

На правах рукописи

Волков Артём Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ
И МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ТУМАННЫХ
ВЫЧИСЛЕНИЙ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2024

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

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

Официальные
оппоненты: **Аджемов Артём Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор,
Московский технический университет связи
и информатики, кафедра общей теории связи,
заведующий кафедрой.

Самуйлов Константин Евгеньевич,
доктор технических наук, профессор,
Российский университет дружбы народов имени
Патриса Лумумбы, кафедра теории вероятностей
и кибербезопасности, заведующий кафедрой.

Колбанёв Михаил Олегович,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный экономический
университет, кафедра информационных систем и
технологий,
профессор кафедры

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт проблем управления им. В.А.
Трапезникова Российской академии наук,
г. Москва

Защита состоится 18 декабря 2024 года в 15.00 на заседании
диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург,
пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

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

Автореферат разослан 18 сентября 2024 года.

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

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие сетей связи в последние десятилетия осуществляется опережающими темпами. Этому в большой степени способствовали концепции Интернета вещей и Тактильного Интернета, породившие соответственно сети связи высокой и сверх высокой плотности и сети связи с ультрамалыми задержками. Однако пандемия в начале третьего десятилетия 21 века несколько по-иному поставила вопрос о роли сетей связи в борьбе с подобными явлениями и на первый план сегодня постепенно выходят услуги телеприсутствия и, естественно, модели и методы построения современных сетей связи для оказания таких услуг.

Услуги телеприсутствия требуют больших ресурсов сети и, в то же время, доступности для пользователя повсеместно. В настоящее время ресурсы сети для оказания услуг, как правило, достаточно централизованы, более точно можно сказать, что, в основном, еще и географически определены. Для того, чтобы изменить это весьма устаревшее положение, архитектуру сети и услуг следует строить по модульному принципу, при этом программное обеспечение систем должно основываться на микросервисной архитектуре. Последнее дает возможность появлению на сети миграции микросервисов. Вкупе с туманными вычислениями это и есть направление развитие сетей и систем связи, которое может обеспечить требования пользователей по предоставлению услуг телеприсутствия.

Необходимость в широком и повсеместном предоставлении услуг телеприсутствия породила еще одну новую технологию, которой, по всей видимости, будет принадлежать ведущая роль в развитии сетей и систем связи в обозримом будущем. Речь идет о метавселенных и их версии как мультивселенных, определенных в Секторе стандартизации Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т). Действительно, виртуальный мир в простейшем варианте и телеприсутствие людей и роботов в расширенном понимании, в том числе в голографической форме, действительно привлекает к исследованиям ученых во всем мире. Особую роль в таких мирах будут играть костюмы телеприсутствия, исследования и разработка которых только начинаются во всем мире.

Разработанность темы исследования. Существует множество работ в области сетей IMT-2020/5G и последующих поколений как теоретического, так и экспериментального плана.

Определяющий вклад в теоретические и экспериментальные исследования этих научных проблем внесли российские и зарубежные ученые А.С. Аджемов, В.М. Вишневецкий, К.Е. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака, В.Г. Карташевский, Б.С. Гольдштейн, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый, Е.А. Кучерявый, М.А. Маколкина, Д.А. Молчанов, А.С.А. Мутханна, М.О. Колбанев, Р.В. Киричек, А.П. Пшеничников,

В.К. Сарьян, С.Н. Степанов, А.С. Ковтуненко, М.А. Сиверс, Н.А. Соколов, В.О. Тихвинский, М.А. Шнепс-Шнеппе, M. Dohler, G. Fettweis, J. Hosek, A. AbdEl Latif, A.A.A. Ateya, M. Maier, M.Z. Shafiq и другие.

В области мультивселенных научных работ пока еще не так много, но уже можно отметить исследования А.Е. Кучерявого и его научной школы у нас в стране и работы I.F. Akyildiz за рубежом.

Настоящая диссертация в отличие от известных подходов к построению и исследованию сетей связи направлена на решение научной проблемы разработки и исследования комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия в мультивселенной при использовании костюмов телеприсутствия.

Объект и предмет исследования. *Объектом* исследования являются сети связи пятого и последующих поколений. *Предметом* исследования являются сети связи на основе туманных вычислений и предоставление услуг телеприсутствия в метавселенной, в том числе при использовании костюмов телеприсутствия.

Цель и задачи исследования. *Целью* диссертационной работы является разработка и исследование комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия в метавселенной при использовании костюмов телеприсутствия.

Цель работы достигается путем последовательного решения следующих *задач*:

- анализ существующего положения в области исследования сетей связи пятого и последующих поколений, роли и места туманных вычислений, миграции микросервисов и услуг телеприсутствия в развитии сетей и систем связи;
- анализ существующего положения дел в области исследований (мета-) мультивселенных, а также костюмов телеприсутствия как интерфейса между метавселенной и пользователями, в том числе аватарами, роботами-аватарами и роботами-холотарами;
- разработка новой архитектуры сети, в которой все услуги связи предоставляются на основе туманных вычислений, а для динамического распределения ресурсов сети образуются туманности как результат ее кластеризации,
- разработка модели сети связи с распределенными оркестраторами,
- разработка метода построения сетей связи в сельской местности и труднодоступных районах на основе распределенных оркестраторов и туманных вычислений,
- разработка метода динамической кластеризации для обеспечения максимальной стабильности кластера без необходимости миграции микросервисов,
- разработка модели и метода функционирования сети с использованием бессерверной архитектуры для миграции групп типовых микросервисов при

применении метаэвристического алгоритма стаи серых волков для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами,

- разработка нового протокола маршрутизации для обеспечения взаимодействия устройств туманных вычислений для миграции микросервисов,
- разработка моделей данных для датчиков и актуаторов и метода передачи этих данных от костюма телеприсутствия в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары).

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана новая архитектура сетей связи, отличающаяся от известных тем, что все услуги связи предоставляются на основе туманных вычислений, образующих туманности для динамического распределения ресурсов сети, что позволяет уменьшить долю трафика поступающего в ядро сети на 20%.

