

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Мутханна Аммар Салех Али

Санкт Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ТЕХНОЛОГИИ И УСЛУГИ В 6G: ВИДЕНИЕ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОГРАНИЧНОГО ОКРУЖЕНИЯ.....	15
1.1 Технологии 6G: основа будущих сетей.....	15
1.2 Услуги телеприсутствия в 6G: скачок к захватывающим впечатлениям.....	33
1.3 Интеллектуальные пограничные вычисления: создание более интеллектуальных сетей.....	45
1.4 Интеграция 6G, телеприсутствия и интеллектуального пограничного пространства: целостный подход.....	55
1.5 Практические приложения и основные варианты использования	63
1.6 Проблемы и будущие направления	71
1.7 Выводы по Главе 1.....	78
ГЛАВА 2 АРХИТЕКТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СЕТЕЙ 6G: РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И КОНВЕРГЕНЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ, ВОЗДУШНЫХ, НАЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ.....	80
2.1 Распределенная архитектура интегрированной сети 6G.....	80
2.2 Имитационная модель интеллектуальной распределенной архитектуры интегрированной сети 6G.....	87
2.3 Выводы по Главе 2.....	101
ГЛАВА 3 Гибридный метод выгрузки трафика для распределенных граничных вычислений в сетях 6G	102
3.1 Гибридная разгрузка задач в 6G: Интеграция пограничных и внутрисетевых вычислений с множественным доступом	102
3.2 Трехуровневая сетевая архитектура для разгрузки задач Edge-Cloud.....	105
3.3 Модель гибридной системы разгрузки: интеграция методологий MEC и INC.....	108
3.4 Компьютерное моделирование и оценка эффективности гибридных стратегий разгрузки ...	115
3.5 Выводы по Главе 3.....	119
ГЛАВА 4 Интеллектуальная бессерверная вычислительная система для услуг телеприсутствия	122
4.1 Предпосылки и мотивация для использования пограничных вычислений с множественным доступом и миграции сервисов в системах телеприсутствия	122
4.2 Предлагаемый подход: Комбинированная платформа SMRA и MEC для минимизации задержек в системах телеприсутствия.....	128
4.3 Математическое моделирование и анализ производительности предлагаемого фреймворка	133
4.4 Выводы по Главе 4.....	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	141

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	145
ПРИЛОЖЕНИЕ	163

ВВЕДЕНИЕ

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. Вишневский, 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, M. Mozaffari, M. Alzenad, A. 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 этот 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 и предмет диссертации

Объект: сети связи пятого и последующих поколений.

Предмет: 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 телеприсутствие.

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

Новизна настоящего 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 по-настоящему захватывающих, с высокой скоростью отклика и энергоэффективностью, сервисов телеприсутствия.

Теоретическая и практическая значимость диссертации

Теоретическая значимость диссертационного 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 разгрузки 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 разгрузки 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 периферийных 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.

ГЛАВА 1 ТЕХНОЛОГИИ И УСЛУГИ В 6G: ВИДЕНИЕ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОГРАНИЧНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Развитие 6G, основанное на конвергенции технологий телеприсутствия и интеллектуальных вычислительных платформ, формирует новый рубеж в сфере телекоммуникаций и обработки данных. Технология 5G значительно расширила спектр возможностей сетевого доступа, а переход к 6G позволит предоставлять гибкие услуги в реальном времени, которые раньше невозможно было себе представить [1]. Сервисы телеприсутствия обеспечат принципиально новые форматы взаимодействия между людьми, а передовые интеллектуальные компьютеры обеспечат бесперебойность и функциональность этих процессов. Внедрение 6G в связке с технологиями телеприсутствия и пограничными вычислениями создаст предпосылки для глубокой трансформации отраслей — от медицины до развлекательного сектора. При этом решение проблем масштабируемости, безопасности и управления ресурсами будет иметь ключевое значение для реализации этого видения. Формирование цифрового ландшафта будет продолжаться по основываясь на передовых исследованиях и разработках, делая мир более умным и связанным [1, 2].

1.1 Технологии 6G: основа будущих сетей

Пятое поколение мобильной связи (5G) способствует изменению отраслей экономики, предлагая более высокие скорости передачи данных, снижение задержки сигнала и повышения качества связи. Однако растущий спрос общества на более продвинутые технологические решения — такие как иммерсивное удаленное присутствие, автономные системы и Интернет всего (IoE) — в скором времени приведет к достижению технологического предела возможностей 5G [2]. Есть основания предполагать, что ожидаемое шестое поколение

телекоммуникаций (6G) заполнит этот пробел, заложив основу для мира, который будет по-настоящему вездесущим, интеллектуальным и чрезвычайно связанным. Мы подробно рассмотрим основные характеристики технологии 6G, сосредоточившись на ключевых факторах, приложениях, проблемах и социальных последствиях, а также на соображениях энергоэффективности, которые определяют будущую сеть. Исторически переход от первого поколения мобильной связи к современным беспроводным технологиям был обусловлен меняющимися потребностями пользователей и технологическим прогрессом [3]. От аналоговых голосовых услуг на 1G до высокоскоростных услуг передачи данных 5G каждое поколение знаменовало собой значительный прогресс в пропускной способности (рисунок 1.1). 6G не только представляет собой постепенное улучшение по сравнению с 5G, но и является серьезным шагом вперед, который, как ожидается, изменит истинную структуру глобальных коммуникаций [3].



Рисунок 1.1 – Эволюция мобильной связи: хронологическое описание достижений в области технологий мобильных сетей от 1G в 1981 году до ожидаемого 6G в 2030 году.

По мере того, как по всему миру идет разворачивание сетей 5G, компании изучают возможности таких приложений, как умные города, автономные транспортные средства, дополненная реальность (AR) и Интернет вещей (IoT) [3, 4]. Но развитие этих передовых технологий в скором времени исчерпает потенциал 5G, особенно с точки зрения задержки, пропускной способности и мощности. 6G гарантированно поддерживает еще более широкий спектр услуг, в том числе скорость передачи данных в терабитах в секунду (Тбит/с), задержку менее миллисекунды и бесшовную интеграцию искусственного интеллекта (ИИ) на каждом уровне сети. Моя цель в этом случае заключается в том, чтобы при более глубоком изучении рассмотреть создание инфраструктуры 6G для будущих технологических революций [4].

Необходимость 6G: расширение границ 5G

Хотя 5G предназначен на поддержку трех ключевых сценариев - улучшенной мобильной широкополосной связи (eMBB), высоконадежных недорогих сетей (URLLC) (как показано на рисунке 1.2) и массовых мультимодальных сетей (mMTC) - будущее развитие технологий будет сосредоточено на более масштабных задачах, включая ключевые приложения для 6G [4]:

- Критически важные данные: ожидаемое распространение устройств IoT — от носимых медицинских мониторов до автономных автомобилей — будет генерировать эксабайты данных ежедневно. Циркуляция такого объема данных в режиме реального времени грозит перегрузкой существующих сетей, для исключения таких ситуаций требуется сети 6G со скоростями в Тбит/с.
- Очень низкая задержка для приложений реального времени: в идеальных лабораторных условиях в сети 5G время задержки составляет 1 мс, таким приложениям, как удаленная доступность в реальном времени, виртуальная реальность (VR) и удаленные операции, требуется еще меньшее время задержки. 6G позволяет сократить это время до микросекунд, что поможет реализовать сервисы чувствительные к задержкам.

- **Энергоэффективность и устойчивость:** по мере того, как сети становятся все более сложными и используют больше данных, управление энергопотреблением становится все более сложной задачей. 6G отдает приоритет энергоэффективности за счет передового управления на основе искусственного интеллекта, экологических аппаратных решений и инноваций в области беспроводных технологий с низким энергопотреблением.

- **Улучшенный пользовательский опыт:** с развитием иммерсивных XR-опытов, цифровых двойников и инструментов совместной работы в режиме реального времени пользователи предъявляют повышенные требования к сетевым решениям. Ожидается, что такие сети будут обеспечивать бесперебойное взаимодействие с высоким разрешением и минимальной задержкой передачи данных. Это требует не просто повышения скорости передачи данных, но и фундаментального переосмысления механизмов обработки информации в сети.

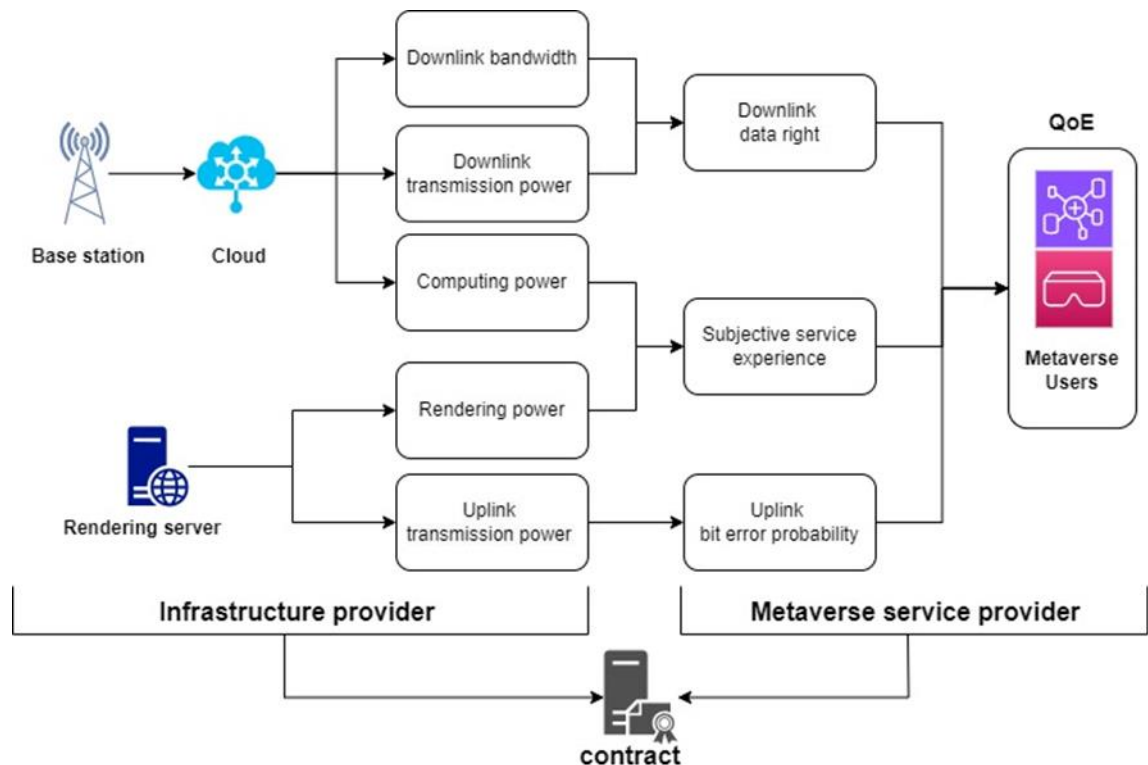


Рисунок 1.2 – Основанный на соглашениях контрактов на рынке услуг метавселенной xURLLC с многомерными услугами и оплатой на основе QoE.

Технологии, поддерживающие 6G: расширение границ

Чтобы удовлетворить эти беспрецедентные требования, 6G будет использовать комбинацию передовых технологий. Наиболее востребованными из них являются [5,6]:

1. Терагерцовая (ТГц) связь

Одной из определяющих особенностей 6G станет использование терагерцовых (ТГц) частотных диапазонов в диапазоне от 0,1 до 10 ТГц. Эти более высокие частоты обеспечивают невероятно высокую скорость передачи данных — до 1 Тбит/с, — но накладывают ограничения на дальность и доступность. так как 5G работает в основном в диапазонах ниже 6 ГГц и миллиметровых волн (mmWave), потребуются новые подходы для преодоления проблемы терагерцового соединения в 6G на больших расстояниях .

- Использование диапазона ТГц: частоты ТГц в густонаселенных городских районах могут использоваться для очень быстрого трафика данных между зданиями, в интеллектуальных рабочих станциях, а также в игровых или телевизионных средах. Исследователи изучают передовые технологии формирования луча и наномасштабных антенн для снижения потерь сигнала, связанных с распространением ТГц волн.

- Технические проблемы: короткий диапазон ТГц волн означает, что будущие сети 6G потребуют сложной топологии размещения базовых станций, потенциально каждые 10-20 метров. Это вызывает опасения по поводу стоимости инфраструктуры, ресурсов и воздействия на окружающую среду таких сложных конфигураций сетевой инфраструктуры.

2. Искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (МО).

Система связи 6G изначально планируются как интеллектуальная система, с применением ИИ и МО, встроенными в каждую часть сети. Эта технология не только повысит эффективность, но и позволит сети учиться на данных и совершенствоваться с течением времени.

- Самоадаптирующиеся сети: ИИ позволит сетям динамически распределять ресурсы на основе текущего спроса на ресурсы, обеспечивая оптимальную производительность. Это может включать корректировку распределения полосы пропускания в реальном времени, прогнозирование перегрузки трафика или перераспределение ресурсов спектра в недостаточно обслуживаемые районы.

- Безопасность на основе ИИ: огромный рост подключенных устройств значительно расширит ландшафт угроз. ИИ будет играть ключевую роль в выявлении и смягчении угроз безопасности, используя алгоритмы машинного обучения для выявления аномального поведения и реагирования в режиме реального времени для предотвращения нарушений.

3. Квантовые коммуникации и вычисления

- Квантовая технология будет играть центральную роль в сетях 6G, обеспечивая дополнительную безопасность и вычислительный потенциал, невозможные в традиционных системах. Квантовая связь опирается на принципы квантовой механики, такие как запутанность и суперпозиция, для передачи данных в практически неслышимых не поддающихся прослушиванию формах [5].

- Квантовое распределение ключей (QKD): шифрование QKD обеспечивает безопасную связь с использованием квантового состояния для обмена ключами, которые невозможно перехватить. Любая попытка откалибровать перехватить или заблокировать ключ мгновенно приводит к краху системы, предупреждая пользователей об атаке.

- Интеграция квантовых вычислений: хотя квантовые вычисления находятся в зачаточном состоянии, они обещают решить сложные задачи оптимизации, которые в настоящее время невозможны с помощью классических вычислений. В случае 6G квантовые вычисления могут использоваться для оптимизации распределения ресурсов, управления сетями или даже улучшения алгоритмов ИИ для управления сетями.

4. Реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (RIS)

RIS — еще один пример беспроводной связи, использующей программно-управляемые функции для манипулирования электромагнитными волнами путем изменения их электрических и магнитных свойств. Изготовленные из метаматериалов и состоящие из совокупности рассеивающих элементов, свойствами которых можно управлять динамически, RIS обеспечивает контролируемое отражение, преломление, рассеивание, модуляцию и прочие свойства электромагнитных волн, что влияет на повышение пропускной способности, расширение зоны покрытия и устранение невидимых участков (например, в условиях дальней зоны), а также увеличение энергоэффективности.

- Улучшенное распространение сигнала: технология RIS способствует оптимизации распространения радиосигнала в условиях плотной городской застройки (в т. ч. в многоквартирных домах) за счет динамического управления его траекторией и подавления мешающих отражений. Это позволяет улучшить покрытие в районах, где традиционные базовые станции с трудом обеспечивают адекватное обслуживание.

- Энергоэффективность: интеллектуально преобразуя сигналы, технология RIS может снизить потребность в мощных базовых станциях, а при наличии достаточного энергетического запаса система способна эффективно задействовать восходящие каналы связи. Компоненты RIS интегрируются в интеллектуальную инфраструктуру (например, в стены зданий или конструкции уличных фонарей), что исключает необходимость в дополнительном оборудовании и проводном подключении для масштабирования системы.

5. Интегрированная сенсорная коммуникация (ИСАК).

Сочетание технологий с функциями зондирования и коммуникации в единой системе эмоций сенсоров и связи — одна из самых захватывающих возможностей 6G. В отличие от предыдущих поколений, в которых коммуникация и восприятие рассматривались как отдельные функции, 6G сольется в интегрированную систему [6].

Автономные транспортные средства: В автономном вождении ИСАК позволит транспортным средствам одновременно взаимодействовать между собой и проводить непрерывное сканирование окружения для выявления препятствий, других участников движения и значимых объектов инфраструктуры, как бы ощущая свое окружение. Это повысит безопасность, предоставляя информацию в реальном времени о дорожных условиях, трафике и потенциальных опасностях.

- Умные города: сети 6G, оснащенные возможностями ISAC в среде умных городов, обеспечат высокий уровень ситуационной осведомленности за счет улучшения управления дорожным движением, общественной безопасности и энергоэффективности за счет обнаружения окружающей среды в режиме реального времени.

Потенциальные применения 6G: трансформация отраслей и обществ

Реальная ценность 6G не только в технических характеристиках, но и в трансформационной функциональности, которая делает ее возможной. От телемедицины до развлечений, каждая отрасль ощутит глубокое влияние 6G [6].

1. Телеприсутствие и голографическая связь

С появлением сетей 6G технология телеприсутствия эволюционирует от традиционных видеоконференций к полностью иммерсивным средам, обеспечивая мультисенсорное взаимодействие и высокую степень реалистичности восприятия. Голографическая коммуникация, где 3D-изображения людей и объектов могут передаваться и обрабатываться в реальном времени, преобразует удаленное взаимодействие.

- Командная работа и сотрудничество: сотрудники корпоративного мира смогут «телепортироваться» в залы заседаний по всему миру в виде 3D-голограмм, создавая ощущение присутствия и взаимодействия, далеко выходящее за рамки современных технологий видеоконференций. Такая интеграция потребует скорости передачи данных в Тбит/с, что может быть обеспечено технологиями 6G.

- **Развлечения и медиа:** в индустрии развлечений голографические технологии получат широкое распространение: концерты, спортивные мероприятия и киноконтент с использованием голограмм станут стандартной практикой. Это обеспечит зрителям иммерсивный опыт, максимально приближенный к физическому присутствию на событии и сократит разрыв между физической и цифровой реальностями.

- **Здравоохранение и дистанционная хирургия:** субмиллисекндные задержки и высокая надежность сетей 6G произведут революцию в сфере здравоохранения, особенно в таких областях, как телемедицина и удаленная хирургия.

- **Точная медицина:** наконец появится возможность проводить удаленные операции на расстоянии в тысячи миль с помощью управляемой роботизированной системы, с точным инструментарием и обратной связью в реальном времени. Возможность предоставления тактильной обратной связи в реальном времени будет иметь решающее значение для обеспечения безопасности и эффективности этих операций.

- **Улучшение здравоохранения:** использование технологий 6G для удалённого взаимодействия даёт возможность жителям отдалённых и недостаточно обслуживаемых территорий получать дистанционный доступ к экспертным ресурсам из городских медицинских центров. Это снижает потребность в поездках и ведёт к повышению качества оказания медицинской помощи. Аналитика в реальном времени, визуализация на основе ИИ и удалённый мониторинг станут стандартными.

2. Коммунальные услуги и сооружения 5.0

С технологической точки зрения внедрение 6G создаст принципиально новые возможности для повышения производительности и развития интеллектуальных систем, что станет ключевым драйвером эволюции Индустрии 5.0. В её рамках реализуется концепция совместного труда человека и роботов на базе

интеллектуальных рабочих мест с глубокой интеграцией цифровых технологий. [6,7].

Автоматизация в реальном времени: оснащение заводов интеллектуальными роботами, которые могут общаться и принимать решения в реальном времени, оптимизируя производственные процессы для повышения эффективности и сокращения отходов. Эти роботы используют сети 6G для обеспечения более надежной связи, что минимизирует время простоя.

- Автономный транспорт: в транспортном секторе внедрение сетей 6G обеспечит надёжное функционирование автономных транспортных средств и дронов за счёт высокоточной координации их маршрутов. Это позволит минимизировать транспортные заторы и повысить уровень безопасности дорожного движения. Ключевым элементом интеллектуальных транспортных систем (ИТС) станет обмен данными в режиме реального времени между транспортными средствами (V2V), инфраструктурой (V2I), а также пешеходами (V2P).

3. Расширенная реальность (XR) и иммерсивные впечатления

Одним из самых интересных вариантов применений 6G является возможность преобразования расширенной реальности (XR), включая дополненную реальность (AR), виртуальную реальность (VR) и смешанную реальность (MR).

- Виртуальное сотрудничество: с внедрением сетей 6G удаленное мировое сотрудничество будет осуществляться в полностью иммерсивных виртуальных средах, где пользователи смогут взаимодействовать с цифровыми объектами и средами в режиме реального времени.

- Умный туризм и образование: технологии иммерсивного туризма позволяют пользователям виртуально исследовать исторические объекты и природные достопримечательности. Взаимодействие обеспечивается за счёт голографических проекций в режиме реального времени и интерактивного мультимедийного

контента, что создаёт эффект присутствия без физического перемещения. В образовании студенты получают возможность проводить опыты в виртуальных лабораториях, участвовать в исторических исследованиях и совместном обучении, которое выходит за рамки учебников и мультимедийных экранов.

Проблемы развития 6G: преодоление препятствий для трансформации связи

- Несмотря на многообещающие разработки и перспективные приложения технологии 6G, путь к ее разработке и внедрению сопряжен с фундаментальными трудностями. Эти трудности обусловлены различными техническими, экономическими, нормативными и социальными соображениями, каждое из которых необходимо адекватно учесть и проработать для обеспечения плавного развертывания сетей 6G. Стандарты и воздействие сетей 6G на окружающую среду — ключевые аспекты, которые активно обсуждаются в контексте развития телекоммуникационных технологий. [7, 8].

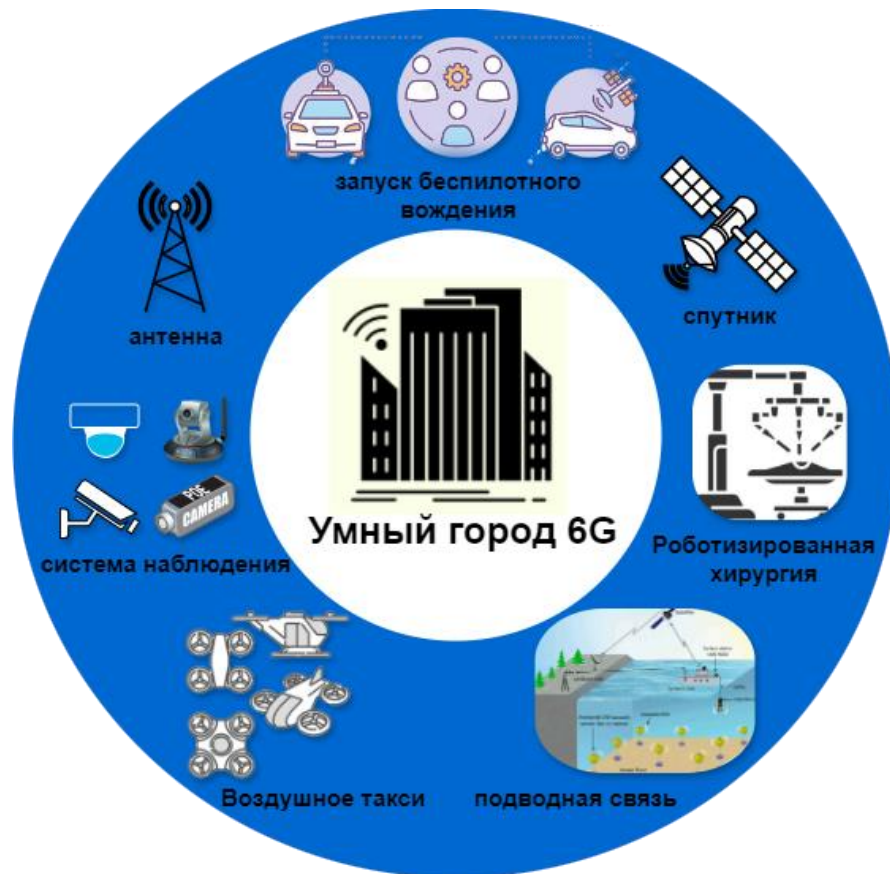


Рисунок 1.3 – Проблемы в разработке 6G

1. Доступность спектра и управление им: битва за полосы частот

Одной из важнейших задач в развитии 6G является обеспечение доступности и рационального распределения новых ресурсов спектра, особенно в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот. Технология ориентирована на работу в диапазоне от 100 ГГц до 10 ТГц, это предполагает обработку чрезвычайно высоких объёмов данных, что открывает новые возможности и ставит серьёзные технические вызовы. Технологии 6G обещают обеспечить высокую скорость передачи данных и производительность сети с ультранизкой задержкой, однако реализация требуемых спектральных ресурсов сопряжена с рядом технических препятствий [8]:

- Ограниченная доступность спектра: большинство диапазонов ниже 6 ГГц уже задействованы существующими сетями — 4G, 5G, Wi-Fi, а также

вещательными службами. В связи с этим для внедрения 6G требуются инновационные подходы, позволяющие выделить новые спектральные ресурсы без нарушения работы действующих систем. Следовательно, для обеспечения сосуществования технологий настоящего и будущего необходимо тщательное планирование.

- Приложения в диапазоне ТГц: Применение терагерцовых частот открывает перспективы для сверхскоростной передачи данных, однако сопряжено с существенными техническими сложностями. Высокие частоты характеризуются значительными потерями при распространении сигнала. Для преодоления этих ограничений исследователи разрабатывают и изучают передовые технологии: формирование луча (beamforming), сверхмассивные MIMO-системы (Massive MIMO) и интеллектуальные отражающие поверхности (IRS), — которые позволяют расширить зону покрытия и повысить надёжность связи.

- Глобальная инфраструктура и координация: для эффективного развёртывания сетей 6G очень важно международное сотрудничество, обеспечивающее справедливое распределение радиочастотного спектра между регионами. Координация усилий регулирующих органов, таких как: Международный союз электросвязи (МСЭ), региональные регуляторы и национальные правительства, позволит выработать единые подходы к управлению спектром. Это особенно актуально для межграничных приложений: спутниковой связи и глобальных сетей IoT, требующих согласованных частотных планов.

- Динамическое распределение спектра: с увеличением спроса на беспроводное подключение в различных отраслях, динамический доступ к спектру и стратегии распределения будут становиться все более важными для оптимизации его использования. Это может быть новая нормативная база, которая позволит различным службам динамически сосуществовать в одном и том же диапазоне частот на основе спроса в реальном времени.

2. Энергоэффективность и экологическая устойчивость

В условиях экспоненциального роста числа подключённых устройств и объёмов передаваемых данных одной из ключевых проблем при внедрении 6G становится необходимость разработки энергоэффективных решений. Отсутствие существенных улучшений в энергоэффективности может привести к значительному увеличению энергопотребления сетей 6G и оказать негативное воздействие на экологическую обстановку [8].

- Требования к энергопотреблению сетей 6G: требования к энергопотреблению сетей 6G существенно возрастут по сравнению с предыдущими поколениями мобильной связи. Это обусловлено рядом факторов: уменьшением размера соты (ячеек), применением крупноразмерных MIMO-антенн, сверхплотным развёртыванием инфраструктуры и необходимостью обеспечения повышенной ёмкости для автономной работы. Решение данной проблемы требует инновационных подходов в проектировании оборудования, архитектуре сетей и стратегиях управления энергопотреблением.

- Управление энергопотреблением на основе ИИ: искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (МО) будут играть ключевую роль в энергоэффективности сетей 6G. Алгоритмы ИИ могут анализировать модели сетевого трафика и динамически распределять ресурсы для снижения потребления энергии. Например, ИИ может позволить базовым станциям переходить в спящий режим в периоды низкого трафика и регулировать уровни мощности в реальном времени для удовлетворения потребностей пользователей без потери энергии.

- Зеленые сети и возобновляемая энергия: чтобы решить растущие проблемы изменения климата и устойчивости, сети 6G должны в первую очередь использовать возобновляемые источники энергии, такие как солнечные, ветровые и водородные топливные элементы. Кроме того, исследователи изучают технологии энергосбора, которые позволяют устройствам IoT получать энергию

из источников окружающей среды, таких как радиоволны, свет или вибрация, снижая их зависимость от батарей и сетевого питания.

- Сокращение выбросов углекислого газа: в условиях ужесточения экологических норм и международных обязательств по сокращению парниковых газов телекоммуникационная отрасль сталкивается с возрастающим давлением в части сокращения выбросов углекислого газа, что обусловлено глобальными климатическими обязательствами и требованиями регуляторов. Внедрение виртуализации и облачной сетевой инфраструктуры позволяет сократить потребность в физическом телекоммуникационном оборудовании, снизить энергопотребление и уменьшение выбросов парниковых газов.

3. Затраты на развёртывание и эксплуатацию инфраструктуры.

Развертывание сети 6G потребует значительных инвестиций в развитие сопутствующей инфраструктуры, в том числе в базовых станций нового поколения, установку высокопроизводительных антенн и расширение оптоволоконных магистралей. Несмотря на то, что сеть 5G уже обеспечивает сложную инфраструктуру в городских районах, 6G потребует, чтобы сетевые функции были намного шире, особенно в терагерцовом спектре, где наблюдаются сложные сигнальные характеристики и множественные типы сигнатур [7, 8].

- Стоимость развертывания: развертывание сетей 6G будет дорогостоящим мероприятием, особенно в сельских и недостаточно обслуживаемых районах, где существующая инфраструктура ограничена. Расходы, связанные с модернизацией существующих сетей, установкой нового оборудования и обслуживанием систем, станут серьезной проблемой для операторов связи и Правительства. Для того чтобы развертывание 6G стало экономически жизнеспособным, могут потребоваться государственно-частные партнерства и бюджеты.

- Плотная сетевая инфраструктура: ввиду ограниченного радиуса действия сигналов 6G и работы на высоких частотах, особенно в терагерцовом (ТГц) диапазоне, потребуется развертывание сверхплотных сетей малых сот, установка

ретрансляторов и интеллектуальных отражающих поверхностей. Наибольшая плотность таких элементов будет необходима в густонаселённых городских районах, где сосредоточено значительное количество пользователей.

- Возможности Backhaul и Fronthaul: инфраструктура Backhaul и Fronthaul (соединяющая базовую станцию с основной сетью и пограничными устройствами) должна будет поддерживать объем данных, генерируемых сетью 6G. Это потребует модернизации волоконно-оптических сетей и, возможно, новых технологий, таких как спутниковый Backhaul в удаленные местоположения. Важно обеспечить, чтобы Backhaul-сеть могла обрабатывать полосу пропускания 6G большого объема, для предотвращения узких мест и поддержки производительности сети.

4. Вопросы кибербезопасности и конфиденциальности

С ростом числа подключенных устройств, а также искусственного интеллекта и квантовых вычислений, встроенных в сети 6G, вопросы кибербезопасности и конфиденциальности выйдут на первый план. Объем данных, передаваемых и обрабатываемых в реальном времени в сетях 6G, спровоцирует новые атаки киберпреступников [8,9].

