

Аль-Кереа Захраа Ахмед Хуссейн

Исследование и разработка методов построения сетей связи с распределенным искусственным интеллектом для поддержки услуг телеприсутствия

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт Петербург – 2026 г.

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
Мутханна Аммар Салех Али

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

Степанов Михаил Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
Ордена Трудового Красного Знамени федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
технический университет связи и информатики»,
кафедра сетей связи и систем коммутации, доцент

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», г. Москва

Защита состоится 16 сентября 2026 года в 15.00 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 22 июля 2026 года.

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

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

Развитие сетей 6G играет важную роль в удовлетворении растущего спроса на сверхнизкие задержки, терабитные скорости передачи данных и бесшовное внедрение передовых технологий, таких как голографическое телеприсутствие, автономные системы и иммерсивные приложения расширенной реальности (XR). Несмотря на то, что технологии 5G обладают расширенными возможностями для реализации такого рода сценариев подключения, его ограничения в части масштабируемости, энергопотребления и задержках затрудняют реализацию футуристических приложений в полном объеме. Конвергенция технологий 6G, телеприсутствия и интеллектуальных пограничных вычислений позволит устранить эти пробелы и послужит стимулом для создания новых приложений в здравоохранении (удаленная хирургия), интеллектуальных системах "умных городов" (в управлении дорожным движением в режиме реального времени) и индустрии 5.0 (для автоматизации на основе искусственного интеллекта). Это исследование играет ключевую роль в решении таких задач, как дефицит спектра, обеспечения безопасности и стабильного развития инфраструктуры в сетях следующего поколения. Эта работа закладывает основу для будущего, в котором будет органичное сочетание цифрового и физического миров. Следовательно, исследование не только расширяет границы технических инноваций, но и служит фундаментом для практического применения в различных отраслях – от здравоохранения и образования, до производства и городского планирования.

Степень разработанности темы. Определяющий вклад в теоретические и экспериментальные исследования рассматриваемых научных проблем внесли российские и зарубежные ученые: В.М. Вишневецкий, К.Е. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака, Б.С. Гольдштейн, В.Г. Карташевский, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый, Е.А. Кучерявый, М.А. 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, М. Mozaffari, М. Alzenad, А. Al-Hourani и другие.

Работы вышеупомянутых авторов внесли значительный вклад в исследования в области сетей связи пятого поколения, гетерогенного трафика, программно-конфигурируемых сетей, сокращения задержек, распределенных архитектур и пограничных вычислений.

Несмотря на эти достижения, комплексная интеграция этих технологий остается недостаточно изученной. В литературе существует явный пробел в отношении того, как эффективно объединить сети 6G, иммерсивные сервисы телеприсутствия и децентрализованные пограничные вычисления в единую систему. Данная диссертация нацелена на устранение этого пробела и предлагает комплексную модель, объединяющую несколько взаимосвязанных компонентов, которая использует сильные стороны каждой перечисленной выше предметной области. Синтезируя теоретические модели, алгоритмические инновации и результаты моделирования, исследование демонстрирует, что целостный подход может преодолеть ограничения, присущие изолированным системам, прокладывая путь к масштабируемым, надежным и перспективным сетям связи. Все это в целом и определяет цель, задачи, объект и предмет диссертационной работы. При этом, в области исследований по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций, решается следующая научная задача: исследование и разработка методов построения сетей

связи с распределенным искусственным интеллектом для поддержки услуг телеприсутствия.

Объект исследования: сети связи пятого и последующих поколений

Предмет исследования: интеграция распределенного интеллекта и гибридной выгрузки задач в системах телеприсутствия для сетей связи пятого и шестого поколений.

Цель и задачи диссертации

Исследование и разработка эффективных методов построения перспективных сетей связи на основе интеллектуальных пограничных вычислений и гибридных алгоритмов выгрузки для предоставления услуг телеприсутствия.

Для достижения этой цели, исследование ставит перед собой следующие задачи:

- Провести анализ современных технологических достижений и выявить ограничения существующих сетей связи;

- Провести исследование существующих ограничений сетей 5G и определить ключевые возможности, которые будут реализованы в сетях 6G, включая эффективное объединение сетей 6G с иммерсивными сервисами телеприсутствия и децентрализованными пограничными вычислениями в единую платформу, с интеграцией AI/ML;

- Разработать гибридную архитектурную модель, которая охватывает несколько уровней - от усовершенствований на физическом уровне до расширенного управления сервисами на уровне приложений и, которая предназначена для поддержки широкого спектра приложений, реализующих технологию телеприсутствия, с гарантией того, что сеть может динамически адаптироваться к различным требованиям к обслуживанию, сохраняя при этом сверхнизкую задержку и высокую пропускную способность.

- Внести на рассмотрение гибридные модели выгрузки, объединяющие преимущества MEC и INC. В этих моделях решение о том, обрабатывать данные локально на пограничном устройстве, передавать их на ближайший пограничный сервер или даже обрабатывать в сети, принимается динамически. Цель состоит в том, чтобы свести к минимуму задержки, оптимизировать энергопотребление и эффективно распределять вычислительные ресурсы в средах, где условия работы сети и требования пользователей сильно различаются;

- Представить набор алгоритмов для динамической миграции сервисов и распределения ресурсов в режиме реального времени;

- Провести комплексные имитационные исследования для тестирования предлагаемых архитектурных моделей и алгоритмов в реалистичных сценариях. Это предполагает создание среды моделирования, отражающей различные условия эксплуатации — от густонаселенных городских районов до отдаленных регионов с ограниченной связью. В диссертации представлены результаты моделирования, которые демонстрируют значительные улучшения в ключевых показателях производительности, таких как сокращение задержки, энергоэффективность и общая надежность обслуживания, по сравнению с традиционными сетевыми моделями.

Услуги телеприсутствия требуют постоянной адаптации к динамическим нагрузкам сети, мобильности пользователей и изменениям требований к вычислительным ресурсам. В диссертации представлены адаптивные итеративные алгоритмы, использующие гибридные методы оптимизации, которые сочетают в себе такие методы, как оптимизация роя частиц и генетические алгоритмы, для непрерывного мониторинга производительности сети и переназначения задач в целях

поддержки оптимального качества обслуживания (QoS). Эти алгоритмы разработаны таким образом, чтобы предоставлять оптимальные практические решения в режиме реального времени, обеспечивая бесперебойное и надежное предоставление услуг телеприсутствия даже в сложных условиях.

В целом, цель и задачи диссертации не только углубляют теоретическое понимание, расширяя существующие модели оптимизации сетей и распределенных вычислений, но и предлагают практически реализуемые решения, которые могут повлиять на развертывание будущих телекоммуникационных систем 6G. Эта работа, в конечном счете, прокладывает путь к созданию преобразующих сервисов телеприсутствия, которые могут поддерживать критически важные приложения в здравоохранении, образовании, промышленной автоматизации и за ее пределами, гарантируя, что удаленное взаимодействие будет обеспечивать тот же уровень естественности, оперативности и эффективности, что и при личном общении.