2. Разработаны модель и метод построения сетей связи общего пользования, отличающиеся от известных тем, что с целью предоставления услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районах предложено использовать для предоставления услуг распределенные оркестраторы совместно с туманными вычислениями и динамическую кластеризацию для обеспечения максимальной стабильности кластера без необходимости миграции микросервисов.

3. Разработаны модель и метод функционирования сети, отличающиеся от известных использованием бессерверной архитектуры для миграции групп типовых микросервисов при применении метаэвристического алгоритма стаи серых для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами, что позволяет как определить группу устройств, а не единичное устройство, так и уменьшить время принятия решения о миграции в десятки раз по сравнению с известным метаэвристическим алгоритмом роя частиц.

4. Разработан метод миграции микросервисов, на основе согласованного на международном уровне нового протокола маршрутизации в среде динамических туманных вычислений, отличающийся от известных тем, что этот метод обеспечивает взаимодействие устройств туманных вычислений для миграции микросервисов, при этом позволяет достичь снижения потребляемой энергии устройствами туманных вычислений на 41% и уменьшить долю потерянных пакетов в среднем до 34%.

5. Разработаны модель данных для датчиков и актуаторов, а также метод передачи этих данных, отличающиеся от известных тем, что данные формируются с использованием костюма телеприсутствия и передаются в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), что позволяет обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных.

Теоретическая значимость работы состоит, прежде всего, в разработке и исследовании комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе

туманных вычислений и миграции микросервисов для обеспечения возможности повсеместной реализации на сети Российской Федерации услуг телеприсутствия.

Важными результатами, имеющими существенную теоретическую ценность, представляются также модель данных для датчиков и актуаторов для костюма телеприсутствия, а также метод передачи этих данных в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), позволяющие обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных. Этот результат позволяет занять достойное место в общемировых работах по созданию мультивселенных.

Самостоятельную научную ценность имеют результаты по построению сетей связи на основе распределенных оркестраторов, что совместно с туманными вычислениями дает возможность предоставления услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступны районах.

Практическая ценность работы состоит в создании научно-обоснованных рекомендаций по созданию сетей связи на основе туманных вычислений для предоставления услуг телеприсутствия, что реализуется как в методике планирования сетей связи ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ», так и в международных стандартах (рекомендациях) сектора стандартизации электросвязи Международного Союза Электросвязи.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке методике планирования сетей связи, в ФГБУ НИИР при выполнении государственных контрактов по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций Администрации связи Российской Федерации в Секторе стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи в работах по разработке стандартов (вкладов), в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при проведении НИР по Мегагранту «Исследование сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного интеллекта для сетей 6G» по соглашению № 075-15-2022-1137 с Министерством науки и высшего образования РФ, при выполнении НИР «Прикладные научные исследования в области создания сетей связи 2030, включая услуги телеприсутствия с сетевой поддержкой, и экспериментальная проверка решений при подготовке отраслевых кадров» в 2023г. № 123060900012-6. А также, при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ. Акты реализации диссертационных исследований представлены в Приложении Б диссертации.

Методы исследования. При проведении исследований были использованы методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории оптимизации,

теории вероятностей, а также мета эвристические алгоритмы и методы имитационного и натурального моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Новая архитектура сетей для предоставления услуг связи, в том числе услуг телеприсутствия, на основе туманных вычислений, образующих туманности для динамического распределения ресурсов сети, что позволяет уменьшить долю трафика поступающего в ядро сети на 20%.

2. Модель и метод построения сетей связи общего пользования, обеспечивающие предоставление услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районах на основе распределенных оркестраторов совместно с туманными вычислениями, позволяющие на основе динамической кластеризации обеспечить максимальную стабильность кластера (сохранение его структуры) без необходимости миграции микросервисов.

3. Модель и метод использования бессерверной архитектуры для миграции групп типовых микросервисов при применении метаэвристического алгоритма стаи серых волков для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами, что позволяет как определить группу устройств, а не единичное устройство, так и уменьшить время принятия решения о миграции в десятки раз по сравнению с известным метаэвристическим алгоритмом роя частиц.

4. Метод миграции микросервисов на основе разработанного протокола маршрутизации в среде динамических туманных вычислений, обеспечивающий учёт весов не только ребер графа, но и весов самих устройств туманных вычислений, что позволило по сравнению с существующими, достичь снижения потребляемой энергии устройствами туманных вычислений на 41% и уменьшить долю потерянных пакетов в среднем до 34%.

5. Модель данных для датчиков и актуаторов для костюма телеприсутствия, а также метод передачи этих данных в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), позволяющие обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами натурального и имитационного моделирования (натурное моделирование проводилось на модельной сети в СПбГУТ), а также широким спектром публикаций и выступлений как на российских, так и на международных научных конференциях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и были одобрены на следующих конгрессах, конференциях и семинарах: семинар Заседание секции «Радиоэлектроника» Дома ученых имени М. Горького РАН (Санкт-Петербург, 2023), конкурс "5G bloomig cup" – БРИКС (Китай, 2023), форум V Международной конференции «Наука будущего», VIII Всероссийского молодежного