- Повышение надежности в IoT и AI: расширение экосистемы IoT, а также распространение интеллектуальных устройств и AI-приложений приводят к увеличению числа потенциальных уязвимостей, доступных для кибератак. Для защиты целостности и конфиденциальности данных в сетях 6G потребуются передовые методы шифрования и системы безопасности на базе искусственного интеллекта. В условиях децентрализованной аутентификации возникнет необходимость в разработке и внедрении альтернативных подходов.

- Квантовая криптография: по мере развития квантовых вычислений традиционные методы шифрования оказываются под угрозой: их могут взломать с помощью квантовых технологий, что создаёт серьёзные риски для безопасности данных в сетях 6G. В связи с этим исследователи активно разрабатывают

квантово-безопасные криптографические методы для защиты от будущих квантовых атак. Одним из перспективных решений выступает квантовое распределение ключей (QKD), обеспечивающее защищённую связь за счёт обмена ключами шифрования на основе принципов квантовой механики.

- Защита конфиденциальности в ИИ и больших данных: алгоритмы ИИ играют центральную роль в возможностях 6G для управления ресурсами и оптимизации операций, но вызывают опасения по поводу конфиденциальности данных. Такие методы, как федеративное обучение, когда модели ИИ обучаются на многих децентрализованных устройствах, где конфиденциальные данные не передаются, могут помочь снизить риски конфиденциальности. Для обеспечения безопасности данных при работе с ними должны использоваться конфиденциальность, шифрование и криптографические методы.

- Регулирование и соответствие: правительствам и регулирующим органам необходимо будет установить новые политики и стандарты для управления конфиденциальностью и безопасностью данных в сетях 6G. Это регулирование должно гарантировать защиту персональных данных пользователей, а также обеспечить бесперебойное использование услуг на базе ИИ и квантовых технологий.

5. Стандартизация и совместимость

Стандартизация является ключом к успешному развертыванию любой мобильной сети нового поколения, и 6G не станет исключением. Чтобы обеспечить жизнеспособность технологии 6G на всех устройствах, платформах и в разных регионах, крайне важно построить единую глобальную сеть связи. Однако достижение глобального консенсуса по стандартам 6G будет сложным и длительным процессом [9].

- Установление глобальных стандартов: установление стандартов 6G потребует сотрудничества между лидерами отрасли, академическими исследователями, правительственными учреждениями и международными

организациями. Органы стандартизации, такие как Международный союз электросвязи (МСЭ) и Проект партнерства третьего поколения (3GPP), играют важную роль в спецификации технологий и проектировании сети 6G.

- Обеспечение совместимости с существующими сетями: одной из проблем 6G станет обеспечение совместимости с существующими сетями 4G и 5G. Это важно для плавного перехода на 6G, особенно в регионах, где еще не развернута инфраструктура 5G. Кроме этого, для бесперебойного пользовательского опыта решающее значение будет иметь связь между различными поколениями веб-технологий.

- Развивающиеся приложения и требования: по мере появления новых приложений и профилей использования для 6G, адаптация стандартов должна будет происходить в соответствии меняющимися требованиями. Например, растущая важность пограничных вычислений, ИИ и квантовых технологий потребует новых протоколов и архитектур, которые могут поддерживать распределенную обработку и анализ данных в реальном времени.

6. Вопросы этики и социальной ответственности

По мере того, как сети 6G все больше интегрируются в повседневную жизнь, будут возникать этические и социальные соображения, касающиеся конфиденциальности, доступа к равенству и возможности злоупотребления передовыми технологиями [9,10].

- Цифровой разрыв и доступ: хотя сети 6G обещают беспрецедентную связь, существует риск того, что цифровой разрыв будет увеличиваться, поскольку необеспеченные сообщества не смогут воспользоваться преимуществами 6G. Необходимы согласованные усилия со стороны регуляторов телекоммуникаций и международных организаций.

- Этические последствия ИИ и автономных систем: возросшая зависимость от ИИ в сетях 6G поднимает вопросы об ответственности, прозрачности и предвзятости решений, принимаемых на основе ИИ. Поскольку системы ИИ берут

на себя все больше ответственности в таких областях, как здравоохранение, транспорт и правоохранительные органы, важно будет гарантировать, что эти системы справедливы, прозрачны и беспристрастны.

- Воздействие на окружающую среду: необходимо тщательно рассмотреть воздействие сетей 6G на окружающую среду, особенно с точки зрения потребления энергии и дефицита сетевого оборудования. Устойчивые практики должны быть приоритетными на протяжении всего жизненного цикла технологий 6G, от проектирования и производства до развертывания и переработки.

Подводя итог, отмечу: 6G — это не просто следующий шаг в мобильной связи, это фундаментальный сдвиг в том, как мы взаимодействуем с цифровым и физическим мирами. Объединяя ИИ, квантовые вычисления, терагерцовые коммуникации и пограничные вычисления, 6G позволит нам принимать в режиме реального времени разумные решения во всех аспектах нашей жизни. Как исследователи, мы обязаны продолжать расширять границы инноваций, гарантируя, что 6G оправдает свои обещания, решая проблемы безопасности, устойчивости и доступа. Хотя мы все еще находимся на ранних стадиях разработки 6G, перспективы будущего мира, где цифровое и физическое плавно сливаются, — говорят о кардинальном изменении того, как мы живем, работаем и общаемся в настоящее время.

1.2 Услуги телеприсутствия в 6G: скачок к захватывающим впечатлениям

По мере того, как мир переходит от сетей 5G к сетям 6G, сила преобразования удаленных услуг становится очевиднее, чем когда-либо. 6G обещает изменить не только то, как мы общаемся, но и то, как мы ощущаем, где мы находимся, и общение на физическом расстоянии [10]. Благодаря достижениям в скорости передачи данных, почти нулевой задержке и числа подключений, 6G

позволит удаленным пользовательским службам эволюционировать от базовой видеоконференции до полностью иммерсивного жизненного опыта. Это даст возможность испытывать полностью реалистичный опыт, иногда стоящий на грани научной фантастики, который эти приложения, вскоре интегрированные в повседневную жизнь, преобразуют то, как мы работаем, учимся, сотрудничаем и общаемся друг с другом. На рисунке 1.4 показаны услуги телеприсутствия в сетях 6G [10].

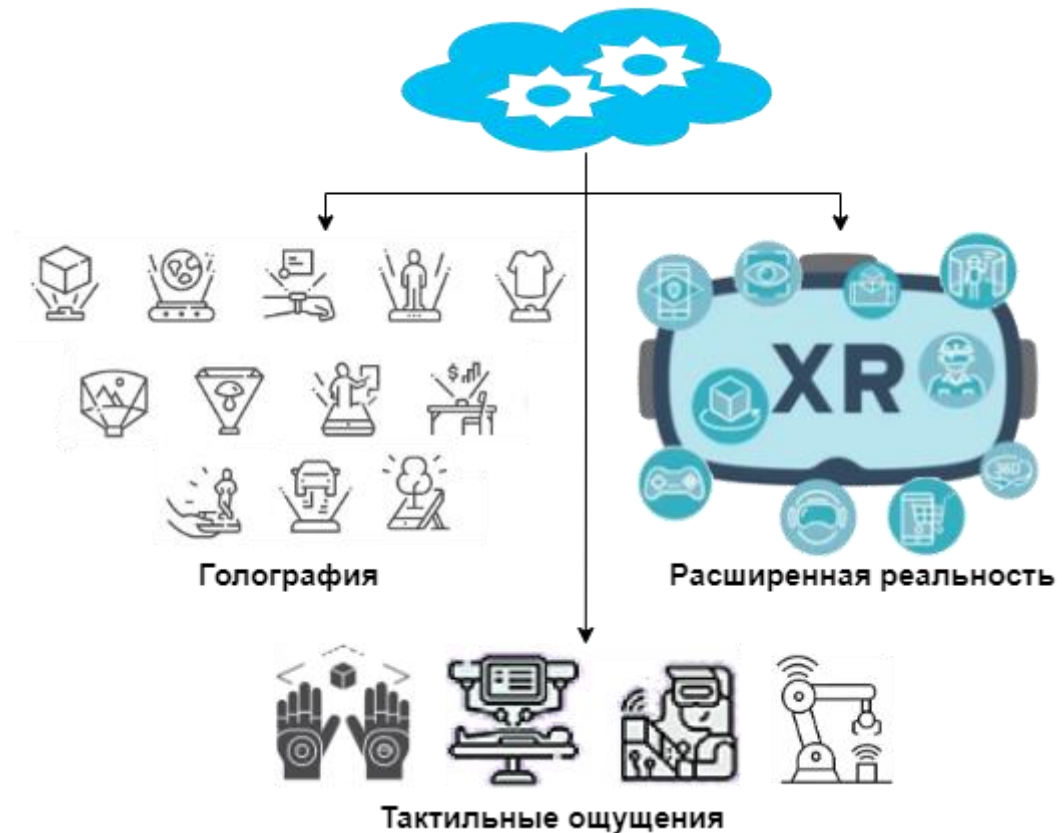


Рисунок 1.4 – Услуги телеприсутствия в 6G

Перспективы технологии 6G

В основе следующей телекоммуникационной революции 6G принесет возможности, далеко выходящие за рамки бизнес-моделей сети 5G, открывая новые перспективы для телеприсутствия. В этом разделе рассматриваются ключевые технологические разработки, которые сделают это возможным [11].

- Сверхнизкая задержка: устранение задержек

Задержка представляет собой временной интервал, требуемый для передачи данных между двумя терминальными устройствами. В контексте услуг телеприсутствия она должна быть минимизирована для обеспечения естественного общения в режиме реального времени. Применение технологий 5G сократило задержку до уровня миллисекунд, 6G может снизить ее до микросекунд, то есть до 1000 раз быстрее. Такое время задержки позволяют осуществлять виртуальную мгновенную связь, когда люди на противоположных концах света могут вести разговоры или заниматься делами, не замечая никаких задержек [11].

Внедрение усовершенствованной системы телеприсутствия позволит полностью исключить задержки и прерывания, которые сегодня мешают качественной видеосвязи и удалённому взаимодействию. Особенно критично это в ситуациях, требующих мгновенной реакции, — например, в телемедицине или при проведении дистанционной диагностической хирургии, где подобные сбои могут привести к серьёзным последствиям [11]. При задержках на уровне микросекунд становится возможной дистанционная хирургия: хирург на одном континенте управляет роботизированной рукой на другом, работая в режиме реального времени. Такой подход гарантирует более высокое качество медицинской помощи за счёт точности и оперативности действий [12].

- Высокие скорости передачи данных: оживляем голограммы

Возможность передачи больших объемов данных в режиме реального времени является еще одним краеугольным камнем технологии 6G. В то время как 5G может поддерживать скорость в гигабиты в секунду, 6G, как ожидается, достигнет скорости до 1 терабита в секунду. Это увеличение пропускной способности данных откроет возможность обмена сложными данными высокого разрешения, которые образуют основу удаленного доступа [10, 11].

Такие высокие скорости передачи данных позволят осуществлять бесшовную голографическую связь, позволяя передавать 3D-изображения людей в реальном времени с естественными движениями. Это сопряжено с обработкой больших объемов данных включая 3D-изображения, текстуру, свет и аудиотрансляцию в реальном времени. Воспроизведенные на терабитных скоростях голограммы не только выглядят как живые, но и естественным образом взаимодействуют с окружающей средой [11].

- **Расширенные возможности подключения: создание сетевого мира**

Технологии сетей 5G заложили основу для подключения миллиардов устройств, технологии 6G поднимут это на новый уровень, поддерживая более чем в 10 раз большее количество устройств на квадратный километр [12]. Это позволит легко интегрировать несколько устройств в системы телеприсутствия. Для создания эффекта полного погружения в системе телеприсутствия требуется одновременная совместная работа нескольких датчиков, камер и комбинированных устройств. Улучшенные возможности подключения обеспечат возможность взаимодействия всех этих устройств без прерываний или задержек [12].

Расширенная связь 6G также позволит создавать плотные многопользовательские удаленные среды. Целые группы людей из разных уголков мира могут объединяться в общем виртуальном пространстве для совместных динамичных проектов, будь то деловые встречи, образование или развлечения [12].

Опыт погружения в телеприсутствие: новое определение присутствия и расстояния

В эпоху 6G удаленность выйдет за рамки нынешних границ, превратившись в полностью захватывающие впечатления, которые смешивают цифровой и физический миры. Объединяя технологии расширенной реальности (XR), включая дополненную реальность (AR), виртуальную реальность (VR) и смешанную

реальность (MR), удаленная реальность 6G предопределил концепцию расстояния, сделав ее ненужной во многих приложениях [12,13].

- Голографическая коммуникация: превращение виртуального взаимодействия в реальность

Одним из наиболее перспективных применений технологии 6G в сфере телеприсутствия станет голографическая связь. В отличие от традиционных видеозвонков, где участники видны на плоском экране, голографическое телеприсутствие позволит людям представлять себя в виде визуализированных 3D-голограмм и создавать участие и присутствие которые ранее были невообразимы [13].

С точки зрения эксплуатации голографические встречи позволяют участникам сидеть за виртуальным столом, где они могут видеть и взаимодействовать друг с другом, как если бы они были физическими. Мимика, жесты и язык тела — то, чего часто не хватает в видеоконференциях — прекрасно видны, что делает разговоры более аутентичными и продуктивными. Это окажет значительное влияние на отрасли, где личный контакт является ключевым, такие как дипломатия, юридические транзакции и корпоративные встречи высокого уровня [13].

- Расширенное сотрудничество: удаленная работа без границ

6G принесет новое измерение в удаленное сотрудничество, особенно в средах, требующих непосредственного взаимодействия со сложными физическими объектами или данными. Используя передовые технологии XR, команды, находящиеся на разных континентах, смогут работать вместе в виртуальных сообществах так, как если бы они были физическими рядом [14].

Те, кто работает в таких отраслях, как проектирование и дизайн, могут манипулировать 3D-моделями продуктов в реальном времени, корректировать и немедленно видеть результаты работы. Это упростит процесс, снизит потребность в физических прототипах и ускорит итерации. Например, архитекторы и

инженеры, работающие над строительным проектом, могут встретиться на строительной площадке, просмотреть 3D-модели здания и корректировать в реальном времени, обсуждая изменения, как если бы они все находились в одной комнате [14].

Хирурги могут эффективно сотрудничать в сфере здравоохранения, работая с 3D-моделями анатомии пациентов: корректируя их, отрабатывая этапы операций и обмениваясь лучшими практиками в режиме реального времени. Это позволит преодолеть географические барьеры, донести передовые медицинские знания до отдалённых регионов и обеспечить равный доступ к современным методам лечения [13 ,14].

- **Персональные устройства погружения**

Появление персонализированных иммерсивных устройств, таких как датчики на запястьях, одежда для всего тела и, возможно, даже интерфейсы мозг-компьютер, сыграет важную роль в выводе удаленного присутствия на новый уровень и даст возможность ощутить прикосновения [14].

Например, браслеты позволят пользователям чувствовать форму, вес и очертания объектов, делая взаимодействие с отдаленными местами более естественным и инклюзивным. Костюмы, закрывающие все тело, могут создавать давление, тепло и даже ощущение ходьбы в виртуальной среде. Интерфейсы мозг-компьютер, пока еще находящиеся на ранних стадиях разработки, могут однажды позволить пользователям управлять виртуальными объектами и средами с помощью своего воображения, а различие между физическим и цифровым опытом станет все более размытым [14].

Приложения за пределами коммуникации: новая эра телеприсутствия

Хотя телеприсутствие часто ассоциируется с сетевым взаимодействием, в эпоху 6G его применение выйдет за рамки этого, преобразуя такие отрасли, как здравоохранение, образование, технологии автоматизации и развлечения [15].

- **Здравоохранение: удаленный мониторинг и хирургия**

Сфера здравоохранения может стать одним из крупнейших бенефициаров удаленных услуг, которые в перспективе будут предоставлять технологии 6G. Удаленное консультирование, диагностика и хирургия будут преобразованы возможностями 6G. Голографическое телеприсутствие позволит врачам консультировать с пациентов в удаленных регионах в режиме реального времени, просматривать 3D-голограммы тела пациента в высоком разрешении и поставить точный диагноз [10, 15].

Кроме того, дистанционно управляемые роботизированные системы дадут хирургам возможность выполнять сложные процедуры. Благодаря тактильной обратной связи врачи смогут ощущать сопротивление и форму тканей — это обеспечит необходимый уровень точности и контроля, который ранее был недостижим без непосредственного физического контакта [15].

- **Образование: погружающие среды обучения**

Удаленный доступ к возможностям 6G кардинально изменит сферу образования. Студенты смогут посещать виртуальные классы, взаимодействовать с голографическим изображением преподавателей и однокурсников, проводить практические эксперименты в виртуальных лабораториях, а также совершать экскурсии в формате виртуальной реальности — например, по историческим местам или научным объектам [15].

Телеприсутствие в образовании обеспечит высокоинтерактивный и иммерсивный опыт обучения, не ограниченный географией или инфраструктурой. Например, уроки истории позволяют студентам фактически посещать древние руины, где они могут изучать 3D-реконструкции и консультироваться с экспертами, при этом чувствуя себя физически присутствующими в этом месте [15].

- **Промышленная автоматизация: удаленная эксплуатация и обучение**

Для предприятий, которые полагаются на взаимодействие людей и машин, 6G обеспечит беспрецедентный уровень удаленной поддержки, обучения и

совместной работы на производстве. Работники смогут получать рекомендации в режиме реального времени от удаленных экспертов, которые могут использовать голографическое телеприсутствие для демонстрации процедур, решения проблем или удаленного управления устройствами [15].

Телеприсутствие также сыграет важную роль в обучении сотрудников выполнению сложных задач, а виртуальное моделирование обеспечит безопасную и контролируемую среду для практики. Сочетание голографических интерфейсов и устройств тактильной обратной связи позволяет обучаемым создавать практические задания, имитирующие условия реального мира, повышая уровень овладения навыками и уверенности в себе.

- **Развлечения: интерактивные впечатления**

В сфере развлечений произойдет революция от внедрения услуг телеприсутствия на базе сетей 6G, предоставляя новый интерактивный опыт, который стирает грань между реальным и виртуальным миром. Например, на концертах могут быть голографические дисплеи, где фанаты могут взаимодействовать с артистом и даже своими действиями влиять на развитие событий. Симуляция позволила фанатам участвовать из дома, переживая игру так, как будто она была на поле [14, 15].

Эти впечатления сделают развлечения более динамичными, увлекательными и личными, предоставив любителям острых ощущений возможность быть активными участниками действий [15].

Аудитория. В виртуальном мире игроки могли взаимодействовать с персонажами, объектами и друг с другом так, что ощущения казались почти осязаемыми — это создавало захватывающий игровой опыт, вызывающий искренний интерес [15].

Проблемы и соображения: на пути к будущему телеприсутствия

Для реализации огромного потенциала телеприсутствия в полной мере, необходимо решить множество проблем. Эти проблемы варьируются от

инфраструктуры и проблем в обеспечении безопасности, до социальных и этических соображений:

- Ограничения на широкополосную передачу данных

Ограничения полосы пропускания широкополосной связи влияют на передачу данных в службах телеприсутствия 6G, потенциально влияя на качество воспроизведения и удобство работы с пользователем [16].

Анализ ограничений: недостатком широкополосной передачи данных является то, что для правильного воспроизведения видео высокой четкости, например, 4K и 8K, требуется большая пропускная способность [16].

Решение: технологические разработки в области сжатия данных, включая JPEG, PNG, H.265, FLAC и оптимизацию потокового контента, могут снизить потребность в широкополосной передаче данных при сохранении высокого качества воспроизведения [11].

- Управление ресурсами и масштабируемость

Требование к системам телеприсутствия поддерживать миллионы одновременных пользователей повышает планку масштабируемости и управления ресурсами [16].

Проблема масштабируемости: поддерживать эффективность и стабильность сети становится все труднее по мере увеличения числа пользователей.

Проблема управления ресурсами: Одной из основных проблем является эффективное распределение ресурсов, таких как вычислительная мощность и пропускная способность.

Решение: создание алгоритмов динамического масштабирования и максимальное управление ресурсами за счет использования облачных вычислений и технологий сетевой виртуализации [11,16].

- Совместимость с различными системами и устройствами

Растущее разнообразие платформ и устройств означает, что службы телеприсутствия должны обеспечивать бесперебойную работу.

Проблема взаимодействия: к различным устройствам предъявляются различные технологические требования, что может привести к несовместимости и негативно сказаться на работе пользователей.

Решение: создание универсальных интерфейсов, стандартизация протоколов взаимодействия и адаптация технологий к конкретным платформам и устройствам [11,16].

Для создания надежных, масштабируемых и безопасных служб телеприсутствия в 6G инженеры, разработчики и эксперты по безопасности должны тесно сотрудничать, чтобы эффективно преодолевать эти проблемы [12].

- Нехватка спектра

Основным препятствием на пути внедрения сетей 6G является ограниченный объем спектра, доступного для беспроводной связи. Терагерцовые (ТГц) диапазоны, которые охватывают диапазон от 300 ГГц до 3 ТГц, иногда называют диапазонами экстремально высоких частот (КВЧ), и именно здесь, как ожидается, будут функционировать сети 6G [17]. Эти частоты обеспечивают огромную полосу пропускания и малую задержку, но также подвержены значительным потерям при распространении, атмосферному поглощению и помехам. Чтобы преодолеть эти препятствия, сетям 6G потребуется использовать передовые технологии, такие как massive MIMO, формирование луча и интеллектуальные отражающие поверхности, для улучшения покрытия и качества сигналов [17].

- Энергоэффективность

Сети 6G потребуют огромных объемов передачи и обработки данных, что приведет к потреблению большого количества электроэнергии и выделению большого количества тепла [16]. Кроме того, сети 6G должны будут поддерживать различные приложения и сервисы, такие как дополненная реальность, виртуальная реальность, голографическая связь и искусственный интеллект, что потребует повышенного уровня производительности и качества обслуживания. Для преодоления этих препятствий сетям 6G потребуются экологически чистые и

устойчивые решения, такие как сбор энергии, беспроводная передача электроэнергии, пограничные вычисления и разделение сетей [17].

- Стандартизация и регулирование

Сети 6G сформируют сложную экосистему, включающую операторов связи, производителей устройств, поставщиков услуг, органы регулирования и пользователей, каждый участник этой экосистемы будет иметь свои интересы и ожидания. Кроме того, что сети 6G должны соответствовать ряду технических, юридических, этических и социальных норм и стандартов, таких как распределение спектра, совместимость, качество обслуживания, защита данных и права человека [15], они должны будут обеспечить прозрачную и адаптируемую основу для стандартизации и регулирования в дополнение к поощрению сотрудничества и координации между различными заинтересованными сторонами для преодоления возникающих трудностей во внедрении и эксплуатации [15, 17].

- Развитие инфраструктуры: создание новых связей

Потребуется разработать масштабную инфраструктуру для поддержки высоких скоростей передачи данных, низкой задержки и высоких требований к подключению, предъявляемых услугами телеприсутствия к сетям 6G. Это включает в себя развертывание новых вышек сотовой связи, оптоволоконных сетей и инфраструктуры пограничных вычислений. Строительство и обслуживание этих инфраструктур потребует партнерства между правительством и частным сектором, что потребует существенных инвестиций [17].

Кроме того, во многих частях мира, особенно в развивающихся странах, могут возникнуть трудности с созданием инфраструктуры, необходимой для перехода на 6G. Это может привести к "цифровому разрыву", когда одни регионы мира выиграют от улучшения охвата услугами телеприсутствия, в то время как другие останутся позади. Обеспечение точной доступности технологии 6G станет серьезной проблемой для политиков и лидеров отрасли [18].

- Безопасность и конфиденциальность: защита персональных данных

Службы телеприсутствия будут обрабатывать огромное количество конфиденциальной личной информации, частные разговоры и общение в режиме реального времени, включая биометрические данные. Обеспечение безопасности и конфиденциальности этих данных становится первостепенным, влияет на доверие пользователей и предотвращает утечку данных или несанкционированное их использования [17].

Для защиты пользовательских данных потребуются надежные протоколы шифрования, безопасные методы передачи данных и строгие правила. Кроме того, вещательные компании Телеприсутствия должны четко представлять, как они будут собирать, использовать и хранить данные, чтобы устранить растущие опасения по поводу цензуры и конфиденциальности [18].

- **Этика и общественное влияние: ориентируясь в новых реалиях**

По мере того, как телеприсутствие становится все более вовлеченным в повседневную жизнь, возникают этические вопросы о его влиянии на общество. Например, способность имитировать взаимодействия, похожие на жизнь, посредством телеприсутствия может повысить аутентичность отношений, потенциал изоляции и психологические эффекты длительного воздействия окружающей среды как результата реальности [17,18].

Кроме того, мобильная активность может нарушить работу традиционных предприятий и рынков труда, особенно в таких областях, как путешествия, гостиничный бизнес и розничная торговля, которые часто требуют физического присутствия. Специалистам по планированию и бизнес-лидерам необходимо учитывать социальное воздействие этих видов деятельности и негативные последствия больших преимуществ технологии телеприсутствия. Необходимо будет разработать меры по их сокращению [18].

Подводя итог отмечу, что технологии сетей 6G откроют новую эру телеприсутствия, преобразуя наше общение, сотрудничество и восприятие мира вокруг нас. Обещая чрезвычайно низкую задержку, высокую скорость передачи

данных и улучшенную связь, телеприсутствие в сетях 6G обеспечит полностью иммерсивные коммуникации, такие как преодоление барьеров расстояния и времени в жизни. Хотя проблемы все еще существуют, потенциальные преимущества услуг телеприсутствия в сетях 6G — от улучшения здравоохранения до образования в плане сотрудничества и качественно новых видов развлечений — огромны.

По мере подготовки к новой волне технологических инноваций становится очевидно: услуги телеприсутствия не просто изменяют способы нашего взаимодействия друг с другом, но и коренным образом повлияют на то, как мы взаимодействуем с окружающим миром, приближая эпоху бесшовного слияния цифрового и физического пространств.

1.3 Интеллектуальные пограничные вычисления: создание более интеллектуальных сетей

Быстрое развитие цифровых технологий привело к внедрению интеллектуальных пограничных вычислений. Этот подход меняет привычные представления об облачных вычислениях и раздвигает их границы: обработка данных теперь происходит ближе к месту их генерации. По мере развития Интернета вещей (IoT) растёт уровень взаимосвязанности устройств и систем. В этом контексте особое внимание уделяется концепциям, преимуществам, проблемам и перспективам интеллектуальных пограничных вычислений — они играют ключевую роль в формировании сетей будущего [19].

Понять интеллектуальные пограничные вычисления

По своей сути интеллектуальные пограничные вычисления представляют собой форму обработки данных децентрализованным способом, при которой вычислительные задачи обрабатываются в точке генерации данных или вблизи нее, известной как «граница» сети. Традиционные методы облачных вычислений имеют централизованные центры обработки данных, которые обрабатывают и

анализируют данные, собранные из нескольких источников. Однако, с учетом значительных достижений в области подключенных устройств и объемов данных, эта централизованная модель представляет такие проблемы, как высокая задержка, повышенное использование полосы пропускания и уязвимости в безопасности [19, 20].

Пограничные вычисления устраняют эти ограничения, распределяя вычислительные функции на пограничные устройства сети. Это многообразные устройства, от смартфонов и датчиков до маршрутизаторов, шлюзов и микроцентров данных. Локальная обработка информации снижает зависимость от облачных ресурсов и обеспечивает практически мгновенный отклик. [19].

Интеллектуальные пограничные вычисления выходят на новый уровень за счёт прямой интеграции технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) в периферийные устройства. Это даёт возможность проводить анализ данных в режиме реального времени и выполнять прогнозную аналитику без передачи задач на централизованные облачные серверы. Гибкость интеллектуальных носимых устройств повышает адаптивность сети к изменяющимся условиям [19].

Ключевые компоненты интеллектуальных пограничных вычислений:

1. Пограничные устройства: это аппаратные компоненты, отвечающие за сбор, обработку и анализ данных. В качестве пограничных устройств могут выступать самые разные технические решения: от простых датчиков IoT, отслеживающих параметры окружающей среды, до сложных систем — автономных дронов, промышленных роботов или интеллектуальных камер, которым необходима значительная вычислительная мощность непосредственно на месте эксплуатации. Цель заключается в том, чтобы обеспечить таким устройствам возможность обрабатывать данные и принимать решения локально, без необходимости обращаться к облачным сервисам [20].

2. Пограничный анализ: В данном случае предполагается применение методов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) к потоку данных непосредственно на месте. Это позволяет устройствам прогнозировать события и принимать решения локально, без передачи необработанных данных в облако. Такой подход экономит пропускную способность сети и обеспечивает своевременные, контекстно-ориентированные решения [20].

3. Пограничная инфраструктура: пограничная инфраструктура состоит из микроцентров обработки данных, шлюзов и сетевых компонентов, которые поддерживают операции по обработке данных близко к конечным пользователям. Эта распределенная архитектура поддерживает централизованные облачные серверы, локально обрабатывая задачи, которые требуют значительные затраты времени или полосы пропускания, сокращая задержку и сетевой “мусор” [20].

4. Связь: Поддержание надлежащего баланса между локальной обработкой данных и централизованным управлением требует постоянного подключения пограничных устройств к центральному облаку. Для обеспечения надёжного обмена данными в системах пограничных вычислений применяются высокоскоростные и стабильные сетевые протоколы, включая программно-определяемые сети (SDN), Wi-Fi 6 и 5G. Технологии сетевого управления, такие как пограничная оркестровка, необходимы для автоматизации распределения ресурсов и обеспечения оптимальной производительности распределенных систем при подключении дополнительных устройств [19, 20].

Преимущества интеллектуальных пограничных вычислений

Приложения, требовательные к задержкам и интенсивно использующие данные, предъявляют всё более высокие требования к инфраструктуре. Интеллектуальные пограничные вычисления (edge computing) позволяют удовлетворить эти потребности, обеспечивая повышение эффективности, безопасности и масштабируемости операций в различных отраслях и сценариях использования [21].

1. Снижение задержки:

Обработка данных в месте, близком к источнику, является одним из основных преимуществ пограничных вычислений. Пограничные вычисления значительно снижают задержку, устраняя необходимость отправлять данные для обработки на удаленные облачные серверы. Это особенно важно для таких приложений, как автономное вождение, игры в режиме реального времени, дополненная реальность (AR), удаленные операции и интеллектуальное производство, где необходим мгновенный отклик. В подобных ситуациях задержка даже в миллисекунды может привести к катастрофическим последствиям [21].

2. Оптимизированная пропускная способность и снижение перегрузки облака:

С распространением устройств IoT объем генерируемых данных резко возрос. Использовать полосу пропускания при отправке этих данных в облако для обработки — дорого и нерационально [20]. Пограничные вычисления уменьшают объем данных, которые необходимо отправить в облако, обрабатывая данные локально, что экономит полосу пропускания и снижает нагрузку на централизованные серверы. Такая эффективность полосы пропускания особенно полезна в условиях высокого спроса или ограничений полосы пропускания, включая удаленные местоположения или масштабные развертывания IoT [21].