Научная новизна исследования заключается в его междисциплинарном подходе, который объединяет отдельные направления исследований в единую связную модель.

Ключевые инновационные достижения включают:

1. В отличие от существующих методов, гибридная модель на основе оптимизации роя частиц и генетических методов позволяет снижать энергопотребление на 75% и задержки 50%, что делает ее эффективной для сервисов, требующих малой задержки и высокой энергоэффективности.

2. Предложен адаптивный механизм, отличающийся тем, что используется динамически изменяемый порог принятия решений, который в реальном времени определяет оптимальный выбор узла обработки (MEC или INC) на основе комплексного учета нагрузки, задержки и вычислительной сложности задач. Механизм обеспечивает эффективный баланс между вычислительными ресурсами и сетевыми задержками, повышая общую производительность и энергоэффективность системы по сравнению с существующими подходами.

3. Предложен новый способ снижения сетевой задержки, отличающийся тем, что используется комбинированный метод SMRA и MEC.

Теоретические модели, разработанные в этом исследовании, помимо алгоритмических улучшений, расширяют современные представления о распределенном интеллекте в телекоммуникационных сетях. Они обеспечивают надежную математическую основу для анализа и оптимизации взаимодействия между сетевыми ресурсами, вычислительной нагрузкой и качеством обслуживания. Всесторонние имитационные исследования и оценка производительности еще больше подтверждают правильность этих моделей, демонстрируя значительные улучшения как в области задержки, так и в области энергоэффективности по сравнению с традиционными архитектурами.

Эти инновации в совокупности расширяют границы возможного в сетях следующего поколения и закладывают прочную основу для будущего внедрения настоящего захватывающих, с высокой скоростью отклика и энергоэффективностью, сервисов телеприсутствия.

Теоретическая и практическая значимость диссертации

Теоретическая значимость этого исследования заключается в его новом подходе к объединению нескольких передовых областей, а именно: связи 6G, иммерсивного телеприсутствия и интеллектуальных прогрессивных вычислений, в единую связную структуру.

Вторая, третья и четвертая главы формируют техническое ядро диссертации, рассматривая три различные проблемы и предлагая инновационные решения, которые углубляют наше понимание в нескольких ключевых областях:

1. В диссертации представлена новая распределенная архитектура 6G, которая объединяет наземные, воздушные, космические и подводные уровни связи. Эта модель расширяет существующие теории гетерогенных сетей, включая управляемую искусственным интеллектом оркестровку и квантово-безопасные протоколы, устраняя пробелы в масштабируемости и интероперабельности для сверхплотных сред и развивая теоретическую базу для будущих интегрированных сетей (например, SAGSIN: Интегрированные сети Космос-Воздух-Земля-море).

2. Разработка гибридных моделей выгрузки задач MEC-INC, которые объединяют парадигмы пограничных и внутрисетевых вычислений. Эти модели включают динамические пороговые значения, стохастическую оптимизацию и обучение с подкреплением, развивая теорию принятия решений в реальном времени в распределенных системах.

3. Новаторские модели компромисса между энергопотреблением и задержками в сетях 6G, объединяющие доступность возобновляемых источников энергии, аппаратные ограничения и требования к качеству обслуживания в единую систему оптимизации.

4. Эволюционные алгоритмы оптимизации: Представлен гибридный генетический алгоритм оптимизации роя частиц (PSO-GA) для распределения ресурсов, который развивает теорию стохастической оптимизации, предоставляя масштабируемые решения для сверхплотных сетей.

Практическая значимость диссертации затрагивает различные сферы жизни и пути развития экономики. Так как все сферы жизни в любом случае тесно взаимосвязаны между собой, так что внедрение описанных выше решений в одной из них будет несомненно влиять на все другие.

1. Трансформация индустрии 5.0 и "умных городов":

- Гибридная модель MEC-INC сокращает время простоя промышленной автоматизации на 70%, позволяя осуществлять оперативное управление в режиме реального времени роботизированными системами управлять роботами с применением технологий искусственного интеллекта на фабриках с интеллектуальной инфраструктурой. Это сводит к минимуму время простоя на производстве и оптимизирует логистику цепочки поставок.

- В "умных городах" платформа поддерживает в режиме реального времени управление дорожным движением и реагирование на стихийные бедствия, обрабатывая данные с датчиков Интернета вещей на границе сети. Например, автономные транспортные средства могут взаимодействовать с пограничными узлами, чтобы избежать столкновений во время чрезвычайных ситуаций. Интегрированная архитектура "космос-воздух-земля-море" поддерживает передачу данных в режиме реального времени с помощью спутников LEO и беспилотных летательных аппаратов, обеспечивая связь в регионах с поврежденной наземной инфраструктурой (например, при проведении спасательных операций после землетрясения).

2. Инновационные приложения в различных отраслях промышленности:

- Здравоохранение: обеспечивает удаленную роботизированную хирургию с субмиллисекундной задержкой и тактильной обратной связью, упрощая доступ к

квалифицированной медицинской помощи в регионах с недостаточным уровнем обслуживания.

- Образование: Иммерсивное обучение и виртуальное сотрудничество улучшаются благодаря передовому рендерингу, управляемому искусственным интеллектом, что позволяет студентам работать с 3D-голограммами исторических событий или проводить виртуальные лабораторные эксперименты, преодолевая географические барьеры в глобальном образовании.

- Развлечения: поддерживает проведение голографических концертов и интерактивных игр AR/VR, создавая новые источники дохода для медиаиндустрии.

3. Образовательная и исследовательская ценность:

- Предоставляет инструменты моделирования с открытым исходным кодом (например, платформы MATLAB) для научных кругов и промышленности для верификации и тестирования алгоритмов сетей 6G.

- Интеграция в университетские учебные планы (например, курсы "Сети нового поколения") для подготовки инженеров по проектированию сетей на основе искусственного интеллекта и квантовой безопасности.

Теоретический вклад этой диссертации переосмысливает принципы сетевого проектирования, интеграции искусственного интеллекта и энергоэффективности в системах связи 6G, а ее практические инновации направлены на решение неотложных задач в области здравоохранения, промышленности и устойчивого развития. Объединяя передовую теорию с практическим применением, эта работа прокладывает путь к гиперсвязанному, интеллектуальному и справедливому цифровому будущему.

Методология и методы исследования. Для решения задач, поставленных в диссертации, в основу данного исследования положен подход, основанный на смешанных методах. Он сочетает в себе:

- Получение аналитических моделей для описания производительности системы в режимах ожидания и распределения ресурсов, теорию массового обслуживания для моделирования трафика, теорию графов для организации сети и квантовую механику для обеспечения безопасной связи.

