

Мухтаров Амир Амангельдыевич

Разработка моделей и методов оптимального
размещения технологических объектов при
проектировании беспроводных широкополосных сетей
связи

Специальность 05.13.06 —
«Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Першин Олег Юрьевич

Официальные оппоненты: _____,
_____,
_____,
_____,
_____,
_____,
_____.

Ведущая организация: _____

Защита состоится _____ на заседании
диссертационного совета _____ при
_____ по адресу: _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке _____.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: _____, ученому секретарю диссертационного совета _____.

Автореферат разослан _____ 2021 года.

Телефон для справок: _____.

Ученый секретарь
диссертационного совета

_____,

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время тенденция бурного развития информационных технологий во всех сферах деятельности человека оказывает весомое влияние на нефтегазовый сектор страны. Современные компании, представляющие собой сложные многоуровневые производственные системы, для своего устойчивого развития требуют постоянного развития информационных технологий. Сегодня наблюдается бурное развитие процесса «цифровизации» нефтегазовой отрасли. Крупные международные нефтегазовые компании имеют подразделения, задачами которых является разработка и реализация в дальнейшем принципов интеллектуального месторождения: «Умные месторождения» («Smart Fields») в компании Shell, «Месторождение будущего» («Field of the Future») в компании BP и «iFields» в компании Chevron и др [1]. Развитие нефтегазового комплекса предусматривает переход к малолотным системам управления добычей, транспортировкой и переработкой сырья. Основными современными информационными технологиями являются: большие данные (англ. Big Data), искусственные нейронные сети (англ. Artificial Neural Network – ANN), системы распределенного реестра (англ. Blockchain), промышленные интернет вещей (англ. Industrial internet of things – IIoT), технологии виртуальной и дополненной реальности (англ. Virtual Reality – VR), мониторинг распределенных объектов беспилотными летательными аппаратами БПЛА (англ. Unmanned Aerial Vehicle – UAV). Необходимость в эффективной передаче больших объемов информации привела к развитию беспроводных технологий. **Беспроводные сенсорные сети широко используются на газовых месторождениях [2].** Информационные системы современных месторождений сегодня помимо данных первичного сбора и обработки информации технологических параметров основных производственных объектов содержат также колоссальный объем информации мультимедийного трафика. Сюда входят, например, данные по обнаружению утечек и разрушения трубопроводов; информация с камер видеонаблюдения, аналитики и т.д.

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

- возможность получения информации с любой точки контролируемой территории;
- быстрый ввод в эксплуатацию по системе подключение типа Plug-&-Play;
- сокращение капитальных затрат на создание сети;
- уменьшение затрат на эксплуатацию;
- высокая гибкость, 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.

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

- выбор типов технических средств и протоколов;
- выбор топологической структуры сети;
- анализ и оптимизация пропускной способности каналов связи, маршрутизации информационных потоков и др.

Задача синтеза топологии при комплексном проектировании ВШС является основной проблемой исследования в данной работе.

Степень разработанности темы. Создание и постоянное развитие современной инфраструктуры передачи данных является одной из основных задач современного производства. Бурное развитие беспроводных сетей во всех областях деятельности человека обуславливает целесообразность их использования на нефтегазовых месторождениях. 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 являются 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. Вишневский, А.К. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака, О.Ю. Першин, О.В. Семенова, А.А. Ларионов, Д.В. Козырев и другие. Наряду с отечественными работами диссертант обращался к трудам зарубежных авторов: Е.С. Кавальканте, Х. Лиу, А.В. Рейз, Д.Ли, Д.П. Хейман, С. Шен, Д. Вендель, У. М. Амин, В. Брахим, Х.Э. Кызыльез 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 ВШС специальных типов, широко представленных на практике: ВШС для контроля линейных траекторий и ВШС