научного форума «Наука будущего – наука молодых» Орел (Россия, 2023), "2nd International Meet & Expo on Robot Intelligence Technology and Applications (ROBOTMEET2023) (Ванкувер, Канада, 2023), Форум 2023 BRICS Forum on Future Networks Innovation (BFFNI) – БРИКС (Шэньчжэнь, 2023), Distributed Computer and Communication Networks (DCCN 2023) (Москва, 2023), Second International conference on Cybersecurity, Cybercrimes, and Smart Emerging Technologies (Эр-Рияд, Саудовская Аравия, (2023-2024), 26th IEEE International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT) (Корея, 2024), UN metaverse Think-a-Thon Virtual Worlds Revolutionizing Smart Sustainable Cities & Communities (Женева, Швейцария, 2024), Глобальный Саммит “Искусственный интеллект во Благо” (Женева, Швейцария, 2024), Форум МСЭ “Сети будущего” и тренинг “тестирование на соответствие и функциональную совместимость” (Ташкент, Республика Узбекистан, 2023), 23rd International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networks and Systems (NEW2AN), (Дубай, ОАЭ, 2023), 7th International Conference on Future Networks & Distributed Systems (ICFNDS) (Дубай, ОАЭ, 2023), Международная конференция по современным системам вычислений и связям следующего поколения (англ. International Conference on Advanced Computing & Next-Generation Communication, ICACNGC 2023) (Санкт-Петербург, 2023).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 64 публикациях, в том числе: в 11 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России; 19 работах в изданиях, включенных в международные базы цитирования; 2 отчетах о НИР; 32 работах в других научных изданиях и материалах конференций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 4, 9, 10, 12 и 18.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Экспериментальные исследования проведены под научным руководством автора при его непосредственном участии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа содержит 330 страниц машинописного текста, 57 рисунков, 8 таблиц, список литературы включает 365 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены ее основные результаты и область их применения, отмечена практическая ценность и научная новизна, а также приведены сведения об апробации работы и представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу развития современных сетей связи, анализу существующего положения в области исследования и международной стандартизации сетей связи пятого (ИМТ-2020) и следующего поколения (ИМТ-2030), роли и места туманных вычислений, в том числе для реализации услуг телеприсутствия.

На основе представленного анализа можно утверждать, что интегрированные сети ИМТ-2030 будут сверхплотными сетями с ультрамалыми задержками, их структура будет стремиться к децентрализации. Ожидаются следующие услуги: голографическое телеприсутствие и персонализация сети (в т.ч. присутствие в сети цифровых аватаров); летающие сети и роевой интеллект; роботы-аватары. Результаты исследований в области интерфейса “человек-робот”, представленный в форм-факторе “костюма телеприсутствия”, могут быть рассмотрены в области разработки метавселенных.

Концепция ИМТ-2030 учитывает 17-ть Целей Устойчивого Развития (ЦУР), определенные Генеральной Ассамблеей ООН. Для реализации поставленных целей активно обсуждается переход к сетям, представляющим собой сеть сетей, или, согласно определению МСЭ, сетям STIN (Space-Terrestrial Integrated Networks). Интегрированные сети, которые в ряде источников названы гибридными сетями, представляют собой следующий виток конвергенции сетей и обеспечения связности между морским, наземным, воздушным и космическим сегментом.

На рисунке 1 приведены следующие сценарии, которые имеют прямую связь с теми сценариями, которые были определены ранее в концепции 5G/ИМТ-2020:

- Massive Communication (массовые коммуникации);
- Immersive Communication (иммерсивные коммуникации или коммуникации с более глубоким погружением пользователя);
- Hyper Reliable & Low-Latency Communication (HRLLC – гипернадёжные сети связи с ультрамалой задержкой);

На рисунке 1 также приведены новые сценарии, которые определены в концепции ИМТ-2030 в рекомендации МСЭ-Р М.2160-0:

- AI and Communication (с англ., искусственный интеллект в связи);
- Ubiquitous Connectivity (повсеместная связь);
- Integrated Sensing and Communication (интегрированное зондирование и связь).

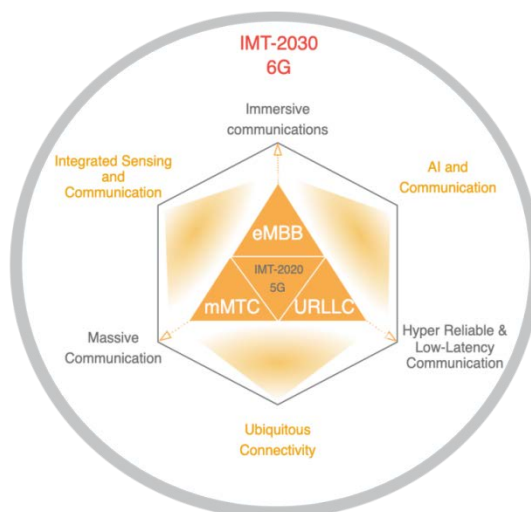


Рисунок 1 – Сценарии

В последнее время ведутся исследования и разработки в области концепции Туманных вычислений, которые представлены как следующий уровень декомпозиции в области систем распределенных вычислений.

Во второй главе представлены результаты исследования и разработки новой архитектуры сетей связи, отличающаяся от известных тем, при этом все услуги связи предоставляются на основе туманных вычислений, образующих туманности для динамического распределения ресурсов сети, что позволяет уменьшить долю трафика поступающего в ядро сети на 20%.

Множество устройств (пользовательские терминалы, устройства Интернета вещей, граничные сетевые устройства и пр.) при выделении малого объема ресурсов могут быть представлены в архитектуре сети как скопление большого количества вычислительных микро-узлов. Учитывая сверхплотность сетей IMT-2030, такой объединенный «вычислительный туман» будет представлять собой массивный вычислительный кластер, который интегрирован в сеть связи общего пользования. Общая идея интегрированной сети с морским, наземным, воздушным и космическим сегментами представлена на рисунке 2.

На рисунке 2 туманные вычисления представлены в различных практических сценариях реализации. К примеру, устройство тумана может быть представлено в виде пользовательского устройства, а также транспорта и БПЛА. На рисунке 2 также показаны другие функциональные модули, которые соответствуют естественному развитию систем мониторинга и управления сетей IMT-2020.

