

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре сетей связи и передачи данных.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Татарникова Татьяна Михайловна**,
доктор технических наук, , профессор
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Институт
информационных технологий и программирования,
директор

Маркелов Олег Александрович,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.
Ульянова (Ленина), кафедра радиотехнических систем,
и.о. заведующего кафедрой.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени
Патриса Лумумбы»,
г. Москва

Защита состоится 2 июля 2025 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 5 мая 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 связи 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 на 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. Парамонов, 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 максимизация осуществляется 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 учебном процессе 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 внедрения 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.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 122 страницы. Работа содержит 13 рисунков, 8 таблиц и список из 131 литературного источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и определены её ключевые особенности, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, определена научная новизна результатов, указаны теоретическая и практическая ценность результатов, приведены сведения об апробации работы, перечислены публикации по теме выполненного исследования.

В первой главе рассмотрен процесс эволюции телекоммуникационных сетей и актуальность архитектуры SAGSIN (рисунок 1), включающей космические, воздушные, наземные и морские компоненты. Каждый тип сети обладает своими преимуществами и ограничениями: широкое покрытие спутников, гибкость воздушных платформ, высокая скорость наземной связи.

Отдельное внимание уделено применению воздушных платформ (ВП) в интеллектуальных системах (ИБ), экстренных ситуациях, умном транспорте и сельском хозяйстве. ВП обеспечивают мобильность, расширение зоны покрытия и снижение задержек, особенно в труднодоступных районах. Их интеграция в сети 5G/6G открывает новые перспективы, но требует решения задач по оптимизации размещения, управлению ресурсами и обеспечению безопасности.

Рассмотрены особенности каналов воздух-земля (AG) и воздух-воздух (AA). AG-канал характеризуется высокой вероятностью прямой видимости и малой дифракцией, но страдает от нестационарности. Канал AA преимущественно определяется LOS-компонентом и подвержен эффекту Доплера.

Также проанализированы методы оптимизации размещения ВП и траекторий полёта. Применение алгоритмов роя частиц, кластеризации и графовых моделей позволяет адаптировать размещение платформ под плотность пользователей и рельеф. Оптимизация маршрутов улучшает покрытие и снижает энергопотребление, повышая эффективность сетевой инфраструктуры.

