

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им.
проф. М.А. Бонч-Бруевича»

На правах рукописи

Чан Тунг Зыонг

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ
ВОЗДУШНЫХ И НАЗЕМНЫХ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ В СЕТЯХ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

Санкт Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. РОЛЬ ВОЗДУШНЫХ ПЛАТФОРМ В СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ	12
1.1 Архитектура 6G SAGSIN	15
1.1.1 Космическая сеть	18
1.1.2 Воздушная сеть	19
1.1.3 Наземная сеть	20
1.1.4 Морская сеть.....	21
1.2. Применения воздушных платформ	24
1.3 Характеристики воздушных каналов связи.....	31
1.3.1 Канал воздух–земля	31
1.3.2 Канал воздух–воздух	36
1.4 Перспективы развития воздушных платформ в будущих сетях связи.....	37
1.4.1 Оптимизация размещения воздушной платформы	37
1.4.2 Оптимизация траектории воздушной платформы.....	41
1.5 Выводы по Главе 1	42
ГЛАВА 2. ЗАДАЧА РАЗМЕЩЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ В ТРЕХМЕРНОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА.....	45
2.1 Введение.....	45
2.2 Архитектура сети	46
2.2.1 Воздушный канал связи с пользователем	48
2.2.2 Наземный канал связи с пользователем	49

2.3 Формулировка проблемы исследования.....	50
2.3.1 Анализ зоны покрытия	51
2.3.2 Анализ пропускной способности	52
2.3.3 Оценка числа ABS.....	54
2.3.4. Задача оптимизации.....	55
2.4 Алгоритм для решения задачи определения местоположения ABS	56
2.5 Результаты моделирования	58
2.6 Выводы по Главе 2	66
ГЛАВА 3. ЗАДАЧА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ ВОЗДУШНЫХ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ.....	68
3.1 Проблема распределения ресурсов воздушных базовых станций.....	68
3.2 Модель сети и постановка задачи	70
3.3 Метод решения проблемы о распределении ресурсов воздушных базовых станций	73
3.4 Результаты моделирования	76
3.5 Выводы по Главе 3	82
ГЛАВА 4. ОПТИМИЗАЦИЯ АССОЦИАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ, МОЩНОСТИ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ	84
4.1 Введение.....	84
4.2 Модель сети	86
4.3 Формулировка проблемы	88
4.4 Алгоритм для решения задачи.....	90

4.4.1 Стратегия ассоциации пользователей.....	90
4.4.2 Распределение мощности и трехмерное размещение ABS	91
4.5 Результаты моделирования	96
4.6 Выводы по Главе 4.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104
Приложение	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В третьем десятилетии 21 века в области сетей связи продолжается интенсивное внедрение новых технологий телекоммуникаций, которое связано как с внедрением принципиально новых услуг телекоммуникаций, например, услуг телеприсутствия, так и с появлением возможности использования для развития сетей связи новых технологических решений, таких как беспилотные летательные аппараты и беспилотные транспортные средства. Все это вместе позволяет при планировании и функционировании сетей связи для обеспечения заданного уровня качества обслуживания и качества восприятия использовать множество различных технологий, что требует интегрального подхода к построению сетей связи. Не случайно, в начале третьего десятилетия 21 века появилась концепция интегрированных сетей связи SAGSIN (Space – Air – Ground – Sea Integrated Networks). В конфигурации сети Космос – Воздух – Земля – Море действительно требуется использование всех возможных ресурсов для обеспечения ее функционирования с требуемыми характеристиками. Создание такой сети планируется к 2030 году, а в настоящее время проводятся исследования и разработки в области создания ее составляющих и, в первую очередь, так называемых гибридных сетей воздух – земля. Именно это направление работ является ключевым в данной диссертации.

Существует достаточно много работ, посвященных использованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для построения сетей связи и их развития. Использование БПЛА позволяет получать информацию с беспроводных сенсорных полей, увеличивать связность наземных сетей, например, сетей автомобильного транспорта VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), организовывать связь в условиях чрезвычайных ситуаций, размещать базовые станции на БПЛА, в том числе привязных, и т.д. В диссертационной работе основное внимание

уделяется вопросам распределения ресурсов между воздушными базовыми станциями ABS (Aerial Base Station) и наземными базовыми станциями GBS (Ground Base Station) в процессе планирования построения гибридных воздушно-наземных сетей связи

Разработанность темы исследования. Определяющий вклад в теоретические и экспериментальные исследования рассматриваемых научных проблем внесли российские и зарубежные ученые: В. М. Вишневский, К. Е. Самуйлов, Ю. В. Гайдамака, Б. С. Гольдштейн, В. Г. Карташевский, А. И. Пармонов, А. Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый, М. С. Маколкина, Д. А. Молчанов, Р. В. Киричек, А. П. Пшеничников, В. К. Сарьян, С. Н. Степанов, М. А. Сиверс, Н. А. Соколов, В. О. Тихвинский, М. А. Шнепс-Шнеппе, M. Mozaffari, M. Alzenad, A. Al-Hourani и другие.

При этом до настоящего времени при решении научных задач в данном направлении исследований недостаточно внимания уделялось задачам распределения ресурсов в условиях перегрузки сетей связи для неоднородной наземной сети с различной плотностью пользователей в различных районах покрытия сети связи. В этих случаях и в целом при планировании гибридных воздушно-наземных сетей связи при совместном использовании ABS и GBS принципиально важную роль могут сыграть и современные методы искусственного интеллекта. В связи с изложенным в диссертационной работе решается следующая научная задача: разработка методов для оптимизации распределения ресурсов воздушных и наземных базовых станций на основе искусственного интеллекта.

Объект и предмет диссертации. Объектом исследования являются гибридные воздушно-наземные сети, а предметом исследования - распределение ресурсов воздушных и наземных базовых станций на основе искусственного интеллекта.

Цель и задачи диссертации. Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов распределения ресурсов в гибридных воздушно-наземных сетях с использованием метаэвристических алгоритмов, методов искусственного интеллекта с подкреплением и глубокого обучения.

Цель работы достигается путем последовательного решения следующих задач:

- анализ современной архитектуры интегрированных сетей связи Космос-Воздух-Земля-Море,
- анализ достижений в области построения гибридных сетей связи Воздух-Земля,
- разработка модели размещения ABS в трехмерном пространстве для поддержки GBS в условиях перегрузки при различной плотности пользователей в нескольких районах покрытия сети,
- разработка методики размещения ABS в трехмерном пространстве для поддержки GBS в условиях перегрузки при различной плотности пользователей в нескольких районах покрытия сети,
- разработка метода максимизации скорости передачи данных на основе совместной оптимизации размещения ABS и распределения мощности среди пользователей на базе использования методов обучения с подкреплением, а именно метода Q-learning и жадного алгоритма ϵ -greedy,
- разработка метода оптимизации для решения проблем ассоциации пользователей, распределения энергии и оптимизации местоположения ABS в гибридных сетях на основе радиуса покрытия GBS как динамического параметра и использования методов глубокого обучения DDPG и DQN.

Научная новизна. Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработаны модель и методика размещения ABS в трехмерном пространстве для поддержки GBS в условиях перегрузки, отличающиеся тем, что задача решается при различной плотности пользователей в нескольких районах на основе метаэвристического алгоритма PSO в условиях большой плотности пользователей в густонаселенных районах, на фестивалях и спортивных мероприятиях.

2. Разработан метод максимизации скорости передачи данных при использовании ABS, отличающийся тем, что на базе совместной оптимизации размещения ABS и распределения мощности среди пользователей на основе использования методов обучения с подкреплением, а именно метода Q-learning и жадного алгоритма ϵ -greedy, что позволяет уменьшить высоту расположения ABS и одновременно увеличить скорость передачи данных на 10-20% в зависимости от числа пользователей.

3. Разработан метод оптимизации для решения проблем ассоциации пользователей, распределения энергии и оптимизации местоположения ABS в гибридных сетях, отличающийся тем, что оптимизация проводится на основе радиуса покрытия GBS как динамического параметра и использования методов глубокого обучения DDPG и DQN, первый из которых дает увеличение скорости передачи на несколько процентов во всем исследованном диапазоне изменения радиуса покрытия GBS по сравнению со вторым методом.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в разработке моделей, методов и методик для планирования гибридных сетей воздушных и наземных базовых станций на основе использования искусственного интеллекта. При этом разработана новая модель и методика с использованием метаэвристического алгоритма PSO при различной плотности пользователей. Предложено использование метода Q-learning и жадного алгоритма ϵ -greedy для максимизации скорости передачи данных в гибридных воздушно-

наземных сетях. Кроме того, предложено использовать радиус покрытия GBS как динамический параметр и для решения задачи оптимизации на основе этой метрики применить методы глубокого обучения DDPG и DQN для планирования современных сетей связи.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы состоит в разработке научно-обоснованных методов планирования гибридной воздушно-наземной сети связи, а также в использовании основных результатов диссертационной работы в учебный процесс для бакалавров и магистров.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Интернет вещей и самоорганизующиеся сети», "Современные проблемы науки в условиях перехода к сетям шестого поколения (6G)», «Системы, сети и устройства телекоммуникаций". Акт реализации диссертационных исследований представлен в Приложении к диссертации.

Методы исследования. При проведении исследований были использованы методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории оптимизации, теории вероятностей, а также метаэвристические алгоритмы, методы обучения с подкреплением и глубокого обучения.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Модель и методика размещения ABS в трехмерном пространстве для поддержки GBS в условиях перегрузки при различной плотности пользователей в нескольких районах на основе решения задачи оптимизации их расположения с использованием метаэвристического алгоритма PSO, что позволяет использовать полученные результаты в густонаселённых районах, на фестивалях и спортивных мероприятиях.

2. Метод максимизации скорости передачи данных при использовании ABS на базе совместной оптимизации размещения ABS и распределения мощности среди пользователей на основе использования методов обучения с подкреплением, а именно метода Q-learning и жадного алгоритма ϵ -greedy, что позволяет уменьшить высоту расположения ABS и одновременно увеличить скорость передачи данных на 10-20% в зависимости от числа пользователей.
3. Метод оптимизации для решения проблем ассоциации пользователей, распределения энергии и оптимизации местоположения ABS в гибридных сетях на основе радиуса покрытия GBS как динамического параметра и использования методов глубокого обучения DDPG и DQN, первый из которых дает увеличение скорости передачи на несколько процентов во всем исследованном диапазоне изменения радиуса покрытия GBS по сравнению со вторым методом.

Достоверность результатов. Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования, а также публикациями в журналах из перечня ВАК и выступлениями как на российских, так и на международных научных конференциях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и были одобрены на следующих конференциях и семинарах:

The International Conference on Advanced Computing & Next-Generation Communication (ICACNC) – Санкт Петербург – 12.10.2023 - 13.10.2023, 24th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networks and Systems (NEW2AN) – Марракеш (Марокко) – 12.12.2024 - 13.12.2024, 8th International Conference on Future Networks & Distributed Systems (ICFNDS) – Марракеш (Марокко) – 1.12.2024 - 11.12.2024, 80-я научно-техническая конференция Санкт-

Петербургского НТОРЭС им.А.С.Попова, посвященная Дню Радио. 21-25 апреля 2025 года, Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов СПбГУТ, 17-21 февраля 2025, семинары кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 9 публикациях, в том числе в 3 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; 1 работе в базе данных SCOPUS, 5 работах в других научных изданиях и материалах конференций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена по специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 2, 4, 6, 7, 11.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно.

ГЛАВА 1. РОЛЬ ВОЗДУШНЫХ ПЛАТФОРМ В СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Эволюция мобильных сетей связи прошла несколько ключевых этапов, начиная с первого поколения (1G), ориентированного на аналоговую передачу голоса, до современных систем пятого поколения (5G), обеспечивающих высокие скорости передачи данных и низкие задержки. Каждое новое поколение вносило значительные улучшения в архитектуру и функциональность сетей связи.

Сети 1G, появившиеся в 1980-х годах, использовали аналоговую связь и обеспечивали только голосовые вызовы. Скорость передачи данных составляла до 2.4 кбит/с. Такие сети имели множество недостатков: ограниченная ёмкость, ненадёжная передача при переключении между сотами, низкое качество голосовой связи. Кроме того, они были достаточно уязвимы к прослушке со стороны третьих лиц [1]. Чтобы устранить недостатки 1G, сети второго поколения (2G), внедрённые в 1990-х годах, перевели связь в цифровой формат. Это позволило использовать шифрование данных, а также внедрить услуги коротких текстовых сообщений (Short Message Service, SMS) и базовые мобильные интернет-сервисы. Стандарты глобальной системы мобильной связи (Global System for Mobile Communications, GSM) и множественного доступа с кодовым разделением каналов (Code Division Multiple Access, CDMA) [2, 3] стали основой для дальнейшего развития мобильных сетей. Сети 2G обеспечивали скорость передачи данных до 64 кбит/с. Далее, примерно в начале 2000-х годов, было разработано третье поколение мобильных сетей (3G), чтобы удовлетворить растущий спрос на различные мультимедийные услуги, такие как видеозвонки и доступ в интернет. 3G обеспечивало скорость передачи данных до 2 Мбит/с [4].

Кроме того, были внедрены новые технологии, такие как широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов (Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA), Универсальная система мобильных телекоммуникаций (Universal Mobile Telecommunications Systems, UMTS) и CDMA 2000 [5]. В 2009

году была представлена сеть четвёртого поколения (4G), которая представлялась как начало долговременной эволюции мобильных сетей связи (Long-Term Evolution, LTE). Сети LTE работают как в режиме разделения по времени (Time Division Duplex, TDD), так и в режиме разделения по частотам (Frequency Division Duplex, FDD). В сети 4G были внедрены улучшенные мобильные широкополосные услуги, связь по протоколу IP (Internet Protocol), голосовая связь через IP (VoIP), видео в сверхвысоком разрешении, потоковое видео и онлайн-игры [6].

С учётом роста потребностей пользователей сеть 4G постепенно заменяется на 5G с использованием новых передовых технологий. Сеть 5G может поддерживать услуги широкополосных сетей (Wide Area Network, WAN), а также технологии беспроводных локальных сетей (Local Area Network, LAN) и персональных сетей (Personal Area Network, PAN). Более того, в сети 5G может быть использована передовая технология множественного доступа, называемая делением луча (Beam Division Multiple Access, BDMA), для увеличения пропускной способности системы. Стандарт IMT-2020 определяет три ключевых сценария использования для сетей 5G: улучшенная мобильная широкополосная связь (Enhanced Mobile Broadband, eMBB), ультра-надежная связь с низкими задержками (Ultra-Reliable and Low Latency Communications, URLLC) и межмашинная массовая коммуникация (Massive Machine-Type Communications, mMTC).

С развитием сетей 5G по всему миру, предлагаются значительные достижения в области беспроводной связи. eMBB обеспечивает пиковые скорости передачи данных до 10 Гбит/с, что позволяет использовать высокоскоростной интернет и создаёт возможности для появления виртуальных приложений. URLLC гарантирует ультра-надежную связь с задержкой всего 1 мс, что делает её критически важной для приложений, требующих отклика в реальном времени. В то же время, mMTC поддерживает в 100 раз больше подключённых устройств на единицу площади по сравнению с 4G. Благодаря этому возможности 5G открывают новые приложения, такие как виртуальная реальность (Virtual Reality, VR),

дополненная реальность (Augmented Reality, AR), смешанная реальность (Mixed Reality, MR), автономные транспортные средства, Интернет вещей (ИВ) и Индустрия 4.0 [7, 8].

Однако по мере роста числа подключённых устройств, увеличения объёмов, передаваемых данных и усложнения сценариев использования современные сети, сталкиваются с новыми вызовами. Кроме того, ожидается, что такие приложения, как голографическое телеприсутствие (Holographic Telepresence, HT), расширенная реальность (Extended Reality, ER), умная электросеть 2.0, Индустрия 5.0, а также туризм в космосе и глубоководный туризм станут основными приложениями будущих коммуникационных сетей. Однако требования этих приложений, такие как сверхвысокие скорости передачи данных, доступ в реальном времени к мощным вычислительным ресурсам, чрезвычайно низкая задержка, точная локализация и тактильные ощущения, а также крайне высокая надёжность и доступность, превосходят возможности сетей, которые может обеспечить 5G [9, 10].

Это привело к разработке концепции сетей шестого поколения (6G), которые будут направлены на интеграцию искусственного интеллекта, повсеместную связь, поддержку терагерцовых частот и сверхнизкие задержки [11]. Основные задачи 6G включают дальнейшее расширение пропускной способности, повышение энергоэффективности и обеспечение надёжной связи в условиях высокой мобильности [12]. 6G ожидается, что будет поддерживать сверхвысокие скорости передачи данных более 100 Гбит/с с задержкой менее 1 мс и коэффициентом готовности 99.99999%. Это открывает возможности для новых приложений, таких как голографическая связь, индустриальный ИВ, цифровые двойники и интеллектуальные системы управления городской инфраструктурой [13].

Одним из ключевых направлений развития 6G является интеграция различных слоев сетевой инфраструктуры, что породило концепцию интегрированных сетей Космос-Воздух-Земля-Море (Space Air Ground Sea

Integrated Networks, SAGSIN) — многослойной иерархической системы, объединяющей спутниковые, воздушные, наземные и морские элементы в единую сеть. Система SAGSIN позволяет значительно повысить эффективность использования радиоресурсов, минимизировать задержки передачи данных и улучшить качество обслуживания пользователей, особенно в условиях высокой мобильности и плотности подключений. На рисунке 1.1 представлена архитектура SAGSIN.

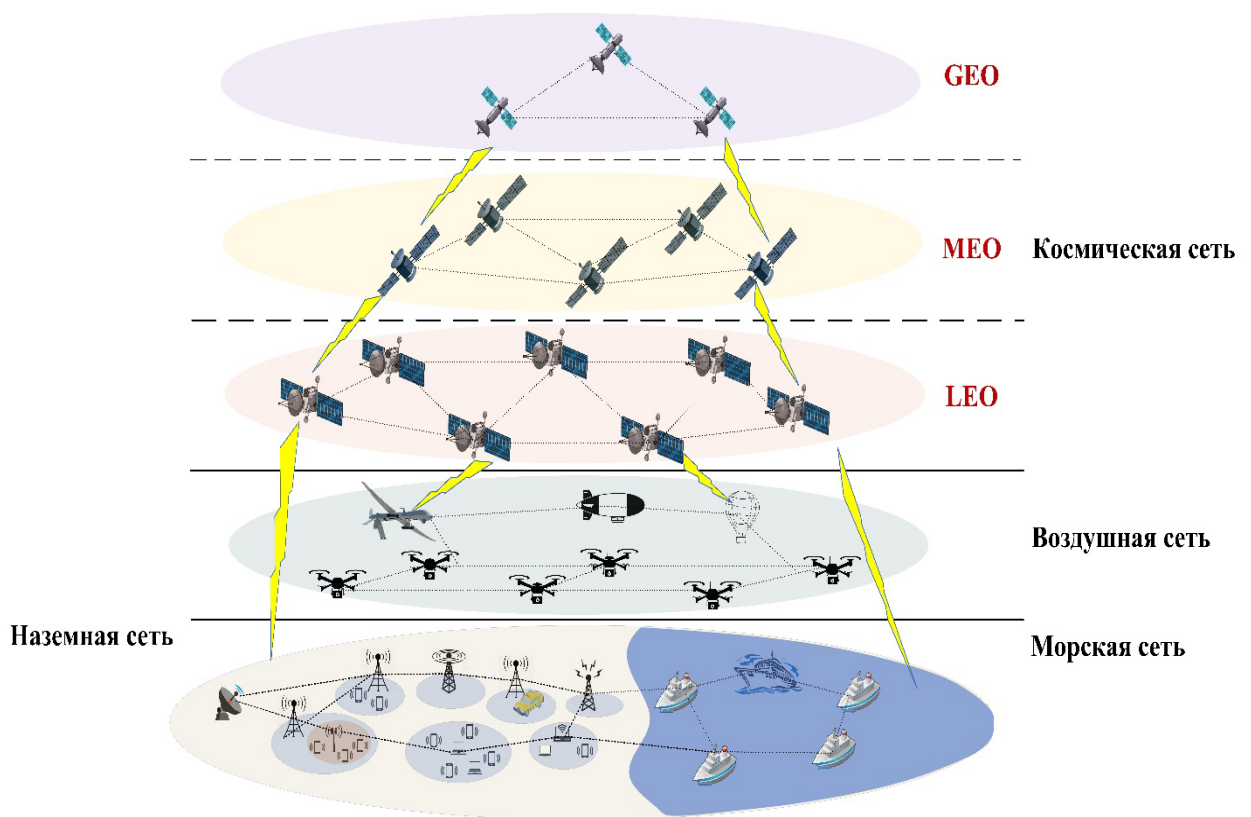


Рисунок 1.1 – Архитектура SAGSIN

1.1 Архитектура 6G SAGSIN

В последние десятилетия было предложено несколько интегрированных систем космос-воздух-земля-море, особенно систем космос-земля, которые были применены в беспроводных коммуникациях. Одной из известных

интегрированных сетей космос-воздух-земля является глобальная информационная сеть (Global Information Grid, GIG). Кроме того, было предложено несколько спутниковых коммуникационных систем, ориентированных на различные орбитальные высоты, включая системы спутников на геостационарной орбите (Geostationary Orbit, GEO), такие как система трансформационных спутников (Transformational Satellite, TSAT), системы спутников на средней орбите (Medium Earth Orbit, MEO), системы спутников на низкой орбите (Low Earth Orbit, LEO), такие как Iridium и Globalstar, и другие.

1) *GIG*: Как комплексный коммуникационный проект Министерства обороны США (Department of Defense, DoD), GIG интегрирует сети связи, сенсорные сети и операционные сети для обеспечения бесшовной глобальной связи [14]. Он состоит из четырех основных слоев: наземного слоя, аэрокосмического слоя, слоя близкого космоса и спутникового слоя. GIG формирует глобальную информационную сеть, которая соединяет классифицированные и не классифицированные вычислительные сети, обслуживая военный персонал США, включая солдат, моряков, пилотов, морских пехотинцев и принимающих решения. Используя передовые возможности передачи информации, GIG обеспечивает связь между любыми двумя или несколькими точками по всему миру. После более чем десятилетия разработки он стал наиболее представительной и технологически зрелой моделью в строительстве сетевых информационных систем.

2) *TSAT*: Система TSAT — это спутниковая система следующего поколения на GEO, предназначенная для военных приложений, разработанная Национальным управлением авиации и исследования космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, NASA), Министерством обороны США (DoD) и разведывательным сообществом [15]. Система TSAT состоит из 5 спутников GEO, которые связываются друг с другом с помощью лазерных каналов, образуя магистральную сеть со скоростью 10 Гбит/с. Это позволяет наземным терминалам

в реальном времени получать оптические и радарные изображения с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и спутников.

3) *O3b*: Система спутников O3b — это созвездие спутников на МЕО, которое было разработано компанией O3b Networks и в настоящее время внедряется [16]. Название O3b расшифровывается как «другие 3 миллиарда», что отражает цель системы — помочь 3 миллиардам людей в Африке, Азии и Южной Америке получить доступ к Интернету через спутниковую сеть. Сеть O3b предложила созвездие из 12-20 спутников МЕО на высоте около 8000 км и четыре спутника уже были выведены на рабочие орбиты.

4) *Iridium*: Система Iridium — это спутниковая беспроводная сеть личной связи, предназначенная для обеспечения глобального покрытия голосовыми и услугами передачи данных [17]. Разработанная компанией Motorola, она состоит из созвездия из 66 спутников LEO на высоте около 780 км, а также включает в себя наземные управляющие сооружения, шлюзовые станции и пользовательские терминалы. Каждый спутник оснащен встроенной обработкой, маршрутизацией и возможностями доставки, а также имеет четыре межспутниковых соединения (Inter-Satellite Links, ISL), которые обеспечивают прямую связь между соседними спутниками. В отличие от мобильных сотовых систем, где пользователи перемещаются между ячейками, система Iridium работает, перемещая ячейки по пользователям, что гарантирует бесперебойную связь по всему миру.

5) *Globalstar*: Система Globalstar — это мобильная спутниковая коммуникационная сеть, разработанная компанией Globalstar, предназначенная для обеспечения бесперебойной связи, недорогих услуг и полного глобального покрытия. Она состоит из 48 спутников на LEO, распределённых по 8 круговым орбитальным плоскостям на высоте 1400 км, при этом в каждой плоскости находится по 6 спутников, наклонённых на 52 градуса к экватору [18]. В отличие от системы Iridium, Globalstar имеет нециклическую структуру без отдельной сети, функционируя как расширение наземных сотовых и мобильных

коммуникационных систем. Основная цель системы — обеспечить пользователям по всему миру доступ к наземной общественной сети в любое время через сплюзовые соединения. Система поддерживает различные услуги, включая голосовую связь, передачу данных, факсимильную связь и радиолокацию, обеспечивая непрерывное глобальное покрытие связи.

1.1.1 Космическая сеть

Сеть космических спутников состоит из различных типов спутников, созвездий и соответствующих наземных инфраструктур, включая наземные станции и центры управления. Эти спутники работают на разных высотах и могут быть классифицированы как спутники на GEO, MEO, LEO [19] и на сверхнизкой околоземной орбите (Very Low Earth Orbit, VLEO) [20]. Спутники GEO обычно используются для телевизионных трансляций, международных телеграмм и микроволновой связи, в то время как спутники MEO и LEO, находящиеся ближе к Земле, обеспечивают высококачественные изображения для таких приложений, как топографическая разведка, обнаружение ресурсов и метеорологический мониторинг. Спутники VLEO, являющиеся классом спутников на самой низкой орбите, предполагается, что будут предоставлять высокоскоростные данные и точное позиционирование.

Космическая сеть также может быть классифицирована по функциональности на узкополосные и широкополосные спутниковые сети. Узкополосные спутниковые сети, такие как системы Iridium и Globalstar, основанные на MEO/LEO, в первую очередь предоставляют пользователям по всему миру голосовые и низкоскоростные услуги передачи данных. Широкополосные спутниковые сети, с другой стороны, используют широкополосные частоты для обеспечения высокоскоростной передачи данных со скоростью до 10 Гбит/с [21], и скорости в 1000 Гбит/с, начиная с 2020 года [22]. Кроме того, многослойные спутниковые сети (Multi-Layered Satellite Networks,

MLSN) интегрируют несколько типов спутников в иерархическую структуру, используя межспутниковые связи и ILLs для повышения связности [23].

Несмотря на свои преимущества, спутники сталкиваются с такими проблемами, как длина каналов передачи, большие задержки распространения сигнала и уязвимость к атакам, что делает глобальную мобильную связь сложной задачей. Для решения этой проблемы американская компания разработала систему Iridium, использующую спутники на низкой орбите для предоставления мобильного доступа в Интернет и динамичных сетей для наземных транспортных средств. Однако из-за значительных задержек распространения сигнала в спутниково-наземных каналах, приложения с реальным временем могут сталкиваться с проблемами качества обслуживания (Quality of Service, QoS). В качестве ключевой технологии в будущих сетях 6G система SAGSIN будет разворачивать большое количество спутников на VLEO, чтобы обеспечить широкое географическое покрытие, высокую пропускную способность и обширные широкополосные услуги связи для жилых, коммерческих, государственных и профессиональных пользователей по всему миру.