3. Улучшенная конфиденциальность и безопасность данных:

Конфиденциальные данные могут обрабатываться локально с помощью пограничных вычислений, либо на самом устройстве, либо на близлежащем объекте [20]. Это помогает предприятиям эффективнее соблюдать требования нормативных актов о защите, например, такие как GDPR (Общий регламент по защите данных) и HIPAA (Закон о переносимости и подотчетности медицинского страхования) и соблюдать правила конфиденциальности, уменьшая раскрытие конфиденциальной информации во время передачи данных в облако. Оперативная обработка данных на границе сети снижает вероятность утечки

данных и повышает их общую безопасность в секторах, где обрабатываются конфиденциальные данные, таких как государственные службы, здравоохранение и финансы [21].

4. Энергоэффективность:

Можно оптимизировать общее энергопотребление сети, распределив вычислительные задачи между пограничными устройствами. Отправляя только самые важные данные в облако, интеллектуальные пограничные устройства могут работать более эффективно [20]. Они также могут использовать локализованные вычислительные ресурсы, что снижает энергозатраты, необходимые для крупномасштабной обработки данных в централизованных центрах обработки данных. Интеллектуальное принятие решений играет решающую роль в балансировании спроса и предложения на энергию в режиме реального времени в пограничных интеллектуальных сетях и системах возобновляемой энергетики, что повышает энергоэффективность и устойчивость [20, 21].

5. Масштабируемость:

Системы для интеллектуальных пограничных вычислений обеспечивают легко расширяемую масштабируемую архитектуру. Добавляя больше пограничных узлов по мере необходимости, пограничные системы обеспечивают постепенный рост, а не зависят от единой централизованной облачной инфраструктуры, которая может быть перегружена растущими объемами данных. Поскольку по мере роста спроса можно без особых усилий подключать больше датчиков или устройств, такая масштабируемость особенно выгодна в логистической цепочке поставок, проектах "умных городов" и промышленных приложениях интернета вещей (IoT) [21].

Проблемы интеллектуальных пограничных вычислений

Интеллектуальные пограничные вычисления имеют ряд преимуществ, но для их успешного внедрения необходимо решить ряд проблем [22].

1. Взаимодействие:

В контексте пограничных вычислений часто используются разнообразные устройства с уникальным оборудованием, программным обеспечением и протоколами связи. Одна из самых больших проблем — убедиться, что эти разрозненные гаджеты могут легко взаимодействовать и работать вместе. Несогласованные стандарты платформ и устройств затрудняют реализацию согласованных пограничных вычислительных систем. Еще многое предстоит сделать для создания общепромышленных стандартов, но работы в этом направлении уже ведутся [22].

2. Сложность управления и оркестровки:

Распределенная система пограничных устройств нуждается в сложных инструментах для обслуживания, мониторинга и координации. Способность одного пограничного узла функционировать как независимо, так и совместно с другими узлами усложняет отказоустойчивость, планирование задач и распределение ресурсов. Надежное функционирование децентрализованной сети зависит от эффективных фреймворков оркестровки и программного обеспечения для управления, однако эти инструменты также добавляют уровни операционной сложности [22].

3. Уязвимости безопасности:

Пограничные вычисления повышают конфиденциальность данных за счет хранения конфиденциальной информации вблизи от источника ее создания, одновременно создавая новые угрозы безопасности. Пограничные устройства подвержены физическим манипуляциям, незаконному доступу и кибератакам, поскольку они часто используются в удаленных или неконтролируемых условиях. Поскольку любое пограничное устройство может стать точкой входа для хакеров, для защиты распределенной сети устройств необходимы надежное шифрование, процедуры аутентификации и обнаружения угроз в режиме реального времени [22].

4. Ограничения ресурсов:

В отличие от крупных облачных центров обработки данных, пограничные устройства часто обладают ограниченными вычислительными мощностями, возможностями хранения данных и энергопотребления [20]. Управление аппаратными ограничениями пограничных устройств при одновременном удовлетворении требований к производительности сложных приложений, таких как аналитика на основе искусственного интеллекта, является сложной задачей. Решения для пограничных вычислений должны быть созданы таким образом, чтобы они хорошо работали в условиях этих ограничений, при этом не в ущерб полезности или надежности [22].

Применение интеллектуальных пограничных вычислений

Интеллектуальные пограничные вычисления имеют широкий спектр революционных применений в самых разных отраслях. Интеллектуальные пограничные вычисления создают новые возможности для инноваций, способствуя быстрому принятию решений и локальному реагированию [22, 23].

- Умные города:

Интеллектуальные пограничные вычисления используются в умных городах для мониторинга потребления энергии, состояния окружающей среды, общественной безопасности и схем дорожного движения в режиме реального времени. Пограничные вычисления позволяют быстрее реагировать на изменяющиеся условия, локально оценивая данные с сетевых датчиков и камер. Это улучшает все сферы жизни: от систем реагирования на чрезвычайные ситуации до управления мусором и уличного освещения [23].

- Здравоохранение:

Пограничные вычисления, которые необходимы для носимых медицинских устройств, телемедицины и удаленного мониторинга пациентов, производят революцию в сфере здравоохранения. Локальный анализ данных о состоянии здоровья, который стал возможен благодаря пограничным вычислениям, способствует более быстрой и точной диагностике, защищая при этом

конфиденциальность пациентов. Персонализированная медицина также совершенствуется с помощью пограничной диагностики на основе ИИ, которая предоставляет медицинским специалистам мгновенную информацию о состоянии пациентов [23].

- Производство и промышленность 4.0:

Пограничные вычисления помогают автоматизированным промышленным системам, контролю качества и предиктивному обслуживанию в производстве. Пограничные вычисления помогают фирмам предвидеть, когда оборудование может выйти из строя, экономя дорогостоящее время простоя и гарантируя более эффективные производственные процессы. Это происходит за счет анализа данных с оборудования в режиме реального времени. Это имеет решающее значение в Индустрии 4.0, поскольку интеллект и автоматизация необходимы для успешной работы [23].

- Автономные транспортные средства:

Одна из важных функций интеллектуальных пограничных вычислений находится в автономных транспортных системах. Для принятия решений о вождении эти автомобили должны мгновенно оценивать огромные объемы данных с датчиков, камер и систем GPS. Автономные автомобили могут быстрее реагировать на изменения в своем окружении, избегать препятствий и защищать пассажиров, обрабатывая данные на границе сети [23].

- Розничная торговля:

Пограничные вычисления облегчают эффективное управление запасами и индивидуализированный опыт покупок в розничной торговле. Розничные торговцы могут предоставлять целевые акции, улучшать навигацию в магазине и гарантировать, что запасы пополняются на основе данных о продажах в реальном времени, обрабатывая данные потребителей локально.

Пограничная аналитика (edge analytics) повышает эффективность интеллектуальных зеркал и интерактивных дисплеев в розничной торговле, способствуя улучшению взаимодействия с покупателями [23].

Будущие направления

У интеллектуальных пограничных вычислений впереди большое будущее благодаря технологическому прогрессу и растущей потребности в быстродействующих сетях реального времени. Следующие основные тенденции будут влиять на развитие пограничных вычислений в будущем [23, 24]:

1. Интеграция 6G:

Конвергенция сетей 6G еще больше преобразует пограничные вычисления, расширяя инновации, представленные сетями 5G. Перспективы еще более низких задержек, большей пропускной способности и улучшенной надежности, которые несет 6G, откроют новые возможности для интеллектуальных пограничных вычислений, которые никогда ранее не были возможны. В сети связи следующего поколения пограничные системы смогут бесперебойно обрабатывать жизненно важные приложения, такие как беспилотные автомобили, удаленные операции и захватывающие AR/VR-опыты, которые крайне чувствительны к задержке при передаче данных. Будущее пограничных вычислений будет определяться сверхбыстрыми скоростями и улучшенными возможностями 6G, которые расширят возможности проведения операций в реальном времени с большим объемом передаваемых данных [24].

2. Достижения в области ИИ и МО:

Сложность внедрения технологий искусственного интеллекта и машинного обучения в пограничные вычисления будет возрастать по мере их дальнейшего развития. Улучшенное распознавание изображений и обработка естественного языка — это две самые сложные задачи, которые смогут решать будущие пограничные системы, открывая широкий спектр автономных приложений в различных секторах экономики. Эти разработки также будут способствовать

созданию пограничных устройств, которые смогут учиться на своем опыте и постоянно улучшать свою функциональность, используя данные в реальном времени [25].

3. Конвергенция пограничных облаков:

По мере того, как пограничные и облачные вычисления объединяются в более целостную гибридную парадигму, становится все труднее проводить различия между ними. Будущие разработки должны обеспечить более плавную интеграцию облачной и пограничной инфраструктур, при этом рабочие нагрузки будут динамически распределяться между ними в зависимости от сетевых условий. Используя эту гибридную архитектуру пограничного-облака, предприятия смогут достичь идеального баланса между стоимостью, масштабируемостью и производительностью [25].

4. Стандартизация и совместимость:

Необходимо будет создать стандартизированные фреймворки и протоколы, которые гарантируют совместимость между платформами и устройствами, чтобы интеллектуальные пограничные вычисления стали широко использоваться. Установление этих стандартов уже является предметом общепромышленной деятельности, и они будут иметь важное значение для упрощения внедрения и администрирования пограничных вычислительных систем [24, 25].

В заключение хочется отметить, перемещая обработку данных ближе к границе сети, где эти данные генерируются, интеллектуальные пограничные вычисления преобразуют сети. Эти изменения позволяют создавать масштабируемые системы, которые могут удовлетворять растущие потребности современных приложений, а также снижать задержку, оптимизировать пропускную способность и повышать безопасность. Интеллектуальные пограничные вычисления стимулируют инновации в широком спектре отраслей, включая производство, здравоохранение, автономные автомобили и умные города. Перспективы развития пограничных вычислений практически безграничны — их

дальнейший рост обеспечивается непрерывным совершенствованием технологий 5G, искусственного интеллекта, а также конвергенцией облачных и пограничных решений. По мере продвижения к более связанному и интеллектуальному миру, внедрение интеллектуальных пограничных вычислений позволяет компаниям открывать новые пути развития и добиваться более высокой эффективности, укрепляя свои позиции на рынке.

1.4 Интеграция 6G, телеприсутствия и интеллектуального пограничного пространства: целостный подход

В результате быстрого развития технологий кардинально меняется наша возможность подключения, общения и взаимодействия с окружающей средой. В авангарде этих изменений стоят будущие технологии: интеллектуальные пограничные вычисления, телеприсутствие и 6G. В целом их потенциал способен кардинально преобразовать целые отрасли и общество в значительно большей степени. Каждая из них сама по себе является значительным достижением [25, 26].

С точки зрения скорости, подключения и надёжности 6G способен кардинально преобразовать сферу беспроводной связи и выйти далеко за существующие пределы. В число его заявленных характеристик входят: задержка на уровне микросекунд, сверхвысокая пропускная способность и скорость передачи данных до 1 терабита в секунду (Тбит/с) [26]. Это откроет доступ к ранее недостижимым уровням эффективности связи и позволит реализовать сценарии использования 5G, которые сегодня ещё невозможны — например, захватывающие приложения виртуальной и дополненной реальности (VR/AR) и голографическую связь в режиме реального времени. Благодаря этим разработкам 6G станет краеугольным камнем предстоящей волны цифровой трансформации.

Традиционные определения телеприсутствия как вида удаленной коммуникации быстро расширяются за пределы голосовых разговоров и

видеоконференций [26]. С помощью сетей 6G телеприсутствие станет мультисенсорным, иммерсивным и почти неотличимым от личных встреч. Благодаря голографии, 3D-рендерингу в реальном времени и интеграции тактильной обратной связи, которая обеспечивает тактильные ощущения и даже имитацию запаха и температуры, пользователи смогут «присутствовать» в отдаленных местах. Этот технологический прогресс значительно улучшит опыт в бизнесе (через виртуальные встречи), образовании (через виртуальные классы), здравоохранении (через удаленную хирургию) и развлечениях (через иммерсивные игры и концерты) [26, 27].

Вместо того чтобы полностью зависеть от централизованных облачных серверов, интеллектуальные пограничные вычисления перемещают мощность обработки данных на основе ИИ ближе к источнику или «границе» сети. С помощью этой распределенной стратегии эффективность приложений в реальном времени повышается, использование полосы пропускания оптимизируется, а задержка уменьшается. Используя модели машинного обучения, обученные на локальных данных, интеллектуальные пограничные устройства могут предоставлять индивидуальные услуги, локально оценивать информацию и быстро реагировать на вводимые пользователем данные [27]. Это важно, поскольку даже небольшие задержки в обработке данных могут испортить захватывающий опыт в приложениях телеприсутствия. Поскольку конфиденциальные данные могут обрабатываться и анализироваться локально, пограничные вычисления также улучшают конфиденциальность и безопасность, снижая вероятность раскрытия во время передачи [27].

Ожидается, что сочетание интеллектуальных пограничных вычислений, телеприсутствия и 6G станет одним из самых революционных технологических слияний за последнее время. Такое сочетание технологий позволит сформировать новую парадигму взаимодействия между цифровым и физическим мирами, а также задаст вектор развития будущих коммуникаций. Объединение этих трех

столпов имеет решающее значение для создания более иммерсивных, интеллектуальных и отзывчивых сред, поскольку передовые коммуникационные сети становятся все более важными для общества предприятий [27].

Синергия между 6G, телеприсутствием и пограничной интеллектуальной

Синергия между технологиями, которая позволяет каждой из них улучшать другую, обеспечивая лучшую производительность и эффективность, лежит в основе этой интеграции. Чтобы в полной мере реализовать преимущества их взаимодействия, необходимо понять эту синергию [28].

- **6G как средство повсеместного подключения:**

Основная функция 6G — предложить сверхбыструю и сверхнадежную коммуникационную сеть с низкой задержкой, которая лежит в основе интеллектуальных пограничных вычислений и телеприсутствия. Ожидается, что 6G с задержкой, измеряемой в микросекундах, и скоростью в 100 раз выше, чем у 5G, откроет такие приложения, как голографическое телеприсутствие и тактильный интернет, требующие мгновенной реакции [27]. Взаимодействие с помощью телеприсутствия будет неотличимо от личных встреч из-за огромных скоростей передачи данных, необходимых для передачи высококачественных изображений, тактильной обратной связи и звука в реальном времени. Более высокая пропускная способность 6G, работающая на терагерцевых (ТГц) частотах, справится с этими требованиями [28].

- **Телеприсутствие как новая реальность взаимодействия:**

С помощью разработок 6G телеприсутствие выйдет за рамки речи и двухмерных видеоконференций, чтобы охватить полностью захватывающие впечатления [27]. Высококачественные 3D-фильмы и голографические проекции станут возможны с 6G, в то время как тактильные гаджеты и интеллектуальные датчики смогут передавать сенсорные данные, такие как температура, прикосновение и даже запах. Будь то деловая встреча, общественное мероприятие

или медицинская консультация, эти захватывающие среды позволят пользователям участвовать в настоящих виртуальных взаимодействиях. Таким образом, телеприсутствие произведет революцию в таких сферах жизни, как образование и здравоохранение, где врачи смогут работать удаленно и получать обратную связь в реальном времени, а студенты смогут отправляться на реалистичные виртуальные полевые экскурсии [28].

- **Интеллектуальные пограничные вычисления как локализованный мозг:**

Распределяя вычислительные ресурсы ближе к конечному пользователю, интеллектуальные пограничные вычисления значительно сокращают необходимость передачи данных туда и обратно между центральными облачными серверами, повышая уровень эффективности этой системе. Благодаря своей способности быстрее обрабатывать данные, минимизировать задержку и предоставлять более отзывчивые услуги, пограничные вычисления необходимы для систем телеприсутствия в реальном времени [27]. Кроме того, пограничные устройства с возможностями ИИ позволяют им оценивать сенсорный ввод, принимать решения в реальном времени и подстраиваться под поведение пользователя, не дожидаясь команд из удаленных центров обработки данных. Например, пограничный сервер может мгновенно оценивать данные медицинских датчиков в удаленном хирургическом сценарии и вносить изменения за доли секунды, чтобы обеспечить бесперебойную работу [28].

Проблемы интеграции

Несмотря на то, что объединение 6G, телеприсутствия и пограничных вычислений имеет много преимуществ, все еще есть несколько проблем, которые необходимо решить, прежде чем это видение может быть полностью реализовано. Эти трудности требуют творческих ответов на операционные, этические и технические проблемы [29].

- **Расходы на инфраструктуру и развертывание:**

Создание необходимой инфраструктуры является дорогостоящим и сложным, что является одним из самых больших препятствий для интеграции. Для управления высокочастотными волнами, которые легко поглощаются зданиями и другими физическими препятствиями, сетям 6G потребуется плотный массив крошечных вышек сотовой связи [28]. Кроме того, для того, чтобы гарантировать, что все пользователи имеют доступ к услугам с низкой задержкой, инфраструктура пограничных вычислений должна быть установлена по всей широкой географической области, охватывающей как городские, так и сельские районы. Большие суммы денег необходимо будет потратить как на программное обеспечение, так и на аппаратное обеспечение (такое как пограничные устройства, датчики и алгоритмы ИИ) для улучшения этой инфраструктуры [29].

- Управление спектром и распределение ресурсов:

Эффективное управление спектром имеет важное значение для функционирования сетей 6G, которые используют более высокие диапазоны частот, более восприимчивые к помехам. Становится все сложнее распределять ресурсы между связанными устройствами справедливым и эффективным образом, поскольку их число резко увеличивается [29]. Благодаря динамическому управлению ресурсами и полосой пропускания в зависимости от спроса в реальном времени интеллектуальные пограничные вычисления могут помочь снять часть этой нагрузки. Однако для этого необходимы продвинутые модели искусственного интеллекта (ИИ), которые могут предвидеть закономерности трафика и оптимизировать использование сети, без ущерба к качеству обслуживания [29].

- Вопросы безопасности и конфиденциальности данных:

Децентрализованная архитектура пограничных вычислений создает дополнительные проблемы конфиденциальности и безопасности данных. Данные более подвержены атакам, когда они обрабатываются на границе, ближе к конечному пользователю [29]. Для защиты конфиденциальных данных,

обрабатываемых службами телеприсутствия, таких как финансовые транзакции или медицинские записи, требуются надежные методы шифрования и защищенные протоколы. Кроме того, широкое использование камер и датчиков для телеприсутствия поднимает вопросы об эксплуатации и мониторинге данных, что требует необходимости в четких правилах конфиденциальности и четком законодательстве [29].

- Требования к задержке и обработке в реальном времени:

Обработка в реальном времени и чрезвычайно низкая задержка — это требования, которым должно соответствовать телеприсутствие для создания действительно захватывающих впечатлений. Хотя 6G обещает обеспечить необходимую скорость и пропускную способность, проблема заключается в том, чтобы пограничные компьютерные узлы могли быстро обрабатывать огромный объем поступающих данных. Чтобы гарантировать выполнение в реальном времени таких действий, как принятие решений, обработка сенсорного ввода и визуальный рендеринг, алгоритмы ИИ должны быть высоко оптимизированы. Это требует постоянного совершенствования программного обеспечения (например, облегченных моделей ИИ) и оборудования (например, специализированных ЦП для вывода ИИ) [28, 29].

Ключевые решения для бесшовной интеграции

Чтобы преодолеть эти препятствия и гарантировать плавную интеграцию 6G, телеприсутствия и интеллектуальных пограничных вычислений, разрабатывается несколько важных решений. К ним относятся [30, 31]:

- Управление сетью на основе искусственного интеллекта:

Для эффективного управления сложным взаимодействием, существующим между сетями 6G, пограничными вычислительными ресурсами и приложениями телеприсутствия, искусственный интеллект будет иметь решающее значение [30]. Искусственный интеллект (ИИ) способен прогнозировать пробки на дорогах, оптимизировать распределение ресурсов и гарантировать, что критически важные

приложения (например, удаленные медицинские процедуры или беспилотные автомобили) получают доступ к необходимой полосе пропускания и вычислительной мощности. Кроме того, алгоритмы машинного обучения способны постоянно учиться на сетевой активности, что постепенно повышает эффективность и производительность [31].

- Модели совместной работы Edge-Cloud:

Масштабируемость и эффективность будут достигаться гибридными моделями, включающими как облачные, так и пограничные вычисления, а не зависящими только от одной из них [30]. При таком методе чувствительные ко времени действия обрабатываются на границе, в то время как нечувствительные ко времени задания могут быть отправлены в облако. Этот кооперативный подход уменьшит нагрузку на облачную и пограничную инфраструктуру и позволит максимально эффективно использовать ресурсы. Например, операции по анализу больших объемов данных могут проводиться в облаке, но данные в реальном времени, необходимые для телеприсутствия, могут обрабатываться на границе сети для уменьшения задержки [30].

- Квантовые вычисления на границе сети:

Несмотря на то, что квантовые вычисления все еще находятся в зачаточном состоянии, они обладают потенциалом полностью преобразовать пограничные вычисления, предлагая скорости обработки на порядки выше. Квантовые компьютеры могут выполнять сложные задачи, такие как высокоскоростное шифрование для защищенных коммуникаций, предиктивная аналитика для умных городов и рендеринг 3D-изображений в реальном времени, как только они будут подключены к границе сети. Несмотря на то, что эта технология все еще находится на ранних стадиях исследований, ее потенциальное использование в сочетании с телеприсутствием и 6G может оказаться революционным [31].

- Блокчейн для безопасности данных:

Технология блокчейн может обеспечить безопасные и децентрализованные фреймворки для пограничных вычислений и управления данными служб телеприсутствия. Мы можем гарантировать, что личные данные не будут изменены или перехвачены, используя блокчейн для аутентификации и шифрования данных в каждой точке взаимодействия, от пограничных устройств до центральных серверов. Технология блокчейн может способствовать прозрачным процедурам аудита, предоставляя потребителям больший контроль над своими данными и возможность отслеживать их использование в любое время [31].

Потенциальные преимущества комплексного подхода

Значительные преимущества дает комплексная интеграция 6G, телеприсутствия и интеллектуальных пограничных вычислений в ряде сфер жизни [32]:

- **Улучшенный пользовательский опыт:** пользователи получают выгоду от более отзывчивых и захватывающих услуг телеприсутствия благодаря пограничным вычислениям и 6G, которые обеспечат необходимую скорость и пропускную способность. Пограничные вычисления в сочетании с технологией 6G обеспечат необходимую скорость и пропускную способность, благодаря чему пользователи получают доступ к более отзывчивым и захватывающим услугам телеприсутствия. Например, двумерные дисплеи уступят место полномасштабным 3D-голографическим взаимодействиям на виртуальных встречах, позволяя участникам общаться в полностью захватывающей обстановке, как если бы они находились в одной комнате [32].

- **Эффективность эксплуатации:** компании увидят повышение операционной эффективности, если внедрят эти интегрированные технологии. Например, данные в реальном времени, собранные с устройств IoT и проанализированные на границе умных фабрик, могут облегчить предиктивное обслуживание, что сокращает время простоя и повышает производительность. В

таких ситуациях системы телеприсутствия могут сэкономить время и средства, позволяя удаленным специалистам проверять и устранять неполадки оборудования без необходимости личных визитов [32].

- **Революция в здравоохранении:** интеграция имеет огромные потенциальные преимущества для сектора здравоохранения. Медицинские специалисты могут выполнять удаленные процедуры с почти мгновенным ответом благодаря системам телеприсутствия с поддержкой 6G, в то время как пограничные вычисления могут интерпретировать данные медицинской визуализации в реальном времени, чтобы помочь в диагностике. Это может сделать передовые медицинские методы лечения доступными в изолированных и труднодоступных местах, избавляя пациентов от необходимости преодолевать большие расстояния для получения специализированной помощи [31].

- **Умные города и IoT:** 6G, телеприсутствие и пограничные вычисления будут работать вместе в умных городах, обеспечивая администрирование в реальном времени и мониторинг жизненно важной инфраструктуры, включая коммунальные услуги, аварийные службы и транспортные системы. Интеллектуальные пограничные узлы обеспечивают более эффективное распределение ресурсов и более быстрое время реакции за счет локальной обработки данных с датчиков Интернета вещей. Например, для сокращения перерывов и повышения общественной безопасности пограничные системы искусственного интеллекта могут выявлять дорожно-транспортные происшествия или отключения электроэнергии и оперативно уведомлять соответствующие органы [31, 32].

1.5 Практические приложения и основные варианты использования

Сочетание интеллектуальных пограничных вычислений, технологий телеприсутствия и сетей 6G позволит создать революционные приложения, которые трансформируют такие отрасли, как здравоохранение, образование,

производство, индустрия развлечений и умные города. Такая интеграция позволит достичь ранее невиданных уровней эффективности, персонализации и взаимодействия в отрасли. Ниже приведен более подробный обзор некоторых наиболее важных вариантов использования, которые подчеркивают возможные эффекты этих конвергентных технологий [33, 50].

Здравоохранение: новая эра взаимосвязанной помощи

Совокупность телеприсутствия, интеллектуальных пограничных вычислений и 6G кардинально изменит отрасль здравоохранения. Персонализированная медицина выйдет на новый уровень благодаря возможности оказывать медицинские услуги в режиме реального времени на основе данных и искусственного интеллекта. Это повысит качество ухода за пациентами и сократит неравенство в доступе к экспертным знаниям [33, 34].

- Дистанционные операции и медицинская помощь с использованием телеприсутствия

Благодаря 6G хирурги смогут проводить точные операции на расстоянии в тысячи километров, управляя роботизированным оборудованием с помощью технологий телеприсутствия в режиме реального времени. Хирурги смогут проводить сложные операции, используя соединения со сверхнизкой задержкой, улучшенные тактильной обратной связью, которая воспроизводит давление и ощущения. На месте операции интеллектуальные пограничные устройства будут оценивать данные пациента и использовать аналитику на основе ИИ для предоставления информации о состоянии пациента в реальном времени, снижая вероятность возникновения проблем [34].

- Телемедицина и диагностический интеллект

Эти технологии, объединенные вместе, выведут телемедицину на новый уровень сложности. В ходе голографических консультаций пациенты будут взаимодействовать с врачами в трехмерной виртуальной обстановке. Высокая пропускная способность 6G предоставит возможность врачам принимать более

обоснованные решения благодаря изображениям высокого разрешения, а практически мгновенная диагностика будет осуществляться с помощью пограничных вычислительных устройств, которые локально обрабатывают такие параметры здоровья пациента, как частота сердечных сокращений, насыщение кислородом и даже данные секвенирования генома [34]. Это сократит пациенту время ожидания жизненно важной помощи, позволяя врачам назначать индивидуализированную терапию на основе результатов в режиме реального времени [34].

- **Носимые устройства для мониторинга здоровья и прогнозной аналитики**

Носимые устройства IoT, которые постоянно отслеживают показатели жизнедеятельности пациента и предоставляют данные на пограничные устройства для локального анализа, будут полезны для системы здравоохранения [34]. Большие объемы данных о состоянии здоровья могут анализироваться в режиме реального времени с помощью соединения 6G, информируя врачей и пациентов о ключевых событиях в области здоровья, таких как сердечные приступы или ранние предупреждающие симптомы заболеваний. Позволяя этим устройствам оперативно реагировать на отклонения, интеллектуальные пограничные вычисления позволяют создать проактивную систему здравоохранения, которая предотвращает кризисы, поддерживая организм человека в прогнозируемом состоянии [34].

Образование: будущее обучения

Ожидается, что благодаря сочетанию 6G, телеприсутствия и пограничных вычислений образование станет более персонализированным, захватывающим и увлекательным опытом. Эти технологии откроют новые возможности для образования и обучения, предоставив учащимся по всему миру больше возможностей, особенно в неблагополучных и сельских районах [35].

- **Виртуальные классы с эффектом погружения**

Представьте себе мир полностью иммерсивных 3D-виртуальных классов, где студенты посещают лекции и взаимодействуют с одноклассниками и преподавателями. Сверхвысокая пропускная способность 6G и технологии телеприсутствия сделают виртуальные настройки эффективным инструментом для вовлечения пользователей в процессы в режиме реального времени [35]. Студенты смогут посещать виртуальные научные лаборатории, исторические места и даже воспроизводить эксперименты с использованием технологии VR/AR. Интеллектуальные пограничные системы предоставят адаптивные обучающие платформы, которые оценивают прогресс каждого студента в реальном времени и изменяют задачи и учебные материалы в соответствии с их стилем обучения [35].

- Глобальное совместное обучение

Студенты из разных географических регионов смогут сотрудничать в условиях виртуального обучения, как будто они находятся в одной аудитории, благодаря телеприсутствию. 6G сократит языковые барьеры, включив системы перевода в реальном времени на базе искусственного интеллекта [35]. Пограничные вычисления персонализируют учебный опыт, адаптируя его к культурным и языковым предпочтениям учащихся, в какой-то степени связь демократизирует образование, делая его более доступным для студентов в слаборазвитых странах [35].

- Профессиональное обучение в области дополненной и виртуальной реальности

Благодаря реалистичным симуляциям дополненной и виртуальной реальности, системы телеприсутствия на базе 6G и пограничных вычислений позволяют студентам в программах профессиональной подготовки отрабатывать практические навыки [35]. В контролируемой обстановке студенты-медики могут проводить виртуальные операции, а будущие инженеры могут разбирать и перестраивать сложные аппараты в виртуальных мастерских. Эти симуляции будут снабжены обратной связью в реальном времени благодаря пограничным

вычислениям, что позволит получать оперативный опыт обучения, максимально приближенный к реальным ситуациям [35].

Производство: Рассвет умных фабрик

Чтобы превратить промышленный сектор в высокоавтоматизированную, управляемую данными экосистему, эти технологии должны быть интегрированы. Анализ данных в реальном времени и технологии телеприсутствия позволят умным заводам стать более производительными и эффективными за счет минимизации простоев и повышения самодиагностики. Эти заводы также будут более гибкими и эффективными [36].

- Удаленный контроль за работой завода и усовершенствованные операции с использованием телеприсутствия

Интерфейсы телеприсутствия, которые показывают вид деятельности в реальном времени, позволяют менеджерам фабрик контролировать несколько участков одновременно [36]. Они могут удаленно устранять неполадки, проверять производственные линии и помогать местным рабочим или автономным роботам со сложными задачами благодаря высокоскоростным возможностям 6G. Для того чтобы максимизировать производительность производства, пограничные вычислительные устройства на заводе будут постоянно оценивать данные с датчиков и оборудования. Это позволит принимать решения в реальном времени и проводить предиктивное обслуживание [36].

- Автоматизация и робототехника на основе пограничных технологий

Будущее производство будет основано на интеллектуальных роботах и автономных системах с подключением 6G и ИИ на границе сети. Эти системы не только будут выполнять монотонную работу, но и будут использовать обработку данных в реальном времени на границе для адаптации к меняющимся производственным требованиям. Например, роботизированные манипуляторы способны снизить потребность в участии человека: они автоматически переключаются между сборочными операциями, в реальном времени опираясь на

актуальные данные о потребительском спросе и проблемах в цепочке поставок [36].