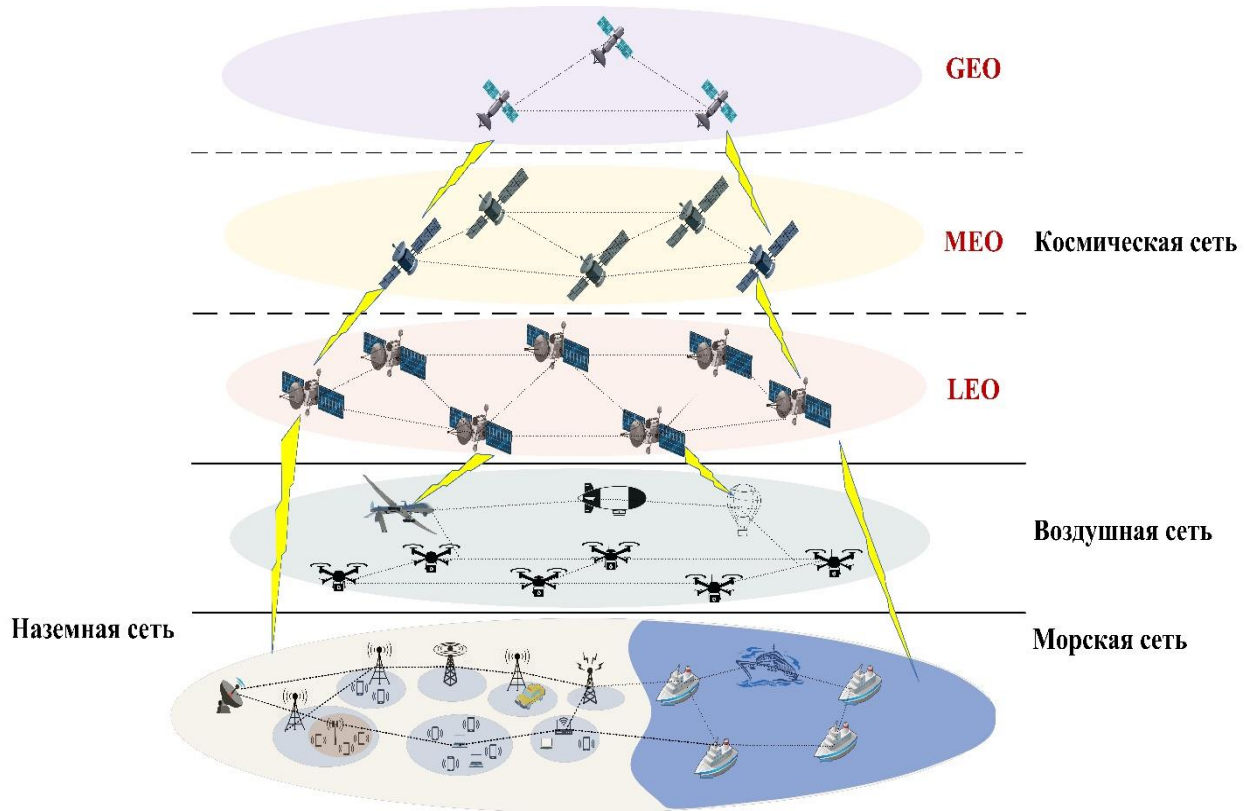


Рисунок 1 – Архитектура SAGSIN

Во второй главе разработаны модель и метод построения гетерогенной сети связи, включающей наземные (GBS) и воздушные базовые станции (ABS), а также пользователей (рисунок 2). В условиях резкого увеличения числа пользователей и ограниченной пропускной способности GBS, ABS предлагаются как средство разгрузки сети. Благодаря мобильности и гибкости, ABS адаптируются к изменяющейся плотности трафика во времени и пространстве, обеспечивая устойчивое качество связи и расширяя зону покрытия.