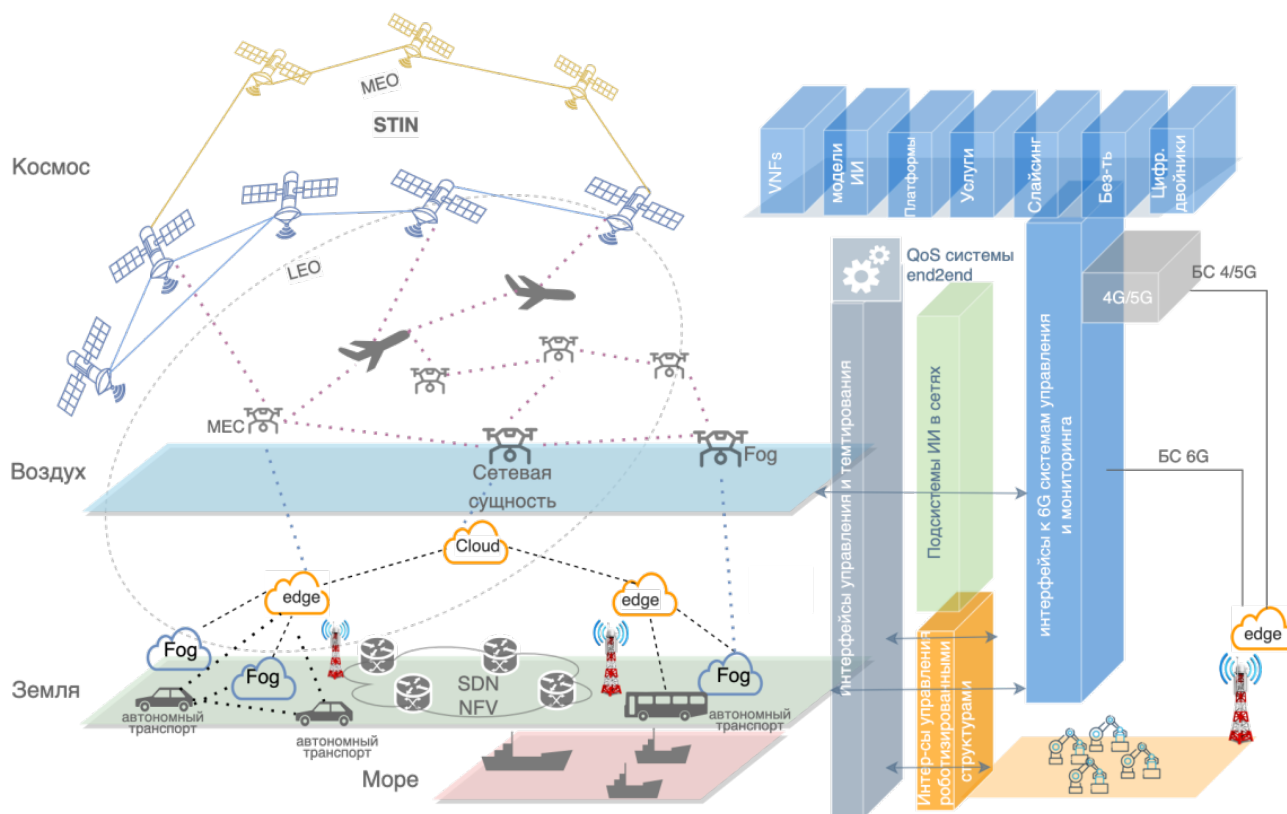


Рисунок 2 – Интегрированная сеть с Fog

Отдельной задачей в области туманных вычислений является изучение форм туманных вычислений. Ранее был предложен фреймворк, который учитывает ряд критериев при определении Fog-устройства для последующей миграции микросервиса. В качестве Fog-устройств могут выступать и граничные сетевые устройства, пользовательские устройства, и устройства Интернета вещей. При этом объединение кластеров может представлять собой иную форму/структуру. Такие объединения могут быть представлены в виде новой формы – вычислительной туманности. На рисунке 3 представлен концепт, где определены возможные формы туманных вычислений. Каждый кластер может быть определен согласно критерию динамичности устройств вычислений (скорость и вектор движения), а также другим критериям, например, времени выполнения вычислительной задачи на устройстве. Данный подход позволяет группировать кластеры в туманности так, чтобы выполнялась полнота типовых вычислительных функций для реализации той или иной услуги. При этом контроль за устройствами остается за служебными Fog-серверами.

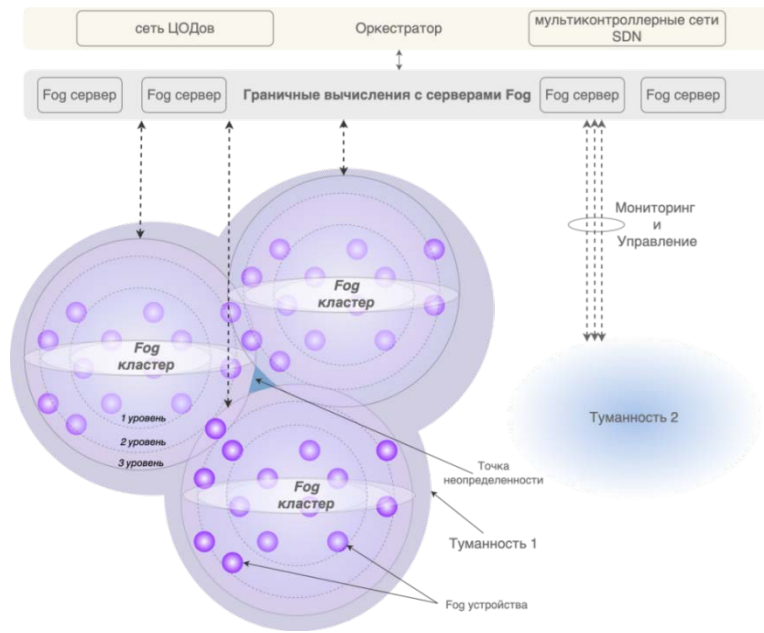


Рисунок 3 – Формы туманных вычислений

Модель сети с использованием туманных вычислений может быть описана элементами, приведенными на рисунке 4.

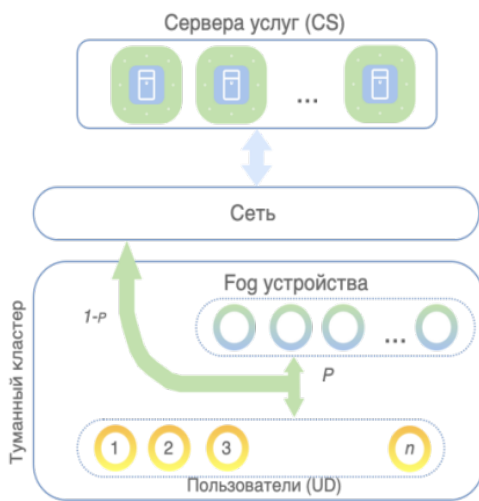


Рисунок 4 – Модель сети с использованием туманных вычислений

Полагаем, что услуга предоставляется центральным сервером CS. Для предоставления услуги требуется передача данных между устройством пользователя UD и CS, при этом от пользователя к CS передается некоторое количество данных в прямом и обратном направлениях. Устройства туманных вычислений могут обслуживать пользователей своего кластера, число которых n_u .