2. *Krasnov, A.* Use of Wireless Networks for Gas Fields Automation [текст] / А. Краснов, М. Пракхова, Е. Khoroashavina // Oil and Gas Business. — 2016. — № 4. — с. 205–221.
3. On a problem of base stations optimal placement in wireless networks with linear topology [текст] / R. Ivanov [и др.] // Communications in Computer and Information Science. — 2018. — т. 919. — с. 505–513.
4. *Land, A. N.* An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems [текст] / A. N. Land, A. G. Doig // Econometrica. — 1960. — т. 28, № 3. — с. 497.
5. *Гэри, М.* Вычислительные машины и труднорешаемые задачи [текст] / М. Гэри, Д. Джонсон. — Мир, 1982. — 416 с.
6. *Емеличев, В. А.* Метод построения последовательности планов для решения задач дискретной оптимизации [текст] / В. А. Емеличев, В. Комлик. — Москва : Наука, 1981. — 208 с.
7. Classification and Regression Trees. [текст] / A. D. Gordon [и др.] // Biometrics. — 1984. — сент. — т. 40, № 3. — с. 874.
8. *Friedman, J. H.* Stochastic gradient boosting [текст] / J. H. Friedman // Computational Statistics and Data Analysis. — 2002. — февр. — т. 38, № 4. — с. 367–378.
9. *Kingma, D. P.* Adam: A method for stochastic optimization [текст] / D. P. Kingma, J. L. Ba // 3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings. — 2015. — дек.

- A16. *Мухтаров, А. А.* Задача размещения базовых станций широкополосной связи для обслуживания заданного множества рассредоточенных объектов [текст] / А. А. Мухтаров, О. Ю. Першин // Труды 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, 2019). — 2019. — с. 2992–2994.
- A17. *Мухтаров, А. А.* Оптимальное размещение базовых станций широкополосной беспроводной сети связи для обслуживания заданного множества рассредоточенных объектов [текст] / А. А. Мухтаров, О. Ю. Першин // Материалы 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019, Москва). — 2019. — с. 610–612.
- A18. *Мухтаров, А. А.* Оптимальное размещение базовых станций широкополосной беспроводной сети связи для обслуживания заданного множества рассредоточенных объектов [текст] / А. А. Мухтаров, О. Ю. Першин // Труды 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019, Москва). — 2019. — с. 531–537.
- A19. *Вишневский, В. М.* Расчёт характеристик тандемной сети с фиксированными длинами входящих пакетов методом машинного обучения [текст] / В. М. Вишневский, А. А. Ларионов, А. А. Мухтаров // Материалы 13-й конференции с международным участием "Новые информационные технологии в исследовании сложных структур" (ISAM 2020, Томск). — 2020. — с. 82.
- A20. *Мухтаров, А.* Математические модели задач оптимального размещения базовых станций беспроводной сети связи [текст] / А. Мухтаров, П. О. Ю. // 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.
- A21. *Мухтаров, А.* Задача оптимального размещения базовых станций широкополосной беспроводной сети. [текст] / А. Мухтаров, П. О. Ю. // Материалы Региональной научно-технической конференции «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России» (Москва, 2018). — 2019. — с. 177.

Список литературы

1. *Тчаро, Х.* Цифровизация нефтяной промышленности: базовые подходы и обоснование «интеллектуальных» технологий [текст] / Х. Тчаро, А. Воробьев, К. Воробьев // Вестник Евразийской науки. — 2018. — т. 2(10). — с. 1–17.

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 БПС указанных типов, определяющего топологию таких сетей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. сделан анализ современного состояния и перспектив развития БПС для обоснования актуальности исследований в области оптимизации их топологии;
2. проанализирована методика проектирования современных БПС с целью определения технологических требований к решению задачи синтеза оптимальной топологии сети и предложены формулы расчета технологических параметров БПС, необходимых для решения задач размещения базовых станций;
3. построены математические модели для задачи оптимального размещения базовых станций БПС 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 БПС с ячеистой топологией;
5. разработаны методы оценки характеристик производительности сети с помощью данных имитационного моделирования и методов машинного обучения.

Научная новизна результатов исследований заключается в следующем:

1. построены математические модели в виде экстремальной комбинаторной задачи и задачи ЦЛП для оптимального размещения базовых станций при проектировании БПС с линейной топологией;
2. разработан специальный алгоритм МВиГ для решения сформулированной экстремальной комбинаторной задачи;
3. разработана итерационная процедура нахождения последовательности лучших решений для задачи размещения базовых станций в рамках комплексного проектирования БПС с линейной топологией;
4. разработаны математические модели для задач проектирования БПС с ячеистой топологией;

5. разработаны модели прогнозирования оценок характеристик про-изводительности сети с помощью методов машинного обучения.

Практическая значимость. Разработанные модели и методы позво-ляют повысить качество и эффективность проектирования БШС для распределенных типов таких сетей.