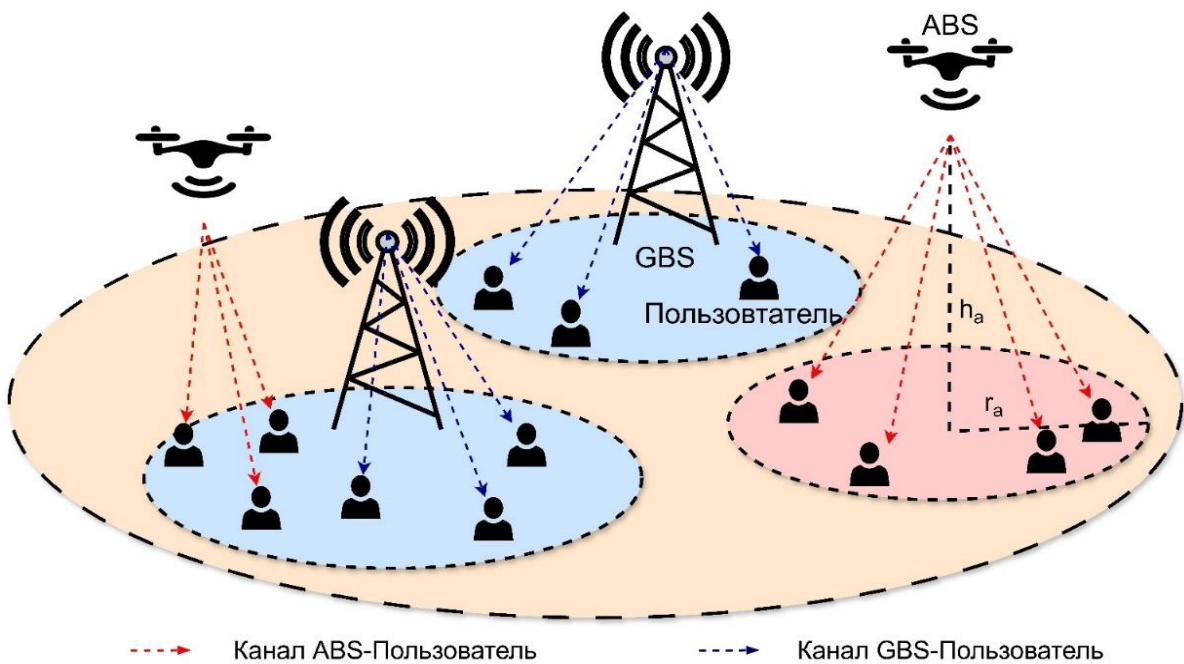


Рисунок 2 – Модель сети

В данной главе рассматривается задача определения оптимального расположения ABS и минимизации их количества (M_a). В процессе развёртывания необходимо обеспечить оптимальное количество ABS, которое удовлетворяет требованиям по покрытию и пропускной способности.

Для оптимизации количества и 3D-размещения ABS используется метаэвристический алгоритм PSO, позволяющий обслужить максимальное число пользователей при соблюдении требований QoS. В алгоритме рой частиц 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:

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

$$W_w^l(t+1) = W_w^l(t) + V_w^l(t+1), \quad (2)$$

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

Для моделирования используются следующие параметры: количество частиц в рое L равно 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 главе принимаются значения $\phi = 0.8$, $c_1 = c_2$ равные 2.

Для моделирования предложенного алгоритма рассмотрены два сценария распределения пользователей с одинаковым числом пользователей ровно 1000 по территории с размером $10 \text{ км} \times 10 \text{ км}$. В обоих случаях рассматриваемая зона делится на центральную подзону с 40% пользователей и окружающую подзону с 60%. В сценарии *A* пользователи в центральной подзоне распределены согласно нормальному закону со стандартным отклонением 1500 м, в то время как в окружающей подзоне — равномерно. В сценарии *B* пользователи в центральной подзоне равномерно распределены в радиусе 2500 м, а в окружающей — по всей оставшейся территории.

Результаты использования алгоритма PSO для двух сценариев представлены на рисунках 3 и 4. 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.

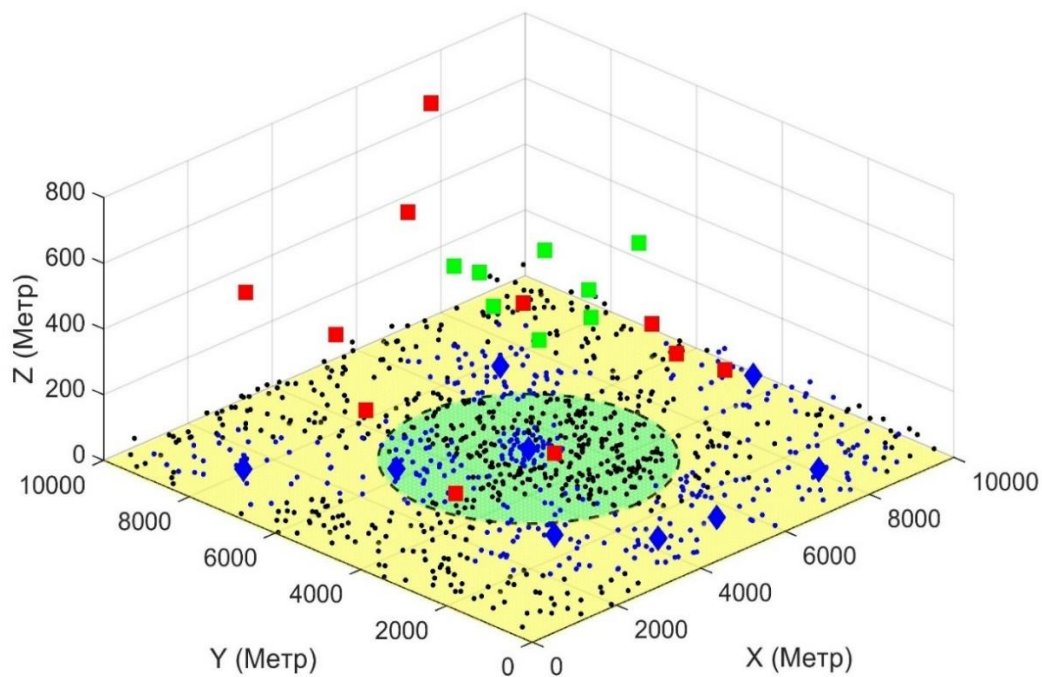


Рисунок 3 – Сценарий А пространственное расположение пользователей, GBS и ABS в 3D