Доля трафика, завершаемого в пределах Туманного кластера пропорциональна доле услуг (сервисов), мигрирующих в устройства туманных вычислений.

Пусть a_{i0} удельный трафик пользователя на i -ю услугу, тогда общий трафик, производимый пользователями туманного кластера, количество пользователей в котором равно n , а число услуг равно m , будет определяться как

$$\tilde{a} = \sum_{i=1}^m a_{i0} n. \quad (2.1)$$

Если p_i вероятность того, что данная услуга делегирована устройствам туманных вычислений кластера, то интенсивность трафика, в пределах кластера составит:

$$a_{INT} = \sum_{i=1}^m p_i a_{i0} n. \quad (2.2)$$

Интенсивность внешнего трафика составит:

$$a_{EXT} = \sum_{i=1}^m (1 - p_i) a_{i0} n. \quad (2.3)$$

В настоящее время трафик потокового видео составляет в глобальной сети около 70%.

Если сделать допущение, что 50% услуг доступа к видео размещены на устройствах Туманных вычислений, то доля трафика γ , замыкающегося в туманном кластере, составит около 35%.

Эта величина случайна и зависит от множества факторов, например, таких как общее количество предоставляемых услуг, специфика пользователей в кластере, возможности устройств Туманных вычислений и другие. Предположим, что интенсивность внутреннего и внешнего трафика a_{INT} и a_{EXT} , также случайны и имеют гамма-распределение, то величина

$$\gamma = \frac{a_{INT}}{a_{INT} + a_{EXT}} \quad (2.4)$$

будет иметь бета-распределение, рисунок 5.

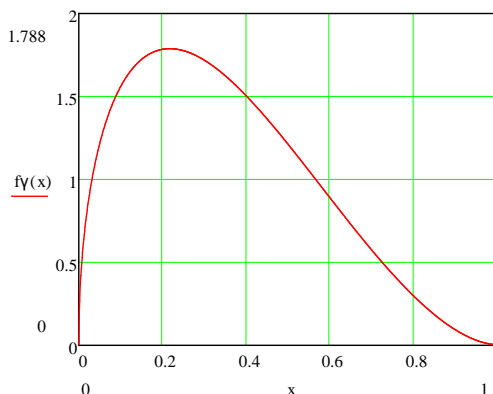


Рисунок 5 – Распределение доли трафика внутри туманного кластера (среднее значение 0,35)

Приведенные выше рассуждения позволяют сделать вывод о том, что доля трафика, замыкающегося внутри туманного кластера, случайна и зависит от доли услуг, мигрирующих на устройства туманных вычислений. Ожидаемое значение доли трафика, завершающегося внутри кластера, в настоящее время составляет около 35%, в среднем, ее распределение близко к бета распределению.

Если же учесть раннюю оценку для традиционного построения сети, стандартизованную в РД 45.120-2000, в частности то, что процент интенсивности внутривычислительной нагрузки для крупномасштабных сетей имеет величину 15–17% и

оценку внедрения туманных вычислений (представлена в данной главе), то уменьшение доли трафика, поступающего в ядро сети может составить до 20%

Таким образом, внедрение технологии туманных вычислений позволит сократить цифровой разрыв, в том числе для удаленных регионов. А также нивелировать необходимый технологический прыжок в области импортозамещения телеком и серверного оборудования.

Третья глава диссертации посвящена вопросам построения сетей связи общего пользования, отличающиеся от известных тем, что с целью предоставления услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районов предложено использовать распределенные оркестраторы совместно с туманными вычислениями, а также динамическую кластеризацию для обеспечения стабильности кластера без необходимости миграции микросервисов.

Бессерверная архитектура ПО позволяет перейти к реализации иного подхода в реализации бизнес и системных процессов. Микросервис представляет набор функций и представлен в виде достаточно атомарной и универсальной структуры ПО – функции, что приводит в итоге к FaaS (Function as a Service). Микросервисы должны быть независимы, а также при необходимости масштабирования функций системы, те или иные микросервисы могут быть размножены так, чтобы удовлетворить возросшие требования внутри системы услуги, так и внешние требования, в т.ч. возросшее количество запросов.

В условиях интегрированных сетей, архитектуры перспективных услуг телеприсутствия должны учитывать принципы модульности и бессерверности распределенных динамических туманных вычислений. В тоже время инфраструктурные вопросы обладают не меньшими по уровню сложности задачами. Например, обеспечение стабильности вычислительного кластера в условиях перемещения fog-устройств.

Рассмотрим следующий сценарий (рисунок 6).

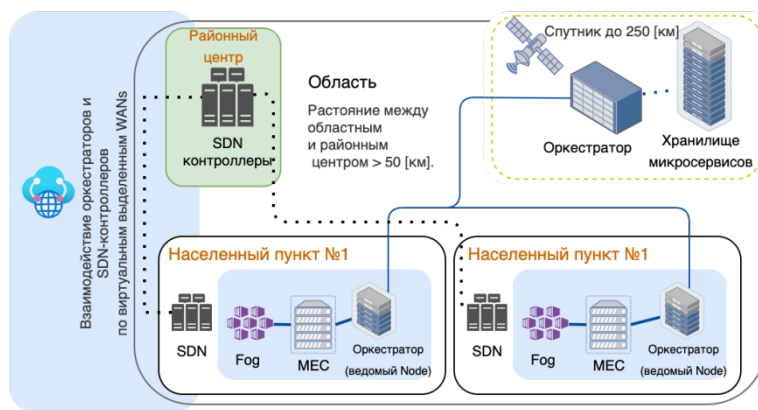


Рисунок 6 – Архитектура для 3-ей группы расстояний

Рассмотрим сценарий услуги, где используется рой роботов для сельскохозяйственных работ в удалённом населённом пункте. Концепция архитектуры приведена на рисунке 7.