Методы исследования. В работе использованы теория и методы оптимизации на конечных множествах и теории массового обслуживания

Основные положения, выносимые на защиту:

1. математические модели в виде экстремальной комбинаторной зада-чи и задачи Ц,ПП для оптимального размещения базовых станций при проектировании БШС с линейной топологией;
2. специальный алгоритм МВ и Г для решения сформулированной экстремальной комбинаторной задачи;
3. итерационная процедура нахождения последовательности лучших решений для задачи размещения базовых станций в рамках ком-плексного проектирования БШС с линейной топологией;
4. математические модели для задач проектирования БШС с ячеи-стой топологией;
5. модели прогнозирования оценок характеристик производительно-сти сети с помощью методов машинного обучения для многофаз-ной сети массового обслуживания.

Апробация работы. Основные положения и результаты ис-следования 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), «Губкин-ский 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, сентябрь 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);

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

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 1 из которых издана в журнале, рекомендованных

A10. *Иванов, Р. Е.* Задача оптимального размещения заданного множе-ства базовых станций беспроводной сети связи с линейной топо-логией [текст] / Р. Е. Иванов, А. А. Мухтаров, О. Першин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышлен-ности. — 2019. — т. 549, № 4. — с. 39—45.

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

- A11. *Ivanov, R. A* Problem of Optimal Location of Given Set of Base Sta-tions in Wireless Networks with Linear Topology [текст] / R. Ivanov, A. Mukhtarov, O. Pershin // Communications in Computer and Infor-mation Science. — 2019. — Vol. 1141 CCIS. — P. 53–64. — (Scopus, WoS).
- A12. On Optimal Placement of Base Stations in Wireless Broadband Net-works to Control a Linear Section with End-to-End Delay Limited [текст] / A. Mukhtarov [et al.] // Communications in Computer and Information Science. — 2020. — Vol. 1337. — P. 30–42.

В сборниках трудов конференций

- A13. *Винников, В. М.* Задача оптимального размещения базовых станций широкополосной сети для контроля линейной территории при ограничении на величину межкомпьютерной задержки [текст] / В. М. Винников, А. А. Мухтаров, О. Першин // Материалы 23-й Международной научной конференции "Распределенные ком-пьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь"(DCCN-2020, Москва). — 2020. — с. 148–155.
- A14. *Лазарева, В. Е.* Расчёт межкомпьютерных задержек и длин очередей в многошаговой tandemной сети с применением методов машинного обучения [текст] / В. Е. Лазарева, А. А. Ларионов, А. А. Мухтаров // Материалы Всероссийской конференции с международным уча-стием "Информационно-телекоммуникационные технологии и мате-матическое моделирование высокотехнологичных систем" (Москва, 2020). — 2020. — с. 43—48.
- A15. *Мухтаров, А. А.* Математические модели задачи размещения базовых станций для контроля линейной территории [текст] / А. А. Мухтаров, Р. Е. Иванов, О. Ю. Першин // Proceedings of the 22nd International Scientific Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2019, Moscow). — 2019. — с. 205–212.

Таблица 3 — Оценка времени расчета моделей межконцевой задержки.

Модель	Расчетное время, сек
Имитационная Модель МНК	172.2 $4.77 \cdot 10^{-6}$
Деревья Решений	$5.48 \cdot 10^{-6}$
Градиентный Бустинг	$5.01 \cdot 10^{-6}$
Искусственные Нейронные Сети	$5.72 \cdot 10^{-6}$

Как видно из результатов сравнения, модели, построенные на дереве решений, градиентном бустинге и искусственной нейронной сети показывают высокую корреляцию с данными тестовыми выборки. По диаграмме рассеивания можно сделать вывод, что наименьшим разбросом обладает регрессионная модель, построенная с помощью искусственной нейронной сети на алгоритме Адам.

В таблице 3 представлены время расчета новой выборки объемом 360. Как видно из расчетов, модели позволяют выиграть время в несколько порядков, что позволяет использовать их в ходе поиска размещения в алгоритме МВиГ.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. разработаны математические модели в виде экстремальной комбинаторной задачи и задачи ЦЛП для оптимального размещения базовых станций при проектировании беспроводных широкополосных сетей (БШС) с линейной топологией;
2. предложен специальный алгоритм МВиГ для решения сформулированной экстремальной комбинаторной задачи;
3. разработана итерационная процедура нахождения последовательности лучших решений для задачи размещения базовых станций в рамках комплексного проектирования БШС с линейной топологией;
4. разработаны математические модели для задач проектирования БШС с ячеистой топологией;
5. предложены модели прогнозирования оценок характеристик пропускной способности сети с помощью методов машинного обучения для многофазной сети массового обслуживания.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна.