1.1.2 Воздушная сеть

Воздушная сеть состоит из воздушных судов, БПЛА, дирижаблей и воздушных шаров [24], образующих воздушную мобильную систему для сбора, передачи и обработки информации. Она позволяет автоматически маршрутизировать данные между воздушными судами и наземными станциями, между воздушными судами и морскими сетями, а также обеспечивает обмен данными со спутниковым слоем. Платформы на большой высоте (High-altitude platforms, HAP), расположенные в стратосфере на высоте примерно 20 километров над землей, являются ключевыми компонентами воздушной сети. По сравнению со спутниковыми коммуникационными платформами, HAP обладают преимуществами, такими как повышенная мобильность, более низкое время

отклика связи и сниженные эксплуатационные расходы. Они часто используются для вещания и многоточечной передачи, экстренной связи, помощи при чрезвычайных ситуациях, а также для крупных временных мероприятий.

Платформы связи на базе воздушной платформы (ВП), работающие ближе к поверхности Земли, обладают такими характеристиками, как короткое время отклика, высокая пропускная способность, высокая надежность передачи по линии прямой видимости, а также значительная мобильность и гибкость. Развертывание нескольких ВП позволяет создать воздушную подсеть для поддержки наземных транспортных средств в передаче информации о дорогах. Кроме того, ВП, оснащенные камерами и GPS-устройствами, могут использоваться для обнаружения препятствий и навигации. Однако, из-за быстро меняющейся топологии сети и колеблющихся условий связи, разработка эффективного механизма координации является важной для обеспечения безопасности сети при предоставлении высокоскоростной и связи с малыми задержками для пользователей на земле [25].

Воздушные сети, включающие как платформы на HAP, так и платформы на низких высотах (Low Altitude Platforms, LAP), служат дополнительными инфраструктурами широкополосной беспроводной связи для наземных сетей [24]. По сравнению с наземными базовыми станциями, воздушные сети предлагают такие преимущества, как более низкие затраты на развертывание, простота реализации и широкое покрытие, что делает их подходящими для предоставления региональных беспроводных сервисов.

1.1.3 Наземная сеть

Наземная сеть состоит из множества подсетей, таких как сотовые сети, мобильные ad hoc сети (Mobile Ad Hoc Networks, MANET) [26], беспроводные локальные сети (Wireless Local Area Networks, WLAN) [27], всемирная совместимость для микроволнового доступа (Worldwide Interoperability for

Microwave Access, WiMAX) [28], прибрежные базовые станции и другие. В целом, с быстрым развитием глобальной мобильной коммуникационной системы, технологии наземных сетей стали достаточно зрелыми [29]. Сотовые сети, которые развивались от первого поколения 1G до пятого поколения 5G, поддерживают различные услуги. WiMAX, например, является широкополосной беспроводной технологией, которая обеспечивает доступ в интернет на высокой скорости на более больших территориях по сравнению с типичными WLAN. MANET позволяют осуществлять децентрализованную связь без необходимости фиксированной инфраструктуры, что особенно полезно в чрезвычайных ситуациях или в районах, где отсутствуют функционирующие сети связи.

1.1.4 Морская сеть

Морская сеть представляет собой сложную систему, состоящую из двух основных компонентов: поверхностной сети и подводной сети. Каждый из этих компонентов играет важную роль в обеспечении связи и обмена данными в морской среде.

Поверхностная сеть: Поверхностная сеть включает в себя корабли, буи и беспилотные надводные аппараты (Unmanned Surface Vehicles, USV). Очевидно, что подвижность USV выше, чем у буйев. Корабли, буи и USV имеют возможности связи и могут предоставлять граничные вычислительные услуги. По сравнению с буями и USV, корабли обладают более высокой вычислительной мощностью. Однако их вычислительные возможности значительно уступают удаленным облачным серверам из-за ограниченных условий связи в удаленных морских районах, недостаточной пропускной способности и нестабильного качества каналов связи. Поэтому необходимо максимально эффективно использовать вычислительные ресурсы этих узлов для выполнения чувствительных к задержке задач в морской среде.

Подводная сеть: Подводная сеть, как правило, состоит из подводной наблюдательной сети и подводной самоорганизующейся сети.

- Подводная наблюдательная сеть использует для связи оптоволоконные и подводные кабели. Однако из-за суровых условий морской среды, а также высокой стоимости строительства и обслуживания развертывание такой сети в широком масштабе затруднено.
- Подводная самоорганизующаяся сеть является беспроводным расширением подводной сети и состоит из стационарных сенсорных узлов и мобильных узлов, таких как автономные подводные аппараты (Autonomous Underwater Vehicles, AUV), дистанционно управляемые подводные аппараты (Remotely Operated Vehicles, ROV), беспилотные подводные аппараты (Unmanned Underwater Vehicles, UUV) и другие. Для связи в такой сети используются акустические волны, однако этот способ связи имеет ограниченную пропускную способность и большие задержки.

В настоящее время морские средства связи имеют низкую эффективность и узкую полосу пропускания, что не удовлетворяет растущие потребности в экономической деятельности и жизни в морской среде. Поэтому использование беспилотных летательных аппаратов береговой зоны и создание новых систем связи являются важными и необходимыми мерами.

По сравнению с другими сегментами SAGSIN, наземная сеть может предоставлять пользователям высокую скорость передачи данных и большую пропускную способность, однако покрытие сети в удаленных районах ограничено. Кроме того, она уязвима к природным катастрофам и повреждениям инфраструктуры, созданной человеком, поэтому полагаться исключительно на наземную сеть не удастся для удовлетворения растущих потребностей в качественных услугах в будущем. WLAN, такие как Wi-Fi, обеспечивают местный доступ в интернет на высокой скорости, но их диапазон ограничен. Наземная сеть продолжает развиваться, включая различные технологии, в том числе 5G и более

поздние, для улучшения связи. Несмотря на эти достижения, в сельских или подверженных бедствиям районах наземные сети часто не могут обеспечить непрерывную и надежную связь, что требует интеграции с космическими, воздушными и морскими сетями для обеспечения более широкого покрытия и устойчивости.

SAGSIN в основном базируется на наземной сети, которая расширяется за счет космической сети, обеспечивая поддержку различных сетевых сервисов в пространстве, воздухе, на суше и в море. Эта интегрированная система предоставляет информационное обеспечение для различных видов деятельности пользователей. SAGSIN обладает рядом ключевых характеристик, включая сверхбольшие масштабы, трехмерную многослойную топологию, высокую гетерогенность и поддержку широкого спектра услуг. Космическая сеть эффективно использует преимущества больших расстояний передачи данных через спутники, а также гибкости и эффективности сетевого развертывания. Благодаря взаимосвязи мобильных спутниковых узлов, наземных узлов и воздушных узлов обеспечивается надежная и эффективная глобальная связь. Связь в воздушной сети осуществляется с помощью стратосферных дирижаблей, стратосферных аэростатов, БПЛА, вертолетов и других высоколетящих платформ. Эти технологии позволяют значительно увеличить дальность связи, расширить зону покрытия наземной сети, а также обеспечивать ретрансляцию и обмен данными в воздухе, что делает их особенно полезными для морских приложений. Наземная сеть играет ключевую роль в обеспечении экстренной связи в прибрежных зонах. Основное оборудование размещается на стационарных станциях вдоль побережья, на островах и рифах. В случае чрезвычайных ситуаций вблизи берега, таких как аварии или стихийные бедствия, фиксированные станции и мощные платформы могут быть использованы для обеспечения устойчивой экстренной связи в прибрежных районах и на окружающих островах. Морская сеть использует корабли и буи в качестве платформ для быстрого развертывания связи и

выполнения поисково-спасательных операций в условиях морских чрезвычайных ситуаций или природных катастроф.

1.2. Применения воздушных платформ

Воздушные платформы для Интернета Вещей

Интернет вещей (ИВ) [30] — это концепция подключения любого устройства к Интернету и другим подключенным устройствам. В последние годы быстрое развитие беспроводных технологий, включая 5G, Wi-Fi 6 и маломощные глобальные сети с широким покрытием (Low Power Wide Area Network, LPWAN) создало благоприятные условия для роста ИВ. Это расширение обеспечивает бесперебойное подключение и обмен данными в реальном времени, способствуя широкому спектру приложений в разных отраслях. Вместе с развитием концепции умных домов и умных городов в будущем, необходимо интегрировать различные типы устройств ИВ, таких как носимые устройства, умная бытовая техника, подключенные транспортные средства, промышленные датчики и системы мониторинга окружающей среды, которые применяются в разных сферах, включая здравоохранение, транспорт, производство и сельское хозяйство [31, 32]. Согласно последним исследованиям и прогнозам рынка, ожидается, что к 2025 году количество устройств ИВ может достичь 100 миллиардов [33], что свидетельствует о беспрецедентном росте потребности в подключении. Ожидается, что этот всплеск подключенных устройств приведет к созданию огромного объема данных, что потребует надежных механизмов управления, передачи и обработки данных для поддержки чувствительных к задержкам и высоконадежных приложений.

Основной проблемой при развертывании ИВ является ограничение мощности устройств ИВ, поскольку многие из них работают от батареи и имеют ограниченные возможности передачи. Эти ограничения затрудняют связь на больших расстояниях, особенно в удаленных или экстремальных условиях, таких как пустыни, горы или морские регионы, где традиционные инфраструктуры связи

редки или отсутствуют. Кроме того, приложения ИВ в управлении стихийными бедствиями, военном наблюдении и мониторинге окружающей среды часто требуют гибких и быстро развертываемых сетевых решений. По этим причинам интеграция ВП в системы связи ИВ представляет собой многообещающий подход к преодолению этих проблем. ВП с их мобильностью и возможностями адаптивного позиционирования могут выступать в качестве базовых станций (Base Station, BS) или ретрансляторов, обеспечивая надежную передачу данных даже в районах без покрытия наземной сетью [34, 35]. Более того, стратегическое размещение ВП может улучшить каналы связи за счет снижения требований к мощности передачи для устройств ИВ, тем самым продлевая их срок службы.

Для полного использования возможностей связи с помощью ВП в ИВ необходима интеграция с современными сетевыми парадигмами, такими как 5G и 6G. Эти передовые беспроводные сети предлагают возможности, такие как URLLC, mMTC и eMBB, которые являются ключевыми для поддержки приложений ИВ в реальном времени и в больших масштабах [36]. Кроме того, такие технологии, как искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (МО), играют значительную роль в оптимизации сетей ИВ с поддержкой воздушных платформ. Методы обучения с подкреплением могут использоваться для динамического планирования траекторий воздушных платформ, энергоэффективного распределения ресурсов и адаптивного управления сетью, обеспечивая оптимальное соединение и минимальную задержку [37, 38].

Несмотря на многочисленные преимущества, существует несколько технических проблем, которые необходимо решить, чтобы сети ИВ с поддержкой ВП достигли своего полного потенциала. Одна из ключевых задач — это оптимизация позиционирования и траектория движения ВП для максимального покрытия при минимальном потреблении энергии. Обеспечение бесперебойной передачи управления между ВП и наземными станциями — еще один критический вопрос, особенно в сценариях с высокой мобильностью. Кроме того, эффективное

распределение спектра и управление помехами необходимы для предотвращения перегрузки сети, особенно в плотных средах ИВ [39]. Проблемы безопасности и конфиденциальности также представляют собой значительные препятствия, поскольку системы ИВ с поддержкой ВП подвержены кибератакам, утечкам данных и несанкционированному доступу, что требует надежных механизмов шифрования, аутентификации и обнаружения вторжений [36].

Решения ИВ с поддержкой ВП имеют разнообразные применения в различных областях, включая экологический мониторинг, умное сельское хозяйство, интеллектуальные транспортные системы и реагирование на чрезвычайные ситуации. В прецизионном сельском хозяйстве воздушные платформы, оснащенные гиперспектральными и мультиспектральными сенсорами, могут собирать данные в реальном времени с устройств ИВ, используемых в сельском хозяйстве, помогая оптимизировать графики орошения, контроль за вредителями и оценку состояния почвы [39]. В умных городах ВП могут использоваться для мониторинга качества воздуха, дорожной обстановки и общественной безопасности через интегрированные сенсоры ИВ и аналитические системы на основе ИИ [36]. Кроме того, системы ИВ с поддержкой ВП играют ключевую роль в управлении катастрофами, предоставляя информацию о ситуации в реальном времени, операции по поиску и спасению, а также поддержку экстренной связи, улучшая время отклика и общую эффективность [39].

Летательный аппарат для сценариев общественной безопасности

Природные катастрофы, такие как наводнения, штормы, торнадо и другие, являются крайне непредсказуемыми событиями. Однако они часто наносят большой ущерб людям, имуществу, транспортным средствам и, в том числе, инфраструктуре наземных коммуникационных сетей. Поэтому управление до, вовремя и после катастрофы является крайне необходимым. Прогнозирование того, где и когда произойдут природные катастрофы, имеет большое значение для

минимизации ущерба, причинённого людям и имуществу. Для управления до катастрофы важную роль играет ВП, которая может использоваться для обнаружения и предупреждения на основе собранной информации. ВП могут помогать в раннем обнаружении катастроф, предоставляя данные в реальном времени, что, в свою очередь, может уменьшить ущерб от катастроф. Например, ВП могут быть развернуты в районах с суровыми климатическими условиями, таких как вулканы и высокие горы, где они могут легко делать фотографии или видео текущей ситуации.

В работе [40] Эрдель и соавторы предложили унифицированную систему, включающую интеграцию как беспроводной сенсорной сети (Wireless Sensor Network, WSN), так и ВП, где WSN служит триггером для автоматического запуска воздушной платформы с целью наблюдения и распределения ресурсов. В работе [41] рассмотрены этапы классификации катастроф и предложены соответствующие архитектуры сети для эффективного управления связью с использованием дронов в сочетании с данными от сенсоров.

Процесс спасательных работ и восстановления после катастроф также является важным аспектом, которому следует уделить внимание. В работе [42] Мунавар и соавторы предложили план обнаружения наводнений на основе изображений затопленных территорий. Эта модель может помочь в экстренном определении зоны катастрофы и сужении области поиска. В работе [43] предложен многозадачный алгоритм оптимизации для команды воздушных платформ, цель которого — осуществить поиск объектов в ограниченной зоне и обеспечить непрерывную связь между объектом и наземными силами. Было замечено, что время завершения задачи значительно сокращается с увеличением плотности ВП.

ВП могут быть использованы для поиска пропавших людей и обеспечения связи в зоне катастроф, где наземная инфраструктура связи повреждена. Таким образом, использование ВП является эффективной мерой для быстрого и широкого обеспечения связи в условиях чрезвычайных ситуаций. Однако из-за

ограниченного времени полета и невозможности круглосуточного мониторинга катастрофических зон необходимо тщательно рассчитывать оптимальное количество, местоположение и траекторию их движения.

Сеть наземной связи с поддержкой воздушной платформы

Для решения проблемы растущего числа устройств и мультимедийных приложений, что приводит к улучшению QoS и скорости передачи данных [44], коммуникация между устройствами (Device-to-Device, D2D) оказывается недостаточной. D2D-коммуникация представляет собой прямую связь между двумя устройствами в сети, минуя базовую станцию. Это позволяет снизить нагрузку на сотовую сеть, улучшить скорость передачи данных и уменьшить задержки, что особенно важно в условиях высокой плотности пользователей. D2D-коммуникации находят широкое применение в таких областях, как умные города, мобильные приложения для обмена данными в реальном времени и беспроводные сети для транспорта.

Однако радиус действия D2D-коммуникаций слишком короткий, и легко возникает помехи. Поэтому, благодаря своей мобильности, ВП может выполнять роль летающей базовой станции для распространения информации. В работе [45] Ван и соавторы исследуют подход управления мощностью для D2D-коммуникаций в сети с поддержкой ВП. Подобным образом ВП может сыграть роль в транспортной сети, передавая информацию между транспортными средствами. В работе [46] Хаббаз и соавторы используют ВП для улучшения производительности передачи данных в транспортных сетях. Авторы представили модель мобильности ВП и стохастическую модель анализа, описывающую доступность маршрутов, и предложили модель задержки передачи данных в присутствии ВП. В работе [47] предложено решение маршрутизации с использованием ВП для транспортных сетей с целью максимизации пропускной способности с учетом ограничений по задержке и скорости передачи данных. Фаваз и соавторы [48] развернули ВП как

узлы хранения и передачи в полностью совместимой сети VANET для повышения доступности связи и минимизации задержки доставки пакетов до конечной точки.

Кроме того, ВП могут поддерживать сети для улучшения покрытия и увеличения пропускной способности. Они могут быть экономически эффективным решением для предоставления беспроводной связи в географических районах с ограниченной инфраструктурой сотовой связи. В некоторых ВП могут быть развернуты для поддержки наземных станций, которые перегружены из-за внезапного увеличения числа устройств в определенное время и в определенной зоне, таких как спортивные мероприятия, фестивали и т.д.

Также стоит отметить, что с развитием технологий 5G и ИВ, ВП могут играть ключевую роль в создании автономных сетей, которые смогут эффективно обеспечивать бесперебойную связь в условиях большой плотности пользователей и повышенных требований к скорости передачи данных. В таких сценариях ВП смогут не только обеспечивать сотовое покрытие в условиях ограниченной инфраструктуры, но и активно управлять распределением нагрузки между различными узлами сети.

Воздушная платформа в роли пользовательского оборудования

Очевидно, что ВП могут выполнять роль пользовательского оборудования в инфраструктуре беспроводной сети. В таком случае ВП могут быть развернуты для мониторинга, наблюдения, доставки и удалённого зондирования [49, 50]. ВП могут быть использованы для инспекции и мониторинга как внутренних, так и внешних объектов. В работе [51] Дж. Гу и соавторы предложили новую платформу и архитектуру системы для совместной работы нескольких ВП для наблюдения. Система основана на поведении стада животных, методах распознавания мелких движущихся объектов и моделировании отслеживания с использованием множества источников данных. В работе [52] предложен метод мониторинга движения на дорогах с использованием ВП для решения проблем управления

дорогами. На самом деле, беспилотные интеллектуальные системы будут анализировать движение в реальном времени, а также различные меры безопасности и смягчения последствий, например, изменение маршрутов движения. В [53] авторы рассматривают использование ВП для мониторинга дорожного движения. Эта техника использует комбинацию маршрутизации инвентаризации и задачи маршрутизации с ограниченной пропускной способностью для мониторинга дорожного движения.

Для целей доставки ВП могут использоваться для транспортировки продуктов питания, медицинского оборудования, лекарств, вакцин, образцов крови, при этом транспортировка наземным транспортом может вызвать пробки и другие проблемы. ВП оснащена контроллером и GPS-модулем, что позволяет легко перемещаться между местом получения и местом доставки. Она получает пакет транзакции, который содержит координаты GPS и идентификационный код клиента. Когда ВП прибывает в место доставки, процессор проверяет идентификационный код, подтверждая тем самым доставку.

Для повышения эффективности использования ВП в качестве пользовательских устройств требуется надёжная связь с низкой задержкой между ВП и наземной сетью. Кроме того, возможно, что ВП могут привести к некоторым инцидентам, таким как падение груза, аварии, вызванные беспилотниками и самолётами. При использовании ВП в качестве пользовательского оборудования в сетях также открывает новые возможности для оптимизации ресурсов. Например, они могут быть развернуты в качестве временных BS в регионах с недостаточным покрытием, что позволит улучшить качество связи и ускорить передачу данных. В условиях, когда наземная инфраструктура недоступна или повреждена, ВП могут стать основным средством коммуникации, обеспечивая бесперебойную работу сетей в критических ситуациях.

1.3 Характеристики воздушных каналов связи

ВП, оснащённые средствами связи, привлекают всё больше внимания благодаря возможностям быстрого развертывания как в гражданских, так и в военных приложениях. В отличие от традиционных наземных базовых станций (Ground Base Station, GBS), ВП обладают высокой мобильностью, что позволяет динамически изменять их положение для обеспечения устойчивой связи. Однако это также приводит к возникновению специфических характеристик каналов передачи данных.

Воздушные каналы связи имеют отличия от каналов наземных и спутниковых систем, включая пространственные и временные вариации, не стационарность среды распространения, замирания сигнала и эффекты затенения конструктивными элементами платформы. Точная характеристика каналов передачи данных является важнейшей задачей при проектировании эффективных систем связи с воздушными платформами.

В зависимости от сценариев взаимодействия, воздушные каналы связи делятся на два основных типа: канал воздух–земля (Air-to-Ground, AG) и канал воздух–воздух (Aerial-to-Aerial, A2A).

1.3.1 Канал воздух–земля

Сравнение воздушно-наземного и наземного распространения радиоволн

Канал AG обладает отчетливо отличающимися характеристиками по сравнению с традиционными наземными каналами связи и имеет неотъемлемое преимущество перед наземными системами связи благодаря более высокой вероятности наличия линии прямой видимости (LOS). Это снижает требования к мощности передачи и может обеспечить более высокую надежность канала связи. В случаях, когда доступны только пути без прямой видимости (NLOS), при достаточно малых углах местоположения ВП, канал AG может испытывать

меньшие потери на дифракцию и затенение по сравнению с наземными каналами связи у поверхности земли.

С другой стороны, канал AG может обладать гораздо более высокой динамикой изменения своих характеристик по сравнению с традиционными наземными каналами связи. Это связано с высокой скоростью передвижения ВП. При статистическом моделировании такой канал можно считать квазистационарным лишь на ограниченных участках пространства. Подобное поведение обычно называют не стационарностью канала. Если ВП удалена от основных рассеивающих объектов или GBS, параметры канала могут изменяться медленнее, особенно при стационарном или зависающем положении платформы. В таких условиях неблагоприятные эффекты, например, длительные замирания сигнала, могут сохраняться на протяжении нескольких секунд или даже минут. Вследствие этого традиционные методы повышения надежности связи, такие как интерливинг или усреднение, оказываются малоэффективными. В большинстве случаев при полете на высотах, значительно превышающих высоту рассеивающих объектов, не стационарность канала AG обусловлена, прежде всего, окружающей обстановкой в районе наземной станции, включая близлежащие здания и особенности рельефа местности.

Кроме того, канал AG сталкивается с рядом других проблем из-за произвольных моделей движения и различных типов приложений связи [54, 55]. В качестве воздушного узла необходимо учитывать несколько технических характеристик ВП, включая тень от корпуса, механический и электронный шум от электрических устройств и двигателей платформы, а также характеристики антенн, включая размеры, направление, поляризацию и работу массива для MIMO-систем (Multiple Input, Multiple Output). Для движущихся ВП также необходимо учитывать эффект доплеровского сдвига и распространения для конкретных приложений связи [56, 57]. Для конкретной конфигурации может потребоваться учитывать оптимальную высоту ВП для поддержания LoS в данной среде.

Диапазоны частот для воздушно-наземного распространения

Как и для всех каналов связи, важным аспектом является выбор диапазона частот, поскольку характеристики распространения могут значительно изменяться в зависимости от частоты. Обычно для коммерческих ВП используются два популярных диапазона – 2.4 ГГц и 5.8 ГГц, которые применяются для управления и связи, несвязанной с полезной нагрузкой (Control and Non-Payload Communication, CNPC), во время полета. Однако для дополнительных функций могут использоваться и другие диапазоны частот для дополнительных функций, например, для передачи видеосигналов от ВП к GBS на частоте 3.4 ГГц. Диапазон 5.8 ГГц является лучшим выбором, чем 2.4 ГГц, для большинства сценариев из-за меньших помех. Для L и C-диапазонов, предназначенных для CNPC, а также для популярных в настоящее время не лицензированных диапазонов для передачи данных на ВП, аттенуация в тропосфере от атмосферных газов и гидрометеоров обычно незначительна. Этот не относится к работе на более высоких частотах, например, миллиметровых волн (mmWave), которые могут достигать 100 ГГц. Эти высокочастотные диапазоны могут страдать как от большей потери пути в свободном пространстве (Free Space Path Loss, FSPL), так и от атмосферных потерь. Поэтому эти диапазоны, как правило, будут использоваться для коротко срочных AG связей. В отличие от более низких частот, диапазоны mmWave предлагают большой пропускной канал, что является их основным преимуществом для 5G сотовых систем. Широкие полосы пропускания могут быть более устойчивыми к большим значениям сдвига и рассеивания Доплера, которые возникают у ВП, движущихся на высокой скорости. Диапазоны mmWave могут быть использованы для поддержки ВП в будущем для высокоскоростных приложений передачи данных в качестве полезной нагрузки для связи. Однако для CNPC эти диапазоны, вероятно, не будут хорошим выбором из-за более высокого ослабления и меньшей дифракции, что делает эти диапазоны ненадежными даже в случае небольших блокировок.

Конфигурация антенн для воздушно-наземного распространения

Из-за ограниченного пространства и аэродинамических требований ВП, выбор и установка антенн требуют особого подхода [58]. Основные факторы, влияющие на характеристики AG канала, включают количество, тип и ориентацию антенн, а также форму и материал конструкции ВП. В большинстве исследований каналов AG используются одиночные антенны, в то время как в работе [59] применялась антенная решётка. Существуют различные конфигурации один вход множественный выход (Single Input Multiple Output, SIMO) и MIMO, используемые для измерения характеристик AG канала [60, 61].

На практике наиболее часто используются всенаправленные антенны, поскольку они обеспечивают устойчивую связь при движении платформы. Направленные антенны, обладающие большим коэффициентом усиления, чувствительны к отклонениям в направлении, что приводит к снижению качества канала при изменении положения платформы. Поэтому для мобильных ВП предпочтительнее применение всенаправленных антенн.

Одной из потенциальных проблем антенн на борту является затенение сигнала элементами конструкции корпуса. Кроме того, ориентация антенн существенно влияет на качество AG канала. В исследовании [62] показано, что горизонтальная ориентация антенн обеспечивает лучшее значение RSS и пропускную способность по сравнению с вертикальной ориентацией в определённых сценариях. Использование нескольких антенн позволяет реализовать пространственное разнообразие, что повышает устойчивость канала даже в условиях слабого мультипутевого распространения [63]. MIMO и SIMO конфигурации обеспечивают прирост пропускной способности AG канала, зависящий от характеристик антенн и окружающей среды.

Также возможно применение многолучевых схем, таких как формирование и управление направлением луча. Однако ограниченное пространство ВП затрудняет реализацию пространственного разнообразия на низких частотах. В то же время,

использование фазированных антенных решёток на миллиметровых волнах может компенсировать фейдинг и улучшить покрытие канала, хотя требует высоких вычислительных ресурсов.

Исследования [64, 65] подтверждают эффективность использования MIMO систем для увеличения ёмкости AG канала. В [64] показано, что изменение диаметра антенной решётки и высоты полёта платформы влияет на ёмкость канала. В [65] рассматривается оптимизация расстояния между элементами линейной адаптивной решётки для повышения пропускной способности MIMO канала.