- Разработку моделей параметрической оптимизации для описания выгрузки задач, миграции сервисов и распределения ресурсов.

- Создание и тонкую настройку решений на основе искусственного интеллекта для сетевой оркестровки и обработки пограничных данных.

- Проведение обширного моделирования в различных сценариях для проверки предложенных моделей и оценки их надежности.

- Внедрение прототипов систем, где это возможно, для демонстрации практической применимости и измерения производительности в реальных условиях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Гибридная модель на основе оптимизации роя частиц и генетического алгоритма, позволяющая улучшить распределение ресурсов, повысить энергоэффективность и уменьшение задержки передачи данных. Результаты моделирования доказывают, что предложенная модель обеспечивает 75%-ное снижение энергопотребления и 50%-ное снижение задержки, что делает ее эффективной для сервисов, требующих малой задержки и высокой энергоэффективности.

2. Гибридная модель и метод, в котором используется динамический порог, имеющий комплексное и многофакторное определение и позволяющий дать объективную оценку эффективности выбранного метода обработки конкретной задачи

и определить выбор метода вычислительной задачи (MEC, INC или гибридный). Результаты моделирования и расчет времени вычислений показывают, что предложенная система выгрузки задач и гибридная модель использования технологий INC и MEC могут сократить задержку примерно на 70%.

3. Комбинированный метод, объединяющий требуемые ресурсы на миграцию и задержку обработки в граничных узлах для оптимизации размещения сервисов и минимизации задержек в устройствах телеприсутствия в среде мобильных граничных вычислений. Предлагаемый метод позволяет снижать задержку на 50 %.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты были тщательно проверены с помощью моделирования и математического анализа. Итерационные алгоритмы были протестированы в различных сценариях, включая экстремальные условия, для обеспечения надежности. Результаты исследований обсуждались на международных конференциях и получили положительную экспертную оценку в рецензируемых изданиях с признанным научным авторитетом, что еще раз подтвердило их достоверность. Подробные оценки производительности указывают на постоянное сокращение времени ожидания и повышение энергоэффективности, что делает выводы весьма надежными.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической и научно-методической конференции и семинарах: конференциях ICFNDS (International Conference on Future Networks & Distributed Systems) в 2025 года. DCCN (International conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications) в 2025 году. NEW2AN (International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking) в 2024 году. СПбНТОРЭС (80-я Научно-техническая конференция СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио) в 2025 года. АПИНО (Актуальные Проблемы Инфотелекоммуникаций В Науке И Образовании) в 2023 года. НТК ППС (Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов) в 2025 года.

Публикации по теме диссертации. Всего по теме диссертации опубликовано 17 работ. В числе опубликованных работ – 3 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации (из них 3 в изданиях, соответствующих искомой специальности), 6 статей в рецензируемых изданиях, входящих в международные базы данных SCOPUS и WoS , 8 работы в журналах и сборниках докладов конференций, включенных в РИНЦ.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 1, 2, 4, 6, 7, 9, 10, 12.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна результатов диссертации, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения об опубликованных работах и выступлениях на конференциях и семинарах, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ технологий 6G, услуг телеприсутствия и интеллектуальных пограничных вычислений как основы будущих цифровых экосистем. Рассмотрены ключевые характеристики 6G: терабитные скорости, микросекундная задержка, интеграция ИИ и использование терагерцового спектра. Описана эволюция телеприсутствия в сторону иммерсивных взаимодействий (голограммы, тактильная обратная связь) и его применение в здравоохранении, образовании и промышленности. Проанализирована роль интеллектуальных пограничных вычислений для обработки данных в реальном времени и снижения нагрузки на сети. Выявлены проблемы интеграции: инфраструктурные затраты, управление спектром, энергоэффективность и кибербезопасность. Подчеркнута синергия технологий для создания умных городов, точной медицины и Industry 5.0.

Во второй главе диссертации проведен анализ эволюции архитектуры сетей 6G, в котором обоснована необходимость перехода от централизованных моделей 5G к распределённым решениям с интеграцией космических, воздушных, наземных и подводных сегментов. Глава начинается с обзора текущего состояния и ограничений 5G: узкие места в пропускной способности, высокая стоимость энергопотребления и недостаточная масштабируемость для объёмов IoT-трафика.

Далее представлены ключевые технологические тренды, формирующие требования к 6G-сетям: резкий рост числа подключённых устройств (mMTC), необходимость сверхнизких задержек и гарантированных показателей надёжности (URLLC), а также возросшая роль энергоэффективности и «зелёных» вычислений на границе сети. Обсуждены преимущества распределённых граничных вычислений (MEC) и их потенциал для снижения задержки, выгрузки магистральных каналов и обеспечения резерва вычислительных ресурсов близко к пользователю.

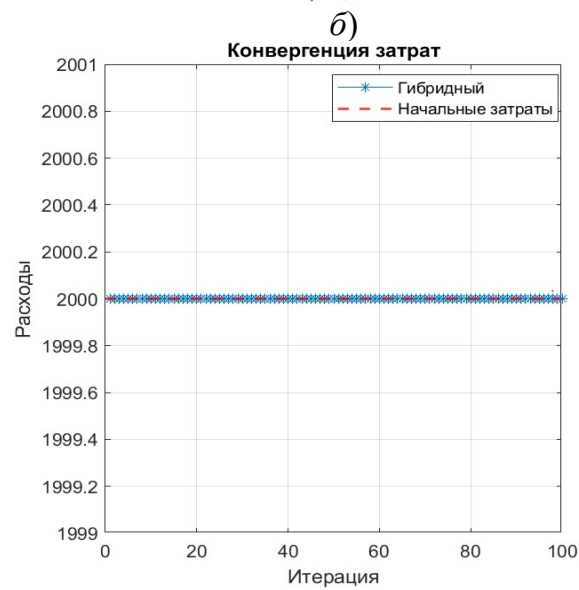
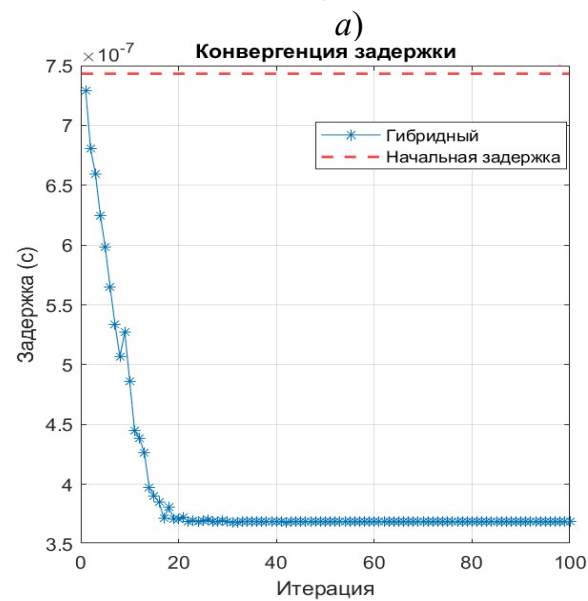
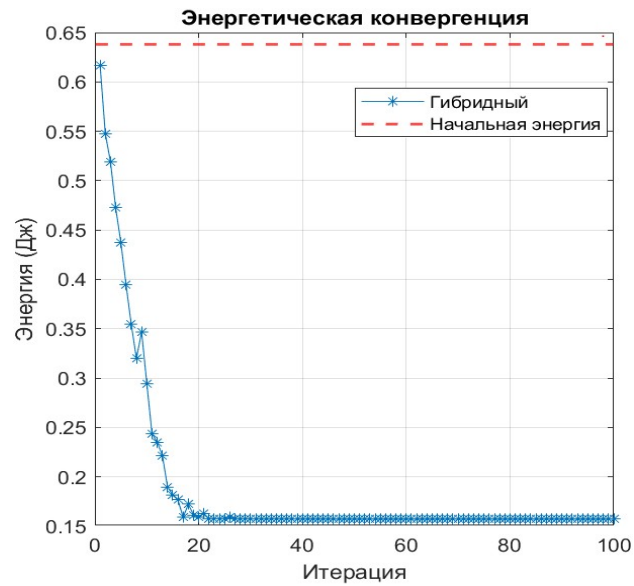
Значительное внимание уделено анализу многоуровневой архитектуры 6G:

Космический и воздушный сегменты — использование НИОКС, HAPS и БПЛА для покрытия удалённых регионов;

Наземный сегмент — гетерогенные сети малых сот (HetNet) и гигантские MIMO-массивы;

Подводный сегмент — особенности акустической связи и энергоограничения для IoUT (Internet of Underwater Things).

На основе выявленных требований предложена целевая архитектура, включающая иерархическую модель расчёта ресурсов с мульти-кластерной организацией узлов. Для оптимального балансирования трёх основных показателей — энергопотребления, задержки и эксплуатационных затрат — внедрены гибридные алгоритмы PSO-GA (Particle Swarm Optimization + Genetic Algorithm). Разработана модель кластеризации, где каждый кластер управляется локальным контроллером ИИ, способным в реальном времени перераспределять нагрузку и адаптировать параметры связи в зависимости от приложения и приоритетов QoS.



в)

Рисунок 1. Результаты моделирования потребления энергии (а), задержки (б) и стоимости (в)

В завершение описана имитационная реализация предложенной архитектуры: настроена среда моделирования, определены параметры сценариев (число узлов, профили трафика, энергобюджеты). Полученные результаты демонстрируют снижение средних задержек при сохранении энергоэффективности на уровне не ниже 75 % и задержку на 50% при чрезвычайно значительном повышении эффективности сети. Этот анализ закладывает теоретическую и практическую основу для последующих глав, посвящённых детальной проработке алгоритмов и тестированию прототипов.

В третьей главе предложена гибридная модель выгрузки вычислительных задач для 6G-сетей, основанная на комбинированном использовании MEC и INC. В рамках предлагаемого метода вводится динамический порог DT, позволяющий автоматически решать, следует ли обрабатывать задачу на пограничном сервере (MEC) или внутри сети (INC):

$$DT = \alpha \left(\frac{LC}{RC} \right) + \beta \left(\frac{NL}{TL} \right) + \gamma \left(\frac{CL}{WC} \right) + \delta \left(\frac{PT}{MT} \right),$$

где:

- LC и RC — текущая и доступная вычислительная нагрузка облака (%),
- NL и TL — реальная и допустимая задержка сети (мс),
- CL и WC — сложность задачи и вычислительная мощность узлов (%),
- PT и MT — время обработки на краю и максимальное приемлемое время (мс),
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ — весовые коэффициенты.

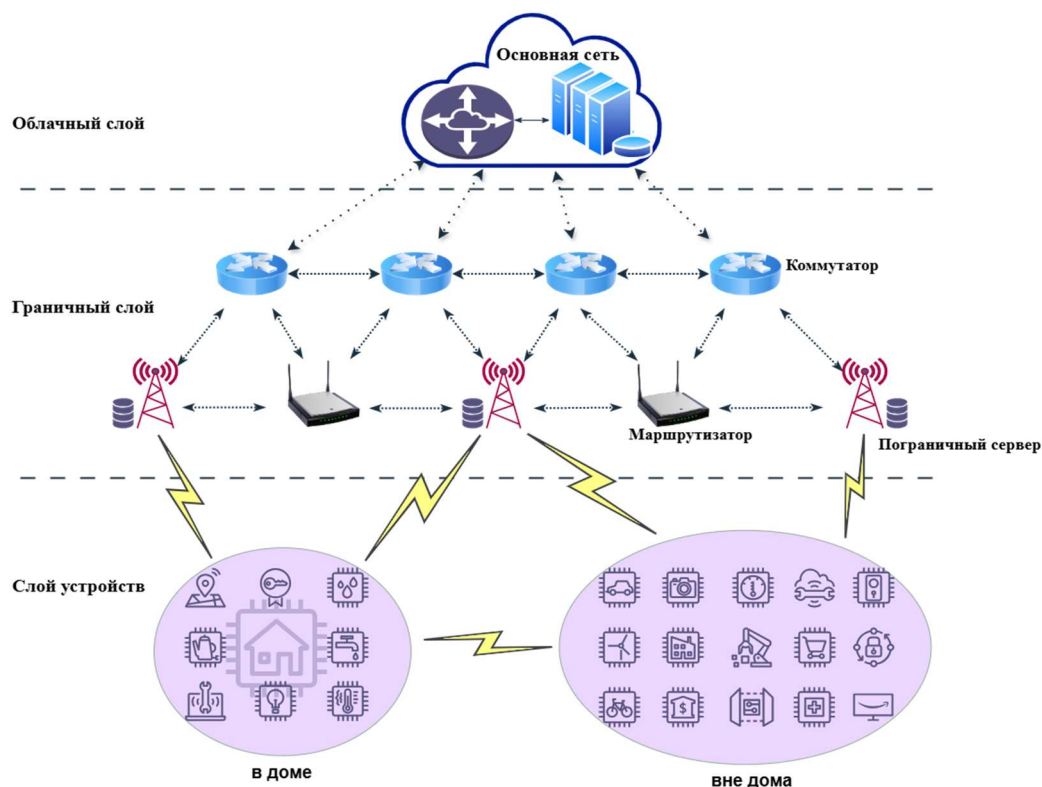


Рисунок 2. Предлагаемая архитектура сети

На рисунке 3 приведена структура алгоритма принятия решений для определения инструмента обработки задачи (MEC или INC) для произвольной сети, параметры которой описаны в начале раздела.