- **Устойчивость и энергоэффективность**

Отслеживая использование ресурсов в режиме реального времени, промышленные процессы также будут оказывать меньшее негативное воздействие на окружающую среду [35]. Интеллектуальные пограничные системы найдут неэффективность в производственных процессах и оптимизируют потребление энергии на заводе, сокращая отходы. С использованием технологий телеприсутствия меры по обеспечению устойчивости могут проверяться удаленно, гарантируя соблюдение экологически чистых производственных принципов и облегчая переход к более цикличной экономике [36].

Развлечения: захватывающие впечатления и не только

По мере интеграции этих технологий индустрия развлечений выйдет на принципиально новый уровень: появятся захватывающие впечатления в реальном времени, объединяющие виртуальный и физический миры [36]. Технологии 6G, телеприсутствия и пограничных вычислений полностью изменят способы взаимодействия людей с информацией — от интерактивных концертов до виртуальных тематических парков [37].

- **Голографические концерты в реальном времени и виртуальные мероприятия**

Голографические концерты, в которых певцы проецируются в реальном времени в гостиные или общественные места по всему миру, будут проводиться бизнесом развлечений. Благодаря использованию 3D-телеприсутствия фанаты смогут виртуально присутствовать на этих мероприятиях и ощущать их так, как будто они находятся лично [37]. В то время как пограничные вычисления локализуют эти голографические проекции, чтобы предоставить индивидуальный опыт в зависимости от предпочтений аудитории, таких как углы обзора камеры и аудиообновление, сверхнизкая задержка 6G гарантирует, что эти события будут восприниматься в реальном времени без задержек [37].

- Интерактивные игры виртуальной реальности (VR)

Благодаря высокой пропускной способности сетей 6G многопользовательские игры приобретут новое измерение, которое позволит игрокам взаимодействовать в полностью реалистичных средах виртуальной реальности, где действия и ответы происходят мгновенно. Динамически изменяя ландшафты, препятствия и сюжетные линии в ответ на действия игрока, AI будет настраивать игровой опыт. Позволяя игрокам общаться друг с другом через реалистичные аватары, телеприсутствие еще больше улучшит этот опыт и будет способствовать более социальной и динамичной игровой среде [37].

- Виртуальные тематические парки и живой VR-туризм

Благодаря технологиям иммерсивного телеприсутствия виртуальный туризм позволит пользователям познавать далекие города, природные чудеса или исторические места. Пользователи смогут взаимодействовать с достопримечательностями, кататься на виртуальных американских горках и даже исследовать подводные среды обитания, если бы целые виртуальные тематические парки транслировались в реальном времени через 6G [37]. Пограничные вычисления обеспечивают отзывчивость и адаптивность впечатлений: они доставляют контент в реальном времени с учётом ввода пользователя и позволяют переключаться между разными настройками или перспективами [37].

Умные города: подключенная инфраструктура и услуги для граждан

Городская инфраструктура будет переосмыслена за счет сочетания 6G, телеприсутствия и пограничных вычислений, что приведет к появлению гиперсвязанных умных городов, где данные в реальном времени будут влиять на выбор, улучшать общественные услуги и повышать уровень жизни [37].

- Телеприсутствие в городском планировании и общественных услугах

Интерфейсы телеприсутствия будут использоваться городскими планировщиками для надзора и контроля городской инфраструктуры, такой как

энергетические системы, транзит и аварийные службы. Они могут оценивать схемы движения, потребление энергии или экологические данные с пограничных датчиков, разбросанных по городу, используя трехмерные представления мегаполиса в реальном времени. Это позволит оперативно вносить изменения в общественные услуги, включая перенаправление движения, оптимизацию энергопотребления и развертывание аварийно-спасательных служб в нуждающихся регионах [37].

- Управление дорожным движением и автономные транспортные средства

Беспроводные сети 6G позволят умным городам создавать инфраструктуру для парка беспилотных автомобилей, которые смогут взаимодействовать в режиме реального времени с транспортной инфраструктурой. Для обеспечения безопасной и эффективной транспортной обстановки пограничные устройства, размещенные на перекрестках или автомагистралях, будут обрабатывать данные о транспортном потоке, погоде и движении пешеходов. Городские власти смогут контролировать и динамически изменять систему управления дорожным движением с помощью систем телеприсутствия, которые оптимизируют маршруты и снизят заторы на дорогах [37].

- Оптимизация энергопотребления и интеллектуальные сети

Энергосети смогут управляться в режиме реального времени с помощью интеллектуальных пограничных вычислений, что позволит сбалансировать спрос и предложение в режиме реального времени в соответствии с потребностями городских жителей. Непрерывный мониторинг моделей потребления энергии в городе станет возможным с 6G, что позволит более эффективно распределять ресурсы. Это уменьшит отходы и воздействие углерода на город, одновременно гарантируя, что электроэнергия будет распределяться там, где она больше всего нужна, например, во время аномальной жары или похолодания [37].

- Общественная безопасность и реагирование на чрезвычайные ситуации

Системы наблюдения на базе искусственного интеллекта в реальном времени, которые могут анализировать видеопотоки и выявлять любые угрозы или кризисы, будут полезны для общественной безопасности. Первые спасатели смогут оценить ситуацию с помощью телеприсутствия до прибытия на место происшествия, что приведет к более скоординированной и эффективной работе. Телеприсутствие также упростит аварийно-спасательным службам и центральным командным центрам связь в случае аварии или стихийного бедствия, гарантируя быстрое развертывание ресурсов и обновления в реальном времени [37].

1.6 Проблемы и будущие направления

Потенциальные преимущества интеграции 6G, телеприсутствия и интеллектуальных пограничных вычислений огромны, но есть несколько препятствий, которые необходимо преодолеть, прежде чем они будут полностью реализованы. Эти трудности варьируются от ограничений на технологии до моральных и правовых проблем [38]. В этом разделе будут рассмотрены основные препятствия, которые необходимо устранить, и представлен обзор будущих путей, по которым пойдут исследования и разработки [38].

Технологические проблемы

1. Требования к сетевой инфраструктуре и задержке

Разработка сетевой инфраструктуры, отвечающей строгим требованиям сетей 6G о сверхвысокой скорости передачи данных, минимальной задержке и поддержке огромного числа подключений, является одним из главных препятствий на пути к конвергенции этих технологий. Несмотря на достижения в этой области, текущая инфраструктура 5G не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к пограничным вычислениям и технологиям телеприсутствия в режиме реального времени. Увеличение количества подключенных к сети устройств ведет к экспоненциальному росту трафика данных. Сети 6G должны

будут справляться с этой нагрузкой, гарантируя задержку не более 1 мс. Для работы на этом уровне потребуется следующее [38, 39]:

- Плотное размещение базовых станций и точек доступа как в сельских, так и в городских районах.
- Создание технологии терагерцового (ТГц) диапазона частот, обеспечивающей достаточную полосу пропускания для сверхбыстрой передачи данных.
- Внедрение спутниковых сетей для обеспечения бесперебойного покрытия по всему миру, особенно в изолированных или слабо развитых регионах.

Для решения этих проблем потребуются значительные финансовые затраты на сетевую инфраструктуру, совместные усилия сетевых провайдеров и усовершенствования программного обеспечения и аппаратных систем [39].

2. Обработка и хранение данных на границе

Локальная обработка данных будет необходима по мере роста интеллектуальных пограничных вычислений, для снижения задержки уменьшения объема отправляемых данных на централизованные облачные серверы. При этом, пограничным устройствам придется управлять большим количеством наборов данных и все более сложными алгоритмами ИИ. Это создает серьезные проблемы в данном направлении [40, 41]:

- Энергоэффективность: крупномасштабная локальная обработка данных требует больше энергии, особенно в изолированных местах с нерегулярным доступом к надежным источникам энергии. Необходимо будет создать пограничные устройства и энергоэффективные алгоритмы, чтобы снизить воздействие этих систем на окружающую среду [40].
- Емкость для хранения: пограничным устройствам придется обрабатывать и хранить бесконечный поток данных с платформ телеприсутствия, датчиков Интернета вещей и других сетевых устройств. Одной из самых больших проблем

будет обеспечение этих устройств достаточным объемом памяти локального хранилища для быстрой обработки данных [40].

3. Взаимодействие и стандартизация

Интеграция 6G, телеприсутствия и интеллектуальных пограничных вычислений требует взаимодействия между устройствами, платформами и сетями. По мере развития этих технологий важно установить глобальные стандарты, которые позволят устройствам и системам разных производителей бесперебойно взаимодействовать. Это включает [41]:

- Разработку универсальных протоколов связи, позволяющих устройствам подключаться к различным сетям, включая 6G, Wi-Fi и спутниковые системы.
- Обеспечение обратной совместимости с устаревшими системами для предотвращения сбоев в работе существующих сетей и обеспечения плавного перехода на новые технологии.
- Решение проблемы разнородных устройств с различными возможностями обработки данных, подключения и хранения.

4. Вопросы безопасности и конфиденциальности

Строгие меры кибербезопасности становятся все более важными, поскольку телеприсутствие и пограничные вычисления становятся все более распространенными. Существует множество потенциальных рисков, связанных с пограничными вычислениями в силу их децентрализации, которые усиливаются в контексте систем телеприсутствия, генерирующих конфиденциальные данные, такие как медицинские записи и потоковое видео в режиме реального времени. Важные трудности состоят в следующем Основные затруднения, требующие внимания, представлены ниже [42, 43]:

- Шифрование данных: разработка облегченных методов шифрования, которые можно использовать на устройствах с ограниченными ресурсами, необходима для гарантии защиты данных, обрабатываемых на границе, от нежелательного доступа или манипуляций.

- Уязвимости сети: в сетях 6G необходимо будет предотвратить распределенные атаки типа «отказ в обслуживании» (DDoS), которые могут помешать работе пограничных вычислений или служб телеприсутствия.

Конфиденциальность пользователя: поскольку все больше личной информации обрабатывается на границе сети, чтобы избежать злоупотреблений или незаконного доступа и воздействия на передаваемые данные, потребуются строгие законы и моральные стандарты. Обезличивание данных и получение разрешений от пользователей станут важнейшими элементами защиты конфиденциальности.

Нормативные и этические проблемы

1. Распределение и управление спектром

Существующее недоиспользование терагерцового спектра, необходимого для сетей 6G, требует разработки новых правил его распределения и администрирования. Международные регулирующие организации и правительства должны организовать сотрудничество, чтобы гарантировать справедливое и эффективное использование этого диапазона спектра. Работа в данном направлении включает [44, 45]:

- Создание четких правил распределения спектра, особенно в густонаселенных городах, где будет значительный спрос на полосу пропускания.
- Организация международного управления спектром для обеспечения равномерного покрытия по всему миру и предотвращения споров.
- Нахождение баланса между потребностями простых людей, государственных организаций и частного бизнеса для обеспечения справедливого доступа к услугам 6G.

2. Этическое использование телеприсутствия и ИИ

Объединение пограничных вычислений на базе ИИ с телеприсутствием порождает этические дилеммы конфиденциальности, мониторинга и независимости. Ниже приведены ключевые моменты [44]:

- Видеонаблюдение: технологии телеприсутствия, например, такие как камеры видеомониторинга в реальном времени используемые для общественной безопасности в системах “умный город”, при внедрении требуют взвешенного подхода, для предотвращения нарушений личной конфиденциальности. Необходимы гарантии, что эти технологии не используются для несанкционированного мониторинга или отслеживания людей без их согласия, поэтому потребуются определенные правила и положения, регулирующие это направление.

- Предвзятость в системах ИИ: чтобы предотвратить предвзятость в процессах принятия решений, особенно в таких деликатных областях, как здравоохранение и правоохранительная деятельность, алгоритмы ИИ, установленные на границе, должны быть обучены на различных репрезентативных наборах данных. Подотчетность и прозрачность имеют важное значение для гарантии того, что системы ИИ функционируют морально и справедливо.

3. Смещение рабочих мест и перемещение рабочей силы

В ряде отраслей, включая промышленность, судоходство и обслуживание клиентов, сокращение рабочих мест является неизбежным следствием автоматизации, которая стала возможной благодаря интеллектуальным пограничным вычислениям и технологиям телеприсутствия. Сотрудничество между государственными и частными структурами будет необходимо для урегулирования вопросов по данной проблеме. Основные направления взаимодействия включают вопросы [45]:

- Разработки и реализации программ переподготовки, для подготовки сотрудников с качественно новым набором знаний и компетенций для решения задач в передовых направлениях, таких как пограничные вычисления, искусственный интеллект и управление системами телеприсутствия.

- Разработка нормативно-правовых актов, направленных на обеспечение получения выгоды от технологий автоматизации и телеприсутствия всех сотрудников в равной степени, для защиты и помощи людям, которых эти технологии могут заменить.

Будущие направления исследований и разработок

1. Достижения в области терагерцовых и квантовых технологий

Успех сетей 6G будет зависеть от развития квантовых технологий и терагерцовой связи. Квантовые технологии откроют новые возможности для безопасной связи и чрезвычайно быстрой обработки данных, в то время как терагерцовые частоты предоставят полосу пропускания сигнала, необходимую для высокопроизводительных приложений, таких как телеприсутствие и иммерсивные впечатления. Исследователям необходимо будет [45]:

- Изучить перспективы разработки и реализации приемопередатчиков, работающих на терагерцовых волнах, для эффективного приема и передачи данных на высоких частотах.

- Изучить, как квантовое распределение ключей (QKD), обеспечивающее непревзойденный уровень кибербезопасности, может использоваться для безопасной передачи данных по сетям 6G.

2. Оптимизация пограничного искусственного интеллекта для повышения энергоэффективности

Разработка энергоэффективных алгоритмов ИИ будет иметь решающее значение для устойчивой работы интеллектуальных пограничных устройств, особенно в удаленных местах. Это включает [46]:

- Создание маломощных схем искусственного интеллекта, способных выполнять сложные задачи в реальном времени, такие как анализ данных и принятие решений, потребляя при этом минимальное количество энергии.

- Изучение методов дальнейшего сокращения энергопотребления за счет минимизации непрерывной передачи данных между пограничными устройствами

и централизованными облачными серверами, таких как пограничное кэширование и федеративное обучение.

3. Проектирование, ориентированное на человека, в телеприсутствии

Развитие технологий телеприсутствия делает ещё более актуальным приоритет пользовательского опыта и доступности в дизайне, ориентированном на человека. Это направление включает [47,48]:

- Разработку интерфейсов телеприсутствия, которые являются захватывающими и удобными для пользователя, чтобы люди могли общаться друг с другом и виртуальными мирами естественным образом. Разработка интуитивно понятных и захватывающих интерфейсов телеприсутствия, позволяющих пользователям естественно взаимодействовать друг с другом и с виртуальными мирами.

- Обеспечение доступности вспомогательных технологий, позволяющих людям с ограниченными возможностями взаимодействовать с цифровой средой посредством систем телеприсутствия.

Долгосрочное видение

Создание полностью связанного общества, где каждый, независимо от местоположения, имеет доступ к взаимодействию в реальном времени, аналитическим данным и захватывающим впечатлениям, является долгосрочной целью конвергенции 6G, телеприсутствия и интеллектуальных пограничных вычислений. Это видение состоит из [49, 50]:

- Глобальная связь: по мере распространения сетей 6G они смогут обеспечить безупречное покрытие даже самых отдаленных уголков земного шара, гарантируя возможность реализации цифровой трансформации для всех.

- Устойчивые технологии: создание экологически чистых, энергоэффективных технологий, которые облегчают внедрение пограничных вычислений, телеприсутствия и 6G, не усугубляя глобальное потепление.

- Расширения возможностей человека: сочетание систем телеприсутствия, интерфейсов «мозг-компьютер» и носимых технологий для улучшения человеческих навыков и открытия новых возможностей взаимодействия между людьми и их цифровым и физическим окружением.

1.7 Выводы по Главе 1

В заключение следует отметить, что совместное развитие технологий 6G, телеприсутствия и интеллектуальных пограничных вычислений приведет к глубоким изменениям в отраслях, повседневной жизни и коммуникационных процессах.

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.

С внедрением технологий телеприсутствия и пограничных вычислений невероятно высокие скорости и низкая задержка 6G полностью преобразуют связь, обеспечивая иммерсивное взаимодействие в реальном времени, а также более интеллектуальные и эффективные сети. Интеграция этих технологий дает

множество преимуществ, однако имеются и недостатки. К ним относятся: необходимость в применении более жестких мер безопасности, создание энергоэффективных систем и улучшения сетевой инфраструктуры, а также этические вопросы и вопросы сохранения конфиденциальности данных и справедливости ИИ. Работа, проведенная по устранению указанных выше недостатков при внедрении новых, даст результаты в преобразовании повседневной жизни, здравоохранения, образования и промышленности, поскольку они объединяются, продвигая человечество к более технологически сложному, устойчивому и связанному будущему.

ГЛАВА 2 АРХИТЕКТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СЕТЕЙ 6G: РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И КОНВЕРГЕНЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ, ВОЗДУШНЫХ, НАЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

2.1 Распределенная архитектура интегрированной сети 6G.

Концептуальная архитектура сети связи 6G с охватом различных сетей, от морских до космических с использованием различных технологий для разных регионов [51, 58], представлена на Рисунок 2.1, где использованы следующие обозначения: FSO/RF (Free Space Optical/Radio Frequency) – оптическая и радиосвязь; ЦОД – центр обработки данных; HAPS (High Altitude Platform Station) – беспилотный летательный аппарат, работающий на высоте 20–50 км; GEO (Geostationary Earth Orbit) – геостационарная околоземная орбита; LEO (Low-Earth Orbit) – низкая околоземная орбита [51].

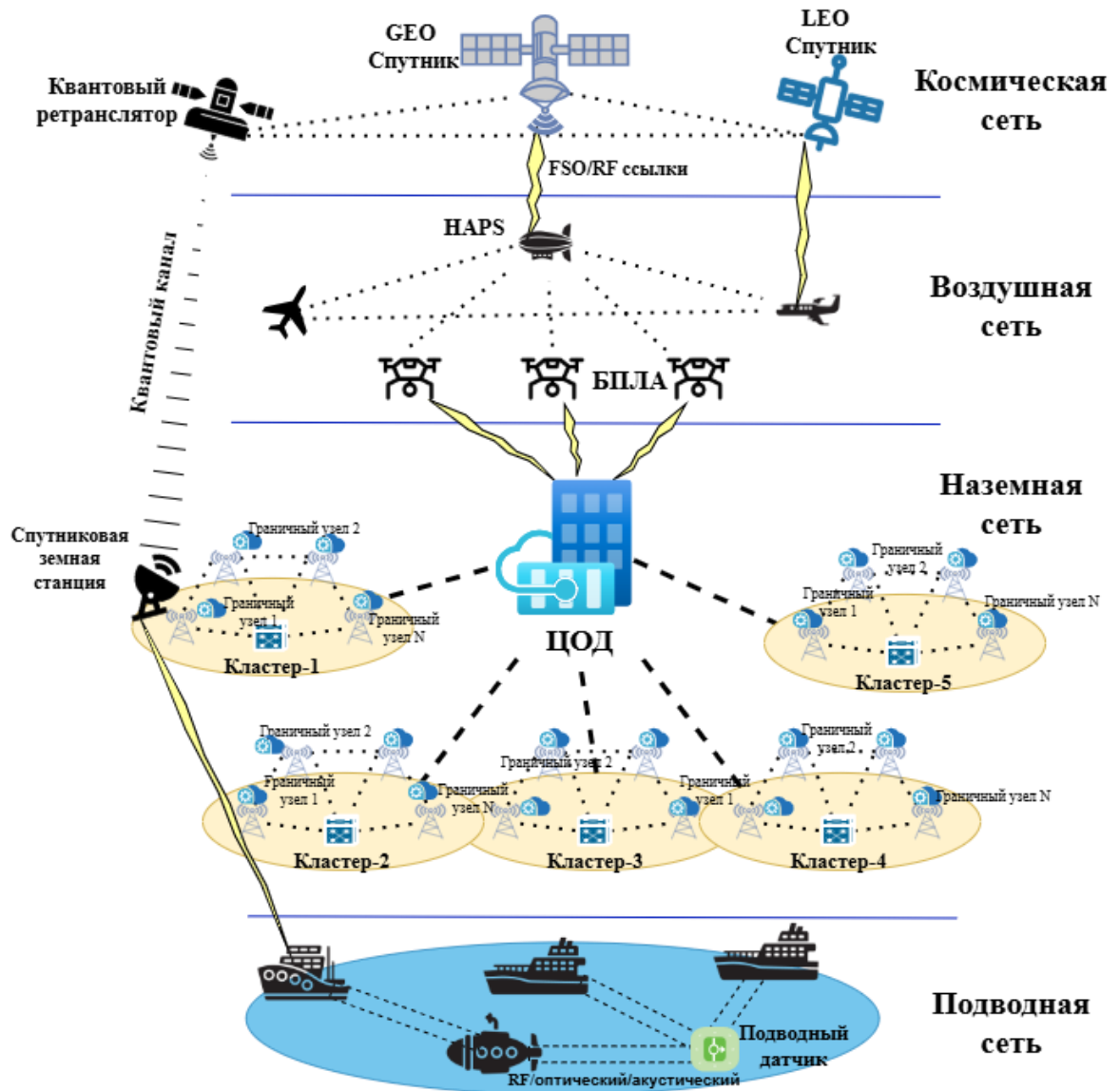


Рисунок 2.1 – Архитектурные изменения, связанные с 6G

Некоторые из ключевых особенностей и функций единой сети 6G с распределенной архитектурой включают интеллектуальную периферию реального времени, распределенный искусственный интеллект и интеллектуальное управление радиоресурсами [52]. Они обеспечивают выполнение функций и достижение целей развертывания сети 6G высокого уровня, таких как внедрение искусственного интеллекта и интеллектуальных периферийных вычислений для оптимизации сети и улучшения процесса принятия решений [59, 60].

Архитектура сетей 6G во многом определяется конвергенцией различных технологий и видов сетей связи, независимо от области их применения. Например, ниже приведены типичные конвергентные сети: космические сети, состоящие из спутников на геостационарных (GEO) и низких (LEO) околоземных орбитах, воздушные сети, включающие в себя высотную платформу HAPS, поддерживающую связь со спутниками и другими беспилотными летательными аппаратами [53, 59].

При этом в интегрированных сетях шестого поколения граничные и туманные серверы могут быть расположены на любом уровне: подводном, наземном, воздушном и/или космическом [61].

В соответствии с такой целостной коммуникационной структурой 6G, мы выступаем за использование следующих новых компонентов [61, 62]:

А. Экологически чистые сети 6G.

Учитывая растущие потребности сетей 6G в энергии, устойчивость имеет важное значение. Для повышения энергоэффективности могут быть использованы следующие методы [54, 63]:

- Оптимизация энергопотребления на основе искусственного интеллекта: Искусственный интеллект способен динамически контролировать энергопотребление в зависимости от потребностей сети в режиме реального времени [63].

- Интеграция возобновляемых источников энергии: Источниками питания для наземной и воздушной сетевой инфраструктуры могут служить солнечная, ветровая и кинетическая энергия [63].

- Датчики сбора энергии: Устройства Интернета вещей могут использовать технологии сбора энергии (например, радиочастотное поглощение энергии) для снижения зависимости от батарей [63].

- **Интеллектуальные системы охлаждения:** Решения для охлаждения центров обработки данных, управляемые искусственным интеллектом, оптимизируют энергоэффективность [63].

- **Мониторинг углеродного следа:** Использование блокчейна в системах торговли выбросами углерода позволит обеспечить надёжное соблюдение экологических стандартов соответствия [63].

В. Искусственный интеллект и автономное управление сетью

Искусственный интеллект будет играть важную роль в оптимизации и контроле сети 6G. Некоторые из улучшений включают в себя [55, 64]:

- **Сети с возможностью самовосстановления:** Искусственный интеллект может автоматически выявлять и исправлять ошибки в режиме реального времени, сокращая время простоя [64].

- **Сегментация сетей на основе искусственного интеллекта:** Интеллектуальное динамическое распределение ресурсов на основе приложений с помощью срезов (например, срезы с низкой задержкой для AR /VR) [64].

- **Профилактическое обслуживание:** Аналитика с помощью искусственного интеллекта может прогнозировать отказ оборудования до его возникновения, повышая надежность [64].

- **Сеть на базе Интернета (IBN):** Сети автоматически настраиваются в соответствии с намерениями пользователя и потребностями бизнеса [64].

С. Голографическое и мультисенсорное телеприсутствие

Развитие технологии телеприсутствия в 6G выйдет за рамки видеозвонков в формате 2D, включая [65]:

- **Голографическая коммуникация:** голографическая коммуникация с передачей полного образа человека (всего тела) в режиме реального времени, с низкой задержкой, поддерживаемая визуализацией с помощью искусственного интеллекта [65].

- Интеграция тактильной обратной связи: пользователи смогут “чувствовать” удаленные объекты с помощью тактильных датчиков со сверхнизкой задержкой [65].

- Передача обоняния: Запахи могут передаваться с помощью сложных датчиков, что улучшает иммерсивную коммуникацию [65].

- Нейронные интерфейсы: Интерфейсы мозг-машина (BMIs) потенциально могут обеспечить прямую нейронную связь для систем телеприсутствия [65].

Д. Гибридная облачная архитектура и передовые пограничные вычисления

Для поддержки приложений с низкой задержкой в сети потребуются дополнительные возможности пограничных вычислений [66]:

- Децентрализованные пограничные узлы: пограничные вычисления на базе искусственного интеллекта позволяют пользователям выполнять вычисления непосредственно на границе сети, что уменьшает задержку [66].

- Облачные вычисления: гибридная модель cloud-edge может повысить эффективность "умных" городов и промышленных приложений [66].

- Оптимизация границы и ИИ: модели ИИ будут изначально запускаться на пограничных устройствах, позволяя делать выводы и принимать решения в режиме реального времени в сферах робототехники и автоматизации [66].

- Бессерверные пограничные вычисления: динамическое распределение ресурсов позволит приложениям масштабироваться в зависимости от потребностей [66].

Е. Интеграция квантовой технологии и блокчейна для сетей будущего

Для повышения безопасности и децентрализации в сетях 6G будут использоваться технологии [67]:

- Квантовое распределение ключей (QKD): чрезвычайно надежное шифрование передачи данных между ключевыми узлами [67].

- Управление идентификационными данными на основе блокчейна: децентрализованные идентификационные данные (DID) могут быть назначены пользователям и устройствам для предотвращения несанкционированного доступа [67].

- Автономные сетевые смарт-контракты: смарт-контракты на основе блокчейна могут использоваться для автоматизации сетевых политик и транзакций [67].

- Квантово-устойчивое хэширование: предлагает перспективные системы аутентификации [67].

Ф. Усовершенствованные IoT и киберфизические системы (CPS)

Сеть 6G будет поддерживать масштабные развертывания устройств IoT и объединится с CPS для промышленных приложений и приложений для умных городов [68]:

- Нано-IoT: малогабаритные датчики IoT с низким энергопотреблением, встроенные в окружающую среду.

- Роевой интеллект: Скоординированные, управляемые интеллектуальные устройства Интернета вещей для максимальной промышленной автоматизации.

- Автономные сети беспилотных летательных аппаратов: интеллектуальные дроны будут обслуживать сети и реагировать на чрезвычайные ситуации.

- Цифровые двойники в реальном времени: прогнозируемое обслуживание и оптимизация физических систем на основе искусственного интеллекта.

Г. Беспроводные технологии нового поколения

Для дальнейшего повышения производительности сети будут внедрены следующие технологии [69]:

- Терагерцовая (ТГц) связь: обеспечивает сверхвысокую скорость передачи данных и низкую задержку для приложений телеприсутствия [69].

- Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (RIS): программируемые отражающие поверхности с искусственным интеллектом улучшают эффективность беспроводной связи и покрытие [69].

- Мультиплексирование орбитального углового момента (OAM): расширяет возможности за счет передачи данных в структурах электромагнитных волн [69].

- Гибридные волоконно-беспроводные сети: сочетание беспроводных и волоконно-оптических технологий обеспечивает бесперебойную работу [69].

Н. Устойчивость к чрезвычайным ситуациям и стихийным бедствиям

Сети 6G будут оснащены надежными системами управления в чрезвычайных ситуациях [70]:

- Прогнозирование стихийных бедствий на основе искусственного интеллекта: аналитика в режиме реального времени для предотвращения стихийных бедствий.

- Устойчивые ячеистые сети: узлы сети с функцией самовосстановления могут обеспечить связь в районах, пострадавших от стихийных бедствий.

- Экстренное развертывание спутников: спутники LEO обеспечивают связь в режиме реального времени в случае перебоев в работе сети.

I. Этичный ИИ и соответствие нормативным требованиям

Обеспечение соответствия сетей 6G, управляемых искусственным интеллектом, этическим стандартам и нормам [71]:

- Снижение уровня объективности и предвзятости: модели ИИ должны быть обучены избегать предвзятости в управлении сетью и взаимодействии с пользователями.

- Соблюдение требований GDPR и защиты данных: будут установлены строгие меры контроля конфиденциальности данных.

- Объяснимый ИИ (XAI): По нормативным соображениям, решения принимаемые ИИ должны быть прозрачными и объяснимыми.

Интеграция перечисленных выше технологий в предлагаемую распределенную архитектуру сетей 6G основывается на искусственном интеллекте, обеспечивает безопасность, отказоустойчивость и реализует возможность поддержки сервисов телеприсутствия следующего поколения. Это произведет революцию в дистанционной связи, обеспечив сверхнизкую задержку, высокий уровень безопасности и полное погружение благодаря таким технологиям, как голографическое телеприсутствие, автоматизация, управляемая искусственным интеллектом, и квантовая коммуникация [71].

2.2 Имитационная модель интеллектуальной распределенной архитектуры интегрированной сети 6G.

• Модельная сеть

На рисунке 2.2 представлена новая сетевая архитектура, обеспечивающая динамическое распределение ресурсов сети на основе сетевых туманностей с целью оптимизации эффективности обработки данных и качества связи.