Эффект Доплера

Смещения частоты из-за эффекта Доплера могут вызывать сдвиг частоты, несущей и межподнесущие помехи, что является значимой проблемой для систем, использующих ортогональное частотное разделение (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Существуют многочисленные исследования, посвящённые моделированию Доплеровского расширения спектра для сценариев связи AG [66, 67]. Некоторые алгоритмы доступа к каналу, такие как многоканальный CDMA, показали свою устойчивость к расширению Доплера в каналах AG. В то время как расширение Доплера в OFDM можно контролировать путём настройки расстояния между поднесущими.

Из-за движения ВП возникает смещение частоты Доплера, которое зависит от скорости ВП и геометрии канала. Когда разные пути передачи сигнала имеют существенно разные частоты Доплера, это приводит к значительному расширению Доплера. Такая ситуация может возникнуть, если ВП находится относительно близко к земной станции GBS. В случае, если ВП находится дальше от GBS и на достаточной высоте, пути передачи сигнала должны иметь схожие частоты Доплера, поскольку объекты, создающие многолучевые компоненты, находятся под схожими углами относительно ВП. Эффект сильного смещения частоты,

постоянного для всех прерывающихся многолучевых компонентов, можно хорошо компенсировать с помощью синхронизации частоты.

Для описания статистических характеристик затухающих каналов обычно используют статистику первого и второго порядка. Большинство исследований по каналам AG рассматривают статистику первого порядка. В то же время, второй порядок статистики, например, скорость пересечения уровня огибающей и средняя длительность затухания, обсуждаются в работах [67, 68], а также многие исследователи изучают другие вторичные характеристики, в частности, функции корреляции во временной и частотной областях.

1.3.2 Канал воздух–воздух

Канал A2A отличается относительно стабильной LoS, что способствует низкому уровню затухания и высокой надёжности соединения. Благодаря отсутствию крупных препятствий на пути распространения сигнала, канал A2A характеризуется малыми потерями на затухание в свободном пространстве по сравнению с каналами воздух–земля [69].

Несмотря на доминирование LoS-компоненты, многолучевые отражения от земной поверхности или других объектов могут возникать при полётах на малых высотах. Однако влияние этих отражений на общую характеристику канала, как правило, незначительно. Тем не менее, при использовании более высоких частот, например, миллиметрового диапазона, эти эффекты могут стать более выраженными [70].

Одним из ключевых факторов, влияющих на характеристики канала A2A, является Доплеровский эффект. Изменение частоты вызвано относительным движением ВП и может достигать значительных значений при высокой скорости полёта. Это приводит к фазовым искажениям, ухудшению качества передачи сигнала, а также требует использования механизмов компенсации и коррекции на уровне физического слоя [71].

Кроме того, динамика канала A2A зависит от плотности трафика в воздушном пространстве, высоты полёта, погодных условий (облачность, дождь) и других факторов, которые следует учитывать при проектировании систем связи между ВП. Актуальные исследования направлены на разработку более точных моделей распространения и оптимизацию протоколов связи для обеспечения высокой пропускной способности, и надёжности A2A соединений.

1.4 Перспективы развития воздушных платформ в будущих сетях связи

В перспективных сетях связи, включая 5G и последующие поколения, ВП играют ключевую роль в обеспечении расширенного покрытия и повышения QoS. Одним из важных направлений развития является оптимизация размещения ВП, что позволяет эффективно обеспечивать связь в районах с перегруженной наземной инфраструктурой, а также в труднодоступных или удалённых регионах, где отсутствуют GBS. Кроме того, активное внимание уделяется планированию и управлению траекториями полёта, что позволяет обеспечивать сбор данных с датчиков и устройств ИВ, а также обновлять или назначать новые задачи этим устройствам в реальном времени. Эти направления способствуют формированию гибких, адаптивных и энергоэффективных сетей связи нового поколения.

1.4.1 Оптимизация размещения воздушной платформы

Как отмечалось в предыдущих разделах, воздушные базовые станции (Aerial Base Stations, ABS) на основе ВП рассматриваются как перспективный элемент архитектуры будущих сетей связи благодаря их высокой мобильности, оперативному развертыванию и низкой стоимости эксплуатации. Однако характеристики канала связи AG существенно изменяются при смещении положения платформы или при изменении условий окружающей среды. В связи с этим возникает необходимость в оптимизации размещения и траекторий полёта

ABS, что позволяет повысить эффективность покрытия, качество связи, а также снизить энергопотребление и задержки при передаче данных.

С целью расширения покрытия авторы в [72] предложили развертывание сети ВП в трёхмерном пространстве для обеспечения связи с пользователями на неровных и труднодоступных территориях. В рамках исследования были предложены две модели: модель оптимального покрытия и модель соединения. В [73] Mozaffari и др. исследуют развертывание ВП в трёхмерном пространстве с целью максимизации эффективности покрытия канала связи вниз, при этом минимизируя потребление энергии. Авторы получили вероятность покрытия канала связи вниз для ВП как зависимость от высоты платформы и усиления антенны. Для оптимизации покрытия земли и минимизации передающей мощности для одной малой ячейки в [74] исследуется эффективность покрытия канала связи для малых ячеек, а также определяется оптимальная высота платформы. В работе также рассматриваются два сценария для определенной географической области: отсутствие помех и полное наличие помех между малым количеством BS. В [75] предложен подход с макро-базовой станцией (Macro Base Station, MBS), использующий решающие и кооперативные стратегии для точного отображения развертывания ВП в нужные зоны. Для обеспечения покрытия другими ВП, Mazaffari и др. в [76] предлагают новую концепцию трёхмерных сетей, в которых присутствуют как ABS, так и пользователи, подключенные к сотовой сети через беспилотники. В рамках исследования также разработана оптимальная схема сотовой связи в трёхмерном пространстве для минимизации задержки связи с пользователями беспилотников, принимая во внимание задержки передачи, вычислений и соединения с backhaul.

Одной из важнейших задач является определение минимального числа ABS, необходимых для обеспечения стабильного и качественного покрытия всех пользователей в различных сценариях. В последние годы ученые активно работают над вопросами оптимизации развертывания таких станций, учитывая

динамичность и особенности трёхмерных сетей. Например, в работе [77] предложено использовать алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) для нахождения оптимальных мест для размещения ABS в трёхмерной сетевой модели. Главной целью этого подхода является минимизация числа ABS при гарантированном покрытии всех наземных пользователей. Важно отметить, что такой метод позволяет эффективно решать задачу выбора наиболее подходящих позиций для установки станций в условиях сложного рельефа местности и наличия различных препятствий.

В [78] Lyu разработал полиномиальный алгоритм последовательного размещения ABS, ориентированный на минимизацию их числа при полном покрытии пользователей. Этот подход становится особенно актуальным в условиях ограниченных ресурсов и необходимости повышения энергоэффективности сетей. В аналогичной теме работы Qu и др. [79] был рассмотрен алгоритм кластеризации с использованием метода K-средних, который направлен на минимизацию числа GBS с учётом требований пользователей к пропускной способности канала. Также в рамках этого исследования особое внимание уделяется сокращению времени развертывания платформ, что является важным фактором для повышения общей скорости развертывания сетевой инфраструктуры.

Другой важной задачей является оптимизация мощности передачи ABS. В [80] представлен трёхмерный алгоритм размещения ABS, который обеспечивает беспроводное покрытие как для наружных, так и для внутренних пользователей при минимальном числе станций. Этот подход нацелен на повышение энергоэффективности системы, позволяя снижать избыточные затраты на передачу данных и одновременно решать задачи улучшения качества связи.

Для дальнейшей оптимизации размещения и повышения общей производительности ABS была предложена модель, учитывающая не только количество GBS, но и различные ограничения, такие как коэффициент покрытия, пропускная способность нисходящей линии связи и время работы станций. В [81]

Huang и др. разработали модель оптимизации, направленную на определение минимального числа ABS с учетом этих факторов, что значительно улучшает качество обслуживания пользователей.

С увеличением числа ВП появляется необходимость разработки стратегии их оптимального размещения, которая будет обеспечивать максимальное количество обслуживаемых пользователей при минимальных затратах мощности. В [82] предложена стратегия, которая позволяет развертывать большое количество ВП, минимизируя при этом потребление энергии и увеличивая общее количество подключённых пользователей.

Авторы работы [83] предложили метод декомпозиции задачи размещения ВП на вертикальную и горизонтальную составляющие, что позволило использовать метод бисекционного поиска для решения трёхмерной задачи размещения. При этом основной целью является максимизация числа подключенных пользователей при заданном уровне QoS. Такой подход не только повышает качество связи, но и способствует стабильной работе сети, несмотря на изменение внешних факторов.

В работе Sabzehali и др. [84] использованы графо-теоретические методы для решения задач размещения ВП, построения магистральных соединений и создания многоуровневых сетей с несколькими BS. Эти методы нацелены на обеспечение беспроводного покрытия для всех наземных пользователей, что является важным условием для достижения широкого покрытия и улучшения качества связи в современных мобильных и беспроводных сетях.

Таким образом, предложенные подходы и алгоритмы представляют собой комплексные решения, направленные на улучшение покрытия, увеличение пропускной способности и минимизацию энергозатрат в сетях с использованием ABS. При учете различных факторов, таких как географические особенности, плотность пользователей и требования к скорости передачи данных, эффективное размещение и управление ABS становятся важными задачами для разработки высокоэффективных сетевых инфраструктур.

1.4.2 Оптимизация траектории воздушной платформы

Одной из ключевых проблем при использовании ВП в качестве мобильных BS является оптимизация их траектории полета. Существует множество факторов, которые могут влиять на траекторию полета, таких как требования пользователей, время полета и потребление энергии. Поэтому планирование оптимального маршрута полета становится важнейшей задачей для эффективного выполнения миссии.

Для развертывания одиночной ВП в работе [85] Арванитаки и Паппас исследуют использование одной ВП для сбора данных с удаленных сенсоров, применяя марковский канал. Исследование показывает, что вероятность успешной передачи информации зависит от расстояния между платформой и сенсорами. В работе [86] предложен метод минимизации максимального потребления энергии всеми сенсорами путем оптимизации расписания их активации и траектории ВП. В [87] рассматривается использование сети беспроводных сенсоров, объединенной с ВП, для мониторинга животных. Для достижения наилучшего варианта наблюдения в различных средах предлагаются две системы сбора данных для определения траектории ВП.

В работе [88] предложен алгоритм планирования траектории ВП для крупномасштабных задач, направленный на минимизацию общего времени выполнения миссии по сбору данных. В этом исследовании для решения проблемы с энергоснабжением ВП рассматривается использование подвижной зарядной станции (например, грузовика с аккумуляторами), которая следует за платформой. Алгоритм также учитывает положение этого грузовика, чтобы скорректировать траекторию платформы, поскольку расстояние между ними влияет на время выполнения задания. Чен и его коллеги [89] сосредоточены на развертывании ВП с ограничением по энергии и эффективном определении мест для зависания платформы с целью максимизации полезности сбора данных. В [90] предложена схема оптимизации траектории с учетом энергосбережения, которая использует как

солнечную энергию, так и зарядные станции. Авторы оптимизируют траекторию платформы, учитывая среднюю скорость передачи данных, общее потребление энергии и справедливость покрытия устройств Интернета вещей.

Кроме того, существует множество исследований, посвященных траекториям полетов множества ВП. В [48] рассматриваются методы эффективного размещения и оптимизации траектории ВП для сбора данных с наземных устройств ИВ с целью минимизации общего потребляемого передающего мощности. Поскольку местоположение активных устройств ИВ изменяется во времени, а одно устройство может находиться в зоне покрытия нескольких платформ, задача совместного развертывания платформ, распределение подключений устройств ИВ и управления мощностью представляет собой большую сложность. В [91] предложена схема распределения миссий между несколькими ВП с планированием их траекторий. Эти платформы ищут цели в заданной области и затем передают информацию команде спасателей на землю. В работе [92] Ву и его коллеги предлагают эффективный итеративный алгоритм, направленный на максимизацию минимальной пропускной способности всех наземных пользователей, путем оптимизации планирования многопользовательской связи, распределения подключений устройств ИВ, траектории платформ и управления мощностью. На основе предсказания местоположения пользователей через Twitter, формулируется задача планирования сети, оптимизации траекторий и управления мощностью для максимизации суммарной мгновенной скорости передачи данных при выполнении требований к скорости передачи для пользователей [93].

1.5 Выводы по Главе 1

1. В данной главе рассмотрен процесс развития телекоммуникационных сетей. С развитием технологий появляются новые требования к будущим сетям, и поэтому актуальными становятся космические, воздушные, наземные и морские сети SAGSIN. Каждый тип сети имеет свои особенности: космическая сеть

обеспечивает широкое покрытие при высокой задержке и потере сигнала, воздушная сеть обладает гибкостью развертывания, но имеет ограничения в ресурсах, а наземная сеть отличается высокой скоростью передачи данных, но ограничена в зоне действия.

2. В данной главе рассмотрены различные применения ВП, включая ИВ, экстренные ситуации, умный транспорт и сельское хозяйство. Эти платформы позволяют преодолеть ограничения по радиусу покрытия и скорости передачи данных, обеспечивая мобильность и гибкость в труднодоступных районах. Их внедрение в современные сети связи, такие как 5G и последующие поколения, открывает новые возможности для улучшения QoS и минимизации задержек. В то же время, интеграция этих технологий сопровождается вызовами, такими как оптимизация положения воздушных платформ, управление ресурсами и обеспечение безопасности, что требует дальнейших исследований и разработки решений для эффективного использования ABS.

3. В данной главе были рассмотрены характеристики каналов воздух-земля и воздух-воздух. Канал AG имеет преимущества высокой вероятности прямой видимости и меньшие потери на дифракцию, но страдает от не стационарности из-за движения ВП. Важно учитывать выбор частотных диапазонов и конфигурацию антенн для обеспечения устойчивой связи. Канал воздух-воздух, в основном, определяется компонентом LOS, а влияние многолучевых эффектов минимально, хотя эффект Доплера также оказывает влияние при высоких скоростях движения.

4. В данной главе рассмотрены подходы к оптимизации размещения ABS и траекторий полёта, направленные на улучшение покрытия и качества связи, а также на снижение энергозатрат. Применение алгоритмов роя частиц, кластеризации и графо-теоретических методов позволяет эффективно решать задачу размещения ВП с учётом географических особенностей и плотности пользователей. Оптимизация траекторий полёта способствует динамическому и адаптивному

покрытию, минимизируя задержки и энергозатраты. Эти методы обеспечивают высокую эффективность и стабильность сетевых инфраструктур.

ГЛАВА 2. ЗАДАЧА РАЗМЕЩЕНИЯ ВОЗДУХНЫХ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ В ТРЕХМЕРНОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА

2.1 Введение

В последние годы количество устройств, подключаемых к сетям связи, значительно возросло. К ним относятся смартфоны, ноутбуки, планшеты и другие гаджеты. Одновременно с этим пользователи все чаще используют высокоскоростной доступ к качественным видеосервисам, что предъявляет повышенные требования к скорости передачи данных [94] и низкой задержке [95]. В результате наземные сети связи сталкиваются с серьезными вызовами при обеспечении потребностей пользователей, особенно в удаленных районах, где инфраструктура либо отсутствует, либо может быть повреждена или уничтожена в результате стихийных бедствий [96]. В связи с этим возникает необходимость разработки новой модели сети, способной дополнять и усиливать наземную инфраструктуру для эффективного решения существующих проблем [97].

ABS [98] играют незаменимую роль в будущих беспроводных сетях благодаря своей гибкости и низкой стоимости развертывания [99]. Их можно использовать для обеспечения связи в качестве временных или вспомогательных BS [100], а также для сбора данных с датчиков и устройств ИВ в труднодоступных районах, где затруднительно строительство GBS [50]. Современные технические достижения значительно увеличили дальность полета ABS и улучшили их устойчивость в воздухе [101]. Однако в процессе эксплуатации эти станции необходимо подзаряжать, что создает дополнительные ограничения. Поэтому для увеличения покрытия и количества подключенных устройств необходимо оптимизировать расположение ABS при развертывании.

Основной вклад в данной главе заключается в разработке модели и метода построения гетерогенной сети связи, которая отличается от известных тем, что для поддержки перегруженных GBS при резком увеличении числа пользователей

предлагается развертывание ABS. Для оптимизации их количества и 3D-размещения предлагается использовать метаэвристический алгоритм поиска, а именно алгоритм PSO, позволяющий обеспечить обслуживание максимального числа пользователей при соблюдении заданных требований к QoS [102].

Глава организована следующим образом:

- в разделе (2) представлена предложенная архитектура гетерогенной сети, в которой заранее развернуто фиксированное количество GBS, а пользователи распределены согласно определенному принципу.

- в разделе (3) формулируются проблемы исследования на основе анализа зоны покрытия и пропускной способности как GBS, так и ABS. На этой основе оценивается предполагаемое количество ABS, которые необходимо развернуть.

- в разделе (4) представлен алгоритм решения проблемы определения размещения ABS на основе метаэвристического алгоритма PSO.

- в разделе (5) приводятся результаты моделирования с оценкой эффективности предложенного метода.

2.2 Архитектура сети

В данной работе рассматривается гетерогенная сеть, представленная на рисунке 2.1. Она включает в себя GBS, ABS и пользователей. Из-за ограниченной пропускной способности GBS не могут обеспечить подключение всех пользователей, находящихся в зоне покрытия GBS. В таких случаях ABS применяются как для разгрузки сети, так и для обеспечения беспроводного соединения пользователей, которые еще не подключены. Плотность пользователей изменяется как во времени, так и в пространстве. Например, в рабочие дни наибольшая концентрация пользователей наблюдается в офисах в дневное время, тогда как в часы пик на улицах нагрузка на сеть возрастает. Из-за этих динамических изменений фиксированная инфраструктура не всегда справляется с требованиями пользователей. ABS, благодаря своей мобильности и гибкости,

могут адаптироваться к изменяющейся плотности трафика, расширяя зону покрытия сети и поддерживая необходимый уровень QoS.

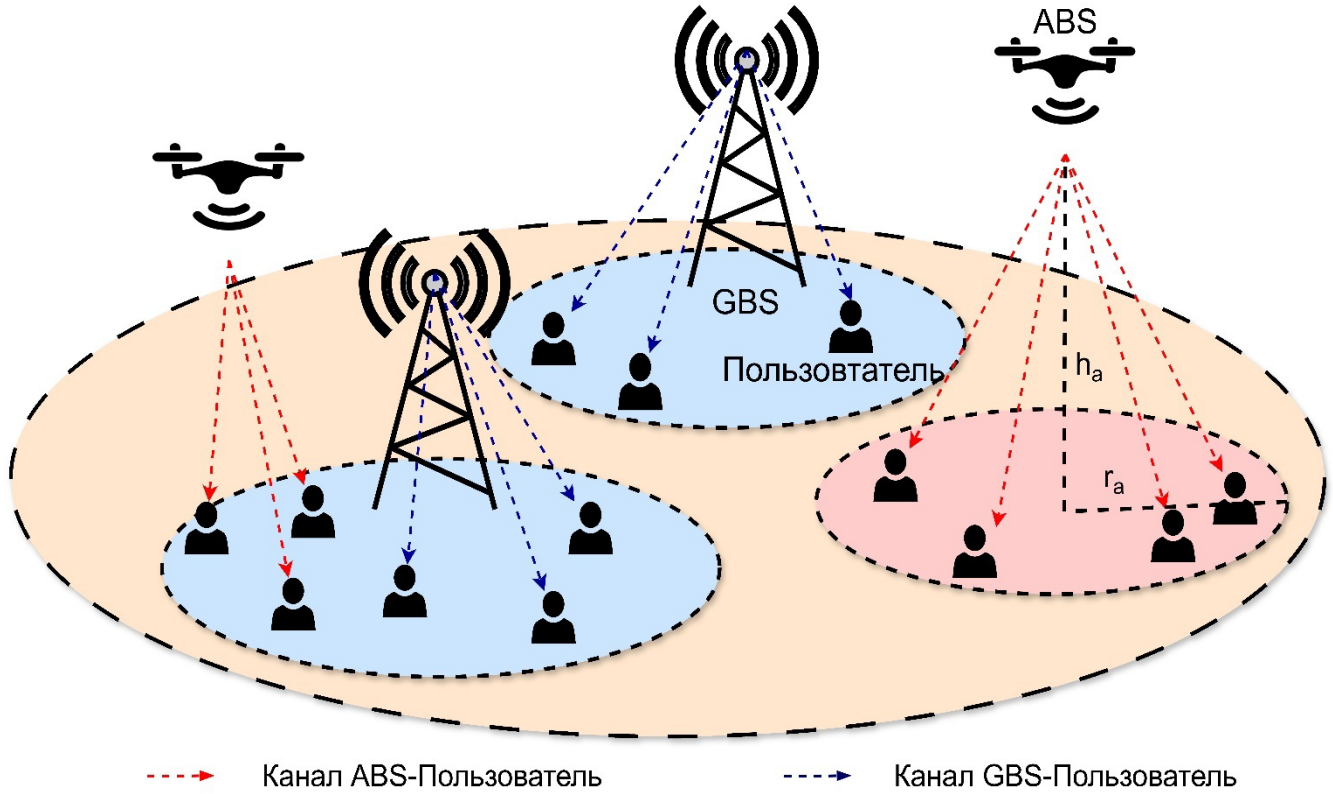


Рисунок 2.1 – Модель сети

Предположим, что в рассматриваемой зоне развернуты GBS для обеспечения долгосрочного подключения, общее число которых составляет M_g . Расположение каждой GBS g , где $g \in \{1, \dots, M_g\}$, задается координатами (x_g, y_g, h_g) . Для поддержки GBS планируется использовать M_a ABS, где M_a – предполагаемое количество развернутых ABS. Положение каждой ABS a обозначает как (x_a, y_a, h_a) ; где $a \in \{1, \dots, M_a\}$, (x_a, y_a) – координаты на поверхности земли, h_a – высота полета ABS. ABS может свободно перемещаться в воздухе, однако ее высота должна находиться в пределах, регламентируемых местными законодательными нормами.

Кроме того, в рассматриваемой зоне находятся N_u пользователей. Расположение каждого пользователя i задается как (x_i, y_i, h_i) , где $i \in \{1, \dots, N_u\}$; (x_i, y_i)

– координаты на поверхности земли, h_i – относительная высота пользователя над землей.

2.2.1 Воздушный канал связи с пользователем

Модель воздушного канала прямой связи с пользователем A2U (Aerial-to-User) представлена в работах [99], [103]. В общем случае, канал A2U имеет две составляющие: прямая видимость (Line-of-Sight, LoS) и непрямая видимость (NLoS) [104]. Вероятность наличия прямой видимости P^{LoS} является важным фактором в канале A2U и может быть выражена следующим образом:

$$P^{LoS} = \frac{1}{1 + s_1 \exp\left(-s_2 \left(\frac{180}{\pi} \theta - s_1\right)\right)}, \quad (2.1)$$

где s_1 и s_2 – параметры, зависящие от окружающей среды (сельская местность, город); θ – угол местоположения между ABS и пользователем i , равен $\arctan\left(\frac{h_{a,i}}{r_{a,i}}\right)$; $h_{a,i}$ – высота полета ABS a относительно пользователя i ; $r_{a,i}$ – горизонтальное расстояние между ABS a и пользователем i , равно $r_{a,i} = \sqrt{(x_a - x_i)^2 + (y_a - y_i)^2}$.

Таким образом, потери распространения $PL_{a,i}$ (в дБ) между ABS a и пользователем i можно описать следующим образом [99]:

$$PL_{a,i} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f_a d_{a,i}}{c} \right) + P^{LoS} \eta_{LoS} + P^{NLoS} \eta_{NLoS} \quad (2.2)$$

где f_a – частота работы ABS (ГГц); $d_{a,i}$ – трёхмерное расстояние от ABS a до пользователя i и $d_{a,i} = \sqrt{r_{a,i}^2 + (h_a - h_i)^2}$; h_i – относительная высота пользователя относительно земной поверхности; c – скорость света; η_{LoS} и η_{NLoS} – средние дополнительные потери распространения для каналов с LoS и NLoS соответственно [99]; P^{NLoS} – вероятность не прямой видимости и $P^{NLoS} = 1 - P^{LoS}$.

На самом деле существует компромисс между потерями распространения PL и высотой полета ABS. Как правило, при полете на больших высотах потери распространения PL увеличиваются из-за увеличения расстояния. Однако, если ABS находится на более низкой высоте, расстояние между ним и пользователем сокращается, но вероятность наличия канала LoS снижается из-за возможных препятствий на земле, что также увеличивает потери распространения. В этом случае вероятность NLoS-соединения будет высока, поэтому, как показано на рисунке 2.2, потери распространения сначала уменьшаются, а затем постепенно увеличиваются. Например, при горизонтальном расстоянии между ABS и пользователем $r = 400$ м оптимальная высота ABS составляет $h = 371$ м, когда потери распространения достигают минимума $PL = 95$ дБ.

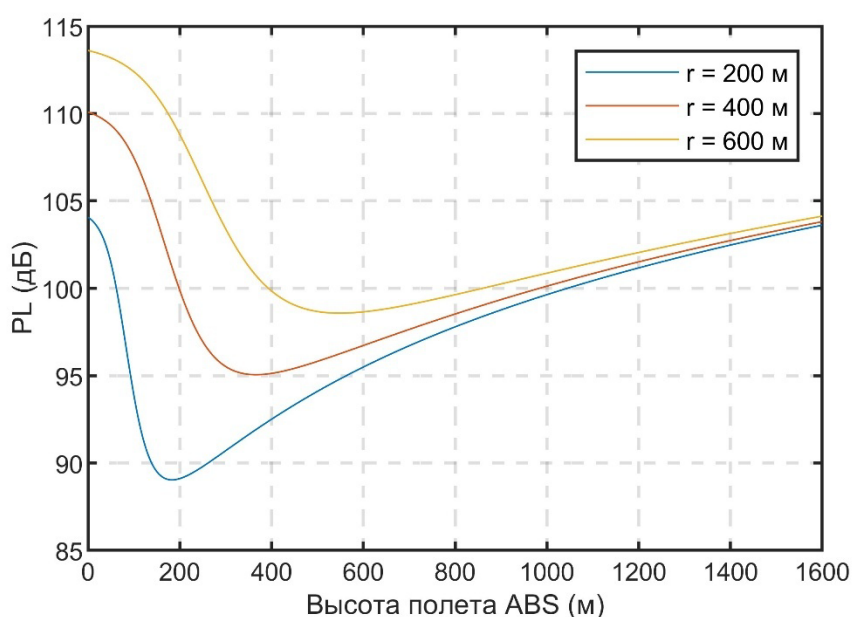


Рисунок 2.2 – Потери распространения на различных горизонтальных расстояниях и высотах полета ABS

2.2.2 Наземный канал связи с пользователем

Для моделирования канала GBS предложено использовать модель Ericsson [105], так как она хорошо описывает распространение сигналов в городских и

пригородных условиях. Существуют и другие модели, такие как Okumura-Hata и COST-231 Hata, однако их возможности по учёту параметров окружающей среды ограничены. Модель Okumura-Hata [106] является эмпирической и подходит для макросот, но не учитывает высоту зданий и другие препятствия в городской среде, что снижает её точность в сложных условиях. Модель COST-231 Hata [107] представляет собой расширенную версию Okumura-Hata для более высоких частот, однако её параметры обладают меньшей гибкостью по сравнению с моделью Ericsson. Потери распространения $PL_{g,i}$ (в дБ) можно определить следующим образом:

$$PL_{g,i} = a_0 + a_1 \log_{10}(d_{g,i}) + a_2 \log_{10}(h_g) + a_3 \log_{10}(h_g) \log_{10}(d_{g,i}) - 3.2(\log_{10}(11.75h_i))^2 + 44.49 \log_{10}(f_g) - 4.78(\log_{10}(f_g))^2 \quad (2.3)$$

где f_{GBS} – частота работы GBS (МГц); $d_{g,i}$ – расстояние от GBS g до пользователя i (км); h_g и h_i – высоты GBS g и пользователя i соответственно (м). Значения параметров a_0 , a_1 , a_2 и a_3 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения параметров для модели Ericsson

Местность	a_0	a_1	a_2	a_3
Городская	36.2	30.2	12	0.1
Пригородная	43.2	68.93	12	0.1
Сельская	45.96	100.6	12	0.1

2.3 Формулировка проблемы исследования

С целью определения оптимального количества ABS, при котором число пользователей, подключенных к ABS или GBS, достигает максимального значения, необходимо учитывать ограничения как по зоне покрытия, так и по пропускной способности. Далее проанализируются оба эти ограничения.