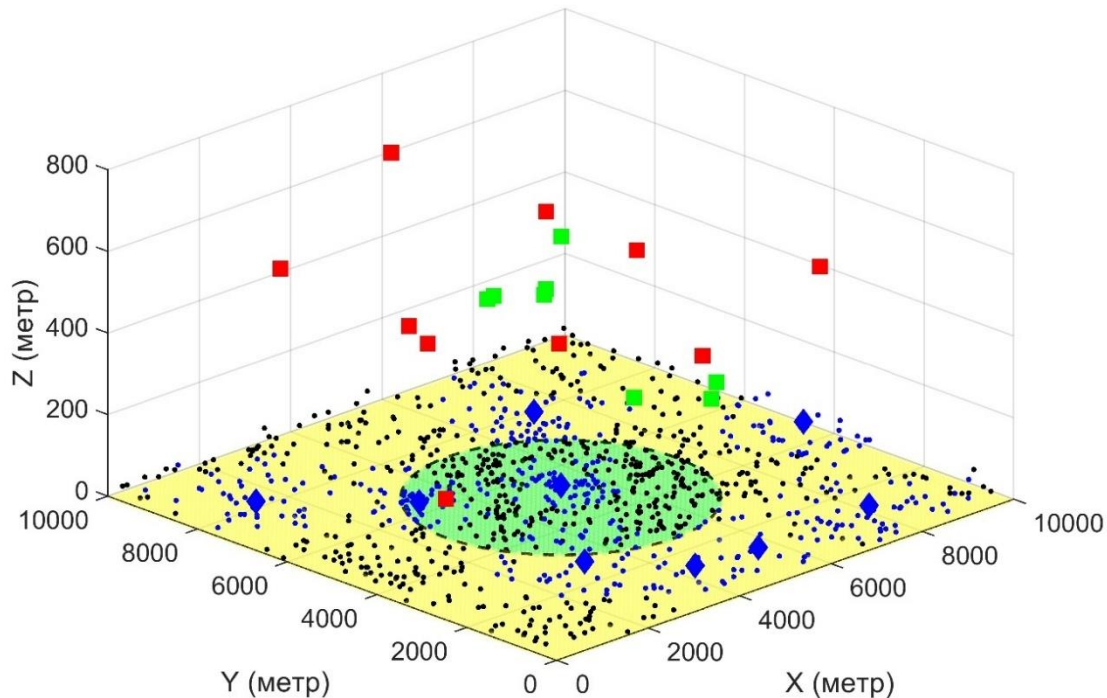


Рисунок 4 – Сценарий В пространственное расположение пользователей, GBS и ABS в 3D

Результаты моделирования показали, что распределение пользователей влияет на количество необходимых ABS для обеспечения требований по

качеству обслуживания. В сценарии *A*, где пользователи распределены по нормальному закону в центральной подзоне, требуется развертывание 19 ABS. В сценарии *B*, где пользователи равномерно распределены, достаточно 18 ABS для выполнения тех же требований по качеству обслуживания.

Результаты моделирования алгоритма PSO также показали, что высота полета ABS зависит от плотности пользователей в подзонах. В центральной подзоне с высокой плотностью ABS располагаются на меньшей высоте, чтобы снизить помехи для соседних устройств, в то время как в окружающей подзоне, где плотность ниже, они работают на большей высоте, что позволяет расширить зону покрытия и повысить эффективность обслуживания.