Первая глава посвящена исследованию технологических параметров БШС, необходимых для решения задач размещения базовых станций. При развертывании сети необходимо обеспечить максимальное покрытие данного участка связь между шлюзами через систему размещенных базовых станций БШС. Для оценки производительности канала связи используется уравнение энергетического потенциала канала связи.

$$P_{tr} - L_{tr} + G_{tr} - L_{fs} + G_{recv} - L_{recv} = SOM + P_{recv}, \quad (1)$$

где: P_{tr} — мощность передатчика, дБм; L_{tr} — потери сигнала на антенном кабеле и разьемах 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 разьемах приемного тракта, дБ; SOM — запас на замирание сигнала, дБ; P_{recv} — чувствительность приемника, дБм.

Мощность принимаемой антенны рассчитывается из уравнения передачи Фрииса:

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

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

Исходя из параметров антен на приемнике и передатчике возможно оценить максимальную потерю сигнала при распространении между двумя антеннами в свободном пространстве (в воздухе): L_{fs} :

$$FSPL = \left(\frac{4\pi R f}{c} \right)^2. \quad (2)$$

Формула (2), выраженная в децибеллах будет выражаться как

$$L_{fs} = 20 \lg F + 20 \lg R + K, \quad (3)$$

где F — центральная частота, на котором работает канал связи, R — расстояние между приемной и передающей антенной и K — константа, зависящая от размерностей частоты и расстояния:

Дальность связи получаем из уравнений (1) и (3):

$$R = 10 \left(\frac{L_f s - 20 \lg F - K}{20} \right). \quad (4)$$

Используя формулу (4) можем рассчитать теоретическое максимальную дальность связи R_{jq} между базовыми станциями и радиусом покрытия r_j с предположением об отсутствии препятствий, отражений, влияния конуров местности и т. д. Это допущение приемлемо для рассматриваемого случая с открытой местностью. Для расчета дальности связи R_{jq} , 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_{rev}^R . Каждая базовая станция оснащена всенаправленной антенной с заданным усилением антенны G_{tr}^T . Данная антенна необходимо для покрытия заданной области. При вычислении радиуса покрытия r_j базовая станция будем считать *передатчиком*, а абонентское устройство *приемником*.

Вторая глава посвящена задаче оптимального размещения базовых станций БШС для контроля линейной территории. Проблема формулируется в виде задачи ЦП и в виде комбинаторной модели в экстремальной форме.

Задаче в виде ЦП формулируется следующим образом.

Для контроля над заданным линейным участком необходимо разместить базовые приемопередающие станции (далее называемые станциями) таким образом, чтобы максимизировать покрытие с ограничениями на суммарную стоимость размещенных станций.

Важно обеспечить связь любой станции со шлюзами на концах участка через систему размещенных станций. Задано множество станций $S = \{s_j\}$. Каждой станции приспаны параметры $s_j = \{r_j, \{R_{jq}\}, c_j\}$, $j = \overline{1, m}$, $q = \overline{1, m}$, $q \neq j$. Здесь r_j – радиус покрытия станции, R_{jq} – это радиус связи между станциями s_j и s_q , и c_j – это стоимость. Задан линейный участок длиной L с концами в точка 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.

Целевая функция будет представлена как:

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

где y_i^+ и y_i^- , $i = \overline{0, n+1}$ определяют охват покрытия (справа и слева, соответственно) станций.

регрессионных моделей. Наименьшим разбросом данных обладает регрессионная модель, построенная на алгоритме Адама. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности использования модели искусственной нейронной сети для оценки времени межконцевой задержки.