2.3.1 Анализ зоны покрытия

Поскольку ABS и GBS развернуты в одной рассматриваемой зоне, их зоны покрытия могут пересекаться. Поэтому предполагается, что каждый пользователь подключается либо к GBS, либо к ABS. Для оценки состояния подключения пользователя предлагается вычислить отношение сигнал/шум плюс помехи (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) в нисходящем канале. Пользователь считается находящимся в зоне покрытия, если принятый им сигнал превышает пороговый уровень $SINR_o$.

Полагаем, что мощность передачи GBS обозначена как P_{GBS} . Будем считать, что весь канал передачи между GBS и пользователем подвержен независимому Рэлеевскому затуханию [99]. Таким образом, коэффициент усиления канала β^{GBS} будет следовать экспоненциальному распределению [108] с параметром 1, то есть $\beta^{GBS} \square Exp(1)$. Шум представляет собой аддитивный белый гауссовский шум со средним значением 0 и дисперсией σ^2 . Полагаем, что все GBS имеют одинаковую мощность передачи, рабочую частоту и высоту установки. Тогда соотношение $SINR_{g,i}^{GBS}$ для нисходящего канала пользователя i от GBS g будет следующим:

$$SINR_{g,i}^{GBS} = \frac{P_{GBS} \beta_{g,i}^{GBS} PL_{g,i}(d_{g,i})}{\sum_{g'=1, g' \neq g}^{M_g} P_{GBS} \beta_{g',i}^{GBS} PL_{g',i}(d_{g',i}) + \sigma^2} \quad (2.4)$$

где P_{GBS} – мощность передачи GBS; $\beta_{g,i}^{GBS}$ – коэффициент усиления канала между GBS g и пользователем i ; M_g – количество уже развернутых GBS; $PL_{g,i}(d_{g,i})$ – потери распространения между GBS g и пользователем i , при этом $d_{g,i}$ – расстояние от GBS g до пользователя i ; $\sum_{g'=1, g' \neq g}^{M_g} P_{GBS} \beta_{g',i}^{GBS} PL_{g',i}(d_{g',i})$ – это совокупная помеха в одном частотном канале, которую получает пользователь i от других GBS g' , за исключением GBS g .

Аналогично зоне покрытия GBS, $SINR_{a,i}^{ABS}$ у пользователя i от ABS a может быть представлено как:

$$SINR_{a,i}^{ABS} = \frac{P_{ABS} \beta_{a,i}^{ABS} PL_{a,i}(d_{a,i})}{\sum_{a'=1, a' \neq a}^{M_a} P_{ABS} \beta_{a',i}^{ABS} PL_{a',i}(d_{a',i}) + \sigma^2} \quad (2.5)$$

где P_{ABS} – мощность передачи ABS; $\beta_{a,i}^{ABS}$ – коэффициент усиления канала между ABS a и пользователем i ; M_a – предполагаемое количество развернутых ABS; $PL_{a,i}(d_{a,i})$ – потери распространения между ABS a и пользователем i , при этом $d_{a,i}$ – расстояние от ABS a до пользователя i ; $\sum_{a'=1, a' \neq a}^{M_a} P_{ABS} \beta_{a',i}^{ABS} PL_{a',i}(d_{a',i})$ – это общий уровень интерференции, получаемый пользователем i от всех ABS a' , кроме ABS a . Будем использовать также распределение Накагами с целочисленным параметром формы m , тогда $\beta_{a',i}^{ABS}$ будет следовать гамма-распределению [109].

Как упоминалось ранее, если значение $SINR$, которое пользователь i получает в нисходящем канале, превышает пороговое значение $SINR_0$, то считается, что пользователь i обслуживается GBS или ABS. Для представления статуса подключения пользователя i введется двоичная переменная γ_i , которая может быть определена следующим образом:

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{если } SINR_i \geq SINR_0 \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (2.6)$$

2.3.2 Анализ пропускной способности

В реальных условиях в зоне покрытия BS (как ABS, так и GBS) может быть множество пользователей, однако пропускная способность этих станций ограничена. Проанализируются ограничения, связанные с пропускной способностью GS. Однако пропускная способность каждой BS зависит от множества факторов, в том числе от доступных радиоресурсов, ширины полосы

частот, уровня помех, используемых схем модуляции и кодирования, а также от максимального числа пользователей, которых она способна обслуживать одновременно. В этой связи необходимо учитывать пространственное распределение пользователей и технические ограничения ABS при планировании покрытия. Далее рассмотрены ограничения, связанные с пропускной способностью ABS и условиями, необходимыми для обеспечения связи всех пользователей в подзоне.

Полагая, $A_{a,k}(x_a, y_a, h_a)$ обозначим площадь, покрываемая ABS a с координатами (x_a, y_a, h_a) , которая пересекается с подзоной k , A_a будет общей площадью покрытия ABS a . Обозначим, $\rho_{a,k}(x_a, y_a, h_a)$ обозначает отношение площади, покрываемой ABS a с координатами (x_a, y_a, h_a) , которая пересекается с подзоной k , к общей площади покрытия данного ABS a :

$$\rho_{a,k}(x_a, y_a, h_a) = \frac{A_{a,k}(x_a, y_a, h_a)}{A_a}, \quad (2.7)$$

Если общая площадь покрытия ABS a полностью находится в пределах подзоны k , то $\rho_{a,k}(x_a, y_a, h_a) = 1$; если она не пересекается с подзоной k , то $\rho_{a,k}(x_a, y_a, h_a) = 0$. В любой подзоне k (где $k = 1, \dots, N_{\text{подзона}}$, $N_{\text{подзона}}$ – число подзоны) все пользователи должны обслуживаться как минимум одной ABS, при этом должны выполняться требования по качеству связи, включая пороговое значение $SINR_o$.

Предположим, что максимальное количество пользователей, которых может обслуживать одна ABS, равно N^{ABS} . Следовательно, для обеспечения обслуживания всех пользователей в подзоне k , должно выполняться следующее выражение:

$$\sum_1^{M_a} N^{ABS} \rho_{a,k}(x_a, y_a, h_a) \geq \lambda_k S_k, \quad (2.8)$$

где M_a – предполагаемое количество развернутых ABS; λ_k – плотность пользователей подзоны k (число пользователей на единицу площади); S_k – площадь подзоны k .

2.3.3 Оценка числа ABS

Для наиболее эффективного использования ABS необходимо сначала оценить их предполагаемое количество, а затем определить их расположение в трёхмерном пространстве. Во-первых, количество пользователей, которых может обслужить GBS, определяется с учетом ограничений по зоне покрытия и пропускной способности GBS. Исходя из числа оставшихся пользователей и максимального количества пользователей, которых может обслуживать каждый ABS, можно оценить предполагаемое количество ABS. В процессе оптимизации возможно исключение некоторых ABS, при этом сохраняется способность системы удовлетворять требования задачи.

Полагаем, что число пользователей, которых могут обслужить все GBS в рассматриваемой зоне, равно N_u^{GBS} . Предположим, что число пользователей, которых необходимо обслуживать с помощью ABS, равно N_u^{ABS} ; где $N_u^{GBS} + N_u^{ABS} = N_u$. Каждый ABS может одновременно обслуживать N^{ABS} пользователей. Предполагаемое число M_a ABS можно оценить тогда следующим образом:

$$M_a = \left\lceil \frac{N_u^{ABS}}{N^{ABS}} \right\rceil \quad (2.9)$$

где $\lceil \cdot \rceil$ – ближайшее целое число, большее или равное заключенному в скобки.

2.3.4. Задача оптимизации

Цель статьи – определить оптимальное расположение ABS и минимизировать их количество. Для описания состояния каждого ABS используется бинарная переменная ε_a :

$$\varepsilon_a = \begin{cases} 1, & \text{если ABS } a \text{ нужен;} \\ 0, & \text{если ABS } a \text{ не нужен.} \end{cases} \quad (2.10)$$

В процессе развёртывания должно быть обеспечено оптимальное количество ABS, которое удовлетворяет требованиям по покрытию и пропускной способности. В конечном итоге задача оптимизации расположения ABS, поддерживающих наземным системам в 3D-сети, можно сформулировать следующим образом:

$$O = \underset{x_a, y_a, h_a, \varepsilon_a}{\text{Min}} \sum_{a=1}^{M_a} \varepsilon_a \quad (2.11)$$

при ограничениях

$$C1: \sum_{i=1}^{N_u} \gamma_i \geq 1, \quad \forall i \in N_u,$$

$$C2: \sum_{a=1}^{M_a} N^{ABS} \rho_{a,k}(x_a, y_a, h_a) \geq \lambda_k S_k, \quad \forall k \in 1, \dots, N_{\text{подзона}},$$

$$C3: x_{\min} \leq x_a \leq x_{\max},$$

$$C4: y_{\min} \leq y_a \leq y_{\max},$$

$$C5: h_{\min} \leq h_a \leq h_{\max}.$$

Ограничение C1 подразумевает, что каждый пользователь обслуживается как минимум одной (как ABS, так и GBS). Ограничение C2 означает, что фактическое число пользователей в каждой подзоне k не должно превышать количество

пользователей, которое могут обслужить развернутые ABS. Ограничения C3, C4 и C5 означают, что ABS должны располагаться в заданном пространстве, где $x_{\min}, y_{\min}, h_{\min}$ — нижние границы по осям, $x_{\max}, y_{\max}, h_{\max}$ — верхние границы по осям.

2.4. Алгоритм для решения задачи определения местоположения ABS

В контексте оптимизации размещения ABS, задача O является задачей смешанного целочисленного нелинейного программирования (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP), где переменная ε_a является целочисленной и принимает значения 0 или 1. Это задача с высокой сложностью для поиска оптимального решения. Традиционные математические методы, такие как методы ветвей и границ (Branch and Bound, B&B) или последовательное выпуклое приближение (Successive Convex Approximation, SCA), могут быть использованы для решения задачи. Однако они часто сталкиваются с ограничениями, когда количество ABS велико, пространство поиска расширяется, а также требуется учитывать многомерность задачи.

В таком случае алгоритмы метаэвристики, такие как PSO являются оптимальным выбором для эффективного поиска оптимального расположения ABS. Алгоритм PSO — это метод оптимизации, основанный на имитации социального поведения рыбных косяков и стай птиц [99, 110]. В этой задаче каждая ABS рассматривается как частица, движущаяся в пространстве поиска. Алгоритм начинается с генерации случайного набора решений. На каждой итерации для каждой частицы формируются новые кандидаты-решения, которые определяются на основе двух факторов: глобально наилучшего решения, найденного роем частиц, и локального решения, найденного для каждой отдельной частицы. После каждой итерации алгоритм обновляет два типа решений: глобальное наилучшее решение (если найдено лучшее решение) и локальное решение для каждой частицы. Эти обновления приводят к изменениям в позициях и скоростях частиц, что помогает им стремиться к оптимальному решению.

Помимо PSO, другим методом оптимизации метаэвристики является генетический алгоритм (Genetic Algorithm, GA), который основан на процессе эволюции через операции селекции, кроссовера и мутации для нахождения оптимальных решений. Тем не менее, PSO имеет преимущество перед GA по скорости сходимости, особенно в задачах с большим пространством поиска. GA требует большего времени для сходимости, поскольку необходимо пройти через несколько поколений эволюции и процессов селекции, в то время как PSO может напрямую обновлять позицию ABS на основе факторов социальной коммуникации, что позволяет находить оптимальное расположение быстрее. Кроме того, GA требует кодирования координат ABS в виде бинарных или вещественных строк, что делает обработку непрерывных переменных менее эффективной, особенно в задачах с большим количеством ABS и необходимостью оптимизации координат в непрерывном пространстве.

Поэтому в данном исследовании предлагается использовать PSO для решения задачи определения расположения ABS в трехмерном пространстве. PSO особенно полезен в задачах оптимизации с большим пространством поиска и требованиями к оптимизации непрерывных переменных, поскольку этот алгоритм не требует кодирования решений и может напрямую обновлять позицию ABS эффективно и быстро. Более того, PSO обладает лучшей способностью к глобальному поиску по сравнению с другими алгоритмами благодаря механизму обмена информацией между частицами в роевой структуре, что позволяет точно и эффективно оптимизировать расположение ABS в трехмерном пространстве.

В нашей системе алгоритм PSO состоит из L частиц, каждая из которых имеет размерность, равную $3 \times M_a$ количеству параметров. Каждая частица W в рое содержит трёхмерные координаты всех ABS в рассматриваемой зоне. После каждой итерации PSO вычисляет глобальное наилучшее решение среди всех частиц роя, обозначаемое $W^{(global)}$, и локальное решение для каждой частицы, обозначаемое $W^{(local)}$. Скорость каждой частицы в рое V_w^l , где l – индекс частицы (

$l=1, \dots, L$), а w – индекс компонента вектора положения частицы ($w=1, \dots, 3 \times M_a$), и положение частицы W_w^l после каждой итерации будут обновляться следующим образом:

$$V_w^l(t+1) = \phi V_w^l(t) + c_1 \phi_1 (W_w^{local}(t) - W_w^l(t)) + c_2 \phi_2 (W_w^{global}(t) - W_w^l(t)), \quad (2.12)$$

$$W_w^l(t+1) = W_w^l(t) + V_w^l(t+1), \quad (2.13)$$

где t – номер текущей итерации; ϕ – инерционный вес, его значение обычно выбирается в диапазоне от 0.8 до 1.2 [111]; c_1 – когнитивный коэффициент ускорения; c_2 – социальный коэффициент ускорения. Параметры ϕ_1 и ϕ_2 – это два случайных положительных числа.

2.5. Результаты моделирования

При моделировании учтены 1000 пользователей, неравномерно распределённых по территории размером 10 км×10 км. Допустимая высота полёта ABS составляет от 200 до 1000 метров в соответствии с местными законами и возможностями ABS. Кроме того, в рассматриваемой зоне есть 9 GBS, 8 из которых GBS распределены равномерно, а одна GBS находится в центре рассматриваемой зоны. Все GBS идентичны по мощности передачи и высоте: $P_{GBS} = 40$ дБм и $h_g = 30$ м соответственно. Мощность, которую может обеспечить ABS, составляет $P_{ABS} = 20$ дБм. Полагаем, что все ABS являются идентичными. В таблицах 2.2 и 2.3 представлены параметры моделирования с использованием ПО MATLAB и характеристики городской территории, использованной в моделировании.

Таблица 2.2 – Параметры моделирования.

Параметр	Значение	Параметр	Значение
P_{GBS}	40 дБм	P_{ABS}	20 дБм
a_o	36.2	a	9.61

a_1	30.2	b	0.16
a_2	12	η_{LoS}	1 дБ
a_3	0.1	η_{NLoS}	20 дБ
N^{GBS}	56	N^{ABS}	23
f_{GBS}	1800 МГц	f_{ABS}	2 ГГц
SINR_0	- 8 дБ		

Таблица 2.3 – Значения параметров для алгоритма PSO

Параметры	Описание	Значение
L	Количество частиц в рое	100
MaxIt	Максимальное число итераций	100
Varmin	Нижняя граница переменной для частиц	0 м
Varmax	Верхняя граница переменной для частиц	10000 м
$h_{\min}$	Минимальная высота полета ABS	200 м
$h_{\max}$	Максимальная высота полета ABS	1000 м
Varsize	Число измерений	3
ϕ	Инерционный вес	0.8
c_1, c_2	Когнитивный и социальный коэффициент ускорения	2, 2

Для модели используются следующие настройки: количество частиц в рое L равен 100, а максимальное количество итераций MaxIt равно 100. Кроме того, скорость движения частиц на каждой итерации ограничена значением $V_{\max}$, т.е. $V_w^l \in [-V_{\max}, V_{\max}]$. В данной работе принимаются значения $\phi = 0.8$, $c_1 = c_2$ обычно равными 2 [111].

Далее представляем алгоритм PSO, используемый в данном моделировании.
Алгоритм Оптимизация PSO для эффективного размещения ABS в 3D

Generate population including L particles W^l with the length $(3 \times M_a), l = 1, \dots, L$.

Initialize $V^l = 0$

Set W^{global}, W^{local}

while $t \leq \text{MaxIt}$ do

for $l = 1, \dots, L$ do

Compute $V^l(t), W^l(t)$

if $W^{local} < W^l(t)$ then

$$W^l(t) = W^{local}$$

end if

if $W^{global} < W^{local}(t)$ then

$$W^{global} = W^{local}(t)$$

end if

end for

for $l = 1, \dots, L$ do

$$V_w^l(t+1) = \phi V_w^l(t) + c_1 \phi_1 (W_w^{local}(t) - W_w^l(t)) + c_2 \phi_2 (W_w^{global}(t) - W_w^l(t))$$

$$W_w^l(t+1) = W_w^l(t) + V_w^l(t+1)$$

end for

$t = t + 1$

end while

В процессе моделирования было рассмотрено два сценария распределения пользователей, как описано в таблице 2.4. В сценарии А рассматриваемая зона разделена на две подзоны: центральная подзона, где расположены 40% пользователей, распределённых нормально с стандартным отклонением 1500 м в

центре центральной подзоны, и окружающая подзона, содержащая 60% пользователей, которые распределены равномерно. В сценарии В, как и в сценарии А, рассматриваемая зона на две подзоны с долями 40% и 60% пользователей. В центральной подзоне пользователи распределены равномерно в радиусе 2500 м, а в окружающей подзоне – равномерно по всей оставшейся территории. Результаты, представленные в таблице 2.4, показывают, что хотя количество GBS в обоих сценариях одинаково ($M = 9$), различное распределение пользователей в центральных подзонах приводит к разному числу подключённых к GBS пользователей. По сравнению со сценарием А, в сценарии В используется на один ABS меньше. Единственное отличие между двумя сценариями заключается в распределении пользователей в центральной подзоне. В сценарии А пользователи распределены согласно нормальному закону, в результате чего они в основном сосредоточены в центре центральной подзоны, что приводит к тому, что некоторые пользователи оказываются за пределами зоны покрытия других GBS. В сценарии В пользователи распределены равномерно по подзоне, что обеспечивает их подключение к другим GBS.

Таблица 2.4 – Сценарии и сравнение производительности

Сценарий	N_u	Описание сценария	M_g	N_u^{GBS}	Оценочное M_a	Фактическое M_a
Сценарий А	1 000	Центральная подзона (20 км ² , 40%) Окружающая подзона (80 км ² , 60%)	9	371	20	19
Сценарий В	1 000	Центральная подзона (20 км ² , 40%) Окружающая подзона (80 км ² , 60%)	9	385	19	18

На рисунке 2.3 представлено число пользователей, подключённых к каждой GBS, что основывается на моделировании с учётом расположения пользователей и GBS, а также расчёта таких параметров, как $SINR$. Результаты показывают, что GBS 6, 8 и 9 работают на максимальной мощности и перегружены, что указывает на высокую плотность пользователей в этих районах. Это подтверждает необходимость использования ABS для разгрузки сети и улучшения качества связи. В то же время, другие GBS, такие как 3, 4, 5 и 7, работают только на 50% своей мощности, что свидетельствует о сравнительно низкой плотности пользователей в этих районах. В таких случаях можно снизить мощность этих GBS, что позволит эффективно удовлетворять потребности пользователей, при этом не нарушая требований качества связи и экономя ресурсы.

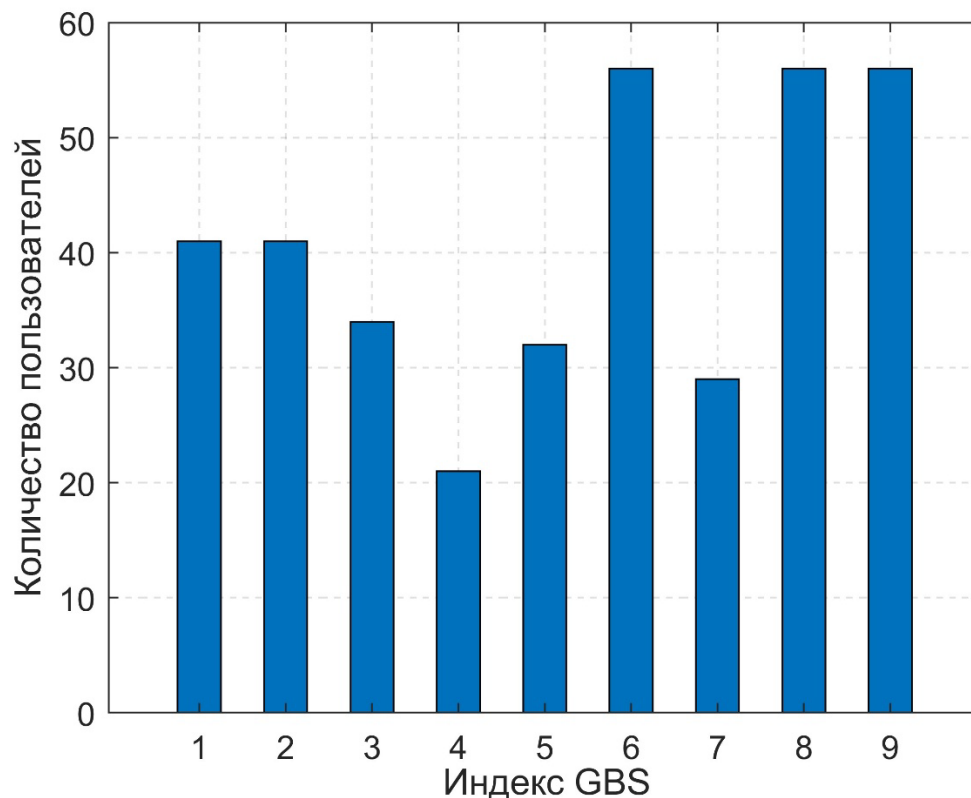
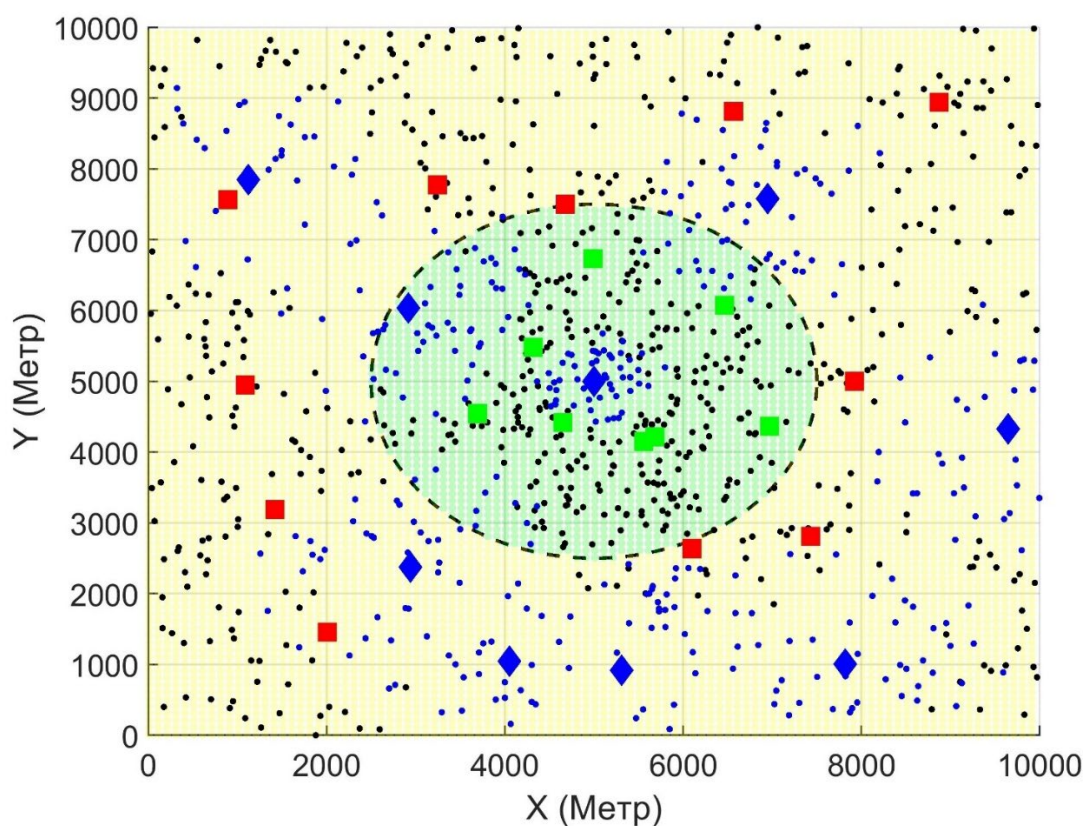
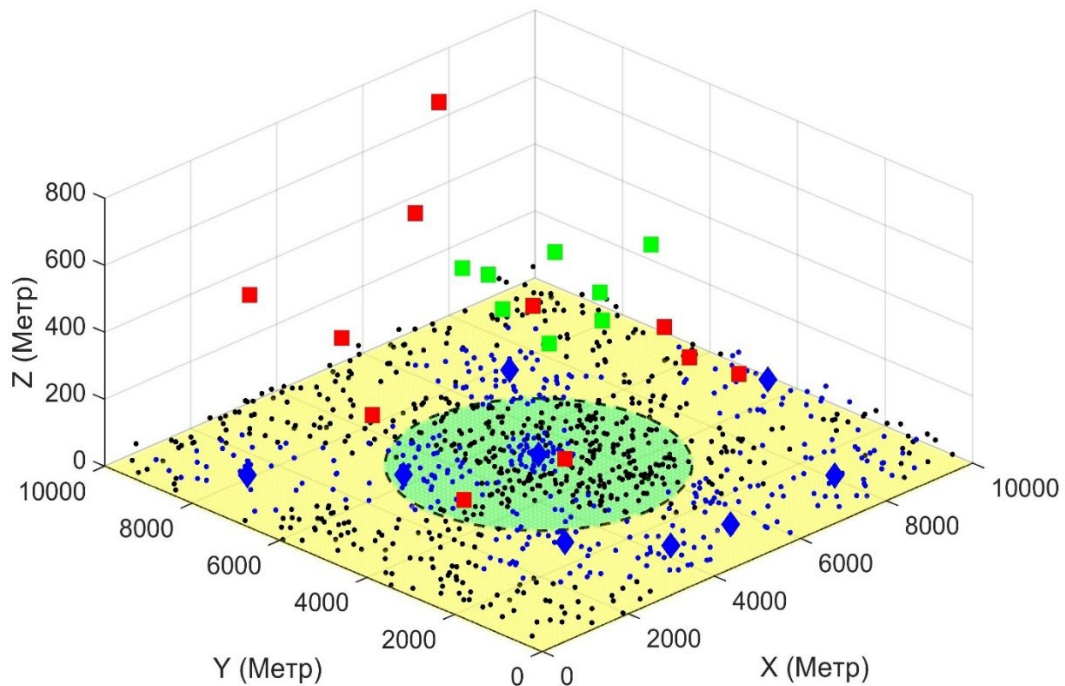