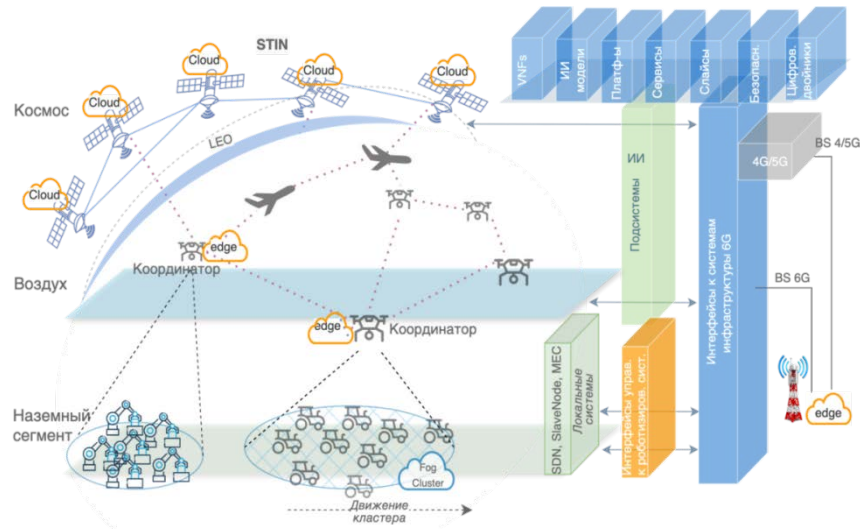


Рисунок 7 – Сценарий предоставления услуги

На рисунке 7 кластер динамических туманных вычислений при выполнении прямых работ перемещается в пространстве, где каждый из устройств имеет свой уникальный путь, при этом все устройства имеют единую конечную географическую цель и таким образом сохраняют строй. В тоже время, некоторые устройства могут изменять маршрут по какой-либо причине, например, объезд препятствия, что может повлиять на архитектуру сети и доступность непосредственно тех микросервисов, которые развернуты на данном вычислительном устройстве Тумана. С учётом удалённости от широкополосных мобильных сетей доступа, в качестве координатора и связующим звеном может выступать БПЛА (в том числе привязного типа), который обеспечивает связность с основной сетью, сервисами и услугами через интеграцию с сетью STIN.

При этом для описания взаимного положения элементов сети предлагается использование модели точечного процесса, рисунок 8.

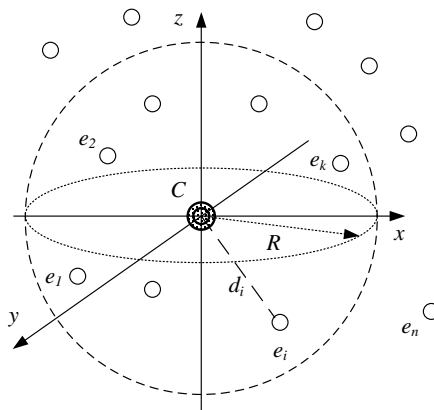


Рисунок 8 – Модель группы элементов

Как показано на рисунке 8, отдельные элементы группы $e_1 \dots e_k$ (кластера) расположены в своих позициях, которые заданы правилами организации группы. Эти позиции фиксированы и неизменны относительно центра кластера C (координатора). Все элементы, включая координатор, могут перемещаться в одном и том же направлении с равными скоростями. Если центр кластера C принять за начало координат, то элементы кластера неподвижны относительно его центра. Будем полагать, что при движении скорости и направления движения отдельных элементов могут несколько отличаться, что приводит к их отклонениям от заданных в группе позиций. Таким образом, расстояние между устройством i и координатором это случайная величина d_i , определяемая в трехмерном пространстве как

$$d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \quad (3.1)$$

где $x_i, x_j, y_i, y_c, z_c, z_c$ – координаты устройств i и координатора c .

Полагая, что устройства «стремятся» сохранить свое положение относительно других членов группы, сделаем допущение того, что координаты устройств случайны и имеют нормальное распределение с математическим ожиданием, равным некоторой «целевой» координате. Расстояния же d_i в таком случае, можно рассматривать как отклонения от целевых координат. Величина d_i в таком случае имеет распределение n -мерного случайного вектора [9] с плотностью вероятности:

$$f(x) = \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \sigma^n \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} x^{n-1} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0 \quad (3.2)$$

где $\Gamma(a)$ – гамма функция; n – количество случайных величин.

В частном случае при $\sigma = 1$, принимает вид распределения Пирсона.

Функция распределения вероятности:

$$F(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{x^2}{n\sigma^2}, \frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} = I\left(\frac{x^2}{2\sigma^2}, \frac{n}{2}\right), \quad x > 0 \quad (3.3)$$

где $I(a, b) = \Gamma(a, b) / \Gamma(b)$ – отношение неполной гамма функции.

При $n = 2$, т.е. в двумерном пространстве и не нулевых математических ожиданиях распределение принимает вид распределения Райса с плотностью вероятности:

$$f(x)_{n=2} = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+v^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right), \quad v = \sqrt{sx^2 + sy^2}, \quad x > 0 \quad (3.4)$$

где $I_0(z)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. (При нулевых математических ожиданиях, при $n = 2$ распределение Релея).

Функция распределения Райса:

$$F(x) = 1 - Q_1\left(\frac{v}{\sigma}, \frac{x}{\sigma}\right), \quad x > 0 \quad (3.5)$$

где Q_1 — Q – функция Маркума (Marcum Q-function):

$$Q_M(a, b) = 1 - e^{-\frac{a^2}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{a^2}{2}\right)^k \frac{P\left(M+k, \frac{b^2}{2}\right)}{k!} \quad (3.6)$$

На рисунке 9 приведены эмпирические гистограммы, полученные при имитационном моделировании и описание их плотностью вероятности и функцией распределения Райса.