В третьей главе проводится исследование проблем совместной оптимизации размещения ABS и распределения мощности среди пользователей для максимизации скорости передачи данных. Для решения этой задачи используется подход на основе методов обучения с подкреплением, включая Q-learning и алгоритм ϵ -greedy.

При развертывании ABS важной задачей является эффективное распределение ограниченных ресурсов, таких как частотный спектр, мощность и полоса пропускания. В условиях высокой плотности пользователей или чрезвычайных ситуаций, когда традиционная инфраструктура недоступна, необходимо приоритизировать обслуживание в зависимости от типа данных и требований конечных устройств. Методы обучения с подкреплением, включая алгоритм Q-learning, являются перспективным подходом для решения задачи распределения ресурсов и оптимизации позиции ABS с целью максимизации скорости передачи данных и улучшения качества обслуживания.

В данной главе рассматривается задача максимизации суммарной скорости передачи данных при ограничениях на местоположение ABS в 3D-пространстве и распределения мощности для каждого пользователя. Для эффективного решения этой задачи применяется алгоритм Q-learning, который позволяет

агенту (ABS) обучаться оптимальной стратегии действий на основе взаимодействия с окружающей средой, учитывая динамические изменения в сети.

Функционирование разработанного алгоритма состоит из следующих компонентов:

1. Состояния (S): Эти состояния представляют ситуацию среды, в которой находится агент. В контексте задачи это представляет собой текущее положение ABS в 3D-пространстве и мощность передачи для каждого пользователя. Состояния описывают, как изменяется окружение в процессе обучения.

2. Действия (A): Это выбор, который агент может сделать на основе текущего состояния. В данном случае, действия включают перемещение ABS (вверх, вниз, влево, вправо и т.д.) и распределение мощности для пользователей.

3. Вознаграждения (R): Это численная оценка, получаемая после выполнения действия. Вознаграждения используются для обучения агента, чтобы он мог понять, какие действия приводят к наилучшим результатам. В рамках данной задачи функция вознаграждения формируется на основе совокупной скорости передачи данных пользователей, зависящей от положения ABS и распределения мощности.

4. Политика (P): Политика – это механизм выбора действий, используемый для определения тех действий, которые агент будет выполнять во время обучения. В главе рассмотрена политика ϵ -greedy, где агент с определенной вероятностью ϵ выбирает случайное действие или выбирает лучшее действие соответствующее наилучшему Q -значению в данный момент, с вероятностью $1 - \epsilon$.

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

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha_t) \cdot Q_t(s_t, a_t) + \alpha_t \cdot [r_t + \beta \cdot \max_{a'} Q_t(s_{t+1}, a')] \quad (3)$$

где β – коэффициент дисконтирования, α_t – скорость обучения, r_t – функция вознаграждения. Функция вознаграждения r_t на временном шаге t можно выразить таким образом:

$$r_t = D_t - \lambda(N - N_u) \quad (4)$$

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

В Q-learning параметр ε со временем уменьшается для баланса между исследованием и эксплуатацией. Сначала высокое значение ε помогает агенту изучать среду. Позже, по мере уменьшения ε агент начинает выбирать действия с наибольшими Q-значениями, что способствует обучению оптимальной стратегии и повышению эффективности в долгосрочной перспективе. Таким образом, в данной работе ε регулируется после каждого эпизода в соответствии с формулой:

$$\varepsilon_{p+1} = \varepsilon_p \varepsilon_0 \quad (5)$$

где ε_0 – постоянное значение, на которое ε уменьшается после каждого эпизода; ε_p и ε_{p+1} – значение ε в эпизоде p и $(p+1)$.

В данной главе в качестве исходных условий рассматривается сценарий с числом пользователей $N=5$, равномерно распределенных на площади $300 \text{ м} \times 300 \text{ м}$. Для обучения предложенного алгоритма Q-learning использованы следующие параметры: $\beta = 0.99$; $c_\alpha = 0.5$; $\varphi_\alpha = 0.7$; $\varepsilon = 1$; $\varepsilon_0 = 0.999$; штрафной коэффициент

$\lambda = 20$. Число эпизодов обучения составляет 250 с шагом по времени $T = 500$.