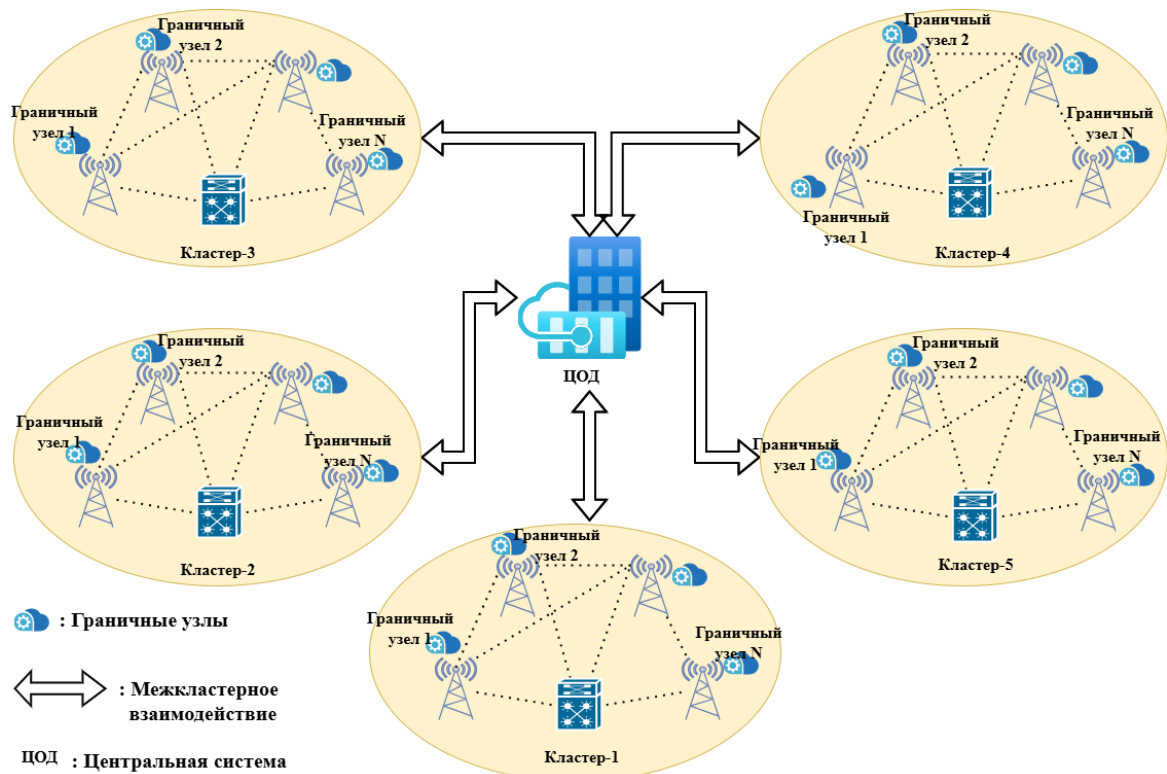


Рисунок 2.2 – Архитектура сети

Теперь подробно рассмотрим элементы новой сетевой архитектуры и их взаимодействия друг с другом [72].:

1. Центральная система. Предлагаемая архитектура основана на центральной системе, которая действует как центральная точка для обработки данных. Агрегация и управление данными осуществляется на центральном узле из различных кластеров, которые распределены в разных географических регионах [72].

2. Кластеры. Предлагаемая архитектура делится на пять кластеров от «Кластер-1» до «Кластер-5» (см. рис. 2). Каждый кластер представляет собой локальную сеть, принадлежащую нескольким граничным узлам (от 1 до N (см. рис. 2)). Такая архитектура должна позволить улучшить обработку данных в распределенном режиме перед отправкой их в центральную систему [72].

3. Граничные узлы. Граничные узлы кластера поддерживают как вычисления, так и связь (именно это обозначено значками беспроводного сигнала и облачных символов на рис. 2). Они относятся к нашим периферийным вычислениям, поскольку выполняют обработку данных вблизи места их генерации, тем самым снижая задержку и потребление полосы пропускания [71].

Граничные узлы каждого кластера связаны между собой ячеистой сетью, как показано пунктирными линиями на рис. 2. Такой тип топологии взаимодействия внутри кластера обеспечивает отказоустойчивую связь между узлами. Это позволяет пакетам данных перемещаться по нескольким маршрутам между узлами и, соответственно, повышает отказоустойчивость сети [72].

4. Межкластерное взаимодействие. Каждый кластер подключен непосредственно к центральной системе, схематично представленной на рис. 2. Такая реализация взаимодействий между центральной системой и кластерами решает очень важную проблему беспрепятственной передачи обработанных данных с граничных узлов на центральный узел, где происходит дальнейшая обработка, хранение и анализ более высокой сложности [72].

Такая архитектура потенциально может стать эффективной отказоустойчивой масштабируемой сетевой конструкцией, отвечающей современным требованиям к обработке данных. Действительно, включение периферийных вычислений в кластерные сети ускорит процесс обработки данных, снизит нагрузку на центральные серверы и повысит эффективность всей системы в целом.

Предлагаемая архитектура найдет свое применение в области анализа данных, принятия решений в режиме реального времени и сокращения задержек: например, при развертывании систем городской безопасности на основе технологий промышленной автоматизации и «умных городов» в контексте Индустрии 4.0 [72].

•Сетевая кластеризация

Кластеризация является очень важной технологией в различных областях, включая беспроводные сенсорные сети, мобильные одноранговые сети и сети нового поколения. Эффективная кластеризация значительно повышает производительность, масштабируемость и энергоэффективность соответствующих сетей [74].

Имитационная модель предлагает комплексный подход к анализу сети, объединяя процессы инициализации, кластеризации и визуализации сети [74].

Для моделирования будем предполагать, что случайная сеть из 100 узлов охватывает площадь 10^6 м². При этом используется пять кластеров.

Исходное распределение узлов в любой сети примем случайным на заданной площади. Это схематично показано на рис. 2.3.

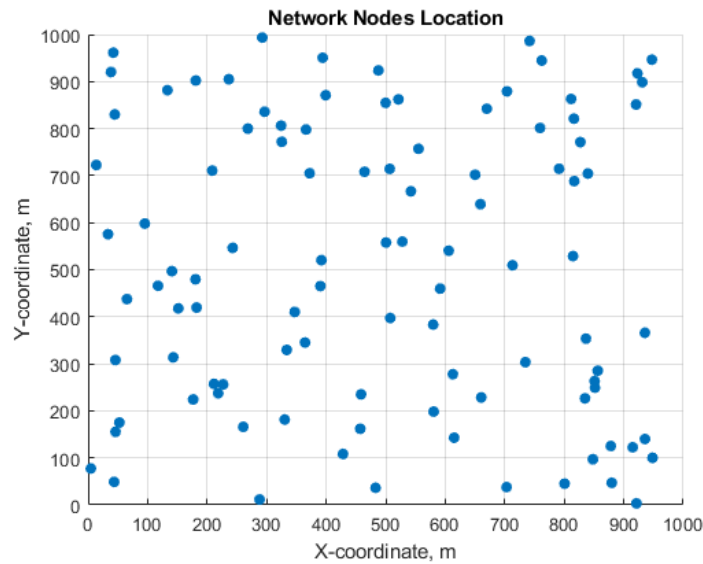


Рисунок 2.3 – Первоначальное распределение узлов сети

На рисунке 2.4 показаны предварительно обработанные данные, распределенные по заранее определенному числу кластеров с помощью алгоритма К-средних.

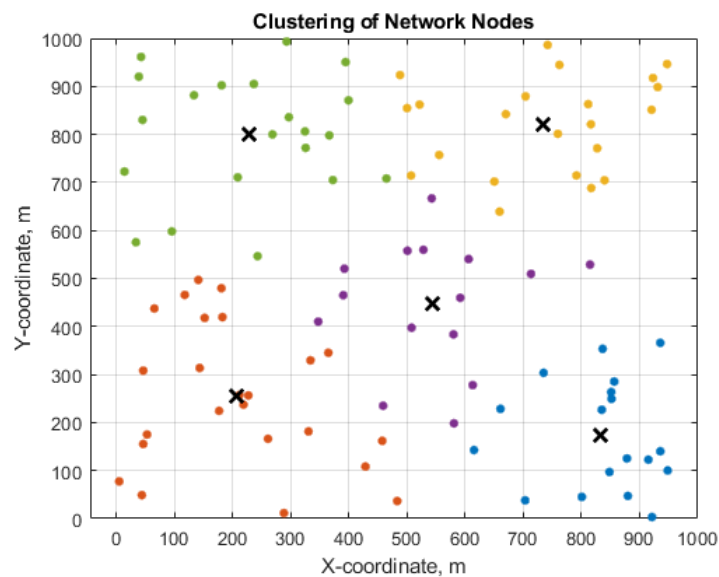


Рисунок 2.4 – Сетевые кластеры; крестиком обозначен центр кластера

На втором этапе решается задача оптимизации распределения ресурсов. Для упрощения предположим, что ресурсная емкость распределена поровну между всеми узлами и рассчитаем количество ресурсов в каждом кластере. Возьмем

любой из рассчитанных ресурсов: пропускную способность, емкость и т.д. Суммарные ресурсы для каждого кластера приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сетевые кластеры

Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3	Кластер 4	Кластер 5
1242	1138	1238	723	1385

Концепция кластеризации может предполагать выделение одинакового ресурса для каждого кластера (если целью, например, является выравнивание нагрузки на ресурсы). При этом, если взять для примера сенсорную сеть, то разница в ресурсах между кластерами будет, по крайней мере, концептуально простой метрикой. Распределение ресурсов проиллюстрировано на рисунке 2.5.

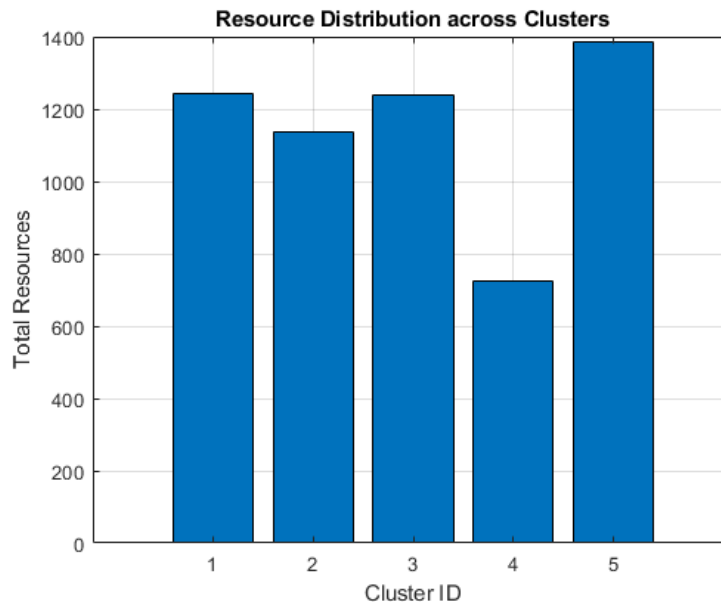


Рисунок 2.5 – Визуализация распределения ресурсов по кластерам

Стандартное отклонение распределения ресурсов в нашем случае составляет 251,89. Для наглядного представления топологии сети на рисунке 2.6 показаны связи узлов в кластерах.

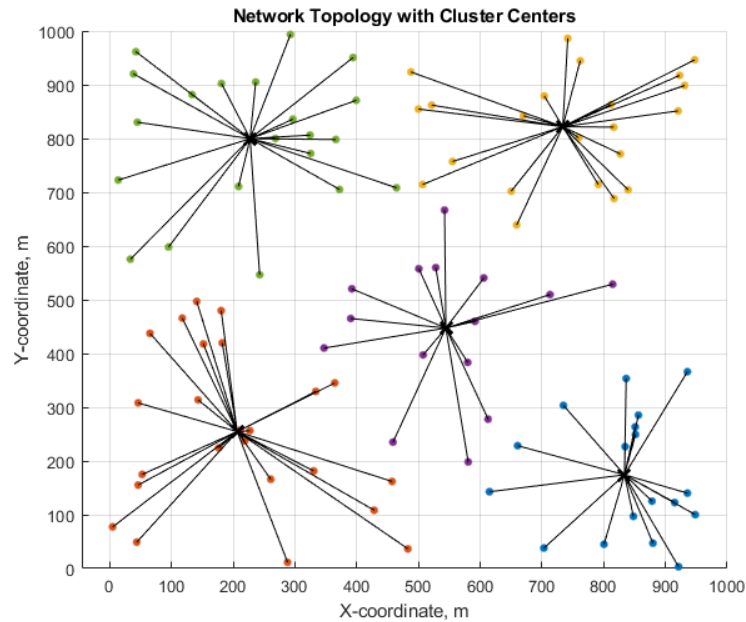


Рисунок 2.6 – Визуализация топологии сети

Эта модель является хорошей основой для проведения анализа сетевой кластеризации. Однако она также позволит моделировать различные сценарии изменения количества узлов, размера области и количества кластеров, чтобы увидеть, как это повлияет на производительность сети. Дальнейшая работа с рекомендациями может быть выполнена путем использования других алгоритмов кластеризации и улучшения визуализации.

• Оптимизация сети

Целью оптимизации будет максимальная скорость передачи данных в высокодинамичной и сложной сетевой среде при минимальных энергопотреблении, задержке и используемых сетевых ресурсах. Далее, чтобы оптимизировать производительность сетевого кластера 6G, будет использоваться гибридный алгоритм.

Гибридный метод улучшает процесс принятия решений по оптимизации ресурсов служб распределенного телеприсутствия в сети 6G за счет совместного использования метода роя частиц (PSO, particle swarm optimization) и генетического алгоритма (GA, genetic algorithm). Поскольку PSO на каждом шаге

осуществляет локальную оптимизацию за счет перемещения частиц в зависимости от индивидуальных и глобальных наилучших местоположений, возможно, что конвергенция технологий и сетей связи может происходить быстрее [75]. В то же время, благодаря механизмам отбора, скрещивания и мутации, в генетическом GA есть возможность для различных вариантов построения сети [76]. Гибридный подход позволяет найти компромисс между совершенствованием решения и диверсификацией пространства поиска путем гибридизации и переплетения указанных методов, обеспечивая экономичную по времени масштабируемую оптимизацию для критически важных с точки зрения времени ожидания сервисов телеприсутствия с учетом энергопотребления в сетях 6G. Ниже приводится описание параметров моделирования, гибридного алгоритма и результатов моделирования, визуализированных с помощью пакета MATLAB.

•Вычислительная модель

Сети 6G, имеющие высокую производительность и очень широкие возможности, представляют собой действительно серьезную проблему для оптимизации распределения ресурсов с точки зрения ультрамалой задержки, энергоэффективности и низкой стоимости [77]. Гибридный алгоритм объединяет возможности GA с возможностями PSO и обеспечивает улучшенные решения задачи оптимизации. Этот подход находит свое применение в получении оптимальных результатов для таких многомерных задач. Параметры моделирования в рассматриваемой кластерной модели – типовые и взяты из [78]. Они представлены в таблицы 2:

Таблица 2.2 – Параметры моделирования

Параметр	Ценность
Количество узлов: N	50
Размер площади: A×A	A=1000 м

Продолжение таблицы 2.2.

Энергия на бит bit: E_b	0.5×10^{-9} Дж
Стоимость за бит: C_b	1×10^{-6}
Скорость передачи данных: R_d	100×10^6 (бит/с)
Начальная энергия: E_0	1 Дж
Размер пакета: P_s	4000 бит
Максимальное количество итераций: $I_{\max}$	100
Количество частиц: P	30
Параметры PSO: w, c_1, c_2	0.7, 2, 2
GA Параметры: частота мутаций	0.1
GA Параметры: частота скрещивания	0.8

Инициализация:

- N – число узлов, позиции $p_i \in R^2, i=1, \dots, N$;
- Решение $x \in R^2$;
- Размер пакета (байты) S , бит $B=8S$;
- E_b – энергия на бит; R_d – скорость передачи (бит/с); C_b – стоимость за бит.

Частицы для гибридного алгоритма в области инициализируются случайным образом. Скорость для каждой частицы устанавливается равной нулю, при этом сохраняются индивидуальные наилучшие позиции частиц и глобальные наилучшие позиции. Вычисляется общая производительность, т.е. показатели энергопотребления, задержки и затрат для данного положения частицы. Это, естественно, влияет на выбор наилучшего пути. Таким образом, гибридный алгоритм вычисляет энергопотребление, задержку частиц, т.е. потенциальных головных кластеров, расстояния между узлами, чтобы вычислить координаты

головного узла, который лучше всего подходит для предложенной архитектуры и обеспечивает наилучшую производительность.

На рисунке 2.8 показан результат работы алгоритма PSO: после проведенных 100 итераций найден глобальный лучший (головной) узел (отмечен красным крестиком).

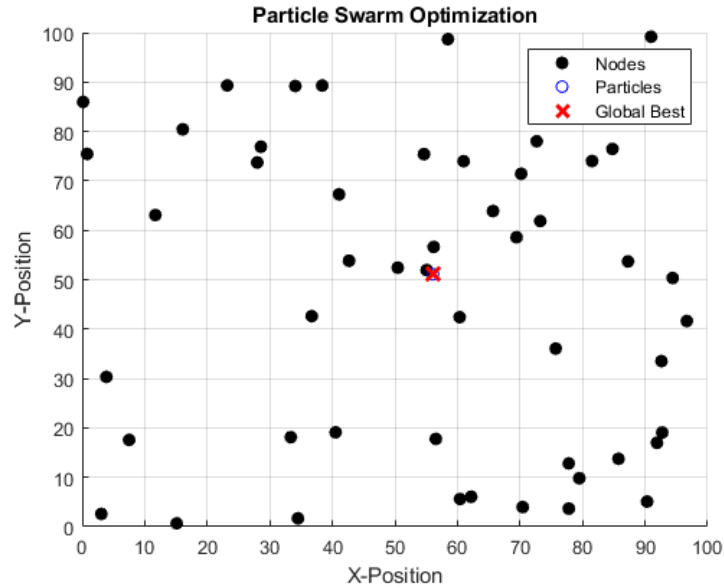


Рисунок 2.7 – Визуализация топологии сети

Целевая функция для решаемой задачи может быть представлена следующим образом:

1. Энергопотребление:

$$E(x) = \sum_{i=1}^N d_i(x)^2 B E_b, \quad (2.1)$$

$$d_i(x) = \sqrt{(p_1 - x_i)^2 + (p_2 - y_i)^2} \quad (2.2)$$

где $d_i(x)$ – евклидово расстояние (расстояние от i -го узла до позиции x); p_1 и p_2 – соответственно горизонтальная и вертикальная координаты потенциального решения; (x_i, y_i) – координаты i -го узла.

2. задержка:

$$L(x) = \frac{B}{R_d} + \frac{1}{c} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i(x), \quad (2.3)$$

где $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

Функция расстояния $d_i(x)$ важна как для энергии E , так и для задержки L , потому что и энергопотребление, и задержка зависят от расстояния между отправителем и получателем.

3-Издержки:

$$C(x) = N \cdot B \cdot C_b, \quad (2.4)$$

Правила обновления алгоритма PSO:

$$v_i^{(t+1)} = w v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (g^t - x_i^t), \quad (2.5)$$

$$x_i^{t+1} = \text{mod}(x_i^t + v_i^{(t+1)}, \text{areaSize}), \quad (2.6)$$

где t – номер итерации; v_i^t – вектор скорости частицы i на итерации t ; $v_i^{(t+1)}$ – скорость частицы i на итерации $(t+1)$; c_1 – когнитивный коэффициент (личный фактор), который определяет, насколько частица притягивается к своему личному лучшему положению; c_2 – социальный коэффициент (коэффициент влияния глобального знания), который определяет силу притяжения к глобальному лучшему; r_1 – случайный скаляр (обычно $r_1 \sim U(0,1)$), который вносит неопределенность в личную составляющую; r_2 – второй случайный скаляр ($r_2 \sim U(0,1)$), который вносит неопределенность в социальную составляющую; p_i^t – личное лучшее положение частицы i до итерации t ; x_i^t – текущее положение частицы i на итерации t ; g^t – глобальное лучшее положение за все частицы на итерации t ; areaSize – размер области (скаляр), граница по каждой координате.

Обновление индивидуальных лучших позиций для каждой частицы:

$$p_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^{t+1}, & \text{если } F(x_i^{t+1}) < F(p_i^t); \\ p_i^t, & \text{если } F(x_i^{t+1}) \geq F(p_i^t), \end{cases} \quad (2.7)$$

$$g^{t+1} = \arg \min_{y \in P_i^{t+1}} F(y), \quad (2.8)$$

где $F(x_i^{t+1})$ – текущее положение частицы i на итерации $(t+1)$; $F(p_i^t)$ – личное лучшее положение i -ой частицы до или на итерации t ; оператор $\arg \min$ возвращает то значение $y \in S$, при котором $F(y)$ минимально.

Операторы GA (одно поколение):

- вычисление индикатора производительности для каждого индивида: $f_j^t = F(P_j^t)$ – положение j -го индивида в поколении t (вектор решений), где j – индекс индивида в поколении $j=1, \dots, M$;

- преобразование показателя производительности в балл путем инверсии:

$$s_j = \frac{1}{f_j^t + \varepsilon},$$

где s_j – оценка отбора, рассчитанная как обратный индикатор производительности: меньший f_j^t , больший s_j , ε – малое положительное число, добавляемое для избежания деления на ноль;

- нормализация оценки по вероятностям:

$$\pi_j = \frac{s_j}{\sum_k s_k},$$

где π_j – вероятность выбора индивида j при формировании родительского пула; s_k – сумма оценок по всем индивидам, индекс k пробегает всю популяцию ($k=1, \dots, M$).

К паре координат потенциального решения p_1 и p_2 с вероятностью p_{cross} применяем оператор кроссовера:

$$\text{child}_1 = \alpha p_1 + (1-\alpha)p_2, \text{ child}_2 = \alpha p_2 + (1-\alpha)p_1, \alpha \sim U(0,1),$$

где $child_1$ и $child_2$ – результаты применения оператора кроссовера к паре p_1 и p_2 ; α – скаляр (коэффициент скалярного смешивания), случайная величина, равномерно распределённая на отрезке $[0,1]$, т.е. $\alpha \sim U(0,1)$.

Мутация происходит с вероятностью p_{mut} :

$child \leftarrow \text{mod}(child + N(0,1), \text{areaSize})$.

Гибридный алгоритм (PSO+GA) на одной итерации выглядит следующим образом:

1. выполнить шаг PSO для частиц;
2. выполнить одно поколение GA;
3. объединить решения:

$$S = \{\text{частицы}\} \cup \{\text{индивиды GA}\}, \quad g^{t+1} = \arg \min_{s \in S} F(s),$$

где S – множество всех кандидатных решений на этой итерации; s – один элемент этого множества, т.е. конкретное решение (вектор координат $[x,y]$); $F(s)$ – значение функции метрики для решения s .

СХОДИМОСТЬ И ИТОГОВЫЕ МЕТРИКИ

Для каждой итерации $t=1, \dots, T$ сохраняются:

- позиции лидера g^t (вектор решения);
- значения метрик в этой позиции: E^t, L^t, C^t :

$$E^t = E(g^t), \quad L^t = L(g^t), \quad C^t = C(g^t), \quad t=1, \dots, T,$$

где g^t – глобальное лучшее решение (вектор) на итерации t ; E^t – значение функции энергии; L^t – значение задержки; C^t – значение стоимости; T – максимальное число итераций.

Пороговые значения:

$$E^* = \min_t E^t \quad (\text{или } E^T \text{ при выборе последней итерации});$$

$$L^* = \min_t L^t$$

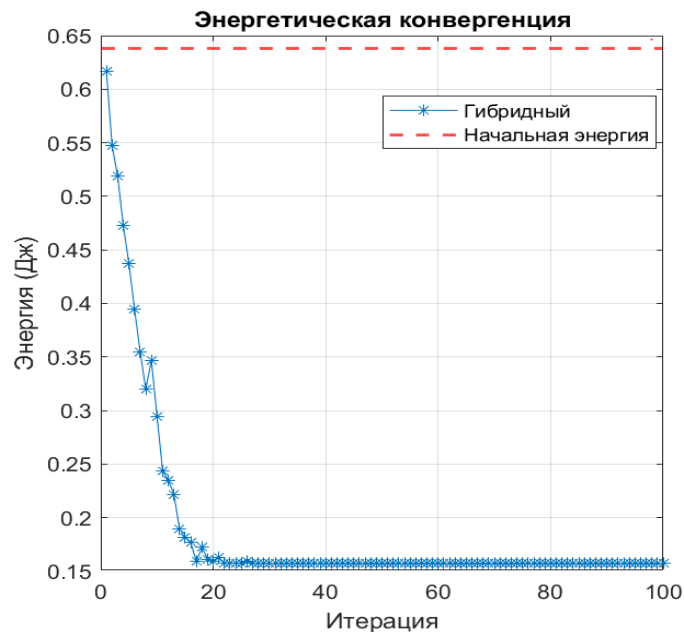
$$C^* = \min_t C^t,$$

где * означает финальное (лучшее) значение метрики, которое обычно представляет собой минимальное значение по итерациям.

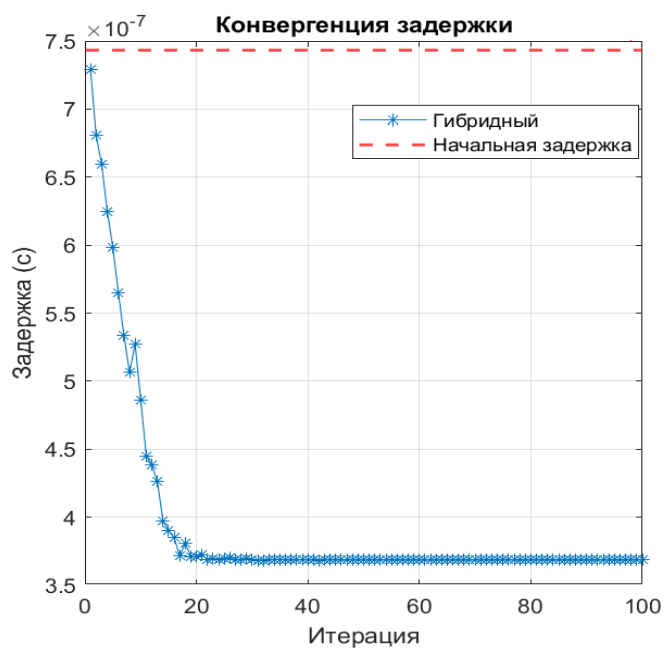
Процент улучшения значения метрики от начального v_0 до финального v^* составляет

$$\Delta\% = \frac{v_0 - v^*}{v_0} \times 100\%. \quad (2.9)$$

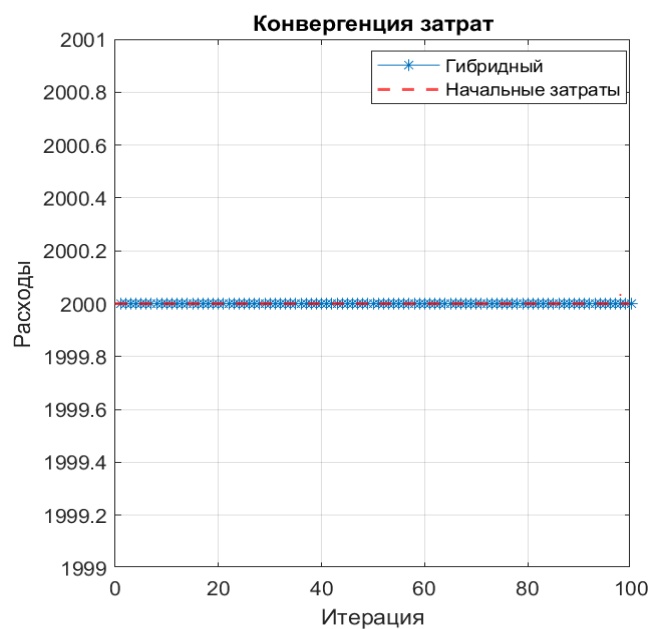
Приведенная выше математическая модель описывает работу гибридного алгоритма на кластерах граничных вычислительных узлов. Этот алгоритм помогает увеличить скорость передачи данных и уменьшить задержку при минимально возможном энергопотреблении. Целевая функция $F(x)$ является взвешенной суммой (скаляризацией) метрик $E(x)$, $L(x)$ и $C(x)$. Она объединяет энергопотребление и задержку с использованием заданных весовых коэффициентов, в то время как эволюционный процесс гибридного алгоритма подталкивает положения и скорости узлов кластера к оптимальному решению. На рис. 2.8 приведены начальные и конечные значения вышеуказанных показателей, рассчитанные с использованием гибридного алгоритма.



а)



б)



в)

Рисунок 2.8 – Результаты моделирования потребления энергии (а), задержки (б) и стоимости (в)

Фактическими значениями, полученными в результате вычислительной модели, являются:

- начальная энергия: 0,62841 Дж;
- конечная энергия: 0,15168 Дж;

- начальная задержка: $7,4502 \cdot 10^{-7}$ с;
- конечная задержка: $3,6027 \cdot 10^{-7}$ с;
- Начальные затраты: 2000
- Окончательные затраты: 2000

Как видим, потребление энергии снижается почти на 75%, а задержка – на 50%. Исходя из оптимальных значений энергии, задержки и стоимости, и процентного сокращения видно, насколько увеличилась эффективность в процессе гибридной оптимизации.

2.3 Выводы по Главе 2

1. 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.

2. 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.

ГЛАВА 3 Гибридный метод выгрузки трафика для распределенных граничных вычислений в сетях 6G

3.1 Гибридная разгрузка задач в 6G: Интеграция пограничных и внутрисетевых вычислений с множественным доступом

Механизмы периферийных вычислений с множественным доступом MEC и интегрированных внутрисетевых вычислений INC являются ключевыми для повышения эффективности вычислительных операций и снижения задержек [94].

Технология MEC подразумевает размещение вычислительных ресурсов ближе к конечным пользователям и источникам данных путем размещения небольших центров обработки данных на периферии сети, что дает возможность обеспечить обработку и анализ информации в сетевой инфраструктуре в режиме реального времени, а также позволяет снизить задержку при передаче данных, уменьшает нагрузку на центральные серверы и идеально подходит для таких приложений, как интернет вещей, дополненная реальность, автономное вождение, услуги телеприсутствия [79] .

Технология INC фокусируется на плавной интеграции вычислительных ресурсов на разных уровнях сети от ядра до периферии, оптимизируя распределение и использование этих ресурсов. INC использует парадигмы распределенных вычислений для обеспечения эффективной обработки и распределения данных по различным сетевым узлам, повышая общую производительность и надежность сети [79].

Совместное применение технологий MEC и INC за счет сокращения времени отклика, снижения перегрузки сети и повышения удобства работы пользователей обеспечивает надежную основу для поддержки требований современных приложений, между которыми интенсивно циркулируют внушительные объемы данных [80, 95].

В настоящее время огромное количество абонентских устройств подключается к сети. Причем это могут быть устройства разного вида и предназначения – от персональных компьютеров до разнообразных датчиков и сенсоров. Лавинообразный рост сетевых устройств связан в первую очередь с быстрым развитием информационных технологий, а также с появлением новых сетевых сервисов и приложений, таких как, например, интернет вещей (IoT) и дополненная реальность [96]. Подобный рост количества сетевых устройств создает значительные сложности в управлении и обслуживании сети. Кроме того, внедрение технологий 5G и реализации повсеместного распространения новых приложений с расширенными функциями, таких как, например, автономные транспортные средства, виртуальная/дополненная реальность, распознавание лиц, электронное здравоохранение и т.д., требуют обеспечения необходимого уровня качества обслуживания (QoS). Например, задачи, чувствительные к временным задержкам, необходимо обрабатывать в течение всего лишь 1 мс [80, 81], что сложно достичь при использовании удаленного облака.