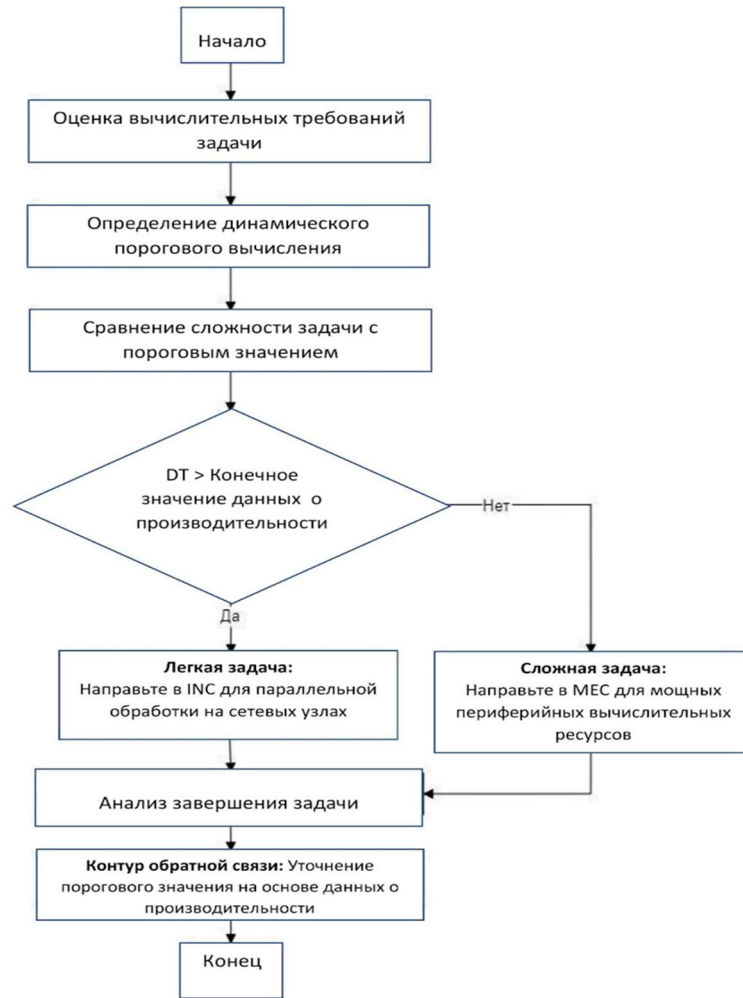


Рисунок 3. Структура алгоритма принятия решений для определения инструмента обработки задачи (MEC или INC)

Вычислительное время для каждого узла i и задачи j моделируется так:

1. Метод MEC (Multi-access Edge Computing):

- Время передачи данных: $t_{commMEC} = \frac{T_S}{\frac{C_{com}}{N}}$
- Время вычислений: $t_{compMEC} = \frac{T_S}{C_C}$
- Полное время для узла i : $t_{MECi} = t_{commMEC} + t_{compMEC}$

2. Метод INC (In-Network Computing):

- Время вычислений: $t_{compINC} = \frac{T_S}{\frac{C_C}{N}}$
- Время передачи данных: $t_{commINC} = \frac{T_S}{C_{com}}$
- Полное время для узла i : $t_{INCi} = t_{compINC} + t_{commINC}$

3. Гибридный метод:

- Если $T_s \leq DT$:
- Фактор передачи данных: $f_{comm} = 0.7$
- Фактор вычислений: $f_{comp} = 0.3$

Иначе:

- Фактор передачи данных: $f_{comm} = 0.3$
- Фактор вычислений: $f_{comp} = 0.7$
- Время передачи данных: $t_{hybridcomm} = \left(\frac{T_s}{\frac{C_{com}}{N}} \right) \cdot f_{comm}$
- Время вычислений: $t_{hybridcom} = \left(\frac{T_s}{C_c} \right) \cdot f_{comp}$
- Полное время для узла i : $t_{hybri} = t_{hybridcom} + t_{hybridcomm}$

Среднее время по всем задачам M :

- $avgTimeMEC = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M timeMEC_j$
- $avgTimeINC = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M timeINC_j$
- $avgTimehybrid = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M timehybrid_j$

Таблица 1. Параметры моделирования

Параметр	Ценность
Число узлов (nodes): N	40
Размер задачи: T_s	1×10^6 бит
Вычислительная емкость: C_c	1×10^9 бит/с
Емкость канала связи: C_{com}	1×10^7 бит/с
Число задач: M	100
Динамический порог: DT	$\frac{T_s}{2}$

Результаты моделирования из Таблицы 1 показывают следующее:

- Среднее время расчета MEC: 4.00 мс
- Среднее время расчета INC: 0.14 мс
- Среднее время расчета гибридного метода: 1.23 мс

На рисунках ниже видно, что гибридный метод существенно снижает задержки по сравнению с чистым MEC и при этом остаётся более сбалансированным, чем INC:

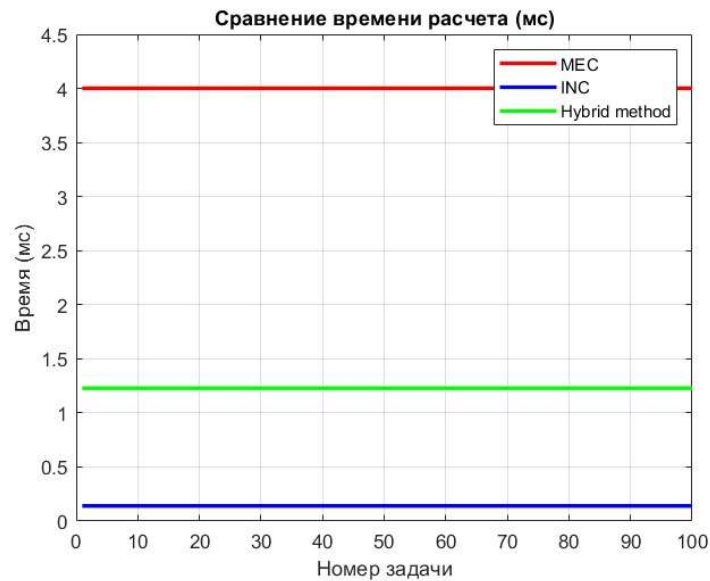


Рисунок 4. Сравнение времени расчета нагрузки для трех методов в зависимости от количества задач

