ	Мбит/с	у.е.
1	20	4	-77	1	-77	3	72,2	24
2	19	4	-77	1	-73	4	72,2	20
3	19	4	-77	1	-77	5	72,2	24
4	18	4	-77	1	-77	3	72,2	24
5	19	4	-77	1	-77	4	72,2	28
6	19	4	-77	1	-74	4	72,2	24
7	20	4	-77	1	-73	4	72,2	20
8	19	4	-77	1	-77	4	72,2	20

Таблица 25 — Параметры базовых станций

На концах участка размещены шлюзы  $s_0$  и  $s_{m+1}$  с параметрами (таблица 26):

Для расчета области покрытия необходимо задаться характеристиками устройств, с которых будет собираться информация (таблица 27).

Итоговое размещение БС должно удовлетворять заданным ограничениям:

- на стоимость  $C = 76$ ;
- на межконцевую задержку сети  $T = 0.001$  с.

Шлюз	$P_{tr}^R$	$G_{tr}^R$	$P_{recv}^R$	$L$
№	дБ	дБ	дБ	дБ
$s_0$	20	5	-77	1
$s_{m+1}$	20	5	-77	1

Таблица 26 — Параметры шлюзов

Устройство	$P_{tr}^u d$	$G_{tr}^u d$	$L$
	дБ	дБ	дБ
	9	1	0

Таблица 27 — Параметры устройств

Для расчета времени межкоцевой задержки, будем считать, что на каждую БС поступает трафик с интенсивностью  $\lambda = 1000$  1/с. Средний размер поступающих пакетов  $w = 1500$  байт.

Для поиска последовательности топологий задано отклонение  $\varepsilon = 0.5\%$  от найденного оптимального значения.

### Расчет радиуса связи и радиуса покрытия станций

По формуле (5) рассчитаем радиус покрытия для каждой станции (таблица 28) и радиусы связи между станциями и со шлюзами (таблица 29 и таблица 30).

Станция	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_{m+1}$
$r_j$ , м	48	43	38	43	43	0

Таблица 28 — Рассчитанные радиусы покрытия

В таблице 31 представлены результаты решения размещения станций. Для заданной  $\varepsilon = 1\%$ , т.е.  $d = 2$  был получены последовательности расстановок для **задач 2, 3 и 4** расчета оценок с помощью задачи ЦЛП, задачи «О ранце» и ЛП. В таблице представлены рекорды «недопокрытия», стоимости и задержки сети, а также размещения станций, число пройденных узлов дерева а и время счета. Задача ЦЛП и задача о ранце решались с помощью Optimization

$R_{jq}, \text{ м}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_0$	$S_{m+1}$
$S_1$	—	76	96	96	76	76	76
$S_2$	85	—	85	85	68	68	68
$S_3$	76	60	—	76	60	60	60
$S_4$	85	68	85	—	68	68	68
$S_5$	85	68	85	85	—	68	68

Таблица 29 — Рассчитанные радиусы связи базовых станций

$R_{jq}, \text{ м}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$
$S_0$	96	85	76	85	85
$S_{m+1}$	96	85	76	85	85

Таблица 30 — Рассчитанные радиусы связи шлюзов

Toolbox Matlab, а задача ЛП решалась с помощью библиотеки с исходным кодом Scipy Python. Как видно из результатов оценка, полученная с помощью задачи ЛП менее точная, приходится обходить большее количество узлов для нахождения рекордов по сравнению с методом оценки «недопокрытия» с помощью задач 2 и 3. В итоге возрастает итоговое количество пройденных узлов. В свою очередь метод ЛП имеет свое преимущество, так как время счета меньше.

Таблица 31 — Сравнения оценок «недопокрытия» для задачи ЦЛП и ЛП

№	Рекорд, м	Стоимость, у.е.	Задержка, сек	Размещение						
				$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
1	1	65	0,03244	$S_1$	—	$S_4$	—	—	$S_5$	—
2	1	65	0,03244	$S_1$	—	$S_5$	—	—	$S_4$	—
3	1	65	0,03244	$S_4$	—	$S_1$	—	—	$S_5$	—
4	0	65	0,03244	$S_4$	—	$S_5$	—	—	$S_1$	—
5	1	65	0,03244	$S_5$	—	$S_1$	—	—	$S_4$	—
6	0	65	0,03244	$S_5$	—	$S_4$	—	—	$S_1$	—
7	1	65	0,03244	—	$S_1$	$S_4$	—	—	$S_5$	—
8	1	65	0,03244	—	$S_1$	$S_5$	—	—	$S_4$	—
9	1	65	0,03244	—	$S_1$	—	$S_4$	—	$S_5$	—
10	0	65	0,03244	—	$S_1$	—	$S_4$	—	—	$S_5$
11	1	65	0,03244	—	$S_4$	$S_1$	—	—	$S_5$	—
12	0	65	0,03244	—	$S_4$	$S_5$	—	—	$S_1$	—
13	1	65	0,03244	—	$S_4$	—	$S_1$	—	$S_5$	—
14	0	65	0,03244	—	$S_4$	—	$S_1$	—	—	$S_5$
15	1	65	0,03244	—	$S_5$	$S_1$	—	—	$S_4$	—
16	0	65	0,03244	—	$S_5$	$S_4$	—	—	$S_1$	—
Метод оценки «недопокрытия» справа		ЦЛП				Задача «О ранце»			ЛП	

Число пройденных узлов	934	934	1590
Время счета, сек	5,412	5,136	3,613