Использование ресурсоемких сервисов на пользовательских устройствах в совокупности с непрерывной передачей данных влияет на потребление энергии и увеличение задержки, что является узким местом в реализации требований по обеспечению необходимого уровня QoS [97].

Для решения проблемы разгрузки сети была предложена новая технология – упомянутые выше периферийные вычисления с множественным доступом [81]. Основным принципом технологии MEC является выгрузка/перенос задач с устройств пользователей на граничные серверы сети или в удаленное облако. Данный подход позволяет существенно сократить задержки при обработке задач и уменьшить энергозатраты устройств пользователей [80, 81].

Сетевые элементы, такие как программируемые коммутаторы и маршрутизаторы, используют внутрисетевые вычисления INC для обеспечения наименьшей возможной задержки. Совместное использование этих двух

технологий все больше привлекает внимание исследователей [82, 83]. Например, программируемые сетевые элементы могут использоваться не только для маршрутизации и обработки пакетов данных, но и для выполнения вычислительных задач, что позволяет удовлетворять строгие требования ко времени обслуживания [98].

Основная идея предлагаемого метода заключается в том, чтобы использовать свободные вычислительные ресурсы сетевых устройств для выполнения обработки запросов, поступающих от близлежащих устройств пользователей [84]. Такой подход не только увеличивает общую вычислительную мощность сети, но и снижает задержки, а также уменьшает объем данных, передаваемых по сети. Предлагаемый метод распределения вычислительных задач между сетевыми элементами открывает новые возможности для уменьшения нагрузки на ядро сети, увеличения производительности и эффективности современных сетевых инфраструктур [99].

Технология INC исследуется достаточно давно. Например, в [83] была предложена структура выгрузки легких критических задач на устройства INC. В [84] авторы разработали модель выгрузки задач на основе глубокого обучения с несколькими источниками и предложили алгоритм оптимизации роя частиц для решения проблемы задержек, путем перераспределения свободных вычислительных ресурсов для обработки запросов, поступающих от пользовательских устройств, расположенных поблизости [100].

Сформулированную задачу выгрузки внутрисетевых задач авторы [85] предложили решать с помощью алгоритма целочисленного линейного программирования. В работе [86] была предложена концепция энергоэффективных внутрисетевых вычислений, в рамках которой сетевые функции интегрированы в вычислительную платформу. Тем не менее стоит отметить, что в рассмотренных работах не исследовался вопрос использования комбинации технологий MEC и INC. В них в основном идет речь о доработке и

модификации каждого метода в отдельности, но не об их совместном использовании или какой-либо другой автоматизированной гибридной комбинации. Следовательно, разработка оптимизированной и многофакторной системы выгрузки задач, совмещающей как метод INC, так и технологию MEC, все еще недостаточно изучена [87].

В этой главе изложены результаты исследования усовершенствованного метода выгрузки задач, основанного на гибридизации внутрисетевых вычислений INC в концепции сетевой архитектуры MEC [100]. При этом спроектирована трехуровневая сетевая архитектура и поставлена цель минимизировать взвешенную сумму задержки. В состав сетевой архитектуры, где осуществляется выгрузка задач, входят внутренние устройства пользователей, граничные серверы, устройства INC и устройства удаленного облака. Для оценки предлагаемой структуры разработан алгоритм принятия решений для определения инструмента обработки задачи и проведен анализ его работы [88].

3.2 Трехуровневая сетевая архитектура для разгрузки задач Edge-Cloud

Предлагаемая архитектура сети для выгрузки задач с использованием внутрисетевых вычислений (INC) в совокупности с технологиями периферийных вычислений с множественным доступом (MEC) имеет трехуровневую структуру: слой устройств, граничный слой и облачный слой [87, 101].

Пользовательские устройства условно можно разделить на два типа: устройства внутренней локации и устройства внешней локации. К первым относятся смартфоны, планшеты, персональные компьютеры, устройства IoT и т.д., которые подключаются к маршрутизаторам через беспроводные каналы связи без использования базовых станций (БС) операторов сотовой связи. Пользовательские устройства внешней локации – это такие же мобильные терминальные устройства, как и устройства первого типа, но которые распределены географически по большой территории, мобильны и подключаются

к БС операторов связи. Предполагается, что каждое устройство пользователя может обслуживаться только одним маршрутизатором или одной БС [87, 102].

В граничном слое (edge layer) маршрутизаторы и БС соединены с основной сетью и удаленным облаком с помощью сетевых коммутаторов, используя транзитные каналы, которые чаще являются оптическими. Кроме того, коммутаторы также могут быть связаны между собой через оптические каналы связи [103]. Стоит отметить, что эти сетевые элементы имеют ограниченные вычислительные ресурсы, однако они позволяют выполнять определенные вычислительные задачи в сети, выгружая тем самым задачи основной сети в центральное облако [87].

Облачный слой размещается на самом верхнем уровне и включает централизованные облачные центры обработки данных, которые имеют практически неограниченные вычислительные ресурсы и могут управлять большими объемами данных, поступающими из различных источников через сеть [104].

Таким образом, представленная архитектура позволяет эффективно распределить задачи и использовать вычислительные мощности разных уровней, что способствует снижению нагрузки на сеть и повышению общей производительности [87].

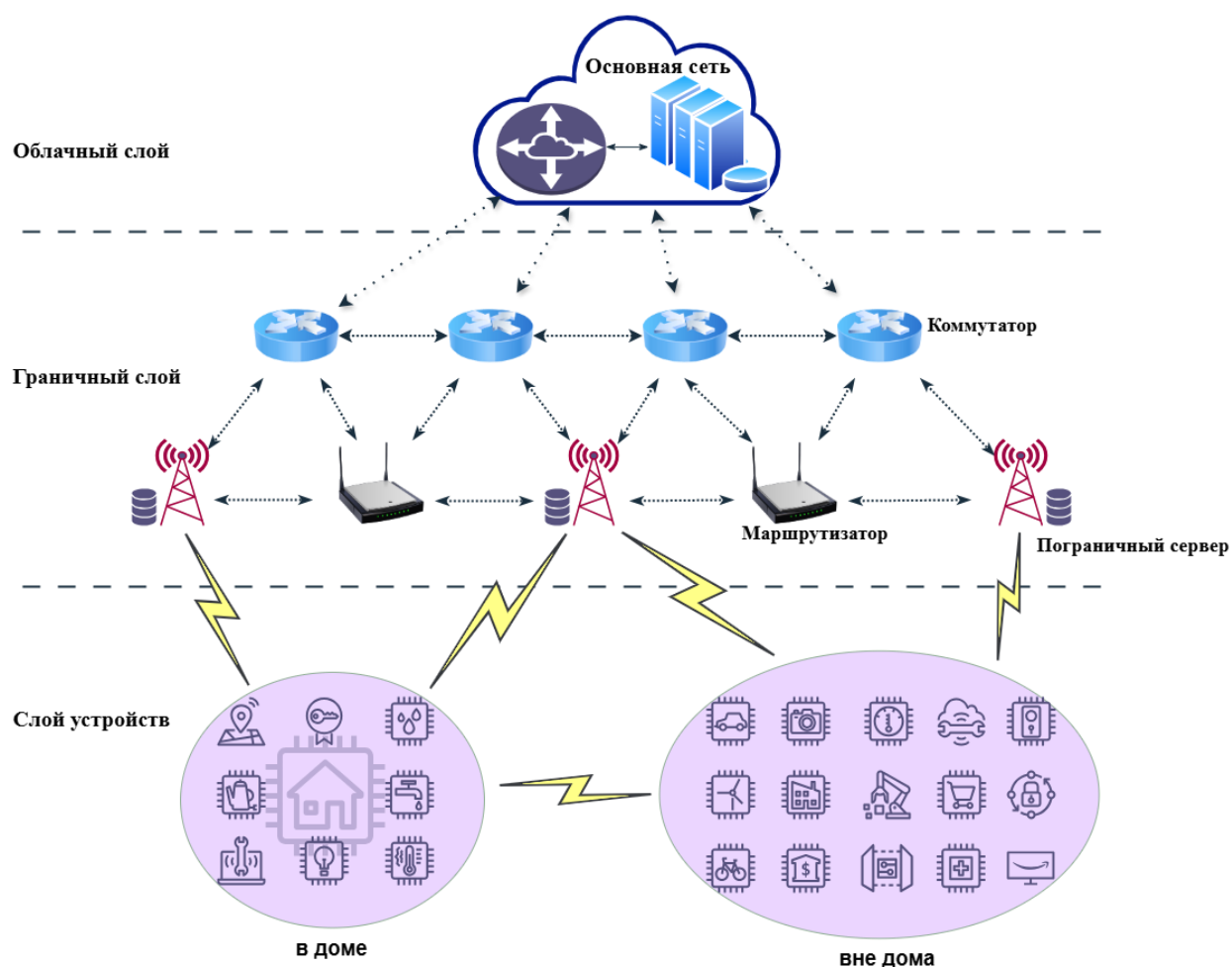


Рисунок 3.1 – Предлагаемая архитектура сети

В сценарии выгрузки задач предполагается, что задачи создаются на устройствах пользователей и могут либо обрабатываться локально (на самих устройствах), либо передаваться на маршрутизаторы или граничные серверы, коммутаторы или в облако. Сценарии выгрузки задач периодически рассматриваются с использованием технологии INC [92]. Устройства пользователей являются постоянным источником генерации задач. Каждый маршрутизатор или граничный сервер собирает информацию о задачах (например, размер задачи, требуемые процессорные циклы и т.д.) и сведения об устройствах (например, оставшиеся ресурсы устройств пользователей, маршрутизаторов, граничных серверов и т.д.) [91]. Эта информация передается в облако для определения политик выгрузки и стратегий распределения ресурсов. После этого

задачи перенаправляются на соответствующие устройства для обработки, при этом информация о состоянии сети, например такая, как задержка, используется для оценки эффективности выбранных политик. При этом стоит отметить, что в данной главе не рассматривается время, необходимое для сбора информации о задачах и устройствах, а также для принятия решений [93].

3.3 Модель гибридной системы разгрузки: интеграция методологий MEC и INC

В рамках данной главы рассматриваются три модели выгрузки задач: INC, MEC и предлагаемую гибридную модель, сочетающую оба указанных метода.

Использование гибридного подхода позволяет достигать наилучшей производительности, выполняя обработку задач на граничных узлах или распределяя их по сети на основе определенных условий или пороговых значений [84]. Наилучшая производительность в гибридном методе оценивается с точки зрения затрачиваемых ресурсов, нагрузки и времени обработки. Предлагаемый гибридный подход в целом предоставляет более оптимальный и равномерный метод выгрузки задач. Он является более устойчивым и масштабируемым, несмотря на то что в отдельных своих аспектах и параметрах он может уступать известным методам. Например, энергопотребление системы, использующей гибридный метод, может оказаться выше, поскольку дополнительная логика принятия решений и миграции увеличивает энергозатраты. Кроме того, интеграция нескольких сетевых уровней может повысить CAPEX/OPEX. Также следует отметить, что подходы MEC или INC, применяемые по отдельности, проще в проектировании и управлении, так как используют единую, предсказуемую стратегию. Гибридный метод сложнее из-за необходимости динамического принятия решений.

Оценка и сравнение вычислительной производительности трех различных методов (MEC, INC и гибридный подход, использующий и MEC, и INC) были выполнены с помощью пакета прикладных программ MATLAB.

Сравнение проведено посредством моделирования сети, состоящей из 40 узлов. В качестве показателя производительности использовалось время, затраченное на обработку задач. Расчет начинается с настройки фундаментальных параметров сети, которые будут использоваться на протяжении всего моделирования. К ним относятся количество узлов, объем каждой задачи, вычислительная мощность узлов и пропускная способность сети. В рамках данной модели были выбраны следующие параметры: количество узлов – 40, размер задачи – 1 Мбит, вычислительная мощность узлов – 1 Гбит/с, пропускная способность сети – 100 Мбит/с. Количество задач было принято равным 100.

Для MEC рассчитывается и суммируется время соединения и вычислений. Время соединения – это время отправки задачи с узла на граничный сервер, а время вычислений – это время, необходимое для обработки задачи на пограничном сервере.

Для метода INC мы пренебрегаем временем соединения, поскольку вычисления выполняются внутри сети, поэтому учитывается только время вычислений.

Для гибридного метода наша модель проверяет, превышает ли размер задачи динамический порог. Если да, то часть задачи обрабатывается через MEC, а оставшаяся часть – через INC. Затем соответствующим образом рассчитывается время соединения и вычислений [92–93].

Гибридный метод предназначен для динамического баланса преимуществ подходов MEC и INC в зависимости от вида и объема задачи. Более детально метод можно представить следующим образом. Сначала задачи оцениваются на основе их вычислительных требований для обработки данных. Легкие задачи (менее трудоемкие в вычислениях) могут быть переданы INC, где сетевые узлы

смогут обрабатывать их параллельно. Более сложные и ресурсоемкие задачи (более трудоемкие вычисления) могут быть направлены в МЕС, чтобы задействовать более мощные вычислительные ресурсы, доступные на границе сети.

Динамический порог – это важнейший элемент, определяющий, будет ли задача обрабатываться с использованием МЕС или INC [88]. Этот порог динамически корректируется в зависимости от доступности ресурсов и условий реального времени, т.е. совокупности текущих, быстро меняющихся параметров сети и системы, которые влияют на решение о том, куда отправлять задачу (INC vs. МЕС). К таким параметрам относятся задержка, джиттер, пропускная способность каналов, текущая загрузка вычислительных узлов, доступная вычислительная мощность, срочность задачи и уровень потребления энергии. Все эти параметры используются для динамического пересчёта порога и для немедленного выбора способа обработки. Иными словами, если средневзвешенная трудоемкость задачи превышает порог, то используется метод МЕС, в противном случае применяется INC [89].

Существует несколько факторов, определяющих динамический порог: задержка в сети, вычислительная нагрузка узла, срочность выполнения задачи, потребление энергии и статистические данные о производительности. Задержка в сети в режиме реального времени может колебаться в зависимости от трафика, перегрузки и доступности узла. При более низкой задержке задача может выполняться INC, тогда как более высокая задержка может потребовать использования МЕС для обеспечения своевременного завершения задачи.

Кроме того, в реальной сети должна отслеживаться текущая нагрузка на сетевые узлы [89]. Если загрузка узлов превышает пороговое значение, то для эффективной обработки задачи произойдет ее выгрузка из сети с последующим использованием метода МЕС. Задачи с более жесткими сроками или более высоким приоритетом с большей вероятностью будут обрабатываться с

использованием МЕС, где гарантированная вычислительная мощность более предсказуема [90].

Профили энергопотребления узлов также могут влиять на пороговое значение. Для энергоэффективных узлов может быть более предпочтительным использование INC, в противном случае выбирается МЕС, чтобы минимизировать разрядку батареи на отдельных узлах.

Статистические данные о производительности задач (время вычислений, вероятность успеха и т.д.) в различных условиях помогают точно настроить порог, делая его более адаптивным к текущей вычислительной среде. Кроме того, в режиме реального времени с учетом любых сиюминутных изменений условий сети или доступности ресурсов происходит перекалибровка динамического порога. Таким образом, гибридный метод, позволяющий при необходимости динамически переключаться между МЕС и INC, остается оптимальным. Для этого используется цикл обратной связи, в котором выполненные задачи анализируются для дальнейшего уточнения пороговых значений. Этот самонастраивающийся механизм постоянно оптимизирует процесс принятия решений, со временем повышая общую эффективность управления ресурсами [89].

Для большей наглядности приведем предлагаемую формулу для расчета динамического порога (dynamic threshold, DT):

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

где LC – текущая вычислительная нагрузка в облачных центрах обработки данных (%); RC – доступные вычислительные ресурсы в облаке (%) ; NL – текущая задержка сети (мс); TL (tolerable latency) – предел допустимой задержки для приложения, мс; CL – сложность вычислительной задачи (%); WC – вычислительная мощность сетевых узлов (%); PT – расчетное время обработки задачи на периферии сети (мс); MT – максимально приемлемое время обработки

задачи (мс); α , β , γ , δ – весовые коэффициенты, определяющие важность каждого параметра.

Весовые коэффициенты обеспечивают гибкость динамической корректировки формулы на основе конкретных сценариев и целей производительности. Для оптимизации стратегии выгрузки эти коэффициенты можно настроить в режиме реального времени на основе анализа данных и результатов машинного обучения.

Данная метрика порога введена с учетом того, что ресурсы облака, предел задержки, мощность узлов и максимальное время обработки задачи являются одними из основных характеристик сети. Связанные с ними параметры (соответственно LC, NL, CL и PT) фактически определяют текущее состояние сети. Кроме того, весовые коэффициенты α , β , γ и δ позволяют выделить наиболее критичный и важный ресурс, который необходимо оптимизировать.

В качестве примера предположим следующие значения рассмотренных параметров: LC = 80% (облачные дата-центры используются на 80% от своей

фактической/номинальной вычислительной мощности); RC = 100% (облако способно предоставить все свои ресурсы); NL = 50 мс; TL = 100 мс, CL = 60% (средне-высокая сложность задачи); WC = 80% (периферийные узлы имеют 80% номинальной вычислительной мощности, т.е. возможна работа в режиме INC или в частично гибридном режиме); PT = 20 мс, MT = 50 мс, α , β , γ , δ = 1 (равные весовые коэффициенты для простоты). В таком случае получим следующее значение порога:

$$DT = 1 \cdot \left(\frac{80\%}{100\%} \right) + 1 \cdot \left(\frac{50\text{мс}}{100\text{мс}} \right) + 1 \cdot \left(\frac{60\%}{80\%} \right) + 1 \cdot \left(\frac{20\text{мс}}{50\text{мс}} \right) = 2,45.$$

Вычисленное значение динамического порога DT, равное 2,45, будет служить критерием для алгоритма принятия решений, чтобы определить, следует ли обрабатывать задачи в MEC или INC.

При необходимости корректировка весовых коэффициентов может уточнить этот порог на основе различных приоритетов и показателей производительности. Эта формула и подход обеспечивают гибкие и динамичные средства балансировки вычислительных задач между MEC и INC, оптимизированные для сценариев реального времени. При этом данные значения зависят от характеристик конкретной сети.

На рисунке 3.2 приведена структура алгоритма принятия решений для определения инструмента обработки задачи (MEC или INC) для произвольной сети, параметры которой описаны в начале раздела.

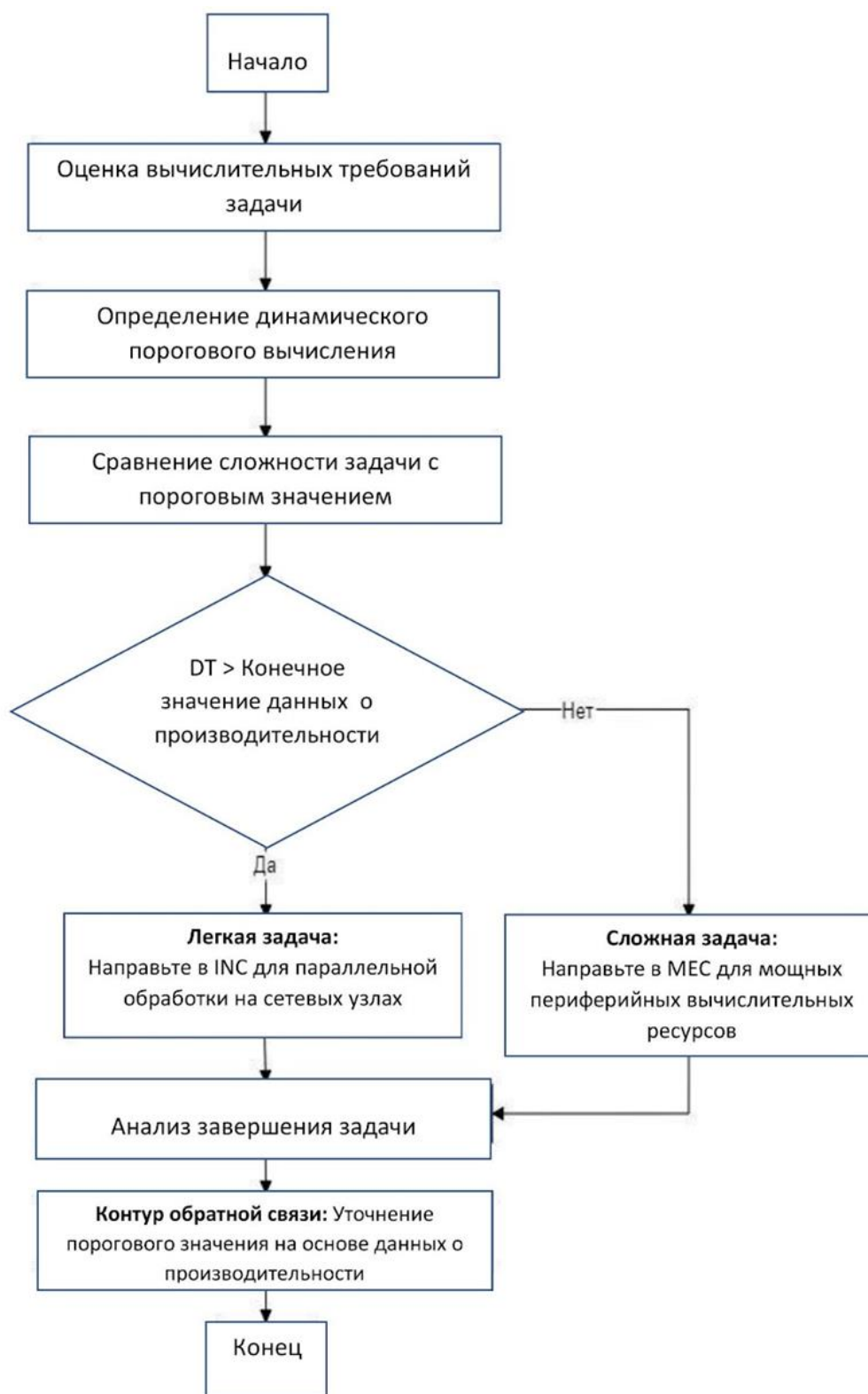


Рисунок 3.2 – Структура алгоритма принятия решений для определения инструмента обработки задачи

3.4 Компьютерное моделирование и оценка эффективности гибридных стратегий разгрузки

Ниже мы приводим краткое описание математической модели представленной системы и процессы которое включает в себя определение параметров, переменных и уравнений.

В нашей модели мы использовали параметры, приведенные в Таблице 3.1:

Таблица 3.1 – 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	$\frac{T_s}{2}$

- timeMEC — время расчёта для метода MEC;

- timeINC — время расчёта для метода INC;

- timeHybrid — время расчета для гибридного метода.

Вычисление времени:

Для каждого узла i и каждой задачи j :

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

- Время передачи данных: $t_{commMEC} = \frac{T_s}{\frac{C_{com}}{N}}$ (3.1)

- Время вычислений: $t_{compMEC} = \frac{T_s}{C_c}$ (3.2)

- Полное время для узла i : $t_{MECi} = t_{commMEC} + t_{compMEC}$ (3.3)

2. Метод INC (In-Network Computing):

- Время вычислений: $t_{compINC} = \frac{T_s}{\frac{C_c}{N}}$ (3.4)

- Время передачи данных: $t_{commINC} = \frac{T_s}{C_{com}}$ (3.5)

- Полное время для узла i : $t_{INCi} = t_{compINC} + t_{commINC}$ (3.6)

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: $t_{hybridcomm} = \left(\frac{T_s}{\frac{C_{com}}{N}} \right) \cdot f_{comm}$ (3.7)

Время вычислений: $t_{hybridcomp} = \left(\frac{T_s}{C_c} \right) \cdot f_{comp}$ (3.8)

Полное время для узла i : $t_{hybridi} = t_{hybridcomm} + t_{hybridcomp}$ (3.9)

Обобщенное время:

Для каждой задачи j :

- $timeMEC_j = (t_{MECi})$

- $timeINC_j = (t_{INCi})$

- $timehybrid_j = (t_{hybridi})$

Среднее время по всем задачам:

- $avgTimeMEC = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M timeMEC_j$

- $avgTimeINC = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M timeINC_j$

- $avgTimehybrid = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M timehybrid_j$

Таким образом, получена математическая модель, описывающая процесс вычисления времени выполнения задач методами MEC, INC и гибридным методом, а на рисунках 3.3 – 3.5 визуализированы результаты их работы.

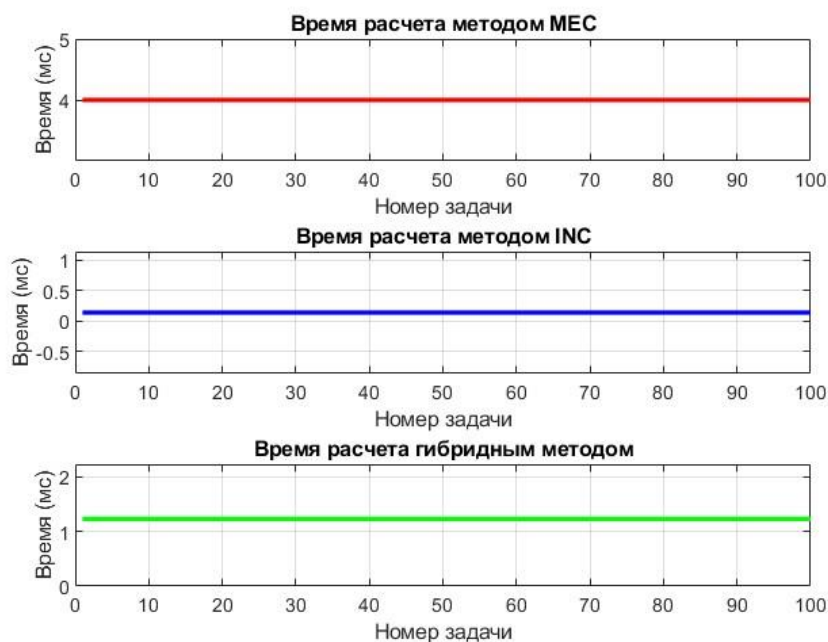


Рисунок 3.3 – Время расчета нагрузки для трех методов в зависимости от количества задач

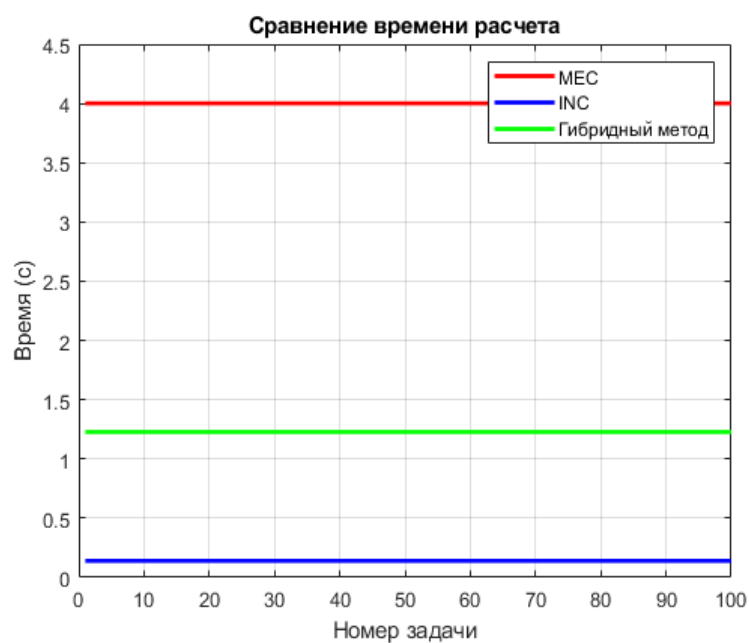


Рисунок 3.4 – Сравнение времени расчета нагрузки для трех методов в зависимости от количества задач

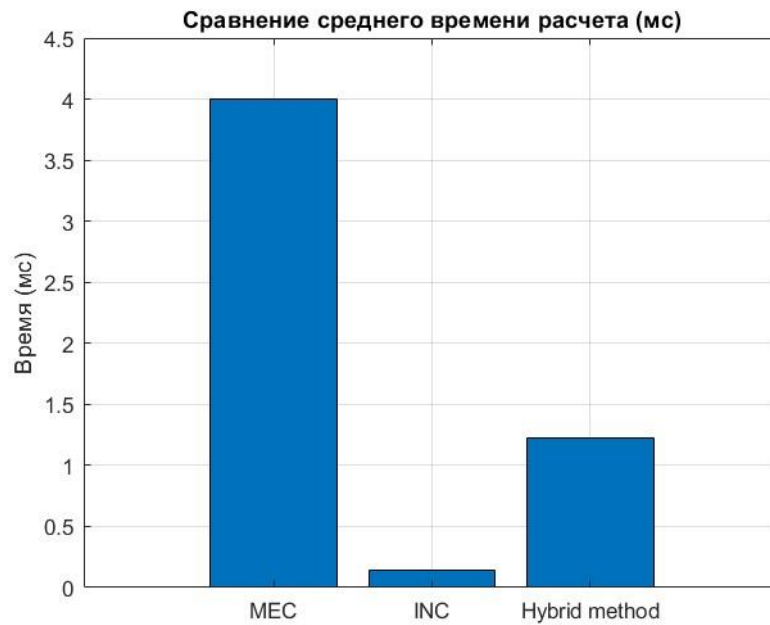


Рисунок 3.5 – Сравнение времени расчета нагрузки для трех методов в зависимости от количества задач в виде гистограммы

Как мы видим, можно уменьшить задержку почти на 70%. Значения показателей и их процентное снижение дают представление о повышении эффективности достигнутой в процессе оптимизации.

Точные значения, полученные в результате работы вычислительной модели:

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

Результаты моделирования показали, что предлагаемая гибридная модель распределения вычислительных ресурсов имеет более высокую скорость обработки, чем MEC, однако работает медленнее чем INC. Тем не менее, предлагаемый метод динамической адаптации между стратегиями MEC и INC в зависимости от размера задачи относительно порога имеет свои преимущества. Такая схема использования вычислительных методов, размещенных в разных

слоях сетевой инфраструктуры, снижает задержки и энергопотребление (ЕС) системы и является более сбалансированной и надежной.

Так, для небольших задач приоритет отдается расширенным внутрисетевым вычислениям, которые осуществляются на сетевых элементах, таких как программируемые коммутаторы и маршрутизаторы, а более крупные задачи перенаправляются к серверам МЕС. За счет динамического переключения весовых коэффициентов для фактора передачи данных f_{comm} и фактора вычислений f_{comp} гибридный подход позволяет лучше использовать доступные сетевые и вычислительные ресурсы, тем самым уменьшая нагрузку на узкие участки сети и повышая ее производительность. Кроме того, гибридный метод может более эффективно адаптироваться к изменяющимся условиям сети и нагрузкам, чем статический подход (МЕС или INC), что делает его более масштабируемым для систем с высоким уровнем изменения рабочих нагрузок. Такой подход снижает вероятность того, что какой-либо отдельный ресурс (коммуникация или вычисления) станет узким местом, что приводит к более сбалансированному распределению нагрузки по сети. Таким образом, применение гибридного метода эффективно для задач, в решении которых могут лучше подходить разные методы обработки. Задачи небольшого вычислительного объема выигрывают от быстрого взаимодействия, тогда как наиболее ресурсозатратные задачи выигрывают от распределенных и параллельных вычислений, тем самым балансируя и оптимизируя общую производительность сети.