Диаграмма рассеивания

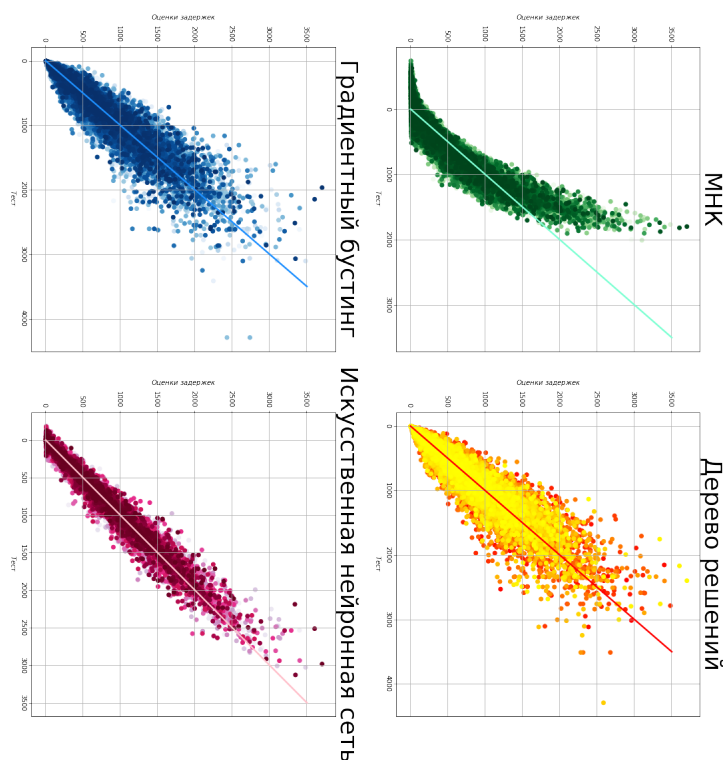


Рис. 1 — Диаграмма рассеивания полученных моделей

Таблица 2 — Метрики моделей

Регрессионные модели	R	STD	$MARE$
Метод наименьших квадратов	0,93	210,47	23,02
Дерево решений	0,95	161,19	2,14
Градиентный бустинг	0,952	165,04	2,16
Искусственные нейронные сети	0,998	83,59	3,14

распределений случайной величины. Каждая фаза такой сети имеет конечный буфер.

Для сетей массового обслуживания (СеМО) с конечным буфером получить аналитическое решение для всей сети достаточно тяжело. Одним из путей решений является использование имитационного моделирования многофазной сети. Построим имитационную модель, в которой методом Монте-Карло разыграем несколько сотен тысяч пакетов для расчета среднего времени задержек в системе.

Использование имитационного моделирования обладает одним существенным недостатком, а именно большие трудозатраты по времени. Метод Монте-Карло требует генерации нескольких сотен тысяч пакетов. При проверке ограничения с помощью имитационного моделирования, в ходе движения по дереву поиска в алгоритме МВиГ, тратится большое количество расчетного времени, что делает практически невозможным поиск оптимального решения за адекватное время. Решением данной проблемы будет аппроксимация данных имитационного моделирования с помощью методов машинного обучения (МО).

Получим выборку для тренировки регрессионных моделей.

На вход имитационной модели подавались:

- N – число станций в сети;
- M – размер буфера очередей на фазах;
- m_A – среднее значение случайного времени между поступлениями пакетов;
- σ_A – стандартное отклонение случайного времени между поступлениями пакетов;
- R – битовая скорость;
- m_C – среднее значение случайного размера пакетов;
- σ_C – стандартное отклонение случайного пакетов;

Средние значения (или математическое ожидание) и стандартные отклонения случайных величин были взяты с реальных данных. По этим параметрам проводилась аппроксимация случайных величин. Если коэффициент вариации $c_v = \frac{\sigma}{m} < 1$, то распределение принадлежит распределения Эрланга. Если $c_v = 1$, то экспоненциальному закону. Если $c_v > 1$, то случайная величина принадлежит гиперэкспоненциальному распределению.

На выходе рассчитывалась межконцевая задержка сети \bar{T} . Было сгенерирована выборка объемом 80000 строчек. Методом Монте-Карло для каждого случая протонялись 100000 пакетов. Полученные данные использовались для обучения регрессионных моделей методами МО. Регрессионные модели строились с помощью метода наименьших квадратов, с помощью дерева принятия решения [7], градиентного бустинга [8], и искусственные нейронные сети на алгоритм Адам [9]. На рисунке 1 представлены диаграммы рассеивания на тестовой выборке полученных

Была получена математическая модель в виде задачи целлочисленного-линейного программирования. Для частного случая, представленного в работе [3], где размещаются множество однотипных станций вдоль линейного участка, было представлено доказательство NP-полноты. Данная модель является обобщением частного случая, следовательно также является NP-полной. Модель ЦЛП рассчитывалась алгоритмом Лэнд и Дойг [4].