Результаты данной главы показали, что при оптимизации только положения ABS, которое находится в точке с координатами (149, 151, 74), его высота значительно выше, чем при совместной оптимизации с распределением мощности, где ABS расположена в точке с координатами (140, 141, 65) (рисунок 5). Это связано с тем, что при оптимизации местоположения система выбирает большую высоту для минимизации потерь на большие расстояния, особенно для удалённых пользователей. В то время как при совместной оптимизации распределение мощности между пользователями позволяет снизить высоту ABS, улучшая общую эффективность системы. Черные квадраты показывают

произвольные позиции ABS с различным распределением мощности между пользователями, что приводит к наименьшему результату, подчеркивая важность правильного выбора местоположения для повышения скорости передачи данных.

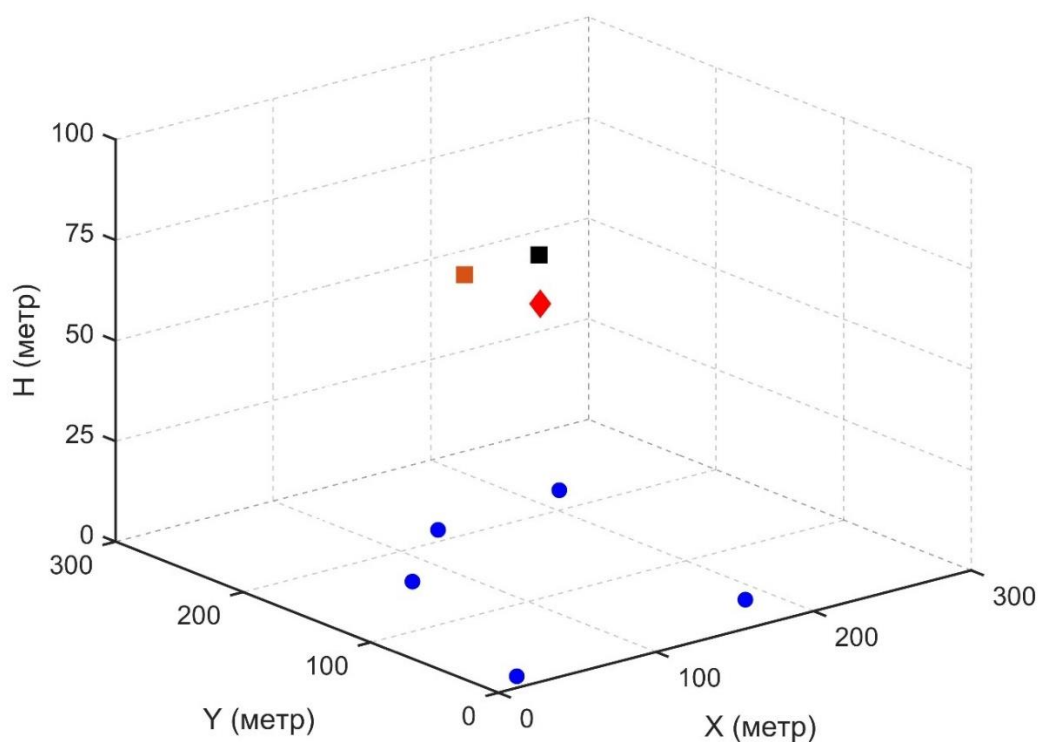


Рисунок 5 – 3D-положение ABS и пользователей

Результаты данной главы также показали, что увеличение числа пользователей в системе влияет на общую скорость передачи данных (рисунок 6). При большем количестве подключенных пользователей увеличивается нагрузка на систему, что приводит к ухудшению качества связи и снижению общей скорости передачи данных. Это связано с тем, что с ростом числа пользователей количество соединений увеличивается, что, в свою очередь, приводит к большему количеству потерь при передаче данных. Однако при оптимизации ресурсов, таких как мощность и местоположение ABS, можно значительно минимизировать эти потери и обеспечить стабильную работу системы, даже при большем числе пользователей.