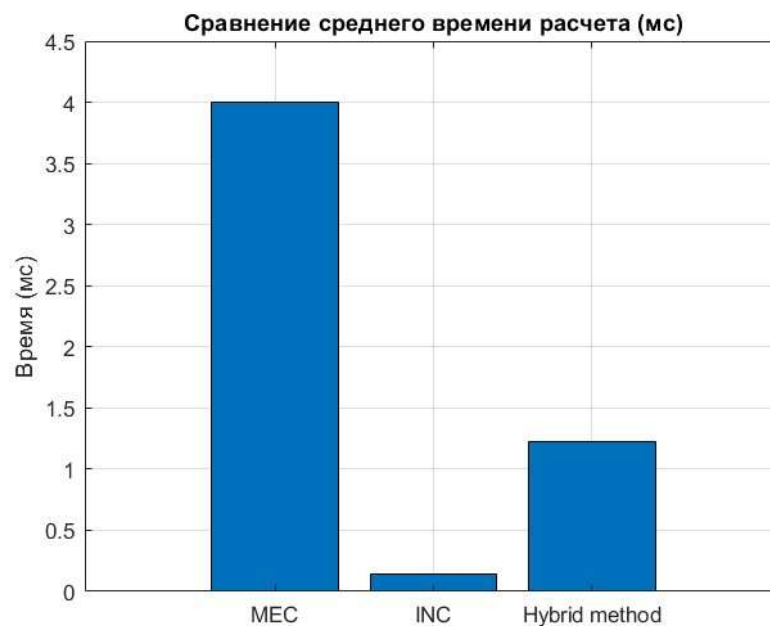


Рисунок 5. Сравнение времени расчета нагрузки для трех методов в зависимости от количества задач в виде гистограммы

Таким образом, предложенная гибридная модель с динамическим порогом обеспечивает высокую скорость конвергенции и снижает задержки и энергопотребление системы до 70 % по сравнению с традиционными решениями.

В четвертой главе предложена интеллектуальная бессерверная вычислительная система для услуг телеприсутствия на основе совместного алгоритма SMRA+MEC, которая обеспечивает:

1. **Динамическую миграцию сервисов** с учётом мобильности пользователей и гетерогенности пограничных узлов.
2. **Оптимальное распределение ресурсов**, минимизирующее суммарную задержку и энергопотребление.

3. Интеграцию AI-моделей для прогнозирования миграций и управления энергосбережением.

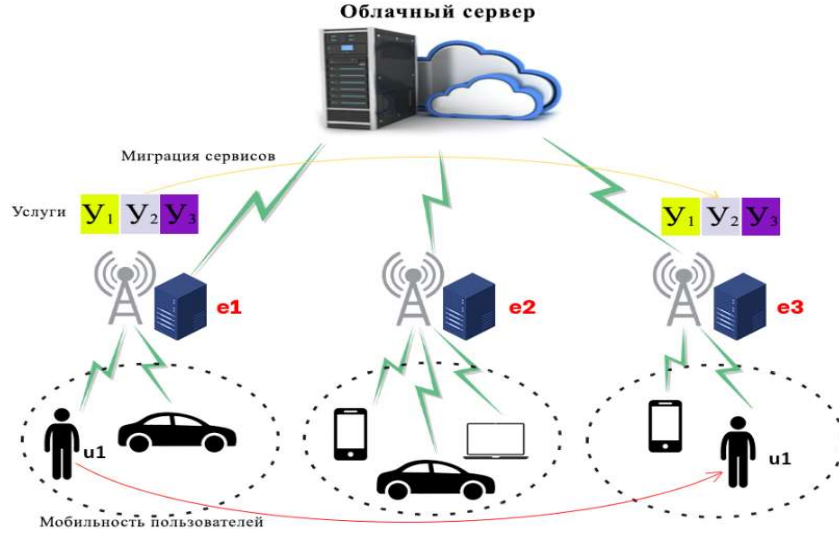


Рисунок 6. Схема сети

Ключевые математические модели главы включают:

- **Общая задержка** для пользователя i , назначенного на узел j :

$$L_{ij} = \underbrace{\frac{D_i}{B_{ij}}}_{\text{передача данных}} + \underbrace{\frac{\rho_i}{\mu_j}}_{\text{время выполнения}} + M_{ij},$$

где D_i — объём передаваемых данных, B_{ij} — полоса канала, ρ_i — нагрузка задачи, μ_j — вычислительная мощность узла, M_{ij} — задержка на миграцию сервиса.

- **Целевая функция** минимизации суммарной задержки:

$$\min_{\{x_{ij}\}} L_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K x_{ij} L_{ij}, \quad \text{s.t.} \quad \sum_j x_{ij} = 1, \quad x_{ij} \in \{0,1\}.$$

- **Энергетический баланс** узла j :

$$E_j = \sum_{i:x_{ij}=1} (P_j^{\text{idle}} + \alpha \mu_j) T + R_j$$

где P_j^{idle} — базовое потребление, α — коэффициент пропорциональности нагрузки, T — время наблюдения, R_j — возобновляемая генерация (солнечная/ветровая).



Рисунок 7. Структура итеративной модели назначения граничных узлов алгоритма

Для повышения объективности модели, случайным образом запускается процесс генерации узлов и назначение их пользователям методов MEC и SMRA, после чего рассчитывается задержка для каждого из них. Комбинированный метод SMRA и MEC основан на итеративном поиске улучшений назначений для сокращения задержки: на каждом шаге итерации случайным образом выбирается пользователь и назначается ему новый узел; если такое изменение приводит к уменьшению задержки (1), оно фиксируется как текущее наилучшее решение. Таким образом, этот метод представляет собой процесс пошагового улучшения посредством случайного поиска,

направленного на минимизацию задержки, начиная с подходов MEC и SMRA и постепенно совершенствуя назначения. Результаты работы метода представлены на рисунках 8-10.