Одной из важных характеристик производительности сети является ее межконцевая задержка. Необходимо оценивать характеристику и использовать ее в качестве ограничения при синтезе топологической структуры сети. Представить данное ограничение в линейной форме невозможно.

Для удовлетворения данного ограничения и снижения времени решения задачи в главе представлена постановка задачи и ее формулировка в специальной экстремальной комбинаторной форме.

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, $l_t - l_i \leq R_{jq}$ и $l_t - l_i \leq R_{qj}$, 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. в одной точке стоит не более одной станции;
3. сумма задержек по всем размещенным станциям меньше заданной величины T – средней межконцевой задержки по времени по всей системе станций:

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

где S_σ – множество размещенных станций, \bar{T}_j – среднее время задержки на станции.

4. суммарная стоимость размещенных станций меньше заданного бюджетного ограничения C .

Каждой допустимой расстановке станций P соответствует величина покрытия $z(P)$, определяемая как суммарная область покрытия станций, входящих в набор пар P .

Для удобства описания в дальнейшем алгоритмов введем понятие «недопокрытия»:

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

Задача 1. Пусть G – множество всех допустимых расстановок P . Тогда требуется найти такую допустимую расстановку P^* , что

$$P^* = \arg \min_{P \in G} f(P) \quad (5)$$

Обозначим через Γ все множество вариантов размещения станций (не обязательно допустимых) из множества S на заданном множестве возможных мест их размещения. В множестве S станции упорядочены по неубыванию радиусов покрытия. Описываемая процедура использует известный прием разбиения множества G на подмножества с использованием некоторого параметра. Процесс формирования и последовательность исследований подмножеств обычно представляется с помощью дерева поиска, представляющего собой ориентированное от корня «Дерева ветвлений», где каждому подмножеству соответствует вершина на дереве. Множеству Γ соответствует корневая вершина.

В главе представлена процедура построения бинарного дерева поиска (дерева ветвлений) для полного перебора без повторений всех элементов множества Γ . Данная процедура используется в дальнейшем при построении дерева поиска в алгоритме МВиТ

Пусть G'_0 , где нижний индекс – номер итерации, исходное множество Γ . На каждой итерации, начиная с итерации $\nu = 0$, разбиваем текущее подмножество G'_ν на два подмножества $G'_\nu{}^1$ и $G'_\nu{}^2$. При этом множество G'_ν обычно называется «материнским», а множества $G'_\nu{}^1$ и $G'_\nu{}^2$ – «потомками» множества G'_ν или дочерними узлами.

В качестве параметра разбиения воспользуемся переменной τ_{ij} , принимающей два значения 0 и 1:

- $\tau_{ij} = 1$, если наложено условие, что на месте a_i расположена станция s_j ;
- $\tau_{ij} = 0$, если наложено условие, что на месте a_i станция s_j располагаться не будет.

Алгоритм метода ветвей и границ.

Для построения алгоритма МВиТ были разработаны методы исследования вершин дерева на возможность их закрытия. В соответствии с техникой МВиТ закрытые вершины в результате исследования, соответствующего ей множества G'_ν , возможно в трех случаях.

Случай 1. Множество G'_ν – пусто, т.е. доказано, что в множестве G'_ν при данном наборе фиксированных и запрещенных переменных τ_{ij} нет ни одной допустимой расстановки P .

Случай 2. Показано, что в множестве G'_ν не может быть допустимой расстановки P с меньшим значением целевой функции (5), 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 заданного большего искомого оптимального решения, например, L – длина всего отрезка.

системой станций, размещенных на выбранных в результате решения заданных вершинах множества A_2 , до плюза s_0 и общей стоимостью размещенных станций была бы минимальной. Вершины и станции будем, соответственно, идентифицировать как объекты или станции на них размещенные. Задано условие, что информация с вершин множества A_1 может передаваться непосредственно только на вершины множества A_2 , а со плюзом и между собой могут быть связаны только вершины множества A_2 .

Задано m типов станций. Вместо каждой вершины a_i , $i = \overline{n_1 + 1, n}$ введем m вершин с координатами вершины a_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 .

Составим граф $H = \{AD, E\}$, описывающий сеть для передачи потока информации между вершинами расширенного множества $AD = A_1 \cup A_2D$ и плюзом. Матрица смежности $E = e_{ij}$ графа H строится по следующим правилам.