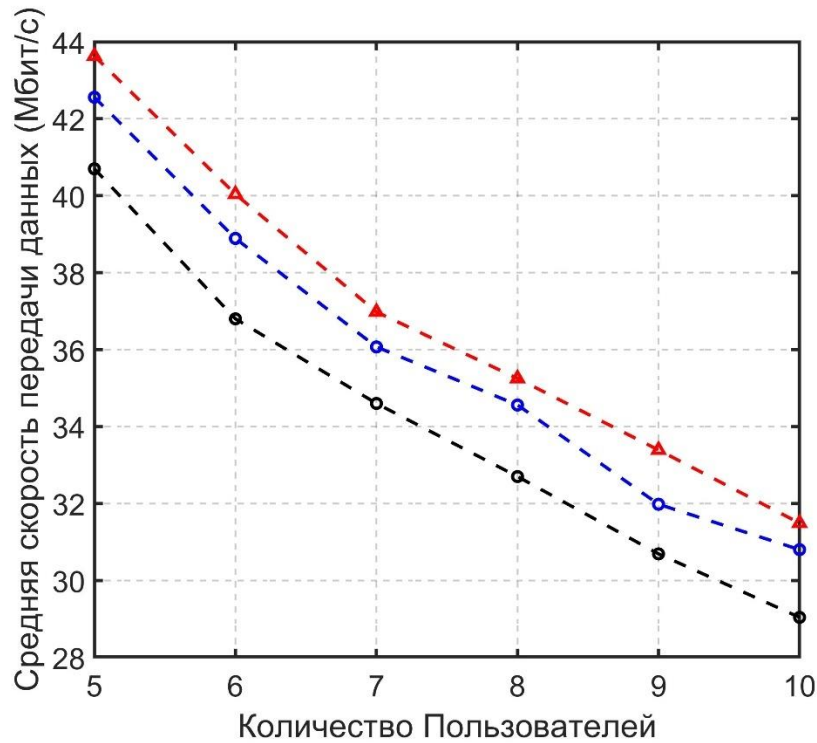


Рисунок 6 – Средняя суммарная скорость передачи данных системы при различном числе и местоположении наземных пользователей

В четвертой главе рассмотрена задача ассоциации пользователей между GBS и ABS, а также оптимизация передачи мощности и трёхмерного размещения ABS с целью максимизации суммарной скорости нисходящей связи в системе.

Для ассоциации пользователей предлагается динамический подход, при котором радиус покрытия GBS регулируется: пользователи внутри радиуса подключаются к GBS, а пользователи, находящиеся за его пределами — к ABS. После определения ассоциации пользователей между GBS и ABS осуществляется оптимизация трехмерного положения ABS и распределения мощности между подключёнными к нему пользователями. Предполагается, что мощность GBS делится поровну между его пользователями. Для решения задачи используется алгоритм DDPG, эффективно работающий с непрерывными пространствами состояний и действий, что делает его подходящим для настройки параметров связи с высокой точностью.

Алгоритм DDPG использует архитектуру Actor-Critic. Сеть Actor выбирает действия на основе текущего состояния системы, таких как перемещение ABS и

распределение мощности. Она обучается с использованием градиентного метода, направленного на максимизацию ожидаемого вознаграждения. Сеть Critic оценивает действия, выбранные сетью Actor, вычисляя ценность действия с помощью Q-функции. Эти оценки позволяют обновлять обе сети: Critic — по функции потерь, а Actor — по градиентной функции $\nabla_{\theta^\pi} J(\theta^\pi)$. Функция потерь $L(\theta^Q)$ для обновления параметров θ^Q определяется следующим образом:

$$L(\theta^Q) = \frac{1}{D} \sum_{j=1}^D (y_i - Q(s_j, a_j | \theta^Q))^2 \quad (6)$$

где D — общее количество образцов опыта в буфере,

Для повышения стабильности обучения используется фактор мягкого обновления τ для обновления параметров целевых сетей $\theta^{\pi'}$ и $\theta^{Q'}$:

$$\begin{aligned} \theta^{Q'} &\leftarrow \tau \theta^Q + (1 - \tau) \theta^{Q'} \\ \theta^{\pi'} &\leftarrow \tau \theta^\pi + (1 - \tau) \theta^{\pi'} \end{aligned} \quad (7)$$

В данной главе рассмотрено 100 пользователей, равномерно распределённых на территории размером $2000 \text{ м} \times 2000 \text{ м}$. Для моделирования использованы следующие параметры: 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. Обучается алгоритм DDPG в течение 500 эпизодов, каждый из которых состоит из 100 шагов. Штрафной коэффициент $\lambda = 10$.