Рисунок 2.3 – Число пользователей, обслуживаемых GBS

Результаты использования алгоритма PSO для двух сценариев представлены на рисунках 2.4 и 2.5. Центральная подзона выделена зелёным цветом, остальная подзона — жёлтым цветом. GBS изображены зелёными ромбами, ABS в центральной подзоне — зелёными квадратами, а в остальной подзоне — красными квадратами. Пользователи, подключенные к GBS, обозначены синими точками, а пользователи, подключенные к ABS, — красными точками.



a)



б)

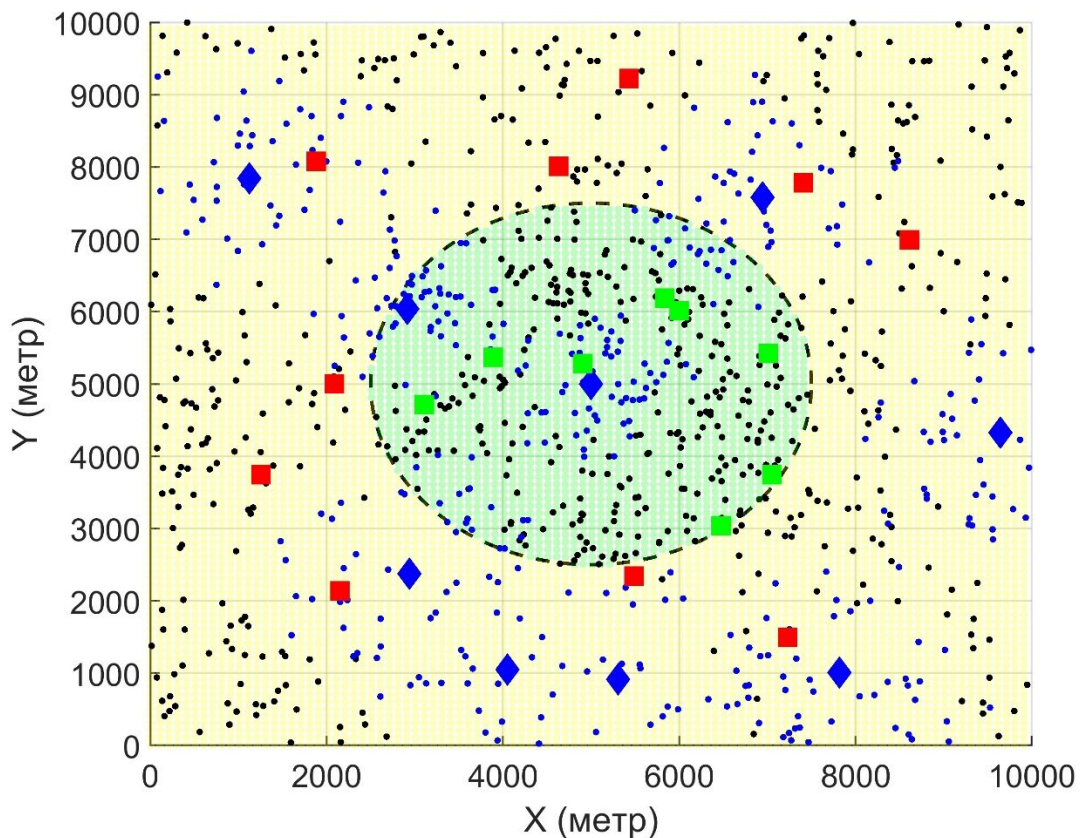
Рисунок 2.4 – Сценарий А: горизонтальное распределение пользователей, GBS и ABS в 2D (а) и пространственное расположение пользователей, GBS и ABS в 3D

(б)

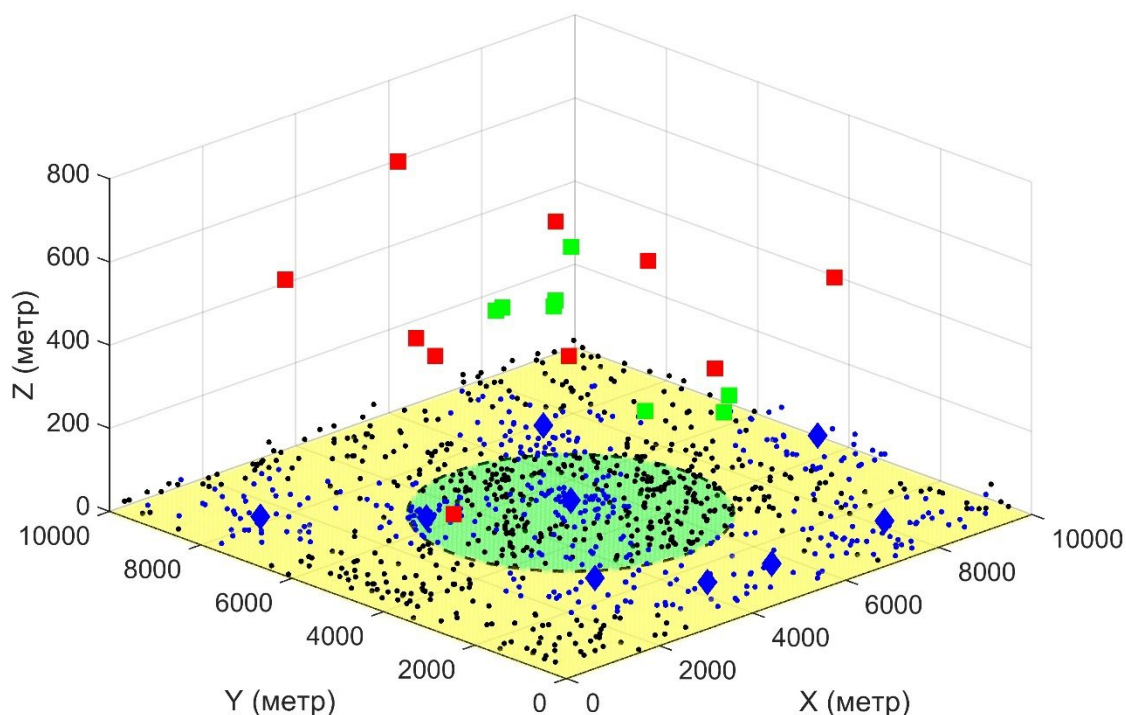
В сценарии А, изначально для обслуживания пользователей было предусмотрено 20 ABS. Однако расчёты показали, что для обеспечения требуемого качества сети достаточно 19 ABS. На рисунке 2.4, а представлено горизонтальное расположение GBS, пользователей и ABS на плоскости. В центральной подзоне (обозначена зелёным цветом) плотность пользователей выше, что приводит к увеличению числа ABS (зелёные квадраты) в данной подзоне. В окружающей подзоне (жёлтый цвет) плотность пользователей ниже, и здесь ABS (красные квадраты) распределены более равномерно. На рисунке 2.4, б представлено трёхмерное расположение GBS, пользователей и ABS. Видно, что в центральной подзоне высота полёта ABS ниже, поскольку высокая плотность пользователей

требует уменьшения помех для соседних устройств. В окружающей подзоне, где плотность пользователей ниже, ABS работают на большей высоте, что позволяет расширить зону покрытия и повысить эффективность обслуживания пользователей.

В сценарии В изначально планировалось развернуть 19 ABS. Однако расчёты показали, что один ABS можно удалить без ухудшения качества обслуживания. На рисунке 2.5, а представлено горизонтальное расположение GBS, пользователей и ABS на плоскости. На рисунке 2.5, б показано трёхмерное расположение GBS, пользователей и ABS. Видно, что в центральной подзоне ABS работают на меньшей высоте, чтобы снизить уровень помех для соседних устройств. В остальной подзоне, где плотность пользователей ниже, ABS функционируют на большей высоте, что позволяет расширить зону покрытия и повысить эффективность обслуживания.



a)



б)

Рисунок 2.5 – Сценарий В: горизонтальное распределение пользователей, GBS и ABS в 2D (а) и пространственное расположение пользователей, GBS и ABS в 3D (б)

2.6. Выводы по Главе 2

В главе предложены модель и методика размещения ABS в городах для поддержки GBS в условиях перегрузки при различной плотности пользователей в нескольких районах, что достаточно часто встречается в реальности, особенно в густонаселённых районах, на фестивалях и спортивных мероприятиях.

При этом было определено число ABS и их расположение в трёхмерном пространстве с учётом ограничений по покрытию и пропускной способности сети. Для решения задачи оптимизации 3D расположения ABS использован

метаэвристический алгоритм PSO. Доказано, что ABS необходимо уменьшать высоту полета в густонаселённых районах, чтобы уменьшить помехи для пользователей, обслуживаемых другими ABS, и повышать высоту, для охвата больших территорий с меньшей плотностью населения.

Кроме того, была определена нагрузка GBS. Как правило, в районах с высокой плотностью пользователей, нагрузка на GBS достигает максимума, поэтому в этих районах необходимо использовать ABS. Однако в районах с меньшей плотностью населения нагрузка GBS незначительна, и в целях экономии энергии для всей сети и сокращения эксплуатационных затрат целесообразно даже уменьшить производительность GBS.

ГЛАВА 3. ЗАДАЧА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ ВОЗДУШНЫХ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ

3.1 Проблема распределения ресурсов воздушных базовых станций

В предыдущей главе была рассмотрена задача оптимального размещения ABS с целью максимизации числа обслуживаемых пользователей для поддержки GBS. Однако при развертывании ABS существует еще одна важная задача — эффективное распределение ресурсов [112].

В условиях стремительного роста числа подключенных устройств, особенно в сетях ИВ и мобильных коммуникационных системах, вопросы эффективного распределения ограниченных ресурсов становятся одним из ключевых вызовов для беспроводных сетей нового поколения. Особую актуальность эта проблема приобретает при использовании ABS, которые благодаря своей мобильности и гибкости развертывания открывают новые возможности для расширения зоны покрытия и повышения емкости сети [113, 114]. Тем не менее, эксплуатация ABS сопряжена с рядом ограничений, среди которых наиболее критичными являются ограниченный энергетический ресурс, нестабильность каналов связи и высокая динамичность топологии сети. Всё это обуславливает необходимость разработки эффективных стратегий управления ресурсами, направленных на обеспечение QoS пользователей при минимизации энергопотребления и максимизации пропускной способности системы [115].

Благодаря своей гибкости ABS может быть развернута на относительно большой высоте, что позволяет значительно расширить зону покрытия и подключить большее количество устройств [99]. Однако при увеличении расстояния между устройствами ИВ и ABS возрастают потери на канале связи, что приводит к снижению скорости передачи данных как по восходящей, так и по нисходящей линии связи. С другой стороны, устройства, находящиеся в непосредственной близости к ABS, могут обеспечивать более высокую скорость

передачи данных благодаря минимальным потерям на канале. Это создаёт дисбаланс в скорости передачи данных между различными зонами покрытия системы. Более того, данные, передаваемые устройствами ИВ, имеют ограниченный срок актуальности [116], что требует минимизации задержек и обеспечения высокой скорости передачи информации. Таким образом, необходимо оптимизировать распределение ресурсов между устройствами, чтобы гарантировать своевременную доставку данных и поддерживать требуемое QoS.

В сценариях с высокой плотностью пользователей — например, при проведении массовых мероприятий или в зонах стихийных бедствий, где использование традиционной инфраструктуры затруднено или невозможно, — возникает необходимость приоритезации обслуживания в зависимости от типа предоставляемых услуг и важности передаваемых данных. Для обеспечения надёжного соединения в таких условиях требуется динамическая адаптация стратегий распределения ресурсов в реальном времени. При этом важно учитывать гетерогенность сети и разнообразие требований конечных устройств. Для устройств ИВ характерны малые объёмы передаваемых данных и строгие ограничения по энергопотреблению, в то время как смартфоны и видеокамеры требуют высокой пропускной способности и стабильного канала связи.

Одним из перспективных направлений решения задачи эффективного распределения ресурсов является применение методов обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL). В подобных системах основные ресурсы, подлежащие распределению, включают частотный спектр, полосу пропускания, мощность передачи [112] и временные интервалы доступа [50], [117]. Для решения задачи распределения этих ресурсов и определения оптимальной позиции ABS в рамках данного исследования используется алгоритм Q-learning. Целью данной работы является максимизация скорости передачи данных системы, что позволит обеспечить более эффективное использование доступных ресурсов и улучшить качество обслуживания.

Глава организована следующим образом:

- в разделе (2) главы представлена модель сети и постановка задачи.
- в разделе (3) главы проводится метод обучение, в том числе для решения задач распределения ресурсов.
- в разделе (4) главы представлены результаты моделирования предложенного метода, а также результаты.
- в разделе (5) представлены выводы по главе.

3.2 Модель сети и постановка задачи

Рассматривается нисходящий канал беспроводной сети с использованием ABS. ABS обеспечивает беспроводную связь для стационарных наземных пользователей в районах, где отсутствуют или временно недоступны GBS. В рассматриваемой зоне, число наземных пользователей равно N . ABS развернут для зависания в определенном месте в этой зоны, чтобы предоставлять пользователям услуги беспроводной связи по нисходящей линии связи. Местоположение ABS в 3D-пространстве обозначается как (x_a, y_a, h_a) , где (x_a, y_a) – горизонтальная координата ABS, а h_a – высота полета ABS. Местоположение каждого пользователя n обозначается через $(x_n, y_n, 0)$. Предполагается, что ABS обладает полной информацией о местоположении пользователя перед развертыванием. Кроме того, для предотвращения беспроводных помех применяется множественный доступ с частотным разделением, а полоса пропускания системы, обозначаемая как B , равномерно распределяется среди всех пользователей.

Вероятность потери связи P_n^{LoS} между ABS и пользователем n определяется следующим образом [118]:

$$P_n^{LoS} = \frac{1}{1 + a \exp(-b[\frac{180}{\pi} \arcsin(\frac{h_a}{d_{a,n}}) - a])} \quad (3.1)$$

где a и b – параметры среды распространения; $\arcsin(\frac{h_a}{d_{a,n}})$ – угол места между ABS и пользователем n ; $d_{a,n}$ – 3D-расстояние от ABS до пользователя n .

Тогда вероятность NLoS соединения будет равна $P^{NLoS} = 1 - P^{LoS}$. Без потери общности, обозначим потери распространения между ABS и пользователем n как $\eta_{a,n}^{LoS} = \beta_0 d_{a,n}^{-\alpha}$ и $\eta_{a,n}^{NLoS} = \chi \beta_0 d_{a,n}^{-\alpha}$ для LoS и NLoS соединения, соответственно; где β_0 – это потеря сигнала на эталонном расстоянии 1 метр для LoS соединений; $0 < \chi < 1$ – дополнительно необходимая средняя дальность распространения для NLoS соединений; α – показатель затухания сигнала.

Предположим, что коэффициент усиления канала между ABS и пользователем n составляет h_n , где h – случайная величина с двумя разными уровнями случайности [118], т. е. случайным возникновением LoS and NLoS соединения. Тогда среднее усиление мощности канала h_n можно определить, как:

$$h_n = P_n^{LoS} \beta_0 d_{a,n}^{-\alpha} + P_n^{NLoS} \chi \beta_0 d_{a,n}^{-\alpha} = \overline{P_n^{LoS}} \beta_0 d_{a,n}^{-\alpha} \quad (3.2)$$

где $\overline{P_n^{LoS}} = P_n^{LoS} + (1 - P_n^{LoS}) \chi$.

Будем предполагать, что общая мощность передачи ABS равна P_a . Пусть p_n представляет собой коэффициент распределения мощности для пользователя n , σ^2 – мощность аддитивного белого гауссовского шума. Тогда значение отношение сигнал / шум (Signal-to-noise ratio, SNR) γ_n у пользователя n определяется как:

$$\gamma_n = \frac{P_a p_n h_n}{\sigma^2}, \quad (3.3)$$

Предполагая, что B обозначает общую полосу пропускания канала, доступную для ABS, достижимая скорость нисходящей линии связи от ABS к пользователю n может быть рассчитана на основе формулы Шеннона [128]:

$$\begin{aligned}
R_n &= \frac{B}{N} \log_2(1 + \gamma_n) \\
&= \frac{B}{N} \log_2\left(1 + \frac{P_a p_n h_n}{\sigma^2}\right),
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Как уже отмечалось выше, цель данной работы состоит в максимизации суммарной скорости передачи данных при ограничениях на местоположение ABS в 3D-пространстве и распределения мощности для каждого пользователя. Задача может быть сформулирована следующим образом:

$$D = \max_{\{x_a, y_a, h_a, p_n\}} \sum_{n=1}^N R_n \tag{3.5}$$

при условиях

$$C1: \sum_{n=1}^N p_n = 1$$

$$C2: p_n > 0, \forall n \in N$$

$$C3: \gamma_n \geq \gamma_0, \forall n \in N,$$

$$C4: x_a, y_a, h_a \in S$$

Ограничение $C1$ означает, что общая сумма коэффициентов распределения мощности для всех пользователей в системе должна равняться 1; ограничение $C2$ указывает на то, что коэффициент распределения мощности каждого пользователя должен быть больше нуля, что гарантирует подключение всех пользователей к ABS; ограничение $C3$ указывает, что значение SNR, полученное пользователем n должно быть больше или равно пороговому значению γ_0 , тогда считается, что пользователь n подключен к ABS; ограничение $C4$ ограничивает размещение ABS заданным пространством.

3.3 Метод решения проблемы о распределении ресурсов воздушных базовых станций

В задачах распределения ресурсов в беспроводных сетях окружающая среда, как правило, является сложной, нелинейной и изменчивой во времени, что затрудняет построение точной математической модели. В связи с этим целесообразно использовать обучение с подкреплением (Reinforcement Learning, RL), поскольку данный подход позволяет агенту обучаться оптимальной стратегии действий на основе прямого взаимодействия с окружающей средой без необходимости её предварительного моделирования.

В рассматриваемой задаче, где присутствует только одна ABS, которая принимает решения, выбор модели с одним агентом является обоснованным и эффективным. В отличие от многоагентных систем, где требуется координация между несколькими агентами и учет их взаимодействия, в данной задаче отсутствует стратегическая зависимость между множеством участников, что значительно упрощает процесс обучения и повышает стабильность алгоритма.

В частности, выбран алгоритм Q-learning — один из наиболее простых и распространённых методов обучения с подкреплением, не требующий информации о модели среды. Q-learning эффективно работает в дискретных пространствах состояний и действий, а также обладает способностью сходиться к оптимальной стратегии. Это делает его особенно подходящим для задачи, где ABS должна обучиться выбору таких параметров, как положение, уровень мощности передачи с целью максимизации функции вознаграждения, например, совокупной пропускной способности системы.

В алгоритме Q-learning ABS выступает в роли агента, а сам алгоритм состоит из четырех частей: состояния, действий, вознаграждений и Q -значений. Основная цель Q-learning — получение политики, которая максимизирует наблюдаемый результат в процессе взаимодействия агентов. На каждом временном шаге агенты наблюдают состояние из пространства состояний S . Соответственно, они выбирают

действие из пространства действий A на основе политики P . Принцип политики на каждом временном шаге заключается в выборе действия, которое приводит модель к максимальному Q -значению. После выполнения действия состояние каждого агента переходит в новое состояние, и агент получает необходимый результат.

Состояния (S). Эти состояния представляют ситуацию среды системы ретрансляции на базе ABS, и принятие решения о действиях основывается на состоянии сети. В данной работе основными факторами, влияющими на состояние сетевой среды, являются положение ABS в 3D-пространстве и мощность передачи для разных пользователей в сети. Затем предоставляется обратная связь для корректировки основных факторов с целью улучшения производительности сети. Обозначаем s_t как состояние ABS на временном шаге t , и оно может быть определено как:

$$s_t = \{x_a^t, y_a^t, h_a^t, p_n^t\} \quad (3.6)$$

где $n \in N$, (x_a^t, y_a^t, h_a^t) – это местоположение ABS на временном шаге t , а p_n^t обозначает мощность, выделенную для пользователя n .

Действие (A). На каждом шаге обозначим a_t как действие ABS на временном шаге t . ABS принимает решения на основе состояния сети, что вызывает переход сети в новое состояние. Действие состоит из двух частей: одна часть – это перемещение в следующее состояние ABS, другая – распределение мощности. Перемещение ABS включает движение вперед, назад, вправо, влево, вверх и вниз. Распределение мощности для каждого пользователя может увеличиваться или уменьшаться.

Вознаграждение (R). Целью Q -learning является максимизация накопленного ожидаемого результата. Чтобы достичь цели, поставленной в уравнении (3.5), необходимо включить общую системную скорость передачи данных в функцию

вознаграждения. На каждом временном шаге t , общая скорость передачи данных для пользователя D_t может быть рассчитана на основе местоположения ABS. ABS будет регулировать свое местоположение и распределение мощности таким образом, чтобы поддерживать оптимальное состояние. Таким образом, можно выразить функцию вознаграждения r_t на временном шаге t как:

$$r_t = D_t - \lambda(N - N_u) \quad (3.7)$$

где N – общее число пользователей в рассматриваемой зоне; N_u – число пользователей, обслуживаемых ABS, статус пользователя может быть основан на формуле (3.3); λ – штрафной коэффициент.

Политика (P). Политика – это механизм выбора действий, используемый для определения тех действий, которые агент будет выполнять во время обучения. Ее главная цель – установить баланс между исследованием и эксплуатацией таким образом, чтобы агент мог подкрепить те суждения, которые он уже знает как хорошие, но также исследовать возможные новые действия [119]. В данной работе далее будем рассматривать наиболее известную политику τ -greedy (эпсилон-жадный алгоритм), в которой агент выбирает случайное действие с вероятностью τ и лучшее действие, соответствующее наилучшему Q -значению в данный момент, с вероятностью $1 - \tau$. Таким образом, вероятность выбора действия a_t в состоянии s_t на временном шаге t задается следующей формулой:

$$\pi_m(s_m, \theta_m) = \begin{cases} 1 - \tau, & \text{если } Q_m(\theta) \text{ наибольшее} \\ \tau, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (3.8)$$

где $\tau \in (0, 1)$

Чтобы обеспечить сходимость Q-learning, скорость обучения α_t является функцией временного шага [120], который задается формулой:

$$\alpha_t = \frac{1}{(t + c_\alpha)^{\varphi_\alpha}} \quad (3.9)$$

где $c_\alpha > 0$, $\varphi \in (\frac{1}{2}, 1]$.

Во время обучения функция значения состояния-действия для агента может итеративно обновляться следующим образом:

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha_t) \cdot Q_t(s_t, a_t) + \alpha_t \cdot [r_t + \beta \cdot \max_{a'} Q_t(s_{t+1}, a')] \quad (3.10)$$

где β – коэффициент дисконтирования.

В Q -learning параметр T со временем уменьшается, чтобы обеспечить баланс между исследованием и эксплуатацией. В начале обучения высокое значение T помогает агенту выбирать случайные действия для исследования окружающей среды и построения точной таблицы значений Q -learning. Однако, если T останется высоким, агент всегда будет выбирать случайные действия, не используя полученные знания, что приведет к отсутствию сходимости процесса обучения. Напротив, если T постепенно уменьшается, агент начнет отдавать предпочтение действиям с наивысшими значениями согласно таблице значений Q -learning, тем самым оптимизируя политику действий. Это помогает агенту освоить лучшую стратегию после достаточного изучения пространства состояний, обеспечивая высокую производительность в долгосрочной перспективе. Таким образом, в данной работе T регулируется после каждого эпизода в соответствии с формулой:

$$T_{p+1} = T_p T_0 \quad (3.11)$$

где T_0 – постоянное значение, на которое T уменьшается после каждого эпизода; T_p и T_{p+1} – значение T в эпизоде p и $(p+1)$.

3.4 Результаты моделирования

В данной работе рассматривается число пользователей $N = 5$, равномерно распределенных на площади $300 \text{ м} \times 300 \text{ м}$. Горизонтальное положение ABS

ограничено в пределах рассматриваемой зоне. Другие параметры моделирования приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры моделирования

Параметр	Значение	Параметр	Значение
P_a	100 мВт	B	5 МГц
a	9.16	b	0.16
σ^2	-110 дБм	β_0	-40 дБ
γ_0	5 дБ	α	-2,3
χ	0.1	—	—

Параметры для предложенного Q -learning следующие: $\beta = 0.99$; $c_\alpha = 0.5$; $\varphi_\alpha = 0.7$; $\tau = 1$; $\tau_0 = 0.999$; штрафной коэффициент $\lambda = 20$. Число эпизодов обучения составляет 250 с шагом по времени $T = 500$.