- $e_{ij} = 1$, если расстояние между i -ой вершиной ($a_i \in A_1$) и j -ой вершиной ($a_j \in A_2D$) не более радиуса покрытия, приписанного этой вершине;
- $e_{ij} = 1$, если вершины a_i и a_j принадлежат разным множествам D_i и D_j и расстояние между ними не более радиуса связи той вершины, у которой радиус связи не больше радиуса связи другой вершины;
- $e_{i0} = 1$ ($a_i \in A_2D$) если расстояние от вершины до плюза не более R_i ;
- $e_{ij} = 0$, во всех остальных случаях.

Целевая функция задачу минимизации суммарной стоимости:

$$\sum_{a_i \in A_2D} C_i \cdot y_i \rightarrow \min,$$

где $y_i = 1$, если станция стоит на месте a_i и $y_i = 0$, в противном случае.

В **четвертой главе** приведено описание метода оценки времени межконцевой задержки сети для сети с кросс-трафиком.

Одним из важных ограничений для алгоритма МВиТ является межконцевая задержка сети.

Для оценки данной характеристики используют стохастические модели многофазной сетей массового обслуживания. В такой системе время между поступлением новых пакетов и время их обслуживания на каждой фазе являются случайными величинами и задаются с помощью функций

$$f(P) \leq f(\bar{P}) + d, \quad (9)$$

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

На основании неравенства (9) можно построить итерационную процедуру, увеличивая величину d , если при данном ее значении допустимого решения на этапе моделирования не найдено.

Обе задачи, в виде ЦЛП и в виде комбинаторной модели в экстремальной форме относятся к широкому классу задач размещения мощностей. Отличительной особенностью рассмотренных задач является наличие условия на связь между размещаемыми объектами (базовыми станциями) и линейная контролируемая территория.

Третья глава посвящена исследованию оптимальное размещение базовых станций БШС сети с ячеистой топологии. Специфика данной задачи размещения мощностей также является наличия условия связи между станциями.

Постановка задачи

Задано множество вершин $A = a_i$, $i = \overline{0, n}$ на плоскости. 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. Каждой вершине a_i приписана величина v_i – максимальный объем информации, снимаемой с объекта, расположенного на этой вершине;
 - A_2 – множество возможных мест размещения базовых станций.
- По определению

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

$$A_1 \cap A_2 = A.$$

Все вершины пронумерованы так, что $A_1 = \{a_i\}$, $i = \overline{1, n_1}$; и $A_2 = \{a_i\}$, $i = \overline{n_1 + 1, n}$.

Задано множество типов базовых станций $S = s_j$, $j = \overline{1, m}$, которые необходимо разместить на множестве A_2 . Каждой станции приписаны четыре параметра $s_j = \{r_j, R_j, \vartheta_j, c_j\}$, где: r_j – максимальный радиус покрытия; R_j – максимальный радиус связи между i -ой и j -ой станциями. Параметр характеризует расстояние, на котором обеспечивается связь между станциями; ϑ_j – максимальный объем информации в единицу времени, который может быть получен от объектов, обслуживаемых данной станцией; c_j – стоимость станции.

Требуется разместить станции таким образом, чтобы вся информация с объектов (вершин множества A_1) могла быть собрана и передана

Случай 3. Найдено оптимальное решение на множестве G_ν .

На каждом узле проводится оценка "недопокрытия" в виде суммы

$$W(G_\nu) = w_1 + w_2.$$

Величина $w_1(G_\nu)$ вычисляется как сумма все частичных «недопокрытий» слева от точки размещения a_k и величины радиуса покрытия, размещаемой станций. Оценку $w_2(G_\nu)$ вычисляется «для недопокрытия» справа на части β до конца всего отрезка (точки a_{n+1}). Данную оценку получим релаксацией условий, определяющих допустимую расстановку станций на участке β . Найдём такое подмножество S_β множества станций S , состоящее из еще не размещенных станций и дающее минимальное «недопокрытие» на участке β при выполнении только условий 2) – 4). Для этого формулируем следующую задачу булевого программирования.

Задача 2.

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

при условии:

$$\sum_{x_j \in S_\beta} c_j x_j \leq C, \quad (6)$$

$$\sum_{x_j \in S_\beta} x_j \leq m, \quad (7)$$

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

где $|\beta|$ – длина отрезка β , m – число свободных мест для размещения станций на отрезке β .