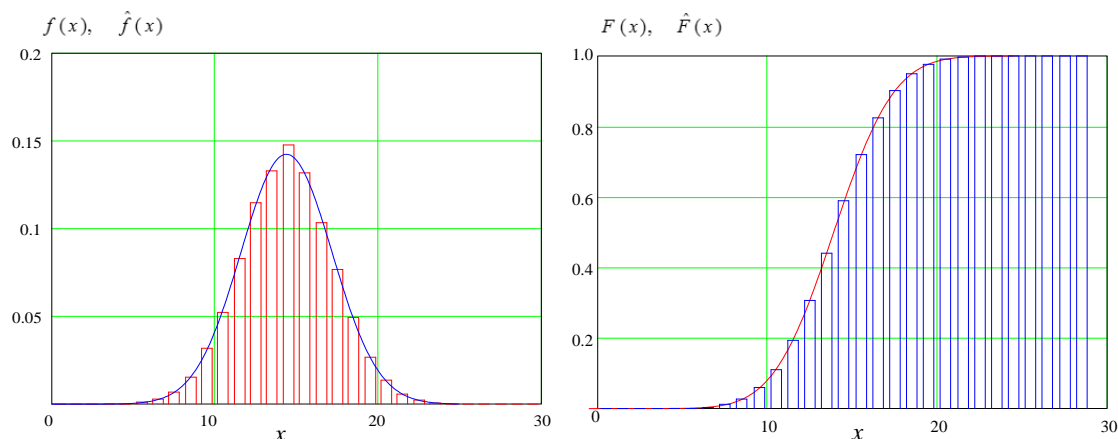


Рисунок 9 – Плотность вероятности и функция распределения расстояния между узлами в двумерной модели ($n = 2$)

В рассматриваемом случае трехмерного пространства $n=3$, при не нулевых математических ожиданиях распределение принимает вид распределения Максвелла с плотностью вероятности:

$$f(x) = \frac{2x^2}{\sigma^3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0 \quad (3.7)$$

Функция распределения определяется следующим выражением:

$$F(x) = 2 \left[\Phi_0\left(\frac{x}{\sigma}\right) - \frac{x}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \right] = 2 \left[\Phi_0\left(\frac{x}{\sigma}\right) - \frac{x}{\sigma} \varphi\left(\frac{x}{\sigma}\right) \right], \quad x \geq 0 \quad (3.8)$$

где $\varphi(\cdot)$ плотность вероятности стандартного нормального распределения, $\Phi_0(\cdot)$ функция Лапласа.

Графики упомянутых функций и результаты имитационного моделирования приведены на рисунке 10.

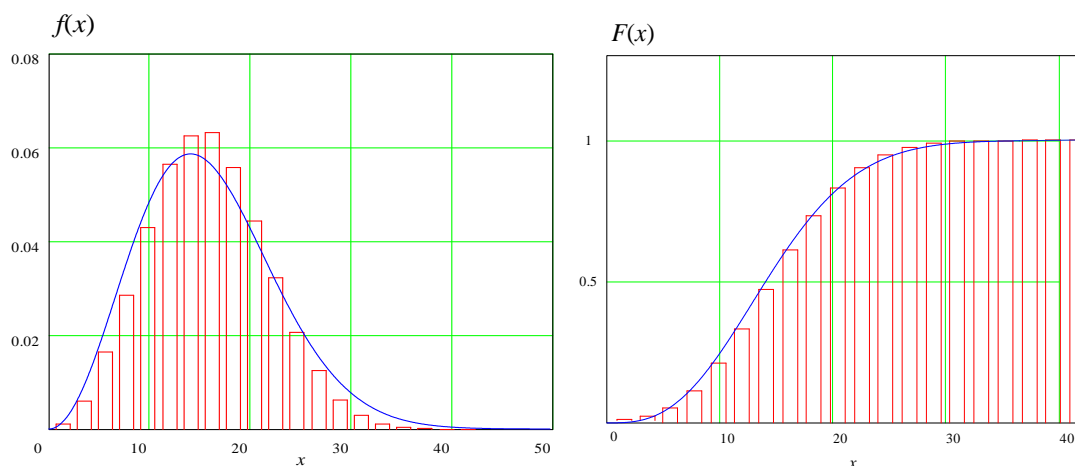


Рисунок 10 – Плотность вероятности и функция распределения расстояния между узлами в трехмерной модели ($n = 3$) и результаты имитационного моделирования

Вероятность того, что расстояние между элементом кластера и координатором превысит величину R может быть оценено как

$$p(d > R) = 1 - F(R, \sigma) \quad (3.9)$$

Вероятность того, что расстояние между координатором и хотя бы одним из элементов кластера превысит величину R будет определяться как

$$p(> R) = 1 - \prod_{i=1}^k F(R, \sigma_i) \quad (3.10)$$

где k – число элементов кластера, σ_i параметр распределения вероятности расстояния.

Если в качестве критерия формирования кластера принять максимальную стабильность кластера туманных вычислений, под которой будем понимать сохранение его структуры, то есть связи между координатором и элементами кластера, то целевой функцией может быть следующее выражение:

$$p(> R) = \min_{pos(C)} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^k F(R, \sigma_i) \right\}, \quad pos(C) \in D, \quad R, \sigma_i > 0, \quad 1 \leq k \leq n \quad (3.11)$$

где D – зона обслуживания, k – количество элементов кластера, R – дальность связи с координатором, σ_i параметр распределения вероятности расстояния, $pos(C) = (x_c, y_c, z_c)$ позиция центра кластера в трехмерном пространстве.

Таким образом, стабильность кластера туманных вычислений, в условиях динамичности устройств, может быть обеспечена через стремление сохранения его структуры с точки зрения наличия устройств туманных вычислений и связей между ними. Так, при реализации предлагаемого метода, координатор будет занимать такую позицию в кластере, которая могла бы максимально обеспечить стабильность кластера при динамически передвигающемся рое устройств туманных вычислений, то есть минимизировать вероятность выхода устройства из кластера, в результате случайных перемещений

При формировании кластера, одним из основных критериев является минимизация расстояния от координатора до элементов кластера. Центроидные алгоритмы кластеризации, например, такие как k -средних и FOREL, минимизируют величину суммарного расстояния от центров кластера до их элементов:

$$O = \min_{pos(c_j)} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{k_j} d(c_j, e_{ji}) \quad (3.12)$$

где $d(c_j, e_{ji})$ – расстояние между центром j -го кластера и его i -м элементом, k_j – число элементов в j -м кластере, m – количество кластеров.