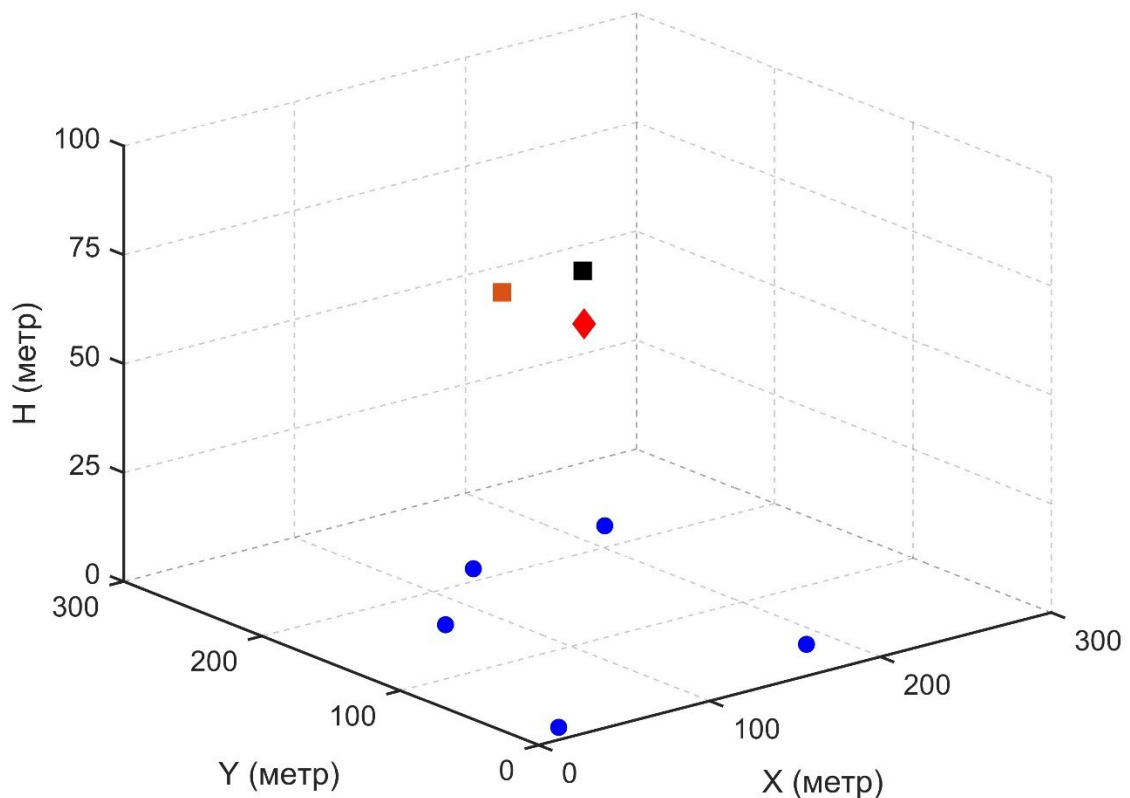


Рисунок 3.1 – 3D-положение ABS и пользователей

На рисунке 3.1 показано 3D-расположение ABS в различных случаях. Красный ромб отображает позицию ABS при оптимизации местоположения и распределения мощности. Эта точка имеет координаты (140, 141, 65). Оранжевый квадрат представляет положение ABS при использовании оптимальной позиции, равномерно распределяющей мощность между пользователями. Эта точка имеет координаты (149, 151, 74). Черные квадраты представляют любое положение ABS и отображают распределение мощности между пользователями. Синие круги обозначают местоположение пользователей. Как видим, высота ABS при оптимизации только местоположения будет выше, чем высота полета ABS при оптимизации местоположения и распределения мощности. Это связано с тем, что при одинаковом уровне распределения мощности среди пользователей ABS будет находиться выше, чтобы уменьшить связь в условиях NLoS в канале «воздух – земля» для удаленных пользователей. Между тем, в случае, когда энергия может быть распределена между пользователями, при наличии удаленных пользователей ABS могут увеличить распределение энергии по сравнению с близлежащими пользователями.

На рисунках 3.2 и 3.3 показаны скорость передачи данных системы при различных уровнях мощности передачи ABS и среднюю скорость передачи данных системы с учетом различных количеств и позиций пользователей на земле. Прерывистая красная линия показывает оптимизацию как позиции, так и распределения мощности, прерывистая синяя линия отображает оптимизацию только позиции при равномерном распределении мощности между пользователями, а прерывистая черная линия показывает оптимизацию для произвольной позиции с учетом распределения мощности.

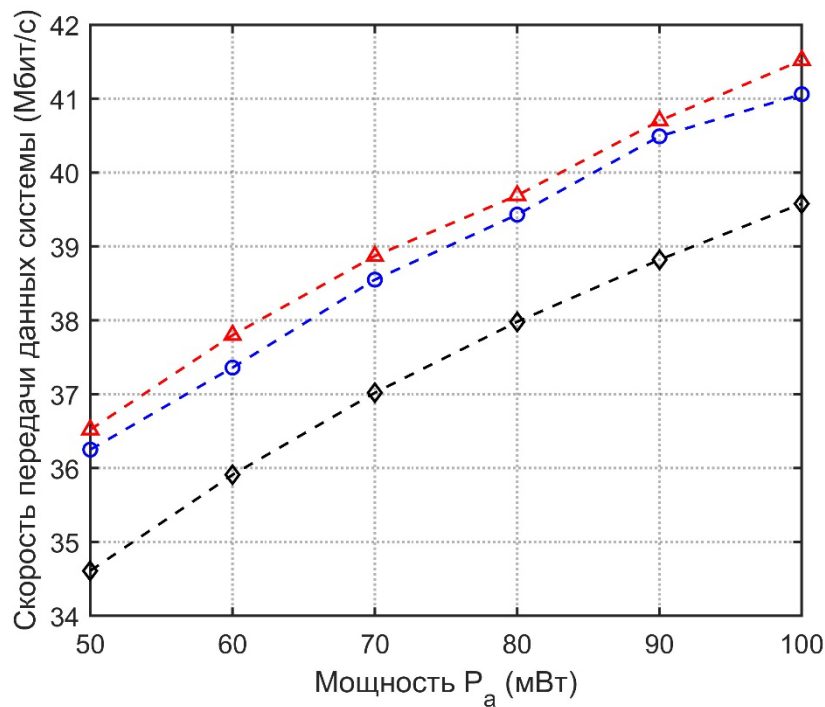


Рисунок 3.2 – Скорости передачи данных системы при различных уровнях мощности передачи ABS

Анализ результатов, представленных на рисунке 3.2, показывает, что наилучшие скорости передачи данных достигаются при одновременной оптимизации положения ABS, распределения мощности среди пользователей. Такой комплексный подход обеспечивает более высокую скорость передачи данных по сравнению с оптимизацией только положения ABS. Это подчёркивает важную роль стратегии управления ресурсами в условиях ограниченных возможностей системы. Кроме того, результаты демонстрируют сравнительный анализ оптимизации либо положения ABS, либо распределения мощности среди пользователей. Результаты показывают, что оптимизация положения ABS существенно улучшает эффективность системы по сравнению со случайным размещением, что подтверждает важность выбора оптимального расположения ABS.

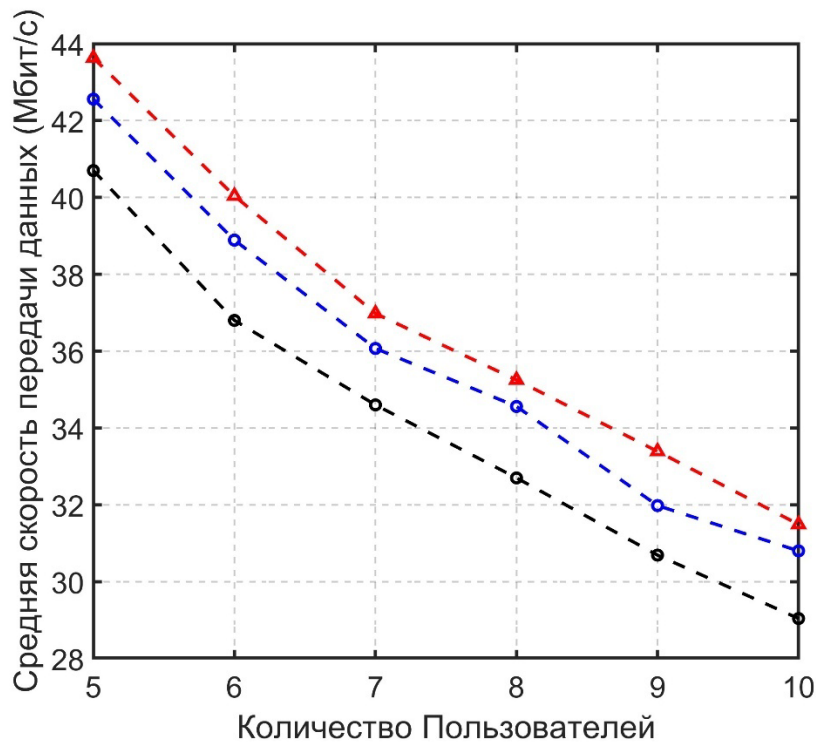


Рисунок 3.3 – Средняя суммарная скорость передачи данных системы при различном числе и местоположении наземных пользователей

На рисунке 3.3 показана средняя суммарная скорость передачи данных системы при различном количестве и распределении пользователей. В целом, с ростом их количества уменьшается средняя суммарная скорость передачи данных в системе. Это можно объяснить тем, что по мере увеличения количества пользователей потери при передаче данных будут возрастать вследствие большего количества подключений пользователей к ABS.

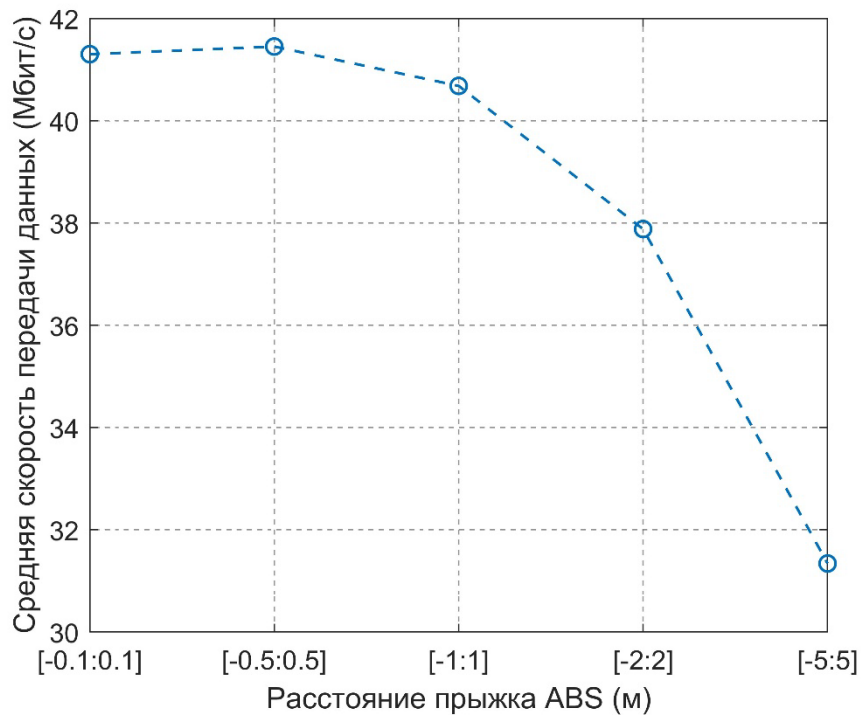


Рисунок 3.4 – Средняя скорость передачи данных системы при различных расстояниях прыжка ABS

На рисунке 3.4 показана средняя скорость передачи данных внешней системы зависит от расстояния после каждого временного шага ABS. Более конкретно, $[-1:1]$ означает, что ABS может изменять положение на 1 м в каждом направлении в трехмерном пространстве, где -1 указывает на движение в одном направлении, а 1 – в противоположном. Как видно из рисунка 3.4, при увеличении величины прыжка средняя скорость передачи данных системы сначала остаётся практически неизменной, а затем резко снижается. Это объясняется тем, что при большом расстоянии перелёта ABS может пропустить глобальную оптимальную точку, и возвращение к ней становится крайне сложным. В Q-learning пространство состояний и действий часто дискретизируется, то есть оно разбивается на отдельные части. Когда расстояния между этими частями большие, алгоритм может не заметить оптимальную точку, потому что он оценивает только конечные

позиции [121]. В результате, при больших прыжках ABS может «перескочить» через оптимальное положение, и найти его снова будет сложно.

3.5 Выводы по Главе 3

В данной главе исследуются проблемы совместной оптимизации размещения ABS и распределения мощности среди пользователей с целью максимизации скорости передачи данных в системе. Для решения этой задачи предложен подход с использованием методов обучения с подкреплением, а именно алгоритма Q-learning и метод T-greedy.

Во-первых, в отличие от ранее известных подходов, было установлено, что при оптимизации только местоположения ABS будет значительно выше, чем при совместной оптимизации местоположения и распределения мощности. Это объясняется тем, что при оптимизации только положения ABS система минимизирует потери на большие расстояния, выбирая более высокое расположение, чтобы уменьшить влияние канала «воздух-земля» для удаленных пользователей. В случае же, когда учитывается также распределение мощности среди пользователей, система имеет возможность гибко перераспределять ресурсы, что приводит к изменению высоты станции.

Во-вторых, результаты моделирования показали, что использование метода обучения с подкреплением Q-learning и алгоритма ϵ -greedy для совместной оптимизации положения и распределения мощности даёт значительное улучшение скорости передачи данных системы. В частности, такая оптимизация обеспечивает более высокие результаты по сравнению с оптимизацией только местоположения ABS или распределения мощности отдельно. Это подтверждает, что комплексный подход к решению задачи позволяет более эффективно управлять ресурсами системы и минимизировать потери.

В-третьих, анализ результатов с учетом различных расстояний прыжков ABS показывает, что увеличение расстояния прыжка приводит к ухудшению

результатов. Это связано с особенностями алгоритма Q-learning, где пространство состояний и действий часто дискретно. При большом расстоянии между этими дискретными состояниями алгоритм может «перескочить» через оптимальное решение, не замечая его. Это подчеркивает важность настройки шага в алгоритмах обучения с подкреплением, чтобы обеспечить более точное и эффективное принятие решений.

В-четвертых, результаты демонстрируют, что при увеличении числа пользователей в системе суммарная скорость передачи данных в целом снижается. Это можно объяснить тем, что с ростом числа подключенных пользователей возрастает нагрузка на систему, что приводит к большему количеству соединений и, как следствие, увеличению потерь при передаче данных. Однако, благодаря правильной оптимизации и гибкому распределению ресурсов, можно минимизировать эти потери и поддерживать стабильную работу системы.

Таким образом, представленные результаты подчеркивают важность использования методов обучения с подкреплением для решения задач оптимизации в системах с ограниченными ресурсами, а также показывают, что совместная оптимизация всех параметров (местоположение и распределение мощности) существенно повышает общую производительность системы, эффективно управляя её ресурсами и обеспечивая лучшую скорость передачи данных.

ГЛАВА 4: ОПТИМИЗАЦИЯ АССОЦИИАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ, МОЩНОСТИ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

4.1 Введение

При развертывании ABS для поддержки наземных сетей, помимо задач по оптимальному размещению и распределению мощности с целью повышения эффективности и QoS, возникает ещё одна важная проблема — это ассоциация пользователей. Правильное ассоциация пользователей играет ключевую роль в оптимизации использования сетевых ресурсов, снижении помех и обеспечении высокого QoS.

В сетях 5G количество подключенных устройств на один квадратный километр может достигать одного миллиона [122], и в последующих поколениях эта цифра будет ещё больше. Такой рост числа устройств предъявляет высокие требования к пропускной способности, задержкам и эффективности использования сетевых ресурсов. В связи с этим было предложено внедрение сверхплотных сетей (Ultra Dense Networks, UDN) как одного из ключевых решений для удовлетворения растущих требований. Развёртывание большого количества GBS в таких сетях позволяет значительно снизить нагрузку на макросоты [123]. Это достигается за счёт увеличения доступной полосы пропускания для пользователей, а также снижения задержек передачи данных благодаря уменьшению расстояния между пользовательскими устройствами и базовыми станциями. Однако высокая плотность развертывания BS приводит к серьёзным проблемам с межсотовыми помехами, поскольку пользовательские устройства могут одновременно принимать сигналы от нескольких BS. Это осложняет задачу эффективного ассоциация пользователей и требует применения продвинутых методов управления подключениями.

Кроме того, необходимо учитывать мобильность пользователей. Постоянные переходы между зонами покрытия разных BS могут вызывать разрывы соединения и снижение качества услуг. Особенно это актуально в условиях многоуровневых и многослойных сетей [124], таких как SAGSIN, рассмотренная в главе 1. Данные сети обеспечивают глобальное покрытие, однако создают дополнительные сложности при выборе базовой станции для подключения. Пользователь может одновременно находиться в зоне покрытия спутниковых систем, воздушных или GBS. Поэтому задача выбора оптимальной точки подключения становится крайне важной и требует комплексного подхода.

Для ассоциации пользователей в сетях 5G и последующих поколениях были предложены различные метрики, позволяющие определить, какая именно BS должна обслуживать конкретного пользователя. Как правило, применяются четыре основных метрики: вероятность отключения/покрытия, эффективность использования спектра, энергоэффективность, а также QoS. В научных исследованиях для оценки характеристик сети может рассматриваться как одна из этих метрик, так и их комбинация в зависимости от конкретной задачи и требований к системе.

Развертывание ABS для расширения покрытия наземных сетей является одним из перспективных решений для обеспечения связи в сетях будущего. Однако, как и в случае с традиционными GBS [125], эффективное размещение ABS играет решающую роль в обеспечении высокой производительности системы. При этом, если размещение GBS часто ограничено природными условиями местности и инфраструктурными факторами, то ABS обладают большей гибкостью благодаря отсутствию географических ограничений. Тем не менее, использование ABS сопряжено с рядом серьёзных вызовов, основными из которых являются ограниченные энергетические ресурсы и нестабильность канала воздушно-наземной передачи из-за постоянного движения платформы и влияния внешних факторов. В связи с этим задача оптимизации размещения ABS и распределения

мощности становится особенно актуальной для повышения эффективности таких систем.

В настоящей работе рассматривается задача ассоциации пользователей между GBS и ABS [126], а также оптимизация мощности передачи для пользователей и определение оптимального положения ABS с целью максимизации суммарной скорости передачи данных в системе. Для решения данной задачи предлагается динамический подход, при котором радиус зоны покрытия GBS может изменяться. Это позволяет гибко определять положение и количество пользователей, подключённых к GBS и ABS. Для пользователей, подключённых к GBS, мощность передачи распределяется равномерно. Оставшиеся пользователи распределяются к ABS, для которых применяется метод глубокого обучения с подкреплением — алгоритм глубокий детерминированный градиент политики (Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG).

4.2. Модель сети

Предлагает, что GBS находится в центре рассматриваемой зоны. Расположение GBS задается координатами (x_g, y_g, h_g) , где (x_g, y_g) — координаты GBS на поверхности земли, а h_g — высота GBS. Для поддержки наземной сети, используется одна ABS. Положение ABS, заданы в виде (x_a, y_a, h_a) , где (x_a, y_a) — координаты ABS на поверхности земли, а h_a — высота полета. В зависимости от мощности, конструкции, а также местных законов, высота полета должна находиться в определенном диапазоне. Всего в рассматриваемой зоне находятся N пользователей. Расположение каждого пользователя n , где $n \in \{1, \dots, N\}$, задается координатами $(x_n, y_n, 0)$.

Для связи «воздух-земля» рассматривается вероятностная модель канала LoS [127], в которой вероятность LoS зависит от взаимного расположения между ABS и пользователем, угла места между ними и окружающей среды. Вероятность наличия LoS P^{LoS} между ABS и пользователем n рассчитывается [127]:

$$P^{LoS} = \frac{1}{1 + a \exp(-b[\theta - a])} \quad (4.1)$$

где a и b – постоянные значения, зависящие от окружающей среды (сельская, городская, густонаселенная и т. д.); θ – угла места между пользователем n и ABS (измеряется в «градусах») и равно $\frac{180}{\pi} \times \arcsin(\frac{h_a}{d_{a,n}})$; h_a – высота полета ABS; $d_{a,n}$ – расстояние между ABS и пользователем n и равно $\sqrt{(x_a - x_n)^2 + (y_a - y_n)^2 + h_a^2}$. С другой стороны, вероятность соединения NLoS будет равна $P^{NLoS} = 1 - P^{LoS}$. Как следует из (4.1), вероятность LoS увеличивается по мере увеличения угла места между пользователем и ABS.

Полагаем, что потери распространения между ABS и пользователем n составляют β_n . С учетом наличия препятствий в воздушном канале связи, β_n обычно моделируются как случайная величина, связанная с вероятностью возникновения LoS- и NLoS-соединений. Следовательно, β_n можно выразить как:

$$\beta_n = \begin{cases} \beta_0 d_{a,n}^{-\hat{\alpha}} & \text{LoS-соединение} \\ \kappa \beta_0 d_{a,n}^{-\hat{\alpha}}, & \text{NLoS-соединение,} \end{cases} \quad (4.2)$$

где β_0 – это потеря сигнала на эталонном расстоянии 1 метр для LoS-соединений; κ – обозначает дополнительные потери распространения для NLoS-соединений; $\hat{\alpha}$ – показатель затухания сигнала; и $d_{a,n}$ – расстояние между ABS и пользователем n . Таким образом, средний коэффициент усиления мощности канала $h_{a,n}^{ABS}$ между ABS и пользователем n выражается как [127]:

$$h_{a,n}^{ABS} = P^{LoS} \beta_0 d_{a,n}^{-\hat{\alpha}} + P^{NLoS} \kappa \beta_0 d_{a,n}^{-\hat{\alpha}} \quad (4.3)$$

В данном исследовании для моделирования канала GBS используется NLoS-канал [127], что означает, что сигнал между GBS и пользователем может быть преграждён различными объектами, такими как здания, деревья или другие препятствия, блокирующие прямую линию видимости между источником и

приёмником. В сценарии городского макрорайона (Urban Macro, UMa), где GBS обычно размещается в городской среде с множеством физических препятствий, такие как высокие здания и плотная растительность, данный тип канала является наиболее типичным. Потери распространения $PL_{g,n}^{GBS}$ (в дБ) можно определить следующим образом:

$$PL_{g,n}^{GBS} = 32.4 + 20 \log_{10}(f_g) + 30 \log_{10}(d_{g,n}) \quad (4.4)$$

где f_g – частота работы GBS (ГГц); $d_{g,n}$ – расстояние от GBS до пользователя n (м).

4.3 Формулировка проблемы

В данной главе сначала решается задача ассоциации пользователей между GBS и ABS. Каждый пользователь должен быть назначен либо ABS, либо GBS для осуществления нисходящей передачи данных. Чтобы определить состояние подключения пользователя, вычисляется отношение сигнал/шум и помехи (Signal-to-Noise Ratio, SNR) в нисходящем канале. Пользователь считается назначенным подключённым к GBS или ABS, если полученный SNR превышает заданный порог SNR_0 .

Предположим, что пользователь n назначен к GBS, тогда полученное значение SNR_n для пользователя n определяется следующим образом:

$$SNR_{g,n}^{GBS} = \frac{P_{GBS} h_{g,n}^{GBS} g_n}{\sigma^2} \quad (4.5)$$

где P_{GBS} – мощность передачи GBS; $h_{g,n}^{GBS}$ – коэффициент усиления канала между GBS и пользователем n и равно $\frac{1}{10^{(PL_{g,n}^{GBS}/10)}}$; g_n – коэффициент распределения мощности GBS для пользователя n ; σ^2 – мощность шума.

Аналогично, для пользователя m назначен к ABS, тогда полученное значение SNR_m для пользователя m будет следующим:

$$SNR_{a,m}^{ABS} = \frac{P_{ABS} h_{a,m}^{ABS} p_m}{\sigma^2} \quad (4.6)$$

где P_{ABS} – мощность передачи ABS; $h_{a,m}^{ABS}$ – коэффициент усиления канала между ABS и пользователем m и рассчитывается по формуле (4.3); p_m – коэффициент распределения мощности ABS для пользователя m .

Предположим, что, N – общее количество пользователей в рассматриваемой зоне, N_n – количество пользователей подключенных к GBS, а количество пользователей, подключенных к ABS, равно N_m . Поскольку все пользователи одинаковы и между ними нет приоритета, предполагает, что полоса пропускания, выделяемая GBS и ABS каждому пользователю при подключении, одинакова и равна B . Для упрощения математических вычислений полоса пропускания B нормализована до единицы. Достижимая скорость передачи данных нисходящей канале системы может быть рассчитана на основе формулы Шеннона [128]:

$$\begin{aligned} R &= R_{GBS} + R_{ABS} \\ &= \sum_{n=1}^{N_n} \log_2(1 + SNR_{g,n}^{GBS}) + \sum_{m=1}^{N_m} \log_2(1 + SNR_{a,m}^{ABS}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

где $R_{GBS} = \sum_{n=1}^{N_n} \log_2(1 + SNR_{g,n}^{GBS})$ – общая достижимая скорость нисходящей линии связи всех пользователей, подключенных к GBS; $R_{ABS} = \sum_{m=1}^{N_m} \log_2(1 + SNR_{a,m}^{ABS})$ – общая достижимая скорость нисходящей линии связи всех пользователей, подключенных к ABS.

Цель данной работы заключается в оптимальном ассоциации пользователей между ABS и GBS с целью максимизации скорости нисходящей связи системы. Задача включает в себя определение стратегии ассоциации пользователей, распределение мощности и трехмерное размещение ABS. Она может быть сформулирована следующим образом:

$$O = \max_{\{x_a, y_a, h_a, p_m\}} R \quad (4.8)$$

при условиях

$$C1: \sum_{m=1}^{N_m} p_m = 1,$$

$$C2: \sum_{n=1}^{N_n} g_n = 1,$$

$$C3: N_m + N_n = N,$$

$$C4: x_{\min} \leq x_a \leq x_{\max},$$

$$C5: y_{\min} \leq y_a \leq y_{\max},$$

$$C6: h_{\min} \leq h_a \leq h_{\max}.$$

Ограничения C1 и C2 подразумевают, что общее распределение мощности пользователей при подключении к ABS и GBS равно 1 соответственно. Ограничение C3 означает, количество пользователей, к которым подключаются ABS и GBS, должно быть равно количеству исходных пользователей в рассматриваемой зоне. Ограничения C4, C5 и C6 означают, что ABS должны располагаться в рассматриваемой зоне, где $x_{\min}$, $y_{\min}$, $h_{\min}$ – это нижние границы по осям, $x_{\max}$, $y_{\max}$, $h_{\max}$ – верхние границы по осям.

4.4 Алгоритм для решения задачи

4.4.1 Стратегия ассоциации пользователей

В беспроводных сетях ассоциации пользователей между GBS и ABS играет ключевую роль в оптимизации общей скорости передачи данных. Одной из главных задач является определение границы зоны покрытия GBS таким образом, чтобы обслуживать оптимальное количество пользователей в регионе, одновременно снижая нагрузку на ABS.

На практике зоны покрытия GBS и ABS могут пересекаться, что создает дополнительную сложность при распределении пользователей. Чтобы не

усложнять модель, в данном исследовании предполагает, что каждый пользователь может быть подключен только к одной из BS — либо к GBS, либо к ABS. Кроме того, чтобы минимизировать межканальные помехи, GBS и ABS работают на отдельных частотных диапазонах.

Для решения этой проблемы предлагается динамический подход, при котором радиус покрытия GBS изменяется. Пользователи, находящиеся за пределами зоны покрытия GBS, обслуживаются ABS. На основе местоположения и количества пользователей, обслуживаемых GBS и ABS, а также оптимального местоположения ABS, достижимая скорость передачи данных в нисходящем канале системы может быть рассчитана с помощью формулы (4.7). Изменение радиуса покрытия GBS приводит к изменению количества пользователей, подключенных к GBS и ABS, тем самым изменяя общую скорость передачи данных в нисходящем канале системы. Затем выбирается такое значение радиуса покрытия GBS, при котором общая скорость передачи данных максимальна.