3.5 Выводы по Главе 3

1. Предлагаемая система разгрузки, 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 МЕС 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.

2. 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.

3. 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.

4. Результаты показывают, что гибридное решение INC-MEC может стать основой будущего 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.

ГЛАВА 4 Интеллектуальная бессерверная вычислительная система для услуг телеприсутствия

4.1 Предпосылки и мотивация для использования пограничных вычислений с множественным доступом и миграции сервисов в системах телеприсутствия

Технология мобильных пограничных вычислений с множественным доступом (MEC) обеспечивает приложения Интернета вещей (IoT) и системы телеприсутствия услугами, критично важными с точки зрения ресурсоемкости и задержки, за счет расширения возможностей облачных вычислений на уровень границе сети в пределах досягаемости конечных устройств. Высокая мобильность IoT-устройств, например таких как транспортные средства, вместе с ограниченными ресурсами пограничных серверов, приводит к увеличению времени отклика и ухудшению стабильности обслуживания [105, 111]. В связи с этим, для поддержания требуемого уровня качества обслуживания (QoS), возникает необходимость в рациональном перераспределении ресурсов и выполнения миграции сервисов. Однако обслуживание процедуры миграции приводит к дополнительным задержкам. Кроме того, на необходимость миграции обслуживания влияют политики распределения ресурсов целевых пограничных серверов [105]. Это связано с тем, что у различных пользователей систем телеприсутствия требования к сетевым и вычислительным ресурсам могут отличаться. Следовательно, вопрос оптимизации процессов миграции обслуживания и распределения ресурсов, является важной задачей, требующей тщательной проработки. В этой главе рассматривается проблема совместной оптимизации миграции сервисов обслуживания и распределения ресурсов (SMRA) в условиях MEC для минимизации задержек в системах телеприсутствия. Предложенный в работе комбинированный метод представляет собой совместный алгоритм SMRA и MEC, который принимает в расчет специфические особенности

систем телеприсутствия и определяет оптимальное решение по перемещению сервисов, вариантов их миграции и распределению ресурсов. Например, для задач чувствительных к временным задержкам, время обработки не должно превышать 0,1 мс [105], что при использовании удаленного облака является сложно достижимой задачей. С другой стороны, из-за ограниченных вычислительных ресурсов абонентских устройств, обработка таких задач на пользовательских устройствах ведет к большому потреблению энергии и высоким задержкам. Для решения этой проблемы была предложена новая технология — упомянутые выше пограничные вычисления с множественным доступом [106]. Основной концепцией технологии МЕС является разгрузка задач, которая подразумевает перенос задач с пользовательских устройств на сервера, размещенные ближе к краю сети, в непосредственной близости от пользователей или в удаленное облако. Данный подход позволяет существенно сократить задержки при обработке задач и уменьшить энергозатраты [106].

Технология телеприсутствия представляет собой совокупность информационных технологий для проведения сеансов видеоконференцсвязи, которая реализуют «ощущение присутствия или воздействия» в месте, отдаленном от реального физического расположения пользователя [112]. Суть этой технологии заключается в объединении технологий передачи видео высокой четкости (UHD), объемного звука и получения обратной связи от пользователя, что нужно для интерактивности, при этом обмен данными должен происходить в режиме реального времени. Кроме того, в эту систему могут входить технологии виртуальной (VR) и дополненной реальности (AR) — например, 3D голограммы и устройства для имитации тактильных контактов [106]. Концепция услуг телеприсутствия известна довольно давно, однако ее практическая реализация стала возможной только в последние годы благодаря развитию телекоммуникационных систем и информационных технологий, поддерживающих высокую пропускную способность передачи данных на гораздо более высоких

частотах и низкую задержку. Однако, внедрение и эксплуатация подобных систем (например, технологий 5G/6G) являются весьма затратными, особенно для малого бизнеса и образовательных учреждений, что является одной из причин тормозящих широкое распространение систем телеприсутствия [105, 106].

Граничные вычисления с множественным доступом (Multi-access Edge Computing, MEC) — это стремительно развивающаяся технология, предназначенная для повышения эффективности передачи данных и обработки информации в современных сетях. Технологии MEC используют децентрализованный подход, который подразумевает размещение вычислительных ресурсов и хранилищ ближе к конечным пользователям, что в целом снижает время задержки и повышает качество обслуживания [113]. Таким образом, в отличие от традиционных облачных вычислений, которые зависят от удаленных центров обработки данных, технология MEC распределяет ресурсы на границе сети, обеспечивая быстрый доступ к данным. Это особенно актуально для приложений требовательных к минимальным задержкам, таких, например, как беспилотные и Интернет вещей (IoT), а также системы телеприсутствия [106]. Технология MEC также помогает разгрузить ядро сети и центральные узлы, перераспределяя задачи обработки информации на пограничные устройства, что улучшает пропускную способность и управление трафиком. Тем не менее, MEC не всегда может обеспечить минимальную задержку при передаче данных, поскольку высока вероятность того, что пограничные узлы могут оказаться перегруженными [114]. Следовательно, миграция обслуживания и распределения ресурсов (SMRA) является важной технологией, которая служит для оптимизации размещения/использования услуг и ресурсов. Основной целью SMRA является достижение эффективного использования коммуникационных и информационных систем и, как следствие, снижение издержек и затрат. Технология включает в себя ряд многоэтапных задач, причем эффективное распределение ресурсов является ключевым аспектом SMRA [107]. В зависимости от результатов анализа в

потребностях и фактического наличия ресурсов, разрабатываются стратегии их оптимального использования, перераспределения или увеличения [107].

Различия между концией миграции обслуживаний и распределения ресурсов (SMRA) и концепцией Multi-access Edge Computing (MEC) заключается в их основной направленности и функциональности. Ниже рассмотрим ключевые различия в принципах работы SMRA и MEC [107]:

в первую очередь технология SMRA направлена на оптимизацию процессов миграции сервисов между различными узлами сети и эффективному распределению ресурсов. Главная задача SMRA заключается в том, чтобы обеспечить максимальную эффективность использования доступных ресурсов, снизить задержки и таким образом повысить качество обслуживания конечного пользователя. Как упоминалось выше, концепция MEC представляет собой архитектуру вычислений «на краю» сети, где данные обрабатываются ближе к источнику их формирования (пользователям), что позволяет значительно сократить время задержки и разгрузить центральные серверы [115]. MEC предоставляет инфраструктуру и программные платформы для размещения разнообразных приложений и сервисов непосредственно на границе сети, что может быть использовано операторами связи для предоставления новых услуг и приложений с низкими задержками [116]. Именно поэтому технология MEC широко используется в рамках концепции интернета вещей (IoT), интеллектуальных транспортных систем (ITS), дополненной и виртуальной реальности (AR/VR), беспилотных и других приложений, требующих быстрой обработки данных и низких задержек [106, 107];

Во-вторых, MEC является более глобальной и занимается созданием архитектурных основ для обработки данных «на краю» сети.

В-третьих, SMRA стремится распределять задачи и ресурсы с точки зрения их текущей доступности и загруженности. MEC, в свою очередь, фокусируется на смещении вычислений ближе к точкам формирования данных [108];

в SMRA акцент делается на управлении и распределении ресурсов между различными узлами сети, чтобы обеспечить оптимальную производительность, а в MEC ресурсы предоставляются на базе узлов сети (edge nodes), чтобы минимизировать время передачи данных и повысить скорость отклика [117].

Не смотря на эти различия тем не менее, взаимодействие между SMRA и MEC также возможно и, зачастую, необходимо для создания высокоэффективных и масштабируемых систем, способных удовлетворить потребности современных приложений и сервисов [118].

Рассмотрим сценарий, схематично показанный на рисунке 4.1, в котором пользователь $u1$ подключается к пограничному узлу $e1$ в момент времени t и запрашивает обслуживание у $U2$ на пограничном узле $e1$. Мы предполагаем, что пользователь $u1$ переместится в окрестности пограничного узла $e3$ в момент времени $t+1$. С одной стороны, если пользователь продолжит подключаться к исходному пограничному узлу $e1$, это приведет к длительной задержке связи между мобильным пользователем $u1$ и исходным пограничным узлом $e1$. С другой стороны, мы можем выполнить миграцию службы, чтобы переместить службу $Y2$ с исходного пограничного узла $e1$ на целевой пограничный узел $e3$, чтобы сократить расстояние связи и уменьшить задержку связи. Миграция сервисов является эффективным средством обеспечения непрерывности связи, но она дополнительно вызывает задержку в процессе миграции [119]. Кроме того, выполнение миграции сервисов ведет к изменению связей между пользователями систем телеприсутствия и ES, при этом нам необходимо учитывать неоднородность и ограниченность ресурсов целевых пограничных серверов. Перераспределение ресурсов на назначенных пограничных серверах после перемещения сервисов влияет на вычислительные задержки и задержки связи для мобильных пользователей. Это, в свою очередь, определяет, имеет ли смысл проведение данной миграции. Таким образом, важно, для проведения миграции одновременно рассчитать и учесть вероятную пользу от процесса миграции

сервисов и перераспределения ресурсов и запускать процесс перемещения только в том случае, когда это способствует уменьшению времени отклика [109].



Рисунок 4.1 – Схема сети

Для обеспечения непрерывного обслуживания и уменьшения задержек доступа, будущие интеллектуальные системы телеприсутствия должны уметь распознавать мобильное поведение пользователей и заранее планировать схемы миграции услуг и распределения ресурсов. Однако предыдущие исследования в основном рассматривали миграцию услуг и распределение ресурсов как отдельные задачи, без учета их взаимного влияния. Результаты принятого решения о миграции услуг влияют на непрерывность обслуживания, тогда как стратегии распределения ресурсов оказывают воздействие на процессы миграции. К тому же разнообразие пользователей предъявляет различные требования к ресурсам и имеет уникальные шаблоны мобильности. Ресурсы в пограничных системах (ES) также могут иметь ограниченность, неоднородность и изменяться со временем,

что добавляет сложности в совмещение оптимизации миграции услуг и распределения ресурсов [110].

Что бы справиться с этими задачами мы исследовали работу SMRA (Совместной Оптимизации Миграции Услуг и Распределения Ресурсов) с учетом этих двух факторов. Наше исследование направлено на определение необходимости миграции сервисов, выбора мест для их перемещения и оптимального распределения ресурсов. В конечном итоге это позволит обеспечить мобильность пользователей, оптимизировать использование ресурсов системы телеприсутствия, минимизировать задержки доступа, предотвращать сбои в обслуживании и улучшить общее качество обслуживания (QoS) [120].

В этой главе, в отличие от имеющихся исследований, мы предлагаем рассмотреть алгоритм совместного использования SMRA+MEC, который учитывает специфику систем телеприсутствия и решает задачу о целесообразности проведения миграции сервисов и оптимального распределения ресурсов. Предлагаемый способ расчета позволяет сократить задержки при передаче данных и вести распределение ресурсов более оптимально [121]. Показано, что комбинация методов SMRA+MEC является наиболее эффективным подходом к минимизации задержек, поскольку итеративный подход к расчету задержки позволяет эффективно использовать имеющиеся вычислительные ресурсы. Стоит отметить, что числовые значения, используемые в главе, имеют относительный и условный характер и в первую очередь предназначены для иллюстрации предлагаемого подхода в минимизации задержки [110].

4.2 Предлагаемый подход: Комбинированная платформа SMRA и MEC для минимизации задержек в системах телеприсутствия

В сфере современных систем телеприсутствия достижение минимальных значений задержки имеет решающее значение для эффективности работы и улучшения пользовательского опыта [121]. Для достижения этой цели одним из

перспективных подходов является использование комбинации методов миграции услуг и распределения ресурсов (SMRA) с технологиями мобильных граничных вычислений с множественным доступом (MEC). Этот раздел посвящен сценарию, предлагающему подходы к описанию сложных, но эффективных методов, применяемых для повышения оптимизации задержки [122, 125].

Данный сценарий предназначен для моделирования и оптимизации задержки в системах телеприсутствия. Это осуществляется за счет стратегического распределения вычислительных задач между несколькими пограничными узлами, выбора оптимальных решений для миграции сервисов и управления ресурсами [125].

Сценарий предполагает балансировку вычислительных задач между различными пограничными узлами, динамическую миграцию сервисов и эффективное распределение ресурсов [123]. Его цель — минимизировать общую задержку, которую испытывают пользователи. Далее рассмотрим ключевые аспекты модели, акцентируя внимание на сложных методах, используемых в ней. Имитационная модель строит сетевой график с помощью библиотеки NetworkX, чтобы смоделировать физическую и логическую структуру сети. График отображает взаимосвязи между разными пограничными узлами и центральным облачным сервером, определяет маршруты передачи данных и возможные задержки [126]. Для воспроизведения реальности сценария, модель симулирует миграцию сервисов и адаптацию распределения ресурсов среди пограничных узлов. Абстрактные функции моделируют эти процессы, сосредотачиваясь на принятии решений, направленных на выбор момента для миграции сервиса с учетом оптимального распределения полосы пропускания и вычислительной мощности. Центральная роль отводится алгоритму оптимизации, который минимизирует суммарную задержку в сети, последовательно подстраивая расположение сервисов и распределение ресурсов [124]. В этом процессе может использоваться метод градиентного спуска или другие техники нелинейного

программирования. После завершения процесса оптимизации модель анализирует полученные результаты, выявляя конфигурации, обеспечивающие минимальную задержку. Эта обратная связь позволяет непрерывно улучшать и настраивать параметры в условиях изменяющейся сетевой среды в режиме реального времени [125, 126].

В модели реализуется процесс назначения пользователей к узлам edge-сети с целью минимизации общей задержки при выполнении задач. Основу составляют различные методы, включая MEC (Multi-access Edge Computing, граничные вычисления с множественным доступом) и SMRA (Service Migration And Resource Allocation). Также представлен комбинированный метод, использующий итеративный процесс улучшения назначений. Суть этого метода состоит в оптимальном распределении пользовательских задач между граничными узлами для снижения задержки. Предлагаемый комбинированный метод включает формулу для расчета задержки L :

$$L = \sum_{i=1}^N \left(D_{trans}(u_i, e_{a_i}) + \frac{R_{task}(u_i)}{R_{exec}(e_{a_i})} \right) \quad (4.1)$$

где N – количество пользователей, u_i – позиция пользователя i , e_{a_i} – позиция назначенного edge-узла для пользователя i , $D_{trans}(u_i, e_{a_i})$ – задержка передачи данных между пользователем u_i и назначенным узлом, $R_{task}(u_i)$ – скорость задачи пользователя u_i (количество задач в секунду), $R_{exec}(e_{a_i})$ – скорость выполнения задач на узле e_{a_i} (количество задач в секунду) [127].

При этом задержка передачи данных $D_{trans}(u_i, e_{a_i})$ это время, затраченное на передачу данных от устройства пользователя к узлу, и может зависеть от расстояния, пропускной способности сети и текущей загрузки [127]:

$$D_{trans}(u_i, e_{a_i}) = \frac{D_{data}(u_i)}{B_{net}(u_i, e_{a_i})} \quad (4.2)$$

где: $D_{data}(u_i)$ — объём данных, подлежащих передаче, $B_{net}(u_i, e_{a_i})$ — доступная пропускная способность между пользователем и узлом. Кроме того, можно учитывать отдельный параметр — задержку выполнения (execution latency), обозначаемую как $T_{exec}(u_i, e_{a_i})$ — которая представляет собой время, необходимое edge-узлу для завершения задачи пользователя. Этот параметр отражает влияние вычислительной мощности узла на скорость выполнения задач. Задержка выполнения рассчитывается следующим образом [127]:

$$T_{exec}(u_i, e_{a_i}) = \frac{R_{task}(u_i)}{R_{exec}(e_{a_i})} \quad (4.3)$$

Таким образом, расчет задержки в предлагаемом методе можно представить как:

$$L = \sum_{i=1}^N (D_{trans}(u_i, e_{a_i}) + T_{exec}(u_i, e_{a_i})) \quad (4.4)$$

Рисунок 4.2 наглядно показывает структуру алгоритма и представляет итеративный процесс улучшения назначения пользовательских задач пограничным узлам. Процесс начинается с произвольных назначений и использует методы случайного поиска для постепенного уменьшения задержки.



Рисунок 4.2 – Структура итеративной модели назначения граничных узлов алгоритма

4.3 Математическое моделирование и анализ производительности предлагаемого фреймворка

Ниже мы приводим краткое описание математической модели, которая включает в себя определение параметров, переменных и уравнений, описывающих представленную систему и процессы. Этот математический подход представляет собой набор параметрических задач оптимизации, связанных с распределением задач между узлами для минимизации общей задержки.

Описание модели и ее параметры

1. Позиции пользователей и граничных узлов:

Пусть $p_u = \{i = 1, 2, \dots, N_u\}$ — это множество позиций пользователей, где N_u — количество пользователей.

Пусть $p_e = \{j = 1, 2, \dots, N_e\}$ — это множество позиций граничных узлов (Edge), где N_e — количество граничных узлов

2. Задачи и вычислительные ресурсы:

Пусть $T = \{i = 1, 2, \dots, N_u\}$ — это вектор задач

Пусть $R = \{j = 1, 2, \dots, N_e\}$ — это вектор вычислительных мощностей

3. Назначение пользователей на граничные узлы:

Пусть $A = \{i = 1, 2, \dots, N_u\}$ где $a_i \in \{1, 2, \dots, N_e\}$ — это индекс узла, на который назначен пользователь i .

4. Задержка миграции:

Пусть M — это матрица стоимости миграции, где элемент $M_{j,k}$ обозначает стоимость миграции между узлами j и k .

Функции и метрики

1. Функция задержки передачи данных:

Пусть $D_{\text{trans}}(u_i, e_j)$ — это функция, которая вычисляет задержку передачи между пользователем i и узлом j :

$$D_{\text{trans}}(u_i, e_j) = \frac{1}{100} \sqrt{\left(x_u^{(i)} - x_e^{(j)}\right)^2 + \left(y_u^{(i)} - y_e^{(j)}\right)^2} \quad (4.5)$$

2. Функция задержки выполнения задачи:

Пусть $D_{\text{exec}}(t_i, r_j)$ — это функция, которая вычисляет время выполнения задачи t_i на узле j :

$$D_{\text{exec}}(t_i, r_j) = \frac{t_i}{r_j} \quad (4.6)$$

где t_i – вычислительная нагрузка пользователя i ;

r_j – вычислительная мощность узла j .

3. Общая задержка:

Общая задержка для каждого пользователя i при назначении на узел j будет суммой задержек передачи данных и выполнения задачи:

$$D_{\text{total}}(a_i) = D_{\text{trans}}(u_i, e_j) + D_{\text{exec}}(t_i, r_j) \quad (4.7)$$

4. Оптимизация назначения пользователей:

Цель состоит в минимизации общей задержки для всех пользователей:

$$D^* = \sum_{i=1}^{N_u} D_{\text{total}}(a_i) \quad (4.8)$$

где a_i — переменная, определяющая назначение пользователя i на один из узлов j .

Итерационная оптимизация

Пусть $A^{(t)}$ — текущее назначение на итерации t . Итерационный процесс обновления назначения осуществляется следующим образом:

1. Выбираем случайного пользователя i и случайный узел j .
2. Рассчитаем новую задержку $D_{\text{total}}(a_i)$ при изменении назначения.
3. Обновляем назначение $A^{(t+1)}$ если новая задержка меньше предыдущей.

Процесс продолжается до того момента, пока назначение не стабилизируется.

Основная задача заключается в нахождении оптимального назначения пользователей на узлы с минимальной общей задержкой. Решение задачи происходит итерационно, что позволяет постепенно улучшать решение на основе случайных изменений назначения.

В рамках предлагаемой модели осуществляется настройка позиций пользователей и edge-узлов случайным образом, ограниченных территорией в 100x100 м (рис. 4.3). Кроме этого, мы задаем число пользователей и граничных узлов. В нашем случае рассматриваем 10 пользователей и 5 граничных узлов, при этом можно рассмотреть любые значения. Используемые нами значения были выбраны для наглядности и упрощения расчетов. Далее случайным образом определяются значения скорости выполнения задач для пользователей и скорости выполнения задач для узлов, а также затраты (стоимость) на миграцию между узлами.

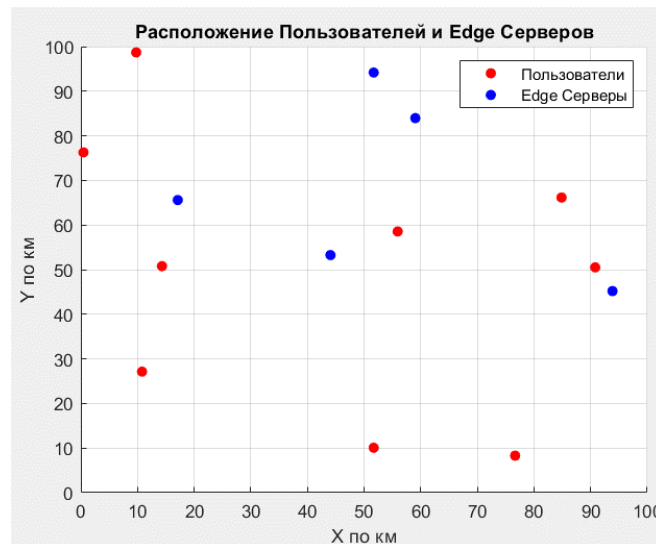


Рисунок 4.3 – Изначальное расположение пользователей и узлов

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 4.4 – 4.9.

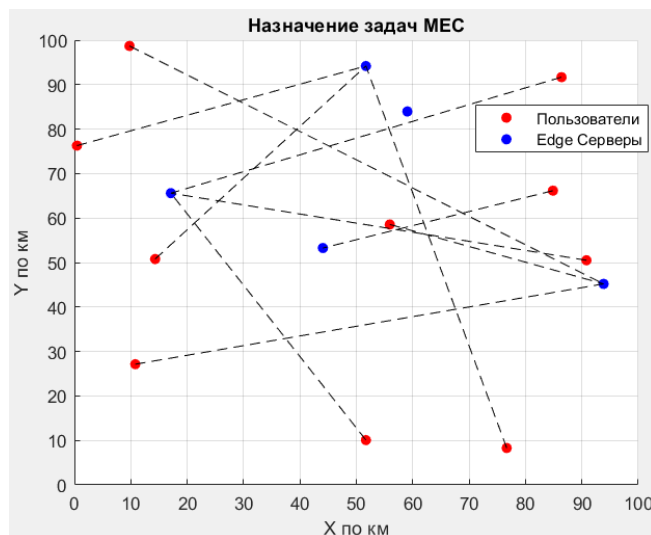


Рисунок 4.4 – Назначение задач методом MEC

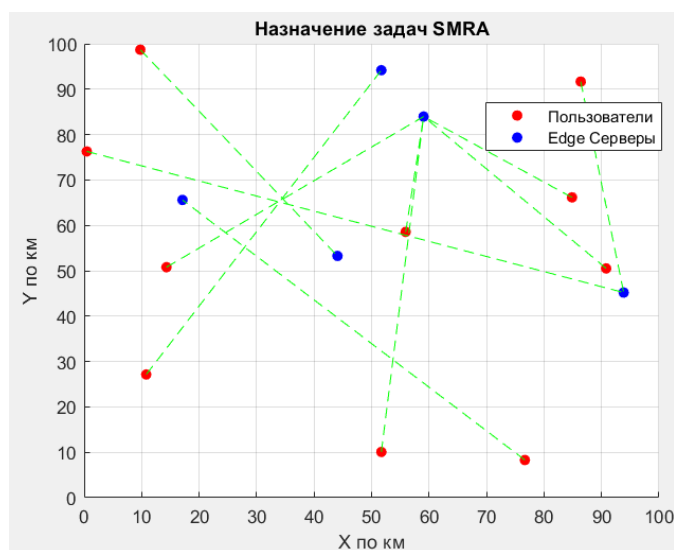


Рисунок 4.5 – Назначение задач методом SMRA

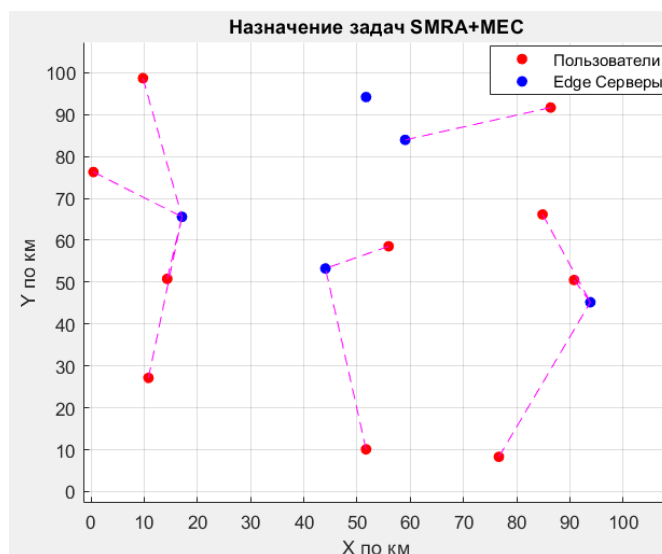


Рисунок 4.6 – Назначение задач комбинированным методом

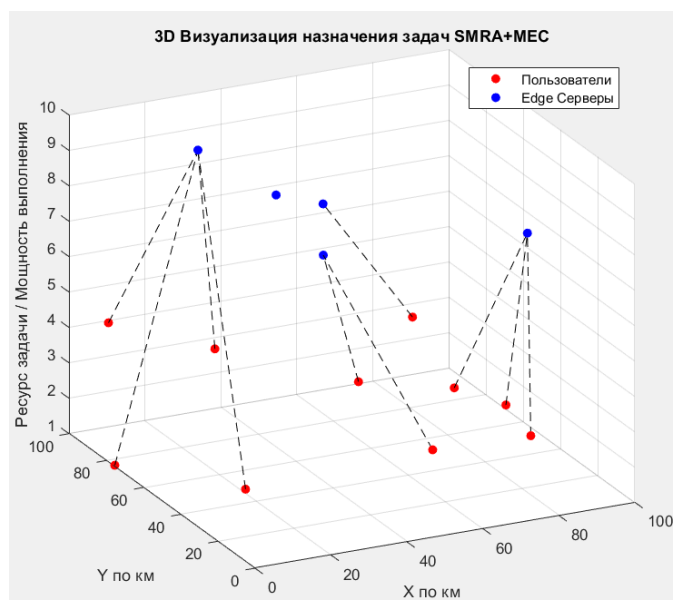


Рисунок 4.7 – 3D Визуализация назначения задач SMRA+MEC

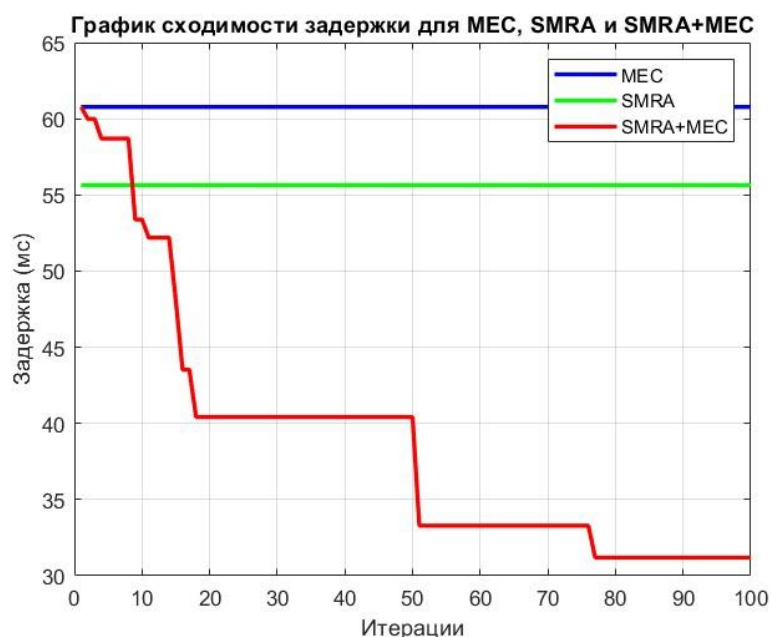


Рисунок 4.8 – График сходимости задержки для MEC, SMRA и предлагаемый алгоритм SMRA+MEC

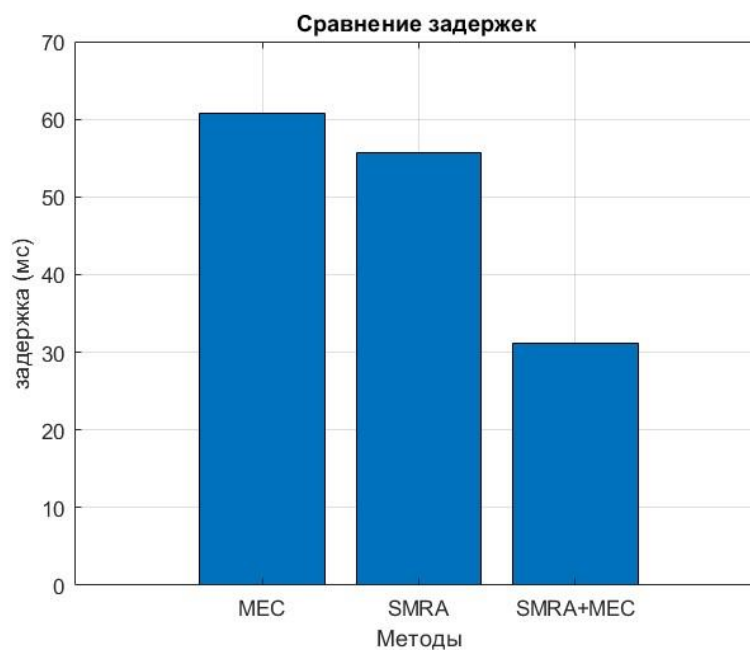


Рисунок 4.9 – Сравнение задержек

Предлагаемая модель комбинирует случайные начальные назначения (используя методы MEC и SMRA) с последующим итеративным улучшением через случайный поиск. Такой подход позволяет снизить задержку выполнения задач благодаря динамическому перераспределению задач пользователей между

Edge-узлами, что помогает находить самые эффективные маршруты передачи и обработки в сети. На рисунке 4.9 видно, что предложенный метод достигает минимальной задержки: задержка MEC составляет 60 мс, SMRA – 55 мс, а комбинированный метод SMRA+MEC дает результат всего в 31 мс. Рисунок 4.9 показывает, что задержка может быть снижена почти на 50 %, что говорит о значительном потенциале предложенной модели.