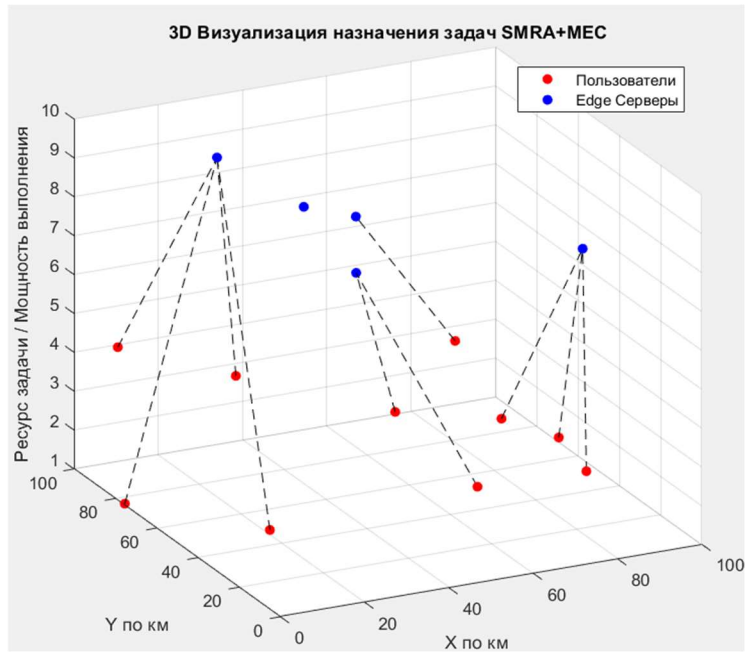


Рисунок 8. 3D Визуализация назначения задач SMRA+MEC

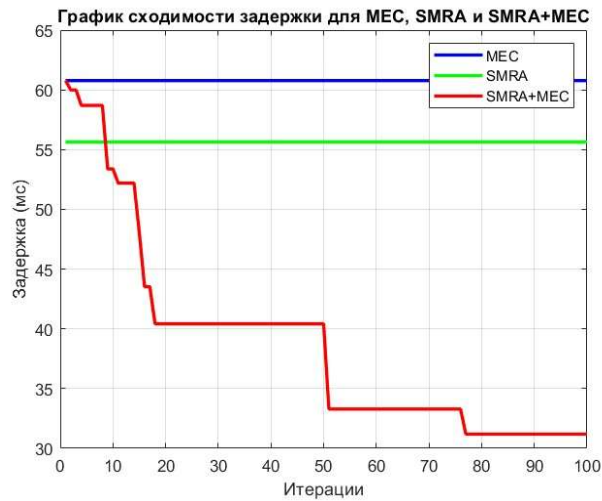


Рисунок 9. График сходимости задержки для MEC, SMRA и предлагаемый алгоритм SMRA+MEC

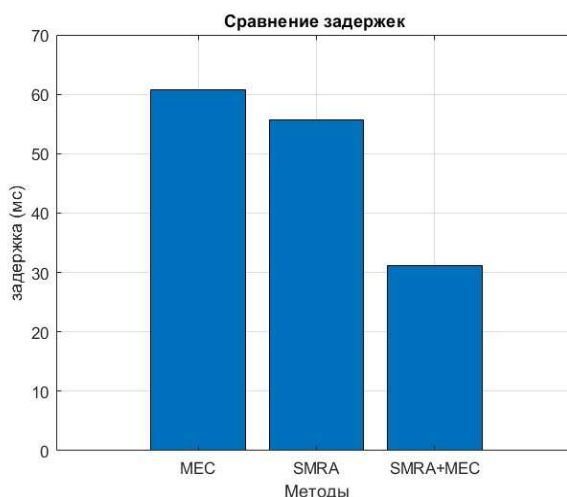


Рисунок 10. Сравнение задержек

- MEC: задержка 60 мс
- SMRA: задержка 55 мс
- SMRA+MEC: задержка 31 мс

Таким образом, предложенный фреймворк SMRA+MEC позволяет снизить задержку до 31 мс (50 %), что делает его перспективным решением для систем телеприсутствия с жёсткими требованиями к QoS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований в диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

1. По сравнению с 5G, сети шестого поколения обеспечивают более высокую ёмкость, скорость передачи данных и минимальную задержку. Благодаря этому станут доступны новые форматы взаимодействия в реальном времени — например, технологии телеприсутствия, имитирующие личное общение.
2. Благодаря технологиям телеприсутствия пользователи имеют возможность получать захватывающие, реалистичные виртуальные впечатления. Это в свою очередь на глобальном уровне улучшает сотрудничество и меняет подходы в удалённой работе, образовании, здравоохранении, организации встреч и индустрии развлечений.
3. Интеллектуальные пограничные вычисления, обеспечивая обработку данных ближе к источнику (например, к устройствам Интернета вещей), снижают задержку и повышают производительность. В результате приложения реального времени, такие как индивидуальное здравоохранение, умные города и автономные системы, будут работать лучше.
4. Переход от централизованной архитектуры к распределенной сети 6G повысит связность, эффективность и масштабируемость. Благодаря интеграции наземных, воздушных, космических и подводных систем связи 6G обеспечивается бесперебойное глобальное покрытие. Автоматизация, управляемая искусственным интеллектом, будет играть решающую роль в управлении сетевыми ресурсами, сокращении задержек при передаче данных и оптимизации процесса принятия решений в режиме реального времени. Это изменение будет способствовать развитию

новых приложений, таких как автономная мобильность, промышленная автоматизация и иммерсивное телеприсутствие.

5. Интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения в сетях 6G обеспечит динамическое распределение ресурсов, прогнозируемое техническое обслуживание и самоорганизацию сети. Эта модель устраняет проблему, связанную с целевой функцией управления задержкой и энергопотреблением, за счет рекурсивного использования гибридного алгоритма оптимизации для каждого кластера. В этой же главе также представлен метод оптимизации, который может привести к снижению энергопотребления на 75% и задержки на 50% при чрезвычайно значительном повышении эффективности сети.

6. Поскольку сети 6G интегрируют различные технологии, важно обеспечить надежные механизмы безопасности и конфиденциальности. Постквантовая криптография, архитектура с нулевым уровнем доверия и управление идентификационными данными на основе блокчейна обеспечат безопасную, зашифрованную и децентрализованную связь. В то же время основное внимание будет уделяться устойчивому развитию, поскольку управление энергопотреблением на основе искусственного интеллекта, возобновляемые источники энергии и устройства Интернета вещей, использующие энергию для сбора, помогают снизить углеродный след крупномасштабных сетей, превращая 6G в более экологичную и устойчивую экосистему.

7. Предлагаемая система выгрузки, основана на пограничных вычислениях с множественным доступом и внутрисетевых вычислениях. Эта система сокращает время ожидания и оптимизирует использование ресурсов за счет динамического планирования вычислительных задач между серверами MEC и сетевыми устройствами, такими как маршрутизаторы и коммутаторы. Результаты моделирования подтверждают повышение производительности на 70%, обеспечивая надлежащий баланс между низкой задержкой, предлагаемой INC, и вычислительной мощностью MEC для создания эффективного сетевого решения 6G.

8. Численные эксперименты подтвердили, что предложенная гибридная модель превосходит традиционный подход MEC в области вычислений и энергоэффективности. Несмотря на то, что она не может сравниться по скорости с pure INC, поскольку представляет собой объединение MEC и INC, этот компромисс обеспечивает большую масштабируемость и адаптивность в различных сетевых средах. Новая система дополнительно оптимизирует энергоэффективность за счет максимального сокращения использования централизованных облачных вычислений.

9. В этой работе я предлагаю алгоритм, показанный на рисунке 3.2, который определяет, следует ли выполнять задачи в MEC или INC, на основе адаптивного порога, учитывающего некоторые параметры, такие как сложность задачи, вычислительная нагрузка и задержка в сети. Алгоритм настраивается в режиме реального времени, чтобы обеспечить оптимальное распределение задач без создания каких-либо узких мест на уровнях MEC или INC. Предлагаемая структура демонстрирует инновационный самонастраивающийся подход, который постоянно оптимизирует распределение ресурсов в пограничных вычислительных системах.