4.4.2 Распределение мощности и трехмерное размещение ABS

После определения местоположения и количества пользователей, подключенных к GBS или ABS, на основе радиуса покрытия GBS, проводится анализ распределения мощности между пользователями и находим оптимальное трехмерное местоположение ABS. Чтобы упростить задачу и сосредоточиться на оптимизации трехмерного местоположения ABS и распределении мощности среди пользователей, подключенных к ABS, предполагает, что все пользователи, подключенные к GBS, получают равное распределение мощности. Для решения задачи оптимизации местоположения ABS и распределения мощности используется алгоритм Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG), который является методом глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL). DDPG выбран благодаря своей способности эффективно решать задачи с непрерывными пространствами состояний и действий, что особенно важно

для данной задачи, где параметры, такие как положение ABS и мощность передачи, являются непрерывными величинами.

В отличие от традиционных методов обучения с подкреплением, таких как Q-learning, которые подходят для дискретных пространств действий, DDPG позволяет работать с более сложными и высоко размерными пространствами, что необходимо в реальных приложениях связи, где настройки системы часто являются непрерывными и требуют высокой точности в принятии решений.

В модели DDPG ABS выступает в роли агента, и модель DDPG строится на основе элементов MDP (Марковский процесс принятия решений): состояния, действий, вознаграждений и вероятность перехода. Задача ABS –научиться оптимизировать свою позицию и распределение мощности, чтобы максимизировать общую скорость передачи данных в сети.

Состояния (s)

Они описывают ситуацию среды системы ретрансляции на базе ABS, и принятие решения о действиях основывается на состоянии сети. Состояние в системе описывает окружающую среду ABS, включая такие параметры, как положение ABS в трехмерном пространстве и уровень мощности, выделенной различным пользователям в сети. Состояние ABS в временном шаге t обозначается как s_t , и может быть записано как:

$$s_t = \{x_a^t, y_a^t, h_a^t, p_m^t\} \quad (4.9)$$

где (x_a^t, y_a^t, h_a^t) – это положение ABS в временном шаге t , p_m^t – обозначает мощность, выделенную для пользователя m .

Действие (A)

На каждом шаге ABS выбирает действие из пространства действий, которое включает как перемещение в новое состояние, так и распределение мощности. Каждое действие приводит к переходу в новое состояние системы. Действие

состоит из двух частей: одна часть – это перемещение в следующее состояние ABS, другая – распределение мощности. Перемещение ABS включает движение вперед, назад, вправо, влево, вверх и вниз. Распределение мощности для каждого пользователя может увеличиваться или уменьшаться. Действие агента в временном шаге t обозначается как a_t , и оно включает как изменение положения ABS, так и регулировку мощности для пользователей.

Вознаграждение (R)

Цель DDPG — максимизация накопленного вознаграждения за время обучения. Чтобы достичь цели, поставленной в уравнении (4.7), функция вознаграждения должна учитывать общую скорость передачи данных в системе, включая как GBS, так и ABS. С другой стороны, после определения количества и расположения пользователей, подключённых к GBS или ABS, на основе зоны покрытия GBS, суммарная скорость передачи данных в нисходящем канале для пользователей GBS остаётся неизменной. Следовательно, этот компонент можно исключить из функции вознаграждения. Таким образом, вознаграждение r_t в временном шаге t может быть вычислено на основе общей скорости передачи данных в нисходящем канале пользователей, подключенных к ABS:

$$r_t = R_t^{ABS} - \lambda \Delta N_t \quad (4.10)$$

где R_t^{ABS} — общая скорость передачи данных в нисходящем канале пользователей, подключенных к ABS; λ — штрафной коэффициент, когда ABS не подключается ко всем пользователям; ΔN_t — количество неподключенных пользователей.

Вероятность перехода (P)

Вероятность перехода из текущего состояния s_t , к следующему состоянию s_{t+1} при выполнении действия a_t . Таким образом, вероятность перехода $P(s_{t+1} | s_t, a_t)$ определяется как:

$$P(s_{t+1} | s_t, a_t) = \begin{cases} 1, & s_{t+1} = s_t + a_t \\ 0, & \text{другие} \end{cases} \quad (4.11)$$

В методе DDPG два основных компонента – сеть Actor и сеть Critic – играют важную роль в оптимизации политики и оценки значений модели. DDPG использует архитектуру Actor – Critic для решения задачи оптимизации в непрерывном пространстве действий. Обе сети, Actor и Critic, являются глубокими нейронными сетями (Deep Neural Network, DNN) и работают совместно для обучения оптимальной стратегии.

Сеть Actor

Сеть Actor принимает состояние системы s_t в виде входных данных и генерирует действие a_t , которое, как ожидается, будет оптимальным для улучшения общей скорости передачи данных. Политика параметризованная нейросеткой с параметрами θ^π , определяет, какие действия должны быть предприняты агентом:

$$a_t = \pi(s_t | \theta^\pi) + \xi \quad (4.12)$$

где $\pi(s_t | \theta^\pi)$ – политика агента, которая определяет оптимальные действия, включая перемещение ABS и распределение мощности, на основе текущего состояния; θ^π – параметры сети Actor, которые обновляются в процессе обучения; ξ – шум.

Сеть Actor обучается с использованием градиентного метода, обновляя параметры θ^π так, чтобы максимизировать ожидаемое суммарное вознаграждение.

Градиентная функция $\nabla_{\theta^\pi} J(\theta^\pi)$ обновления параметров сети Actor определяется как в работе [129].

Сеть Critic

Сеть Critic оценивает действия, выбранные сетью Actor, и предоставляет обратную связь. Его основная задача – вычислить ценность состояния или ценность действия с использованием Q-функции, которая оценивает, насколько выгодно выбранное действие в данной ситуации. Таким образом, Сеть Critic играет ключевую роль в обучении, помогая сети Actor выбирать более эффективные действия на основе актуальных оценок ценности.

В процессе обучения сеть Critic вычисляет целевое значение y_t , которое используется для корректировки её параметров, минимизируя ошибку между текущей оценкой $Q(s_t, a_t | \theta^Q)$ и целевым значением. Целевое значение y_t определяется:

$$y_t = r_t + \gamma Q(s_{t+1}, \pi(s_{t+1} | \theta^{\pi'}), \theta^{Q'}) \quad (4.13)$$

где r_t – это вознаграждение, полученное в временном шаге t ; γ – это коэффициент дисконтирования; $Q(s_{t+1}, \pi(s_{t+1} | \theta^{\pi'}), \theta^{Q'})$ – это оценка ценности для состояния s_{t+1} , вычисленная с использованием целевой Actor сети $\pi(s_{t+1} | \theta^{\pi'})$ и целевой Critic сети $Q(s_{t+1}, a_{t+1} | \theta^{Q'})$.

Сеть Critic использует функцию потерь для обновления параметров θ^Q . Функция потерь $L(\theta^Q)$ определяется следующим образом:

$$L(\theta^Q) = \frac{1}{D} \sum_{j=1}^D (y_i - Q(s_j, a_j | \theta^Q))^2 \quad (4.14)$$

где D – общее количество образцов опыта в буфере.

Чтобы стабилизировать обучение, используется фактор мягкого обновления τ для обновления параметров целевых сетей $\theta^{\pi'}$ и $\theta^{Q'}$:

$$\begin{aligned}\theta^{Q'} &\leftarrow \tau\theta^Q + (1-\tau)\theta^{Q'} \\ \theta^{\pi'} &\leftarrow \tau\theta^{\pi} + (1-\tau)\theta^{\pi'}\end{aligned}\tag{4.15}$$

Процесс обучения DDPG включает в себя сбор опыта из среды и его сохранение в буфер воспроизведения H . Случайная мини-партия извлекается из буфера воспроизведения для обновления сетей Critic и Actor. Сеть Critic обновляется по ошибке, а сеть Actor — на основе градиента политики. Целевой сети обновляются постепенно с фактором мягкого обновления τ , чтобы уменьшить колебания. Модели обучения и значения вознаграждения сохраняются для отслеживания и дальнейшего использования. Этот процесс помогает улучшать политику и ценность со временем.

4.5 Результаты моделирования

В данной работе рассматриваются 1000 пользователей, равномерно распределенных по территории размером 2000 м × 2000 м. Высота полета ABS, находится от 200 м до 1000 м в зависимости от местных правил и конструктивных особенностей.

Таблица 4.1 – Параметры моделирования

Параметр	Значение	Параметр	Значение
P_{GBS}	40 дБм	P_{ABS}	20 дБм
a	9.61	b	0.16
β_0	-30 дБ	κ	-20 дБ
f_g	3.5 ГГц	SNR_0	20 дБ
σ^2	-130 дБм	$\hat{\alpha}$	-2.3

Для экспериментального моделирования фактор дисконтирования вознаграждения $\gamma = 0.99$, фактор мягкого обновления $\tau = 0.005$, размер буфера воспроизведения составляет $H = 10^5$, общее количество образцов опыта в буфере

$D = 64$. Шум Орнштейна-Уленбека (OU) ξ следует нормальному распределению со средним значением 0 и дисперсией 0.5 [130]. Обучается алгоритм DDPG в течение 500 эпизодов, каждый из которых состоит из 100 шагов. Штрафной коэффициент $\lambda = 10$.

Таблица 4.2 – Влияние различных радиусов покрытия GBS на высоту полета ABS

Радиус покрытия GBS (м)	600	700	750	800	900	1000
Высота полета ABS (м)	810	612	560	512	477	450

В таблице 4.2 описано влияние радиуса покрытия GBS на высоту полета ABS. В целом, по мере уменьшения радиуса покрытия GBS высота полета ABS будет постепенно увеличиваться, чтобы иметь возможность связаться со всеми оставшимися пользователями. Увеличение высоты полета также увеличивает вероятность соединения в пределах прямой видимости, тем самым снижая потери при передаче и улучшая качество обслуживания. Кроме того, увеличение высоты полета ABS позволяет расширить зону покрытия, помогая подключаться к удаленным пользователям.

Таблица 4.3 – Радиус покрытия GBS и его влияние на количество пользователей и суммарную скорость передачи данных

Радиус покрытия GBS (м)	600	700	750	800	900	1000
N_n (человек)	29	35	38	44	59	61
R_{GBS} (бит/с)	149.3	176.2	191.4	217.2	218.6	289.8
N_m (человек)	71	65	62	58	41	39
R_{ABS} (бит/с)	347.3	322.5	308.2	278.2	206.2	194
R (бит/с)	496.6	498.7	499.6	495.2	487.8	483.8

Таблица 4.3 описывает влияние радиуса покрытия GBS на количество подключенных пользователей и общую скорость передачи данных для

пользователей, подключенных к GBS и ABS, а также для всей системы в целом. Из таблицы 4.3 видно, что при радиусе покрытия GBS, равном 750 м, общая скорость передачи данных системы достигает максимального значения. На рисунке 4.1 показаны распределения пользователей, GBS и ABS при радиусе покрытия GBS, равном 750 м. Красный квадрат представляет трехмерное положение ABS в пространстве, синий ромб, расположенный в центре рассматриваемой зоны, представляет положение GBS. Синие и красные точки обозначают пользователей, подключенных к GBS и ABS соответственно. Синий пунктирный круг обозначает радиус покрытия GBS.

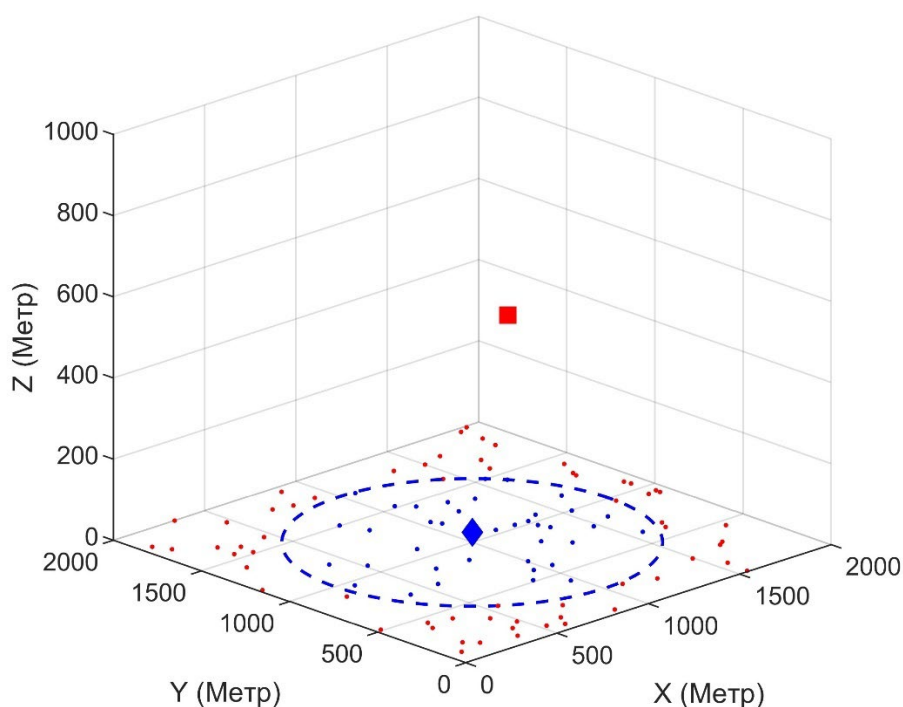


Рисунок 4.1 – Распределение пользователей, GBS и ABS

На рисунке 4.2 показана скорость передачи данных системы при использовании методов глубокого сети Q (Deep Q Network, DQN) и DDPG. DDPG превосходит DQN в задачах распределения ресурсов и оптимизации трехмерного местоположения ABS благодаря своей способности выполнять обработку в

непрерывном пространстве. DQN применим только в пространстве дискретных действий [131], тогда как DDPG может регулировать положение ABS и распределение мощности в соответствии с непрерывными значениями, что повышает общую скорость передачи данных. Кроме того, DDPG использует курсы критики и актерского мастерства, которые помогают лучше обучаться в сложных условиях [121].

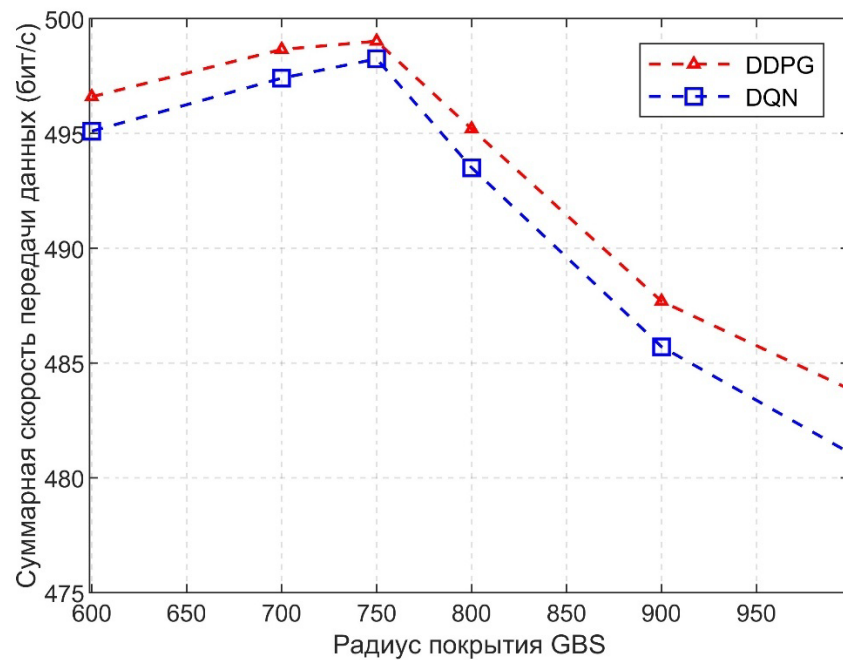


Рисунок 4.2 – Суммарная скорость передачи данных в разных алгоритмах

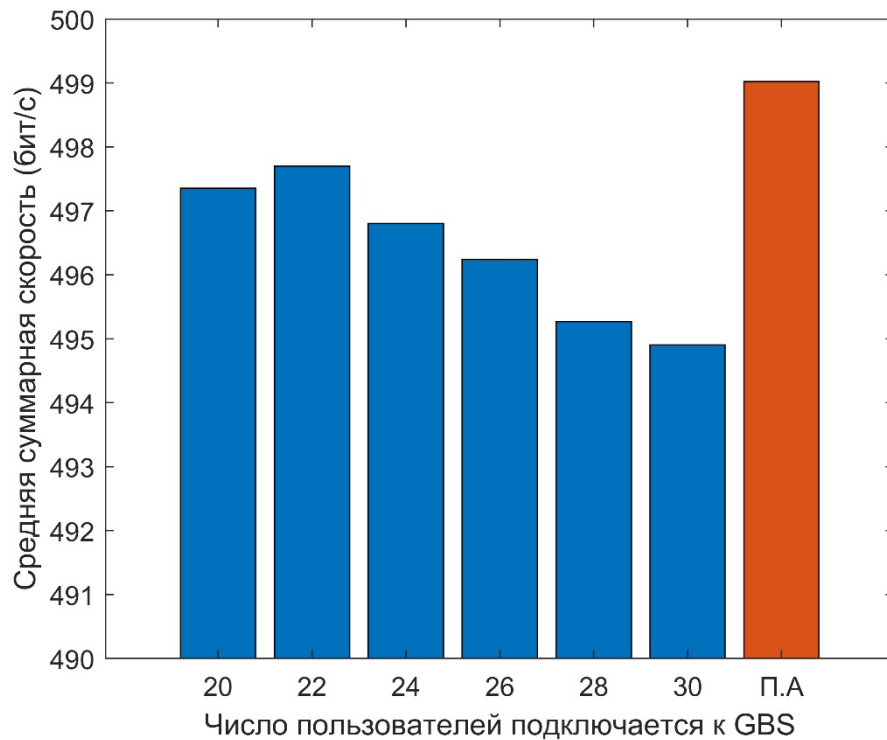


Рисунок 4.3 – Средняя суммарная скорость передачи данных при случайном выборе числа пользователей, подключённых к GBS

На рисунке 4.3 представлена зависимость суммарной скорости передачи данных от числа пользователей, подключённых к GBS, при оптимальном радиусе обслуживания, равном 750 м. Для оценки эффективности предложенного подхода, результаты сравниваются со средним значением суммарной скорости передачи данных, полученным при случайном выборе пользователей, подключаемых к GBS при фиксированном их числе. Из графика видно, что по мере увеличения количества пользователей, подключённых к GBS, общая скорость передачи данных снижается, что связано с ограниченностью доступных ресурсов и пропускной способности. В то же время предложенный метод ассоциации пользователей демонстрирует устойчивое преимущество, обеспечивая более высокие показатели скорости передачи данных даже в условиях случайного ассоциация пользователей по зоне покрытия, что свидетельствует о его эффективности и рациональности в условиях ограниченного радиуса обслуживания.

4.6 Выводы по Главе 4

В данной главе предлагается модель и метод для изучения проблем ассоциации пользователей, распределения энергии и оптимизации местоположения ABS в гибридных сетях. Рассматривая радиус покрытия GBS как динамический параметр, можно определить количество и местоположение пользователей, подключенных к GBS или ABS, соответствующих каждому радиусу.

При распределении мощности пользователей, подключенных к GBS, всем пользователям выделяется одинаковая мощность. Между пользователями, подключающимися к ABS, рекомендует использовать DDPG для поиска оптимального положения ABS и соответствующего распределения мощности. На основе общей скорости передачи данных системы, соответствующей различным радиусам покрытия GBS, определяется оптимальный радиус, при котором общая скорость передачи данных системы достигает максимального значения.

Кроме того, в статье также сравниваются алгоритмы DDPG и DQN. Результаты показывают, что DDPG превосходит DQN в предложенной задаче. Это можно объяснить разницей в том, как два алгоритма ищут решения: DDPG работает в непрерывном пространстве действий, что позволяет находить более оптимальные решения, тогда как DQN выполняет поиск только в дискретном пространстве, что приводит к ограничениям в точности и гибкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Проанализированы различные применения воздушных платформ, включая Интернет Вещей, экстренные ситуации, умный транспорт и сельское хозяйство. Эти платформы позволяют преодолеть ограничения по радиусу покрытия и скорости передачи данных, обеспечивая мобильность и гибкость в труднодоступных районах. Их внедрение в современные сети связи, такие как 5G и последующие поколения, открывает новые возможности для улучшения QoS и минимизации задержек. В то же время, интеграция этих технологий сопровождается научными проблемами, такими как оптимизация положения воздушных платформ, управление ресурсами и обеспечение безопасности, что требует дальнейших исследований и разработки решений для эффективного использования ABS.

2. Рассмотрены подходы к оптимизации размещения ABS и траекторий полёта, направленные на улучшение покрытия и качества связи, а также на снижение энергозатрат. Применение алгоритмов роя частиц, кластеризации и графо-теоретических методов позволяет эффективно решать задачу размещения воздушных платформ с учётом географических особенностей и плотности пользователей. Оптимизация траекторий полёта способствует динамическому и адаптивному покрытию, минимизируя задержки и энергозатраты. Эти методы обеспечивают высокую эффективность и стабильность сетевых инфраструктур.

3. Разработаны модель и методика размещения ABS в трехмерном пространстве для поддержки GBS в условиях перегрузки, отличающиеся тем, что задача решается при различной плотности пользователей в нескольких районах на основе метаэвристического алгоритма PSO для густонаселенных районов, на фестивалях и спортивных мероприятиях.

4. Разработан метод максимизации скорости передачи данных при использовании ABS, отличающийся тем, что на основе совместной оптимизации

размещения ABS и распределения мощности среди пользователей на основе использования методов обучения с подкреплением, а именно метода Q-learning и жадного алгоритма T-greedy, что позволяет уменьшить высоту расположения ABS и одновременно увеличить скорость передачи данных на 10-20% в зависимости от числа пользователей.

5. Разработан метод оптимизации для решения проблем ассоциации пользователей, распределения энергии и оптимизации местоположения ABS в гибридных сетях, отличающийся тем, что оптимизация проводится на основе на основе радиуса покрытия GBS как динамического параметра и использования методов глубокого обучения DDPG и DQN, первый из которых дает увеличение скорости передачи на несколько процентов во всем исследованном диапазоне изменения радиуса покрытия GBS по сравнению со вторым методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gupta A. A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies / A. Gupta, R.K. Jha // IEEE Access. – 2015, – Vol. 3, – pp. 1206–1232.
2. Halonen T. GSM, GPRS and EDGE performance: Evolution towards 3G/UMTS / T. Halonen, J. Romero, J. Melero // John Wiley & Sons. – 2004.
3. Santhi K. R. Goals of true broad band's wireless next wave (4G–5G) / K.R. Santhi, V.K. Srivastava, G. SenthilKumaran, A. Butare // Proceedings of IEEE 58th Vehicular Technology Conference, VTC 2003-Fall. – 2003. – Vol. 4, – pp. 2317–2321.
4. Sharma P. Evolution of mobile wireless communication networks – 1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network / P. Sharma // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2013, – No. 8, pp. 47–53.
5. Chen S. The development of TD-SCDMA 3G to TD-LTE-advanced 4G from 1998 to 2013 / S. Chen, J. Zhao, Y. Peng // IEEE Wireless Communications. – 2014, – Vol. 21, No. 6, pp. 167–176.
6. Datta P. Exploration and comparison of different 4G technologies implementations: A survey / P. Datta, S. Kaushal // Proceedings of Recent Adv. Eng. Comput. Sci. (RAECS). – 2014, pp. 1–6.
7. Wijethilaka S. Realizing Internet of Things with network slicing: Opportunities and challenges / S. Wijethilaka, M. Liyanage // Proceedings of IEEE 18th Annual Consumer Communications Networks Conference (CCNC). – 2021, pp. 1–6.
8. Siriwardhana Y. The fight against the COVID-19 pandemic with 5G technologies / Y. Siriwardhana, C. De Alwis, G. Gür, M. Ylianttila, M. Liyanage // IEEE Engineering Management Review. – 2020, – Vol. 48, No. 3, pp. 72–84.

9. Lu Y. 6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues / Y. Lu, X. Zheng // *Journal of Industrial Information Integration*. – 2020, – Vol. 19, pp. 100158.
10. Liu Y. Federated learning for 6G communications: Challenges, methods, and future directions / Y. Liu, X. Yuan, Z. Xiong, J. Kang, X. Wang, D. Niyato // *China Communications*. – 2020, – Vol. 17, No. 9, pp. 105–118.
11. Chowdhury M. Z. 6G wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions / M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, Y. M. Jang // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. – 2020, – Vol. 1, pp. 957–975.
12. Zhang Z. 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies / Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidism P. Fan // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. – 2019, – Vol. 14, No. 3, pp. 28–41.
13. Jiang W. The road towards 6G: A comprehensive survey / W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, H. D. Schotten // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. – 2021. – Vol. 2, pp. 334–366.
14. Hubenko V. P. Improving the global information grid's performance through satellite communications layer enhancements / V. P. Hubenko, et al. // *IEEE Communications Magazine*. – 2006, – Vol. 44, No. 11, pp. 66–72.
15. Hamdi M. Bandwidth-effective design of a satellite-based hybrid wireless sensor network for mobile target detection and tracking / M. Hamdi, N. Boudriga, M. S. Obaidat // *IEEE Systems Journal*. – 2008, – Vol. 2, No. 1, pp. 74–82.
16. Blumenthal S. H. Medium earth orbit Ka-band satellite communications system / S. H. Blumenthal // *Proceedings of IEEE MILCOM*. – 2013, Nov., pp. 273–277.

17. Maine K. Overview of IRIDIUM satellite network / K. Maine, C. Devieux, P. Swan // Proceedings of IEEE WESCON, San Francisco, CA, USA. – 1995, pp. 483–490.
18. Dietrich F. J. The Globalstar cellular satellite system / F. J. Dietrich, P. Metzen, P. Monte // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1998, – Vol. 46, No. 6, pp. 935–942.
19. Casoni M. Integration of satellite and LTE for disaster recovery / M. Casoni, C. A. Grazia, M. Klapez, N. Patriciello, A. Amditis, E. Sdongos // IEEE Communications Magazine. – 2015, – Vol. 53, No. 3, pp. 47–53.
20. Guo F. Enabling massive IoT toward 6G: A comprehensive survey / F. Guo, F. R. Yu, H. Zhang, X. Li, H. Ji, V. C. Leung // IEEE Internet of Things Journal. – 2021, – Vol. 8, No. 15, pp. 11891–11915.
21. Farserotu J. A survey of future broadband multimedia satellite systems, issues and trends / J. Farserotu, R. Prasad // IEEE Communications Magazine. – 2000, – Vol. 38, No. 6, pp. 128–133.
22. Gharanjik A. Multiple gateway transmit diversity in Q/V band feeder links / A. Gharanjik, B. S. MR, P. D. Arapoglou, B. Ottersten // IEEE Transactions on Communications. – 2014, – Vol. 63, No. 3, pp. 916–926.
23. Nishiyama H. Toward optimized traffic distribution for efficient network capacity utilization in two-layered satellite networks / H. Nishiyama, Y. Tada, N. Kato, N. Yoshimura, M. Toyoshima, N. Kadowaki // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2012, – Vol. 62, No. 3, pp. 1303–1313.
24. Chandrasekharan S. Designing and implementing future aerial communication networks / S. Chandrasekharan, K. Gomez, A. Al-Hourani, S. Kandeepan, T. Rasheed, L. Goratti, S. Allsopp // IEEE Communications Magazine. – 2016, – Vol. 54, No. 5, pp. 26–34.