Таким образом, задержка может быть снижена почти на 50%, что говорит о значительном потенциале предложенной модели. Однако стоит отметить, что представленные значения являются ориентировочными и могут потребовать уточнения для конкретных сетей или систем. Полученное итоговое значение и процент уменьшения дают представление об уровне повышения эффективности, достигаемого в ходе оптимизации.

4.4 Выводы по Главе 4

1. В главе показано, что миграция служб 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 разгрузки 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.

2. 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.

3. 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.

4. Разработанный мной итеративный алгоритм, который показан на рисунке 4.6, 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 (уравнения 1-8). 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Предлагаемая система разгрузки, 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.

7. 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.

8. 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.

9. Результаты показывают, что гибридное решение INC-MEC может стать основой будущего 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.

10. В главе показано, что миграция служб 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 разгрузки 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.

11. 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.

12. 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.

13. Разработанный мной итеративный алгоритм, который показан на рисунке 4.6, 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 (уравнения 1-8). 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alsabah, M. 6G Wireless Communications Networks: A Comprehensive Survey / M. Alsabah, M.A. Naser, B.M. Mahmmmod et al. // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 148191–148243.
2. Wang, S. On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies and Testbeds / S. Wang, X. Wang, H. Chen et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023. – Vol. 25. – P. 905–948.
3. Di Renzo, M. Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities / M. Di Renzo, H. Wymeersch, G. H. C. et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Vol. 23. – P. 1546–1577.
4. Chen, Z. Terahertz Communications and Sensing for 6G and Beyond / Z. Chen, X. Ma, Y. Li et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials / COMST. – 2024. – Vol. (special issue) – P. 1–44.
5. Liu, A. A Survey on Fundamental Limits of Integrated Sensing and Communication / A. Liu, J. Zhang, Y. Liu et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24. – P. 1123–1160.
6. Huang, J. Edge-Computing-Driven Internet of Things: A Survey / J. Huang, Q. Li, S. Wang et al. // ACM Computing Surveys. – 2022. – Vol. 55. – P. 1–38.
7. Promwongsa, N. A Comprehensive Survey of the Tactile Internet: State-of-the-Art and Research Directions / N. Promwongsa, A. Ebrahimzadeh et al. // IEEE Access / arXiv. – 2020. – P. 1–58.
8. Varghese, B. A Survey on Edge Performance Benchmarking / B. Varghese, N. Wang et al. // arXiv / IEEE. – 2020. – P. 1–36.
9. Luo, Q. Resource Scheduling in Edge Computing: A Survey / Q. Luo, S. Hu et al. // arXiv. – 2021. – P. 1–48.

10. Ateya, A. A. Energy efficient offloading scheme for MEC-based augmented reality system / Ateya, A. A., Muthanna, A., Koucheryavy, A., Maleh, Y., & El-Latif, A. A. // Cluster Computing, 26(1), 2023, 789-806.
11. Schäfer A. A Survey on Synchronous Augmented, Virtual and Mixed Reality Remote Collaboration Systems / A. Schäfer, G. Reis, D. Stricker // ACM Comput. Surv. (CSUR) – 2021.
12. 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. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-18-27. EDN:UOYTAY
13. Кучерявый А.Е. Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия / Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Парамонов А.И., Выборнова А.И., Мутханна А.С., Матюхин А.Ю., Дунайцев Р.А., Владимиров С.С., Ворожейкина О.И., Захаров М.В., Фам В.Д., Марочкина А.В., Горбачева Л.С., Паньков Б.О., Анваржонов Б.Н. // Электросвязь. 2022. № 1. С. 14-20.
14. Волков А.Н. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G MEGANETLAB СПБГУТ / Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е., Бородин А.С., Парамонов А.И., Владимиров С.С., Фокин Г.А., Дунайцев Р.А., Захаров М.В., Горбачева Л.С., Паньков Б.О., Анваржонов Б.Н. // Электросвязь. 2023. № 6. С. 5-14.
15. 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.

16. Rejeb A. How augmented reality impacts retail marketing: A state-of-the-art review from a consumer perspective / A. Rejeb, K. Rejeb, H. Treiblmaier // J. Strateg. Mark. – 2021, – P. 1–31.
17. Yoo, J. The effects of perceived quality of augmented reality in mobile commerce—An application of the information systems success model. // Informatics. – 2020, № 7. – P. 14.
18. Alshahrani, A. Efficient multi-player computation offloading for VR edge-cloud computing systems / Alshahrani, A., Elgendy, I. A., Muthanna, A., Alghamdi, A. M., & Alshamrani, A // Applied Sciences, 10(16), 2020, 5515.
19. Szajna A. The production quality control process, enhanced with augmented reality glasses and the new generation computing support system / A. Szajna, R. Stryjski, W. Woźniak, N. Chamier-Gliszczyński, T. Królikowski, T. // Procedia Comput. Sci. – 2020, № 176. – P. 3618 – 3625.
20. 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.
21. Tsai T.H. Research study on applying SLAM-Based Augmented Reality technology for gamification history guided tour. In Proceedings of the 2019 / T.H. Tsai, Y.W. Chiang, // IEEE International Conference on Architecture, Construction, Environment and Hydraulics (ICACEH), – Xiamen, China, 20–22 December – 2019. – P. 116 – 119.
22. Mao C.C. Augmented reality of 3D content application in common operational picture training system for army / C.C. Mao, C.H. Chen // Int. J. Hum. Comput. Interact. – 2021, № 37. – P. 1899 – 1915.

23. Zaman F. Investigating a Virtual Reality Based Subterranean Scenario Examining Augmented Reality Implications for Military Operators. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting / F. Zaman, W. Drake, J. Intriligator, A. Gardony, M. Natick, J. Rife // SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, USA, – 2021; – Vol. 65, – P. 1129 – 1133.

24. Jones D. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, – 2020, № 29. – P. 36 – 52.

25. Lu Y. Adaptive edge association for wireless digital twin networks in 6G /Y. Lu, S. Maharjan, Y. Zhang // IEEE Internet of Things Journal, – 2021. № 8(22). – P. 16219 – 16230.

26. Ahmadi H. Networked twins and twins of networks: An overview on the relationship between digital twins and 6G / H. Ahmadi, A. Nag, Z. Khar, K. Sayrafian, S. Rahardja // IEEE Communications Standards Magazine, – 2021. № 5(4). – P. 154 – 160.

27. Kuruvatti, N. P., Habibi, M. A., Partani, S., Han, B., Fellan, A., & Schotten, H. D. Empowering 6G Communication Systems With Digital Twin Technology: A Comprehensive Survey / Kuruvatti, N. P., Habibi, M. A., Partani, S., Han, B., Fellan, A., & Schotten, H. D. // IEEE Access, – 2022.

28. Masaracchia A. Digital Twin for 6G: Taxonomy, Research Challenges, and the Road Ahead / A. Masaracchia, V. Sharma, B. Canberk, O.A. Dobre, T.Q. Duong // IEEE Open Journal of the Communications Society, – 2022.

29. Allam Z. Future (post-COVID) digital, smart and sustainable cities in the wake of 6G: Digital twins, immersive realities and new urban economies. / Z. Allam, D.S. Jones // Land use policy – 2021. 101, – P. 105201.

30. Elzanaty A. Towards 6G holographic localization: Enabling technologies and perspectives / A. Elzanaty, A. Guerra, F. Guidi, D. Dardari, M.S. Alouini // arXiv preprint arXiv:2103.12415. – 2021.
31. Long W. A promising technology for 6G wireless networks: Intelligent reflecting surface / W. Long, R. Chen, M. Moretti, W. Zhang, J. Li // Journal of Communications and Information Networks, – 2021. № 6(1). – P. 1 – 16.
32. 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. <https://doi.org/10.1145/3726122.3726258>
33. Bi S. Computation Rate Maximization for Wireless Powered Mobile-Edge Computing With Binary Computation Offloading / S. Bi, Y. J. Zhang // IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 17, no. 6, – Jun., 2018. – P. 4177–4190.
34. Huang C. Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends. IEEE Wireless Communications / C. Huang, S. Hu, G.C. Alexandropoulos, A. Zappone, C. Yuen, R. Zhang, M. Debbah // – 2020. № 27(5). – P. 118 – 125.
35. S. Choudhury, S. Das, S. Paul, I. Seskar, and D. Raychaudhuri, “Intelligent agent support for achieving low latency in cloud-native nextg mobile core networks,” in Proc. ACM International Conference on Distributed Computing and Networking (ICDCN), Jan. 2023, pp. 12–19.
36. Beniiche A. 5.0: Internet as if People Mattered. IEEE Wireless Communications / A. Beniiche, S. Rostami, M. Maier // – 2022. № 29(6). – P. 160 – 168.

37. Maier, M. Toward 6G: A new era of convergence. In Optical Fiber Communication Conference. // Optica Publishing Group. – 2021. June, – P. F4H-1.
38. Maier M. The Internet of No Things: Making the Internet Disappear and “See the Invisible” / M. Maier, A. Ebrahimzadeh, S. Rostami, A. Beniiiche // IEEE Communications Magazine, – 2020. № 58(11). – P. 76-82.
39. Maier, M. 6G as if people mattered: From industry 4.0 toward society 5.0. In 2021 International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). // IEEE. – 2021. July, – P. 1 – 10.
40. Мутханна А.С. Метод размещения SDN-контроллеров на мобильных узлах сетей VANET для высокоплотных и сверхплотных сетей 6G / Мутханна А.С // Электросвязь. 2023. № 8. С. 19-27.
41. Chen, N. Toward 6G internet of things and the convergence with RoF system / N. Chen, M. Okada // IEEE Internet of Things Journal, – 2020. № 8(11). – P. 8719 – 8733.
42. Vaigandla, K. K. Communication Technologies and Challenges on 6G Networks for the Internet: Internet of Things (IoT) Based Analysis. // In 2022 2nd International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM) – 2022. February, – P. 27 – 31.
43. 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. <https://doi.org/10.1145/3726122.3726259>.
44. Владыко А.Г. выгрузки трафика В V2X/5G сетях на основе системы граничных вычислений / Владыко А.Г., Мутханна А.С., Кучерявый А.Е. Метод // Электросвязь. 2020. № 8. С. 24-30

45. Мутанна М.С. Метод глубокого обучения с подкреплением для систем интернета вещей на базе технологии lora с ограниченными ресурсами и поддержкой QOS / Мутанна М.С., Мутханна А.С., Бородин А.С. // Электросвязь. 2021. № 8. С. 23-26.
46. Hu S. Blockchain and artificial intelligence for dynamic resource sharing in 6G and beyond / S. Hu, Y.C. Liang, Z. Xiong, D. Niyato // IEEE Wireless Communications. – 2021. № 28(4). – P. 145 – 151.
47. Мутханна А.С. Модель интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух–земля» и метод выгрузки трафика для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности. Труды учебных заведений связи/ Мутханна А.С // 2023;9(3):42-59
48. Peng, H. 6G toward Metaverse: Technologies, Applications, and Challenges. / P.C. Chen, P.H. Chen, Y.S. Yang, C.C. Hsia, L.C. Wang // In 2022 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS) // IEEE. – 2022. August, – P. 6 –10
49. Kharche S. /Interoperability Issues and Challenges in 6G Networks / S. Kharche, P.Dere // Journal of Mobile Multimedia. – 2022. № 18(5). – P. 1445 – 1470.
50. 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.
51. Soldani, D. Horizon 2020 and beyond: On the 5G operating system for a true digital society / D. Soldani, A. Manzalini // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2015. – Vol. 10, Issue 1. – P. 32–42.

52. Volkov, A.N. Advanced Research of Networks and Services 2030 in the 6G MEGANETLAB Laboratory of SPbSUT / A.N. Volkov, A.S.A. Muthanna, A.E. Kucheryavy, et al. // *Electrosvyaz*. – 2023. – No. 6. – P. 5–14.
53. Al-Ansi, A. Survey on intelligence edge computing in 6G: Characteristics, challenges, potential use cases, and market drivers / A. Al-Ansi, A.M. Al-Ansi, A. Muthanna et al. // *Future Internet*. – 2021. – Vol. 13, Issue 5. – 118.
54. Dunaytsev, R.A. Integrated Space-Air-Land-Sea Network as the Basis of Sixth-Generation Communication Networks / R.A. Dunaytsev, A.S. Borodin, A.E. Kucheryavy // *Electrosvyaz*. – 2022. – No. 10. – P. 5–8.
55. 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. – EDN EVGPDZ.
56. 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. – EDN FQJKVP.
57. Volkov, A.N. Routing Problem in a Dynamic Fog Computing Network / A.N. Volkov // *Transactions of Educational Institutions of Communications*. – 2024. – vol. 10, No. 4 – P. 27–37.
58. Gu X. Energy-Optimal Latency-Constrained Application Offloading in Mobile-Edge Computing[J]. / X. Gu, C. Ji, G. Zhang // *Sensors*, – 2020. 20(11): P. 3064 – 3086.
59. Аль-Кереа, З. А. Стандартизация и сценарии применения hnrllc 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 2023 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. – С. 60-64. – EDN OGYSFB.

60. 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 2023 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. – С. 65-69. – EDN LPBUBY.

61. Shafi, M. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice / M. Shafi, A.F. Molisch, P.J. Smith et al. // IEEE Journal of Selected Areas in Communications. – 2017. – Vol. 35, Issue 6. – P. 1201–1221.

62. 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. – EDN AIZIZF.

63. 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. – EDN PSPQFP.

64. Muthanna, M.S.A. Toward an ultra-low latency and energy efficient lorawan / M.S.A. Muthanna, P. Wang, M. Wei et al. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems (NEW2AN 2019, ruSMARN 2019). – Springer International Publishing, 2019. – P. 233–242.

65. 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. – 100158.

66. Singh, S.P. Fog computing: From architecture to edge computing and big data processing / S.P. Singh, A. Nayyar, R. Kumar, A. Sharma // The Journal of Supercomputing. – 2019. – Vol. 75. – P. 2070–2105.

67. 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. – EDN LPTJNG.

68. 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.

69. Бородин А. С. Искусственный интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений/ А. Н. Волков, А. С. Мутханна, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – № 1. – 2021. – С. 17-22.
70. Мутханна А.С. Интеллектуальная распределенная архитектура сети связи для поддержки беспилотных автомобилей / Мутханна А.С. // Электросвязь. 2020. № 7. С. 29-34.
71. Patel M. et al. // Contributing Organizations and Authors. – no. 1, – P. 36.
72. Khan A. ur R. A Survey of Mobile Cloud Computing Application Models / A. ur R. Khan, M. Othman, S.A. Madani, S.U. Khan // IEEE Commun. Surv. Tutor., vol. 16, no. 1, – 2014. – P. 393–413.
73. Sanaei Z. Heterogeneity in Mobile Cloud Computing: Taxonomy and Open Challenges / Z. Sanaei, S. Abolfazli, A. Gani, R. Buyya // IEEE Commun. Surv. Tutor., vol. 16, no. 1, – 2014. – P. 369 – 392.
74. Brummett T. Performance Metrics of Local Cloud Computing Architectures / T. Brummett, P. Sheinidashtegol, D. Sarkar, and M. Galloway // in 2015 IEEE 2nd International Conference on Cyber Security and Cloud Computing, New York, NY, USA, – 2015. – P. 25–30.
75. Zhao T. A Cooperative Scheduling Scheme of Local Cloud and Internet Cloud for Delay-Aware Mobile Cloud Computing / T. Zhao, S. Zhou, X. Guo, Y. Zhao, Z. Niu // in 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), San Diego, CA, USA, – 2015. – P. 1–6.
76. Liu Y Adaptive Multi-Resource Allocation for Cloudlet-Based Mobile Cloud Computing System / Y. Liu, M.J. Lee, Y. Zheng // IEEE Trans. Mob. Comput., vol. 15, no. 10, – Oct., 2016.– P. 2398–2410.

77. El-Barbary A.E.-H.G. A cloudlet architecture using mobile devices / A.E.-H.G. El-Barbary, L.A.A. El-Sayed, H.H. Aly, M.N. El-Derini // in 2015 IEEE/ACS 12th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA), Marrakech, – 2015. – P. 1–8.
78. Маколкина, М.А. Метод выгрузки трафика приложений дополненной реальности в многоуровневой системе граничных вычислений / М.А. Маколкина, А.А. Атея, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2019. – № 6. – С. 36–42.
79. Волков, А.Н. Сетевая вселенная / А.Н. Волков, А.Е. Кучерявый, А.С.А. Мутханна // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей XIII Международной научно–технической и научно–методической конференции в 4 т. – СПб: СПбГУТ, 2024. – Т. 1. – С. 9–11.
80. Liu F. A survey on edge computing systems and tools[J]. / F. Liu, G. Tang, Y. Li, et al. // Proceedings of the IEEE, – 2019. 107(8): – P.1537 – 1562.
81. Sharif Aldin, H. N. S. Consistency models in distributed systems: A survey on definitions, disciplines, challenges and applications / H. N. S. Sharif Aldin, H. Deldari, M. H. Moattar, M. R. Ghods. // CoRR (arXiv). – 2019. – P. 52–arXiv:1902.03305.
82. Nguyen, D. C. Federated Learning for Internet of Things: A Comprehensive Survey / D. C. Nguyen, M. Ding, P. N. Pathirana, A. Seneviratne, J. Li, H. V. Poor. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Vol. 23, No. 3. – P. 1622–1658.
83. Ateya, A.A. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks / A.A. Ateya, A.A. Abd El–Latif, A. Muthanna et al. – New York: River Publishers, 2025. – 254 p.
84. Vinothina, V. A Survey on Resource Allocation Strategies in Cloud Computing / V. Vinothina, R. Sridaran, P. Ganapathi. // International Journal of

Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). – 2012. – Vol. 3, No. 6. – P. 97.

85. Maity, I. ReSQ: Reinforcement learning-based queue allocation in software-defined queuing framework / I. Maity, T. Taleb // Journal of Networking and Network Applications. – 2022. – Vol. 2, Issue 4. – P. 143–152.

86. Zhu, D. A Deep Reinforcement Learning Approach to Efficient Distributed Optimization / D. Zhu, T. Xu, J. Lu. // arXiv. – 2023. – P. 10– arXiv:2311.08827.

87. Chen, Y. Dynamic task allocation and service migration in edge-cloud IoT system based on deep reinforcement learning / Y. Chen, Y. Sun, C. Wang, T. Taleb // IEEE Internet of Things Journal. – 2022. – Vol. 9, Issue 18. – P. 16742–16757.

88. Al-Amaireh, H. Energy-Efficient Resource Allocation in Mobile Edge Computing Using NOMA and Massive MIMO / H. Al-Amaireh, T. Cinkler, Q. Alghazali. // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 21456–21470.

89. Kianpisheh, S. A survey on in-network computing: Programmable data plane and technology specific applications / S. Kianpisheh, T. Taleb // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023. – Vol. 25, Issue 1. – P. 701-761.

90. Атея, А.А. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно-конфигурируемых сетей / А.А. Атея, А.С. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2019. – № 3. – С. 34-40.

91. Ateya, A.A. End-to-end system structure for latency sensitive applications of 5G / A.A. Ateya, M.S. Al-Bahri, A.S. Muthanna, A.E. Koucheryavy // Электросвязь. – 2018. – № 6. – С. 56–61.

92. Li K. Exploiting computation replication for mobile edge computing: A fundamental computation-communication tradeoff study[J]. / K. Li, M. Tao, Z. Chen // IEEE Transactions on Wireless Communications, – 2020. 19(7): – P. 4563 – 4578.

93. Hu, N. An energy-efficient in-network computing paradigm for 6G / N. Hu, Z. Tian, X. Du, M. Guizani // IEEE Transactions on Green Communications and Networking. 2021. – Vol. 5, Issue 4. – P. 1722–1733.

94. Semnani, S. H. Multi-Agent Motion Planning for Dense and Dynamic Environments via Deep Reinforcement Learning / S. H. Semnani, H. Liu, M. Everett, A. de Ruiter and J. P. How // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – Vol. 5, No. 2. – P. 3221–3226.
95. Lu, S. QoS-aware Dynamic Service Caching and Updating in Cost-efficient Multi-Access Edge Computing / S. Lu, X. Jin, J. Wu, S. Zhou, S. Wu, J. Yang, R. Yan. // ISPA (IEEE Int. Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications). – 2024. – P. 1718–1725.
96. Vyas, A. Privacy-Preserving Federated Learning for Intrusion Detection in IoT Environments: A Survey / A. Vyas, P.-C. Lin, R.-H. Hwang, M. Tripathi. // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 127018–127050.
97. Khan, Z. A Review on Task Scheduling Techniques in Cloud and Fog Computing: Taxonomy, Tools, Open Issues, Challenges, and Future Directions / Z. A. Khan, I. A. Aziz, N. A. Bt Osman, I. Ullah. // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 143417–143445.
98. Sasaki, Y. A Survey on IoT Big Data Analytic Systems: Current and Future / Y. Sasaki. // IEEE Internet of Things Journal. – 2021. – Vol. 9, No. 2. – P. 1024–1036.
99. Tehrani, P. Federated Deep Reinforcement Learning for the Distributed Control of NextG Wireless Networks / P. Tehrani, F. Restuccia, M. Levorato. // DySPAN / IEEE conference. – 2021. – P. 248–253.
100. Vijayaraj, M. Parallel and Distributed Computing for High-Performance Applications / M. Vijayaraj, R. M. Vizhi, P. Chandrakala, L. H. Alzubaidi, K. Muzaffar, R. Senthilkumar. // E3S Web of Conferences (ICONNECT 2023). – 2023. – Vol. 399, Article 04039.
101. Wang, C. The Security and Privacy of Mobile-Edge Computing: An Artificial Intelligence Perspective / C. Wang, Z. Yuan, P. Zhou, Z. Xu, R. Li, D. O. Wu. // IEEE Internet of Things Journal. – 2023. – Vol. 10, No. 24. – P. 22008–22032.

102. Abeysekara, H. Distributed Machine Learning for Predictive Analytics in Mobile Edge Computing Based IoT Environments / P. Abeysekara, H. Dong and A. K. Qin. // International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). – 2020. – P. 1–8.
103. Hajam, S. IoT–Fog architectures in smart city applications: A survey / S. S. Hajam, S. A. Sofi. // China Communications. – 2021. – Vol. 18, No. 11. – P. 117–140.
104. Wang F. Optimal Energy Allocation and Task Offloading Policy for Wireless Powered Mobile Edge Computing Systems[J]. / F. Wang, J. Xu, S. Cui // IEEE Transactions on Wireless Communications, – 2020. 19(4): – P. 2443 – 2459
105. Thang D.V., Volkov A., Muthanna A., Koucheryavy A., Ateya A.A., Jayakody D.N.K. Future of Telepresence Services in the Evolving Fog Computing Environment: A Survey on Research and Use Cases // Sensors. 2025. Vol. 25. Iss. 11. P. 3488. DOI:10.3390/s25113488
106. Van Thang D., Volkov A., Muthanna A., Elgendy I.A., Alkanhel R., Jayakody D.N.K., Koucheryavy A. A Framework Integrating Federated Learning and Fog Computing Based on Client Sampling and Dynamic Thresholding Techniques // IEEE Access. 2025. Vol. 13. PP. 95019–95033. DOI:10.1109/ACCESS.2025.3571979
107. Taleb T., Samdanis K., Mada B., Flinck H., Dutta S., Sabella D. On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19. Iss. 3. PP. 1657–1681. DOI:10.1109/COMST.2017.2705720
108. Чистова Н.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Метод формирования цифровых кластеров сетей связи пятого и последующих поколений на основе качества предоставления услуг // Электросвязь. 2020. № 7. С. 22–28. DOI:10.34832/ELSV.2020.8.7.003. EDN:QDEUQG
109. Yu H., Ming Z., Wang C., Taleb T. Network Slice Mobility for 6G Networks by Exploiting User and Network Prediction // Proceedings of the International

Conference on Communications (ICC, Rome, Italy, 28 May – 01 June 2023). IEEE, 2023. DOI:10.1109/ICC45041.2023.10279739

110. Addad R.A., Dutra D.L.C., Taleb T., Flinck H. Toward Using Reinforcement Learning for Trigger Selection in Network Slice Mobility // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2021. Vol. 39. Iss. 7. PP. 2241–2253. DOI:10.1109/jsac.2021.3078501. EDN:UGJVKC

111. Абделлах А.Р. Применение робастных m-оценок для машинного обучения в сетях VANET / Абделлах А.Р., Мутханна А., Кучерявый А.Е // Электросвязь. 2020. № 5. С. 41-46.

112. Hu L., Tian Y., Yang J., Taleb T., Xiang L., Hao Y. Ready Player One: UAV-Clustering-Based Multi-Task Offloading for Vehicular VR/AR Gaming // IEEE Network. 2019. Vol. 33. Iss. 3. PP. 42–48. DOI:10.1109/MNET.2019.1800357

113. Chen Y., Sun Y., Wang C., Taleb T. Dynamic Task Allocation And Service Migration in Edge-Cloud IoT System Based on Deep Reinforcement Learning // IEEE Internet of Things Journal. 2022. Vol. 9. Iss. 18. PP. 16742–16757. DOI:10.1109/JIOT.2022.3164441. EDN:XSAUUL

114. Ming Z., Li X., Sun C., Fan Q., Wang X., Leung V.C.M. Dependency-Aware Hybrid Task Offloading in Mobile Edge Computing Networks // Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS, Beijing, China, 14–16 December 2021). IEEE, 2021. PP. 225–232. DOI:10.1109/ICPADS53394.2021.00034

115. Pang Z. A Survey of Cloudlet Based Mobile Computing / Z. Pang, L. Sun, Z. Wang, E. Tian, S. Yang // in 2015 International Conference on Cloud Computing and Big Data (CCBD), Shanghai, China, – 2015. – P. 268–275.

116. Taherkordi A. Data-Centric IoT Services Provisioning in Fog-Cloud Computing Systems: Poster Abstract / A. Taherkordi, F. Eliassen // in Proceedings of the

Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation - IoTDI '17, Pittsburgh, PA, USA, – 2017. – P. 317–318.

117. Gandotra P. Green Communication in Next Generation Cellular Networks: A Survey / P. Gandotra, R.K. Jha, S. Jain // IEEE Access, vol. 5, – 2017. – P. 11727 – 11758.

118. Beck M.T. Mobile Edge Computing: A Taxonomy / M. T. Beck, M. Werner, S. Feld, and T. Schimper, // – 2014. – P. 7.

119. Wu J. Cloud radio access network (C-RAN): a primer / J. Wu, Z. Zhang, Y. Hong, Y. Wen // IEEE Netw., vol. 29, no. 1, 2015. – P. 35–41.

120. Luan T.H. Fog Computing: Focusing on Mobile Users at the Edge / T.H. Luan, L. Gao, Z. Li, Y. Xiang, G. We, L. Sun // – P. 11.

121. Mao Y. A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective / Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang, K.B. Letaief // IEEE Commun. Surv. Tutor., vol. 19, no. 4, – 2017. – P. 2322 – 2358.

122. Piumsomboon T. User-Defined Gestures for Augmented Reality / T. Piumsomboon, A. Clark, M. Billingham, // – P. 6.

123. Zhou T. Joint Cell Activation and Selection for Green Communications in Ultra-Dense Heterogeneous Networks / T. Zhou, N. Jiang, Z. Liu, C. Li // IEEE Access, vol. 6, – 2018. – P. 1894 – 1904.

124. Taleb T. Anything as a Service' for 5G Mobile Systems / T. Taleb, A. Ksentini, R. Jantti // IEEE Netw., vol. 30, no. 6, – Nov. 2016. – P. 84–91.

125. Liu J. Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems / J. Liu, Y. Mao, J. Zhang, and K. B. Letaief // in 2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Barcelona, Spain, – 2016, – P. 1451 – 1455.

126. Chen M. Task Offloading for Mobile Edge Computing in Software Defined Ultra-Dense Network / M. Chen, Y. Hao // IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 36, no. 3, – Mar., 2018. – P. 587 – 597.
127. Liu J. Offloading Schemes in Mobile Edge Computing for Ultra-Reliable Low Latency Communications / J. Liu, Q. Zhang // IEEE Access, vol. 6, – 2018. – P. 12825 – 12837.

ПРИЛОЖЕНИЕ

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

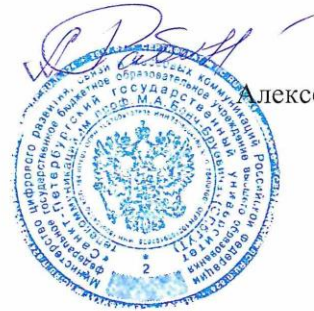
ИНН 7808004760 КПП 784001001

ОКТМО 40909000

30.04.2026 № 66/54-99
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
доктор техн.наук, доцент



Рабин
Алексей Владимирович

Акт

о внедрении научных результатов, полученных Аль-Кереа Захраа Ахмед Хуссейн
в диссертационной работе «Исследование и разработка методов построения сетей
связи с распределенным искусственным интеллектом для поддержки услуг
телеприсутствия»

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 Аль-Кереа Захраа Ахмед Хуссейн, использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по дисциплине «Самоорганизующиеся сети» (Рабочая Программа регистрационный номер №_22.05/430-Д), разделы Программы:
 - Беспроводные сенсорные сети;
 - Качество обслуживания в самоорганизующихся сетях;
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 № 24.05/537-Д), раздел Программы:
 - Граничные вычисления. Туманные вычисления. Новая микросервисная архитектура сети. Робототехника и сети связи.
 - Метавселенная. Сетевая вселенная. Костюмы телеприсутствия.

3. При чтении лекций и проведении практических занятий для аспирантов по дисциплине «Интернет вещей и самоорганизующиеся сети» (Рабочая Программа регистрационный номер №_25.05/616-Д), раздел Программы:

- Ad Hoc или самоорганизующиеся сети. Приложения самоорганизующихся сетей. Всепроникающие сенсорные сети как технологическая основа внедрения концепции Интернета Вещей. Кластеризация сенсорных сетей и основные методы кластеризации, включая биоподобные алгоритмы. Особенности сетевой безопасности в сенсорных сетях.

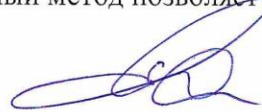
В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Аль-Кереа Захраа Ахмед Хуссейн в диссертационной работе:

1. Гибридная модель на основе оптимизации роя частиц и генетического алгоритма, позволяющая улучшить распределение ресурсов, повышение энергоэффективности 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 (МЕС, INC или гибридный). Результаты моделирования и расчет времени вычислений показывают, что предложенная система выгрузки задач и гибридная модель использования технологий INC и МЕС могут сократить задержку примерно на 70%.

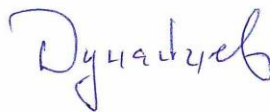
3. Комбинированный метод, объединяющий требуемые ресурсы на миграцию и задержку обработки в периферийных узлах для оптимизации размещения сервисов и минимизации задержек в устройствах телеприсутствия в среде мобильных граничных вычислений. Предлагаемый метод позволяет снижать задержку на 50 %.

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