Таблица 1 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 1 видно, что при радиусе покрытия GBS, равном 750 м, общая скорость передачи данных системы достигает максимального значения

Таблица 1 – 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

Результаты, представленные на рисунке 7, показывают, что метод DDPG обеспечивает более высокую скорость передачи данных при использовании методов глубокого Q-learning (DQN). Это связано с тем, что DDPG эффективно решает задачи распределения ресурсов и оптимизации трехмерного положения ABS в непрерывном пространстве, в то время как DQN ограничен дискретным пространством действий. Благодаря использованию архитектуры Actor–Critic, DDPG способен более точно адаптировать положение ABS и распределение мощности, что особенно важно в условиях высокой динамики среды.

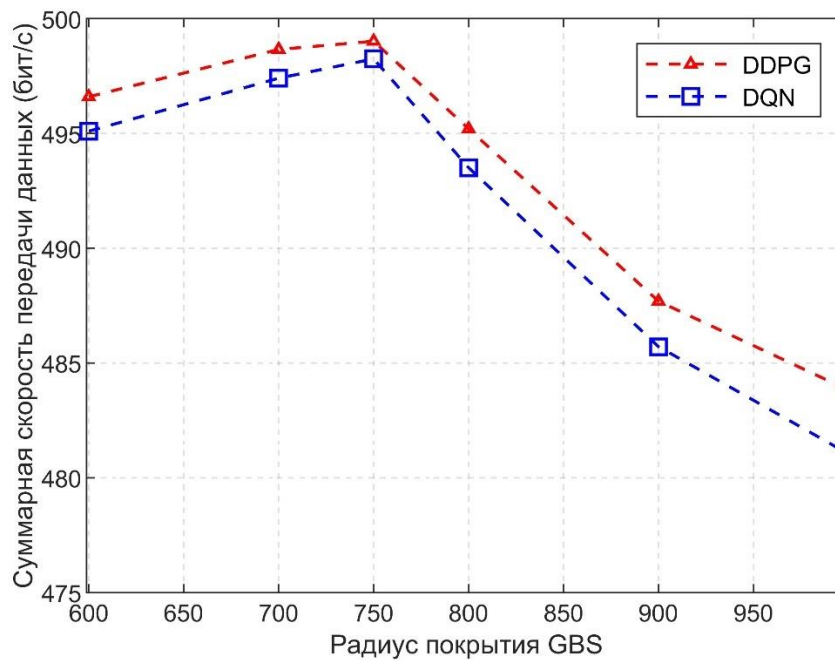


Рисунок 7 – Суммарная скорость передачи данных в разных алгоритмах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

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 ϵ -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 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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.

2. 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. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-1-62-68. EDN:RVENVC.

3. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования

4. Tran T. D. Aerial Base Station Location Assisting Terrestrial Systems in 3D network/ T. D. Tran, Muthanna A., Koucheryavy A. // Lecture Notes in Computer Science (LNCS). Cham: Springer Nature Switzerland. 2024. Vol. 15554. pp. 194-208.

Публикации в других изданиях

5. 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. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-3 1-12. EDN: CIQWAM.

6. 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. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-2-40-47. EDN: XVUFQQ.

7. 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. С.179–181. ISBN 978-5-7629-3485-5.

8. 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. DOI 10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12.

9. 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. С.186–189. ISBN 978-5-7629-3485-5.

Подписано в печать 30.04.2025. Формат 60×84 1/16.
1,0 а.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в СПбГУТ, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1