25. Guo H.. UAV-enhanced intelligent offloading for Internet of Things at the edge / H. Guo, J. Liu // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019, – Vol. 16, No. 4, pp. 2737–2746.
26. Conti M. Mobile ad hoc networking: Milestones, challenges, and new research directions / M. Conti, S. Giordano // IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 52, No. 1, pp. 85–96.
27. Charfi E. PHY/MAC enhancements and QoS mechanisms for very high throughput WLANs: A survey / E. Charfi, L. Chaari, L. Kamoun // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2013, – Vol. 15, No. 4, pp. 1714–1735.
28. Papapanagiotou I. A survey on next generation mobile WiMAX networks: Objectives, features and technical challenges / I. Papapanagiotou, D. Toumpakaris, J. Lee, M. Devetsikiotis // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2009, – Vol. 11, No. 4, pp. 3–18.
29. Agiwal M. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey / M. Agiwal, A. Roy, N. Saxena // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016, – Vol. 18, No. 3, pp. 1617–1655.
30. Кучерявый А. Е. Интернет вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. 2013. No. 1. С. 21–24.
31. Gubbi J. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions / J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami // Future Generation Computer Systems. – 2013, – Vol. 29, No. 7, P. 1645–1660.
32. Zanella A. Internet of things for smart cities / A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, M. Zorzi // IEEE Internet of Things Journal. – 2014, – Vol. 1, No. 1, pp. 22–32.
33. Rose K. The internet of things: An overview / K. Rose, S. Eldridge, L. Chapin // The Internet Society (ISOC). – 2015, – Vol. 80, No. 15, pp. 1–53.
34. Pang Y. Efficient data collection for wireless rechargeable sensor clusters in harsh terrains using UAVs / Y. Pang, Y. Zhang, Y. Gu, M. Pan, Z. Han, P. Li //

- Proceedings of IEEE Global Communications Conference. – 2014, Dec., pp. 234–239.
35. Zhang J. Minimizing the number of deployed UAVs for delay-bounded data collection of IoT devices / J. Zhang, Z. Li, W. Xu, J. Peng, W. Liang, Z. Xu, X. Jia // Proceedings of IEEE INFOCOM 2021 – IEEE Conference on Computer Communications. – 2021, May, pp. 1–10.
 36. Al-Fuqaha A. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications / A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, M. Ayyash // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015, – Vol. 17, No. 4, pp. 2347–2376.
 37. Wu Q. Joint trajectory and communication design for UAV-enabled multiple access / Q. Wu, Y. Zeng, R. Zhang // Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017). – 2017, Dec., pp. 1–6.
 38. Hayat S. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint / S. Hayat, E. Yanmaz, R. Muzaffar // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016, – Vol. 18, No. 4, pp. 2624–2661.
 39. Valavanis K. P. Handbook of unmanned aerial vehicles / K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos // Springer Publishing Company, Incorporated. – 2014.
 40. Erdelj M. Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management / M. Erdelj, M. Król, E. Natalizio // Computer Networks. – 2017, – Vol. 124, pp. 72–86.
 41. Erdelj M. Help from the sky: Leveraging UAVs for disaster management / M. Erdelj, E. Natalizio, K. R. Chowdhury, I. F. Akyildiz // IEEE Pervasive Computing. – 2017, – Vol. 16, No. 1, pp. 24–32.
 42. Munawar H. S. UAVs in disaster management: Application of integrated aerial imagery and convolutional neural network for flood detection / H. S. Munawar, F. Ullah, S. Qayyum, S. I. Khan, M. Mojtahedi // Sustainability. – 2021, – Vol. 13, No. 14, pp. 7547.

43. Hayat S. Multi-objective UAV path planning for search and rescue / S. Hayat, E. Yanmaz, T. X. Brown, C. Bettstetter // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. – 2017, May, pp. 5569–5574.
44. Jameel F. A survey of device-to-device communications: Research issues and challenges / F. Jameel, Z. Hamid, F. Jabeen, S. Zeadally, M. A. Javed // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2018, – Vol. 20, No. 3, pp. 2133–2168.
45. Wang H. D2D communications underlaying UAV-assisted access networks / H. Wang, J. Chen, G. Ding, S. Wang // *IEEE Access*. – 2018, – Vol. 6, pp. 46244–46255.
46. Khabbaz M. Modeling and performance analysis of UAV-assisted vehicular networks / M. Khabbaz, J. Antoun, C. Assi // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2019, – Vol. 68, No. 9, pp. 8384–8396.
47. Fan X. UAV-assisted data dissemination in delay-constrained VANETs / X. Fan, C. Huang, B. Fu, S. Wen, X. Chen // *Mobile Information Systems*. – 2018, – No. 1, Article 8548301.
48. Fawaz W. Unmanned aerial vehicles as store-carry-forward nodes for vehicular networks / W. Fawaz, R. Atallah, C. Assi, M. Khabbaz // *IEEE Access*. – 2017, – Vol. 5, pp. 23710–23718.
49. Shakhathreh H. Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges / H. Shakhathreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, Z. Dou, E. Almaita, I. Khalil, M. Guizani // *IEEE Access*. – 2019, – Vol. 7, pp. 48572–48634.
50. Mozaffari M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems / M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. H. Nam, M. Debbah // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2019, – Vol. 21, No. 3, pp. 2334–2360.

51. Gu J. Multiple moving targets surveillance based on a cooperative network for multi-UAV / J. Gu, T. Su, Q. Wang, X. Du, M. Guizani // IEEE Communications Magazine. – 2018, – Vol. 56, No. 4, pp. 82–89.
52. Reshma R. Security situational aware intelligent road traffic monitoring using UAVs / R. Reshma, T. Ramesh, P. Sathishkumar // Proceedings of 2016 International Conference on VLSI Systems, Architectures, Technology and Applications (VLSI-SATA). – 2016, Jan., pp. 1–6.
53. Li M. Unmanned aerial vehicle scheduling problem for traffic monitoring / M. Li, L. Zhen, S. Wang, W. Lv, X. Qu // Computers & Industrial Engineering. – 2018, – Vol. 122, pp. 15–23.
54. Asadpour M. Micro aerial vehicle networks: An experimental analysis of challenges and opportunities / M. Asadpour, B. Van den Bergh, D. Giustiniano, K. A. Hummel, S. Pollin, B. Plattner // IEEE Communications Magazine. – 2014, – Vol. 52, No. 7, pp. 141–149.
55. Xiao Z. Enabling UAV cellular with millimeter-wave communication: Potentials and approaches / Z. Xiao, P. Xia, X. G. Xia // IEEE Communications Magazine. – 2016, – Vol. 54, No. 5, pp. 66–73.
56. Ibrahim M. Air-ground Doppler-delay spread spectrum for dense scattering environments / M. Ibrahim, H. Arslan // Proceedings of MILCOM 2015. – 2015, Oct., pp. 1661–1666.
57. Kang K. B. Analysis of micro-Doppler signatures of small UAVs based on Doppler spectrum / K. B. Kang, J. H. Choi, B. L. Cho, J. S. Lee, K. T. Kim // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2021, – Vol. 57, No. 5, pp. 3252–3267.
58. Kaul S. Effect of antenna placement and diversity on vehicular network communications / S. Kaul, K. Ramachandran, P. Shankar, S. Oh, M. Gruteser, I. Seskar, T. Nadeem // Proceedings of 2007 4th Annual IEEE Communications

Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. – 2007, Jun., pp. 112–121.

59. Newhall W. G. Wideband air-to-ground radio channel measurements using an antenna array at 2 GHz for low-altitude operations / W. G. Newhall, R. Mostafa, C. Dietrich, C. R. Anderson, K. Dietze, G. Joshi, J. H. Reed // Proceedings of IEEE MILCOM 2003. – 2003, Oct., Vol. 2, pp. 1422–1427.
60. Matolak D. W. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings / D. W. Matolak, R. Sun // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2016, – Vol. 66, No. 1, pp. 26–44.
61. Chen J. MIMO performance evaluation for airborne wireless communication systems / J. Chen, B. Daneshrad, W. Zhu // Proceedings of 2011-MILCOM 2011 Military Communications Conference. – 2011, Nov., pp. 1827–1832.
62. Yanmaz E. Channel measurements over 802.11a-based UAV-to-ground links / E. Yanmaz, R. Kuschnig, C. Bettstetter // Proceedings of 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps). – 2011, Dec., pp. 1280–1284.
63. Willink T. J. Measurement and characterization of low-altitude air-to-ground MIMO channels / T. J. Willink, C. C. Squires, G. W. Colman, M. T. Muccio // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2015, – Vol. 65, No. 4, pp. 2637–2648.
64. Gao X. Analysis of unmanned aerial vehicle MIMO channel capacity based on aircraft attitude / X. Gao, Z. Chen, Y. Hu // WSEAS Transactions on Information Science and Applications. – 2013, – Vol. 10, No. 2, pp. 58–67.
65. Zhang C. Broadband air-to-ground communications with adaptive MIMO datalinks / C. Zhang, Y. Hui // Proceedings of 2011 IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference. – 2011, Oct., pp. 4D4–1.

66. Ibrahim M. Air-ground Doppler-delay spread spectrum for dense scattering environments / M. Ibrahim, H. Arslan // Proceedings of MILCOM 2015. – 2015, Oct., pp. 1661–1666.
67. Simunek M. The UAV low elevation propagation channel in urban areas: Statistical analysis and time-series generator / M. Simunek, F. P. Fontán, P. Pechac // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013, – Vol. 61, No. 7, pp. 3850–3858.
68. Cheng X. Second order statistics of non-isotropic mobile-to-mobile Ricean fading channels / X. Cheng, C. X. Wang, D. I. Laurenson, A. V. Vasilakos // Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Communications. – 2009, Jun., pp. 1–5.
69. Khuwaja A. A. A survey of channel modeling for UAV communications / A. A. Khuwaja, Y. Chen, N. Zhao, M. S. Alouini, P. Dobbins // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2018, – Vol. 20, No. 4, pp. 2804–2821.
70. Gapeyenko M. Flexible and reliable UAV-assisted backhaul operation in 5G mmWave cellular networks / M. Gapeyenko, V. Petrov, D. Moltchanov, S. Andreev, N. Himayat, Y. Koucheryavy // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2018, – Vol. 36, No. 11, pp. 2486–2496.
71. Yan C. A comprehensive survey on UAV communication channel modeling / C. Yan, L. Fu, J. Zhang, J. Wang // IEEE Access. – 2019, – Vol. 7, pp. 107769–107792.
72. He X. Towards 3D deployment of UAV base stations in uneven terrain / X. He, W. Yu, H. Xu, J. Lin, X. Yang, C. Lu, X. Fu // Proceedings of 2018 27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). – 2018, Jul., pp. 1–9.
73. Mozaffari M. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage / M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, M. Debbah // IEEE Communications Letters. – 2016, – Vol. 20, No. 8, pp. 1647–1650.

74. Mozaffari M. Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis / M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, M. Debbah // Proceedings of 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – 2015, Dec., pp. 1–6.
75. Sharma V. Intelligent deployment of UAVs in 5G heterogeneous communication environment for improved coverage / V. Sharma, K. Srinivasan, H. C. Chao, K. L. Hua, W. H. Cheng // Journal of Network and Computer Applications. – 2017, – Vol. 85, pp. 94–105.
76. Mozaffari M. Beyond 5G with UAVs: Foundations of a 3D wireless cellular network / M. Mozaffari, A. T. Z. Kasgari, W. Saad, M. Bennis, M. Debbah // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2018, – Vol. 18, No. 1, pp. 357–372.
77. Kalantari E. On the number and 3D placement of drone base stations in wireless cellular networks / E. Kalantari, H. Yanikomeroglu, A. Yongacoglu // Proceedings of 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). – 2016, Sep., P. 1–6.
78. Lyu J. Placement optimization of UAV-mounted mobile base stations / J. Lyu, Y. Zeng, R. Zhang, T. J. Lim // IEEE Communications Letters. – 2016, – Vol. 21, No. 3, pp. 604–607.
79. Qu H. Rapid deployment of UAVs based on bandwidth resources in emergency scenarios / H. Qu, W. Zhang, J. Zhao, Z. Luan, C. Chang // Proceedings of 2020 Information Communication Technologies Conference (ICTC). – 2020, May, pp. 86–90.
80. Sawalmeh A. Power-efficient wireless coverage using minimum number of UAVs / A. Sawalmeh, N. S. Othman, G. Liu, A. Khreishah, A. Alenezi, A. Alanazi // Sensors. – 2021, – Vol. 22, No. 1, pp. 223.

81. Huang H. A method for deploying the minimal number of UAV base stations in cellular networks / H. Huang, C. Huang, D. Ma // *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. – 2019, – Vol. 7, No. 2, pp. 559–567.
82. Alzenad M. 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage / M. Alzenad, A. El-Keyi, F. Lagum, H. Yanikomeroglu // *IEEE Wireless Communications Letters*. – 2017, – Vol. 6, No. 4, pp. 434–437.
83. Bor-Yaliniz R. I. Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks / R. I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi, H. Yanikomeroglu // *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. – 2016, May, pp. 1–5.
84. Sabzehali J. Optimizing number, placement, and backhaul connectivity of multi-UAV networks / J. Sabzehali, V. K. Shah, Q. Fan, B. Choudhury, L. Liu, J. H. Reed // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2022, – Vol. 9, No. 21, pp. 21548–21560.
85. Arvanitaki A. Modeling of a UAV-based data collection system / A. Arvanitaki, N. Pappas // *Proceedings of 2017 IEEE 22nd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. – 2017, Jun., pp. 1–6.
86. Zhan C. Energy-efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network / C. Zhan, Y. Zeng, R. Zhang // *IEEE Wireless Communications Letters*. – 2017, – Vol. 7, No. 3, pp. 328–331.
87. Vera-Amaro R. Data collection schemes for animal monitoring using WSNs-assisted by UAVs: WSNs-oriented or UAV-oriented / R. Vera-Amaro, M. E. Rivero-Ángeles, A. Luviano-Juárez // *Sensors*. – 2020, – Vol. 20, No. 1, pp. 262.

88. Zhu Y. Efficient aerial data collection with cooperative trajectory planning for large-scale wireless sensor networks / Y. Zhu, S. Wang // IEEE Transactions on Communications. – 2021, – Vol. 70, No. 1, pp. 433–444.
89. Chen M. Data collection utility maximization in wireless sensor networks via efficient determination of UAV hovering locations / M. Chen, W. Liang, S. K. Das // Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom). – 2021, Mar., pp. 1–10.
90. Zhang L. Energy-efficient trajectory optimization for UAV-assisted IoT networks / L. Zhang, A. Celik, S. Dang, B. Shihada // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2021, – Vol. 21, No. 12, pp. 4323–4337.
91. Hayat S. Multi-objective UAV path planning for search and rescue / S. Hayat, E. Yanmaz, T. X. Brown, C. Bettstetter // Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2017, May, pp. 5569–5574.
92. Wu Q. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks / Q. Wu, Y. Zeng, R. Zhang // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2018, – Vol. 17, No. 3, pp. 2109–2121.
93. Liu X. Trajectory design and power control for multi-UAV assisted wireless networks: A machine learning approach / X. Liu, Y. Liu, Y. Chen, L. Hanzo // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019, – Vol. 68, No. 8, pp. 7957–7969.
94. Wang C. X. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks / C. X. Wang, F. Haider, X. Gao, X. H. You, Y. Yang, D. Yuan, E. Hepsaydir // IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 52, No. 2, pp. 122–130.
95. Bennis M. Ultrareliable and low-latency wireless communication: Tail, risk, and scale / M. Bennis, M. Debbah, H. V. Poor // Proceedings of the IEEE. – 2018, – Vol. 106, No. 10, pp. 1834–1853.

96. Neumayer S. Assessing the vulnerability of the fiber infrastructure to disasters / S. Neumayer, G. Zussman, R. Cohen, E. Modiano // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2011. – Vol. 19, No. 6, P. 1610–1623.
97. Дунайцев Р. А. Интегрированная сеть космос-воздух-земля-море как основа сетей связи шестого поколения / Р. А. Дунайцев, А. С. Бородин, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. 2022. №. 10. С. 5–8.
98. Кузнецов К. А. Модель и методы маршрутизации трафика в сети связи с использованием БПЛА / К. А. Кузнецов, А. И. Парамонов, А. С. А. Мутханна, А. Е. Кучерявый // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. №. 4. С. 62–72.
99. Чан Т. З. Размещение воздушных базовых станций в трёхмерной сети для поддержки наземного сегмента / Т. З. Чан, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. 2025. № 3. С. 17–25.
100. Волков А.Н. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G Meganetlab СПбГУТ / А. Н. Волков, А. С. А. Мутханна, А. Е. Кучерявый, А. С. Бородин, А. И. Парамонов, С. С. Владимиров, Г. А. Фокин, Р. А. Дунайцев, М. В. Захаров, Л. С. Горбачева, Б. О. Паньков, Б. Н. Анваржонов // Электросвязь. 2023. No. 6. С. 5–14.
101. Kovalenko V. Clustering algorithms for UAV placement in 5G and beyond networks / V. Kovalenko, A. Alzaghir, A. Volkov, A. Muthanna, and A. Koucheryavy // 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2020. pp. 301–307.
102. Кучерявый А. Е. Трёхмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, М. А. Маколкина // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. №. 3. С. 1–12.

103. Al-Hourani A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments / A. Al-Hourani, S. Kandeepan, A. Jamalipour // 2014 IEEE Global Communications Conference. – IEEE. – 2014.
104. Khawaja, W. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles / W. Khawaja, I. Guvenc, D. W. Matolak, U. C. Fiebig, N. Schneckenburger // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019, – Vol. 21, Issue 3, pp. 2361–2391.
105. Чан Т. З. Трехмерное размещение воздушных базовых станций для поддержки наземной сети на основе адаптивной оптимизации роя частиц / Т. З. Чан, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 3. С.1–12.
106. Singh Y. Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength / Y. Singh // International Journal of Computer Applications. – 2012, – Vol. 59, pp. 37–41.
107. Nkordeh N.S. LTE Network Planning using the Hata-Okumura and the COST 231 Hata Pathloss Models / N.S. Nkordeh (A.A.A. Atayero, F.E. Idachaba, O.O. Oni) // Proceedings of World Congress on Engineering. – 2014, – London, U.K., July 2–4, pp. 705–709.
108. Goldsmith, A. Wireless communications / A. Goldsmith // Cambridge University Press. – 2005.
109. Tran T. D. Aerial Base Station Location Assisting Terrestrial Systems in 3D network/ T. D. Tran, Muthanna A., Koucheryavy A. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems., 2024, pp. 194-208.
110. Kennedy J. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks. – Vol. 4, pp. 1942–1948.
111. Blondin J. Particle Swarm Optimization: A Tutorial / J. Blondin // [Online]. Available: http://cs.armstrong.edu/saad/csci8100/pso_tutorial.pdf. – 2009.

112. Чан Т. З. Распределение ресурсов в беспроводной сети связи с базовой станцией на воздушной платформе: Обзор / Т. З. Чан // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 2. С. 40–47.
113. Zeng Y. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges / Y. Zeng, R. Zhang, T.J. Lim // IEEE Communications Magazine. – 2016, – Vol. 54, Issue 5, pp. 36–42.
114. Wu Q. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network / Q. Wu, R. Zhang // IEEE Communications Magazine. – 2019, – Vol. 58, No. 1, pp. 106–112.
115. Zhao N. UAV-assisted emergency networks in disasters / N. Zhao, W. Lu, M. Sheng, Y. Chen, J. Tang, F. R. Yu, K. K. Wong // IEEE Wireless Communications. – 2019, – Vol. 26, No. 1, pp. 45–51.
116. Samir M. UAV trajectory planning for data collection from time-constrained IoT devices / M. Samir, S. Sharafeddine, C. M. Assi, T. M. Nguyen, A. Ghrayeb // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2019, – Vol. 19, No. 1, pp. 34–46.
117. Shahzadi R. UAV assisted 5G and beyond wireless networks: A survey / R. Shahzadi, M. Ali, H. Z. Khan, M. Naeem // Journal of Network and Computer Applications. – 2021, – Vol. 189, pp. 103114.
118. Чан Т. З. Оптимизация использования ресурсов воздушных базовых станций на основе методов искусственного интеллекта / Т. З. Чан, А. Е. Кучерявый // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 1. С. 62–68.
119. Sutton R. S. Reinforcement learning: An introduction / R.S. Sutton, A.G. Barto // MIT Press, Cambridge. – 1998, – Vol. 1, No. 1, pp. 9–11.
120. Jaakkola T. Convergence of stochastic iterative dynamic programming algorithms / T. Jaakkola, M. Jordan, S. Singh // Advances in Neural Information Processing Systems. – 1993. – Vol. 6.

121. Lillicrap T. P. Continuous control with deep reinforcement learning / T.P. Lillicrap, J.J. Hunt, A. Pritzel, N. Heess, T. Erez, Y. Tassa, D. Wierstra // arXiv preprint arXiv:1509.02971. – 2015.
122. Кучерявый А. Е. Сети связи 2030 / А. Е. Кучерявый, А. С. Бородин, Р. В. Киричек // Электросвязь. 2018. №. 11. С. 52–56.
123. Чан Т. З. Распределения пользователей в сетях пятого и последующих поколений/ Т.З. Чан Нгуен Дык Ту, А. Е. Кучерявый// 80-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2025.
124. Чан Т. З. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, М. А. Маколкина, А. С. А. Мутханна, А. И. Выборнова, Р. А. Дунайцев, М. В. Захаров, Л. С. Горбачева, Т. З. Чан, А. В. Марочкина // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. №. 3. С. 1–12.
125. Zhao W. Approximation algorithms for cell planning in heterogeneous networks / W. Zhao, S. Wang, C. Wang, X. Wu // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2016, – Vol. 66, Issue 2, pp. 1561–1572. DOI: 10.1109/TVT.2016.2552487.
126. Чан Т. З. В направлении устойчивых сетей на основе воздушных базовых станций: обзор энергоэффективных протоколов маршрутизации / Нгуен Дык Ту, Т. З. Чан, А. С. Мутханна, А. Е. Кучерявый // 80-й Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2025.
127. Чан Т. З. Оптимизация распределения пользователей, мощности и расположения воздушной базовой станции на основе методов глубокого обучения с подкреплением / Т. З. Чан, А. Е. Кучерявый // Труды учебных заведений связи. 2025. Т.11. № 2. С. 32–40.

128. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication / C.E. Shannon // The Bell System Technical Journal. – 1948, – Vol. 27, Issue 3, pp. 379–423.
129. Liu C. H. Energy-efficient UAV control for effective and fair communication coverage: A deep reinforcement learning approach / C.H. Liu, Z. Chen, J. Tang, J. Xu, C. Piao // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2018, – Vol. 36, Issue 9, pp. 2059–2070. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2864373.
130. Seid A. M. Collaborative computation offloading and resource allocation in multi-UAV-assisted IoT networks: A deep reinforcement learning approach / A.M. Seid, G.O. Boateng, S. Anokye, T. Kwantwi, G. Sun, G. Liu // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2021, – Vol. 39, Issue 3, pp. 725–738. DOI: 10.1109/JSAC.2021.3063188.
131. Mnih V. Human-level control through deep reinforcement learning / V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A.A. Rusu, J. Veness, M.G. Bellemare, D. Hassabis // Nature. – 2015, – Vol. 518, No. 7540, pp. 529–533.

Приложение

Акт о внедрении результатов исследования

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,
д. 61, литера А, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
Санкт-Петербург, 193232

Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159
<http://sut.ru>

E-mail: rector@sut.ru

ОКПО 01179934 ОГРН 1027809197635

ИНН 7808004760 КПП 784001001

ОКТМО 40909000

21.03.2025 № 18/54-99
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе,
доктор техн.наук, доцент



Рабин
Алексей Владимирович

Акт

о внедрении научных результатов, полученных Чаном Тунг Зыонгом
в диссертационной работе «Исследование и разработка методов распределения
ресурсов воздушных и наземных базовых станций в сетях связи на основе
искусственного интеллекта»

Комиссия в составе и.о. декана факультета Инфокоммуникационных сетей и систем В.С.Елагина, доцента кафедры сетей связи и передачи данных Р.А. Дунайцев и заведующей лабораторией кафедры сетей связи и передачи данных О.И. Ворожейкиной составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные результаты, полученные Чаном Тунг Зыонгом, использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по дисциплине «Интернет вещей и самоорганизующиеся сети» (Рабочая Программа регистрационный номер №_24.05/146-Д), разделы Программы:
 - Беспроводные сенсорные сети;
 - Наземно-спутниковые сети связи;
2. При чтении лекций и проведении практических занятий для магистров по дисциплине «Современные проблемы науки в условиях перехода к сетям шестого поколения (6G)» (Рабочая Программа регистрационный номер № 24.05/643-Д), раздел Программы:
 - История развития сетей связи. Сети связи пятого и шестого поколений. Интегрированные сети связи SAGSIN. Прогнозы развития сетей связи.

3. При чтении лекций проведении практических занятий для аспирантов по дисциплине «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» (Рабочая Программа регистрационный номер №_21.05/780-Д), раздел Программы:

- Аналитические модели;
- Имитационные модели.

В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Чаном Тунг Зыонгом в диссертационной работе:

- Разработаны модель и методика размещения базовых станций в трехмерном пространстве для поддержки наземных базовых станций в условиях перегрузки, отличающиеся тем, что задача решается при различной плотности пользователей в нескольких районах на основе метаэвристического алгоритма PSO для густонаселенных районов, на фестивалях и спортивных мероприятиях.

- Метод максимизации скорости передачи данных при использовании ВБС, отличающийся тем, что на основе совместной оптимизации размещения ВБС и распределения мощности среди пользователей на основе использования методов обучения с подкреплением, а именно метода Q-learning и жадного алгоритма ϵ -greedy, что позволяет уменьшить высоту расположения ВБС на 12% и одновременно увеличить скорость передачи данных на 10-20% в зависимости от числа пользователей.

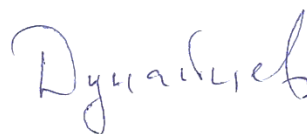
- Разработан метод оптимизации для решения проблем ассоциации пользователей, распределения энергии и оптимизации местоположения ВБС в гибридных сетях, отличающийся тем, что оптимизация проводится на основе на основе радиуса покрытия наземной базовой станции GBS как динамического параметра и использования методов глубокого обучения DDPG и DQN, первый из которых дает увеличение скорости передачи на несколько процентов во всем исследованном диапазоне изменения радиуса покрытия GBS по сравнению со вторым методом.

И.о. декана факультета ИКСС
к.т.н., доцент



В.С. Елагин

Доцент кафедры ССиПД
к.т.н., PhD



Р.А. Дунайцев

Зав. лабораторией кафедры ССиПД



О.И. Ворожейкина