Очевидно, что эффективность использования оценки в методе ветвей и границ определяется точностью оценки и временем ее вычисления. **Задача 2** – это задача ЦЛП, являющаяся труднорешаемой [5]. На основном **задаче 2** можно получить две оценки менее точные, но имеющие более эффективные методы решения. Заметим, что при снятии ограничения (6) или (7) **задача 2** представляет собой целочисленную задачу о ранце с эффективным псевдополиномиальным алгоритмом решения [5]. При этом с точки зрения точности оценки, более перспективным представляется снятие ограничения (7), так как на практике, обычно, число возможных мест размещения станций существенно меньше числа размещенных станций, полученного в результате решения задачи.

Если множество G_ν получено из материнского добавлением условия $\pi_{kt} = 0$, то оценка $W(G_\nu)$ равна оценке материнского множества.

Если для найденной расстановки P выполняются условия 1) – 4), которые для единственной расстановки легко проверяются, и

$$f(P) < f(\hat{P}), \quad (8)$$

то $f(P)$ принимается за новый рекорд $f(\hat{P})$, расстановка P становится новым рекордным решением \hat{P} и выполняется шаг обратного хода по дереву поиска. Если неравенство (8) не выполняется, то рекорд остается прежним и выполняется шаг обратного хода.

Работа алгоритма МВит заканчивается, когда все вершины дерева поиска закрыты, при этом решение задано:

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

Были проведено численное сравнение двух методов для частного случая с однопипными станциями и без учета ограничения на время доставки пакетов в сети. В задаче требовалось разместить весь набор m имеющихся станций. Множество всех возможных вариантов комбинаций m станций на n местах (не только допустимых) запишем как Γ . Общее количество $\gamma \in \Gamma$:

$$\gamma = C_n^m \times m!$$

В качестве характеристики сравнения двух методов было выбрано количество пройденных узлов в ходе поиска оптимального значения, чтобы параметры выполнения алгоритмов не зависели от скорости машины и/или качества реализации программного кода данных алгоритмов.

В таблице 1 показаны результаты решения задач для различного числа количества размещения и количества станций с использованием полного перебора, алгоритма МВит и модели Ц.П. Для каждого набора станций и набора размещений были рассчитаны 10 примеров с различными числовыми входными данными. Для «—» решение задачи данной размерности методом полного перебора не было получено за 3 ч счета. Как видно из результатов, представленных в таблице, при увеличении размерностей задачи, алгоритм МВит позволяет найти решение быстрее в ходе движения по дереву поиска.

Построения последовательности топологий для итерационной процедуры моделирования.

Таблица 1 — Результаты численного решения.

Места размещения	Станции	Полный перебор	МВит	Ц.П
7	5	17550	933	753
9	5	71090	6478	2669
10	5	126180	1041	8551
12	6	—	8294	38569
13	6	—	18485	30369

При проектировании ВШС 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 [6].

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 , где

$$f(P^1) = f(P^*),$$

$$f(P^2) = \text{ext}\{f(P), P \in G \setminus P^1\},$$

...

$$f(P^k) = \text{ext}\{f(P), P \in G \setminus P^1 \cup P^2 \cup \dots \setminus P^k\},$$

В последовательности Γ каждое решение не лучше предыдущего и не хуже последующего.

Будем последовательно, начиная с первой расстановки, выполнять этап моделирования ВШС. Очевидно, что как только мы получим расстановку, удовлетворяющую всем требованиям этапа моделирования, мы решим задачу нахождения оптимальной топологии среди всех топологий, для которых выполняются все требования к показателям, исследуемым и рассчитываемым на этапе моделирования сети. Действительно, для всех предыдущих расстановок эти условия не выполняются, а все последующие расстановки в последовательности Γ не могут быть лучше по критерию $f(P)$.

Заменяя неравенство (8) на нестрогое и записывая все рекорды, полученные в процессе работы алгоритма, мы, очевидно, получим последовательность расстановок, где каждая расстановка не хуже предыдущей и не лучше последующей. Для получения последовательности Γ достаточно «перевернуть» полученную последовательность, где первый элемент становится 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 Γ можно сделать следующее. Зададим условие, что в результате решения задачи 1 мы хотим получить не только оптимальное решение, но и все решения не хуже оптимального на величину d . Для решения такого варианта задачи достаточно неравенство (8) в алгоритме МВит заменить следующим неравенством