10. Результаты показывают, что гибридное решение INC-MEC может стать основой будущих сетей 6G в прикладных сценариях обработки данных в режиме реального времени, таких как Интернет вещей, автономные автомобили и дополненная реальность. Динамическое распределение задач на основе условий в реальном времени обеспечивает повышенную надежность системы и качество

обслуживания пользователей. В перспективе можно использовать алгоритмы машинного обучения для повышения адаптивности принятия решений за счет улучшения динамического порогового уравнения.

11. Доказано, что миграция услуг и распределение ресурсов (SMRA) с использованием пограничных вычислений с множественным доступом (MEC) эффективно работают для минимизации задержек в контексте систем телеприсутствия. Платформа минимизирует задержку связи и вычислений за счет совместной оптимизации выгрузки задач, миграции служб и динамического распределения ресурсов. Имитационные эксперименты демонстрируют снижение задержки на 50% по сравнению с изолированными решениями MEC или SMRA, что свидетельствует о комплексной оптимизации сервисов телеприсутствия в режиме реального времени.

12. Решения на базе искусственного интеллекта, такие как интеллектуальная миграция сервисов (с использованием LSTM и федеративного обучения), частичная передача состояний и динамическое масштабирование напряжения/частоты (DVFS), позволяют снизить энергопотребление среды MEC. При планировании разнородных задач рабочие нагрузки распределяются между энергоэффективными узлами (например, ARM-серверами), а задачи, связанные с задержкой, сохраняются для высокопроизводительных узлов. Интеграция с возобновляемыми источниками энергии делает еще один шаг вперед в области устойчивого развития, позволяя системам телеприсутствия находить компромисс между их производительностью и воздействием на окружающую среду.

13. SMRA+MEC сочетает в себе консолидацию SDN/NFV, резервирование с отслеживанием состояния и федеративное автоматическое масштабирование для управления временным состоянием сети. Превентивная миграция (с использованием цепей Маркова) и сочетание политики реагирования и проактивности предотвращают сбои в обслуживании. Стресс-тестирование в экстремальных условиях (например, для аварийного восстановления, массовых мероприятий) подтверждает надежность платформы с задержкой менее миллисекунды и временем безотказной работы 99,999% для критически важных рабочих нагрузок.

14. Разработанный итеративный алгоритм, динамически распределяет пользовательские задачи между граничными узлами для минимизации задержки. Алгоритм использует механизм случайного поиска для изучения возможного перераспределения, последовательно уточняя распределение с учетом вычислений общей задержки. Благодаря интеграции начальных назначений MEC и SMRA и постоянной оптимизации в условиях моделирования алгоритм сокращает задержку на 50%. Ключевым вкладом является интеграция факторов задержки передачи и выполнения для корректировки в режиме реального времени и применение стохастической оптимизации для предотвращения локальных минимумов. Решение гарантирует, что адаптация систем телеприсутствия эффективно реагирует на мобильность пользователей и разнообразие ресурсов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях

1. Аль-Кереа З.А.Х., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. Интеллектуальная бессер-верная вычислительная система для услуг телеприсутствия // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11. – № 4. – С. 18–27.
2. Аль-Кереа З.А.Х. Трехуровневая сетевая архитектура для выгрузки задач в сетях 6G на основе технологий граничных вычислений / З.А.Х. Аль-Кереа, А.С.А. Мутханна // Электросвязь. – 2025. – № 11. – С. 15-24.
3. Аль-Кереа, З.А.Х. Архитектурная эволюция сетей: распределенный интеллект и конвергенция космических, воздушных, наземных и подводных сетей связи / З.А.Х. Аль-Кереа, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2025. – № 10. – С. 63-71.

Научные статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных базах данных

4. Zahraa Al-Kerea, Hussein Yasir, Tatyana Lapteva, Artem Volkov, Ammar Muthanna, and Maha Ibrahim. 2025. Hybrid traffic Offloading method for distributed edge computing in 6G networks. In Proceedings of the 8th International Conference on Future Networks & Distributed Systems (ICFNDS'24). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 930–937.
5. Zahraa Al-Kerea, Hussein Yasir, Olga Vorozheykina, Ammar Muthanna, and Nargizakhon Nosirkhuja kizi Shamshieva. 2025. Intelligence serverless computing system for telepresence services. In Proceedings of the 8th International Conference on Future Networks & Distributed Systems (ICFNDS'24). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 938–944.
6. Zahraa Al-Kerea, Hussein Yasir, Alsarhan Mohammed Qahtan, Lyubov Gorbacheva and Ammar Muthanna. A novel collaborative reinforcement learning method for Human-to-Avatar Interactions. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 2025. pp.67-78.

Научные статьи, опубликованные в других изданиях и материалах научных конференций

7. Аль-Кереа З.А. Инновационные решения граничных вычислений для сетей 6G: интеграция современных платформ и оркестрация с помощью Kubernetes / Х.А. Ясир, З.А. Аль-Кереа, А.С. Мутханна // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. – 2025. – № 1(80). – С. 168-170.
8. Аль-Кереа З.А. Метод агрегирования данных для распределенных туманных вычислений в сетях автотранспорта / Х.А. Ясир, З.А. Аль-Кереа, А.С. Мутханна // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. – 2025. – № 1(80). – С. 175-178.
9. Аль-Кереа, З.А. Стандартизация и сценарии применения hURL в сетях связи 6G / З.А. Аль-Кереа, А.С. Мутханна, Х.А. Ясир // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023) : Сборник научных статей. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. В 4 т., Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 марта 2023 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. – С. 60-64.

10. Аль-Кереа, З.А. Сценарии применения интеллектуальных граничных вычислений в сетях 5G / З.А. Аль-Кереа, А.С. Мутханна, Х.А. Ясир // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023) : Сборник научных статей. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. В 4 т., Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 марта 2023 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. – С. 65-69.

11. Аль-Кереа, З.А. Будущее телеприсутствия: как сети 6G произведут революцию в виртуальном взаимодействии / А.С. Мутханна, З.А. Аль-Кереа, Х.А. Ясир // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025) : Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17-21 февраля 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2025. – С. 272-277.

12. Аль-Кереа, З.А. Реализация платформы граничных вычислений для сетей 6G: безопасность, AI и приложения / А.С. Мутханна, З.А. Аль-Кереа, Х.А. Ясир // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025) : Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17-21 февраля 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2025. – С. 278-281.

13. Аль-Кереа, З.А. Современные платформы граничных вычислений для сетей 6G: анализ архитектур и технологий / А.С. Мутханна, З.А. Аль-Кереа, Х.А. Ясир // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025) : Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17-21 февраля 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2025. – С. 282-286.

14. Аль-Кереа, З.А. Разработка метода увеличения скорости передачи данных в 6G / З.А. Аль-Кереа, А.С. Мутханна, Х.А. Ясир // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025) : Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17-21 февраля 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2025. – С. 446-451.