Минимизация этой функции производится путем выполнения процедуры выбора центров кластеров. Координаты центра кластера определяются как координаты центра масс согласно следующему выражению:

$$cm = \begin{cases} x = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \omega_i \\ y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \omega_i \\ z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z_i \omega_i \end{cases} \quad (3.13)$$

где ω_i – весовой коэффициент элемента, k – количество элементов кластера.

Смысл весового коэффициента ω_i состоит в том, что его величина влияет на позицию центра кластера. Если центр кластера рассматривать как центр масс, то весовой коэффициент имеет смысл массы соответствующего элемента. Если весовой коэффициент некоторого элемента много больше весовых коэффициентов остальных элементов, то центр кластера будет выбран вблизи этого элемента. Таким образом, Вероятность выхода Fog-устройства из кластера иллюстрирует рисунок 11.

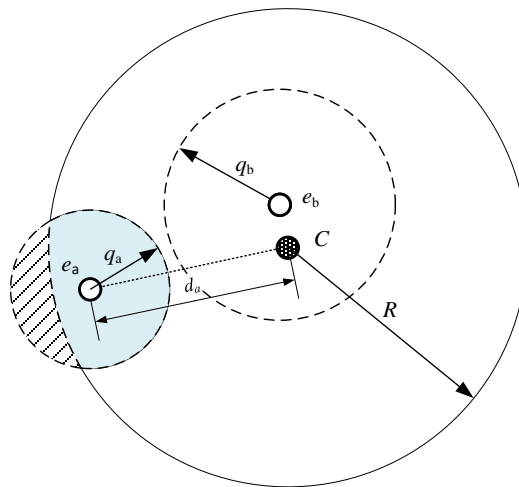


Рисунок 11 – Модель кластера Fog

На рисунке 11 изображен кластер, образованный координатором, который находится в центре C , в этой зоне находятся элементы кластера e_a и e_b . Окружности с

центрами в e_a и e_b демонстрируют области возможных положений этих элементов в результате случайных перемещений. Если случайные отклонения позиции имеют нормальное распределение, то радиусы упомянутых окружностей имеют смысл квантилей для заданной вероятности. Пересечение зоны связи с координатором, определяемой как круг радиуса R и зоны возможных положений элемента сети определяет вероятность выхода элемента из кластера. Эта вероятность пропорциональна заштрихованной области круга с центром в позиции элемента e_a . Опишем отклонения от целевых координат величиной среднеквадратического отклонения σ_i , где $i = 1 \dots n$.

Как в трехмерном, так и в двумерном случаях, уменьшение расстояния между центром кластера и элементом кластера d_i , приводит к уменьшению вероятности выхода элемента из кластера.

Учтем критерий стабильности кластера в коэффициенте ω_i :

$$\omega_i = \sigma_i^\alpha \quad (3.14)$$

где α – коэффициент, определяющий «чувствительность» метода к случайным отклонениям от позиций элементов $0 \leq \alpha \leq 1$. Выбор значения коэффициента определяется значимостью данного критерия для решаемой задачи.

Метод выбора позиции координатора (центра кластера) основан на алгоритме кластеризации FOREL. Это центроидный алгоритм, для его выполнения необходимы данные о координатах элементов и дальности связи координатора (радиусе кластера). Предполагается, что зона связи координатора представляет собой шар в трехмерном случае (возможно усеченный) или круг в двумерном случае с радиуса R . Для решения задачи требуются следующие исходные данные: данные о координатах элементов кластера (математические ожидания координат элементов) $E = (e_1 \dots e_k)$ и данные об отклонениях элементов от их ожидаемых позиций (среднеквадратические отклонения положений элементов) $\sigma = (\sigma_1 \dots \sigma_k)$. Эти данные могут быть получены в результате сбора соответствующей статистики. Для краткости будем называть данный алгоритм как SCAD (Spatial Clustering Algorithm by Deviations). В диссертации алгоритм приведен в формате псевдокода.

Эффективность предложенного метода оценим по сравнению с формированием кластера только на основании расстояния между элементами, то есть без учета их подвижности. В качестве параметра, характеризующего качество алгоритма выберем вероятность выхода элемента из кластера. При оценке эффективности степень значимости подвижности выбрана равной единице, т.е. значение коэффициента в выражении (3.14) $\alpha = 1$.

Эффективность вычислялась согласно следующему выражению:

$$e = 100 \frac{p(> R)}{p^*(> R)} \quad (3.15)$$

где $p(>R)$ вероятность того, что хотя бы один элемент кластера оказался вне зоны связи координатора без учета подвижности элементов, $p^*(>R)$ вероятность того, что хотя бы один элемент кластера оказался вне зоны связи координатора при кластеризации данным алгоритмом, то есть с учетом подвижности элементов.

Для оценки эффективности была использована имитационная модель. В рассматриваемом случае координаты элементов случайны и элементы образуют гетерогенные скопления (различные по составу и характеру размещения группы устройств), соответственно для решения задачи будет использован точечный процесс Неймана-Скотта.

Координаты элементов случайны, элементы образуют скопления. Полагаем, что элементы могут отклоняться от своих позиций на случайную величину, распределенную по нормальному закону. Параметры распределений задаются нулевым математическим ожиданием $\mu_i = 0$ и среднеквадратическим отклонением $0,05R < \sigma_i < 0,5R$. Таким образом, предполагается, что разброс отклонений элементов от их позиций различен для различных элементов. Такое предположение продиктовано практическими приложениями, в которых группа элементов, представляющая собой, например, группу сельскохозяйственной техники включает в себя различные агрегаты, которые имеют свою специфику движения, вследствие чего и их отклонения от заданных позиций могут быть различными. При моделировании значения среднеквадратических отклонений в каждом эксперименте выбираются случайным образом $\sigma_i = random()$, $i = 1 \dots n$.

В каждом эксперименте используется различный диапазон значений среднеквадратических отклонений, который характеризуется величиной, определяемый по следующей формуле:

$$\xi = \frac{\max \{ \sigma_i \mid i = 1 \dots n \}}{R} \quad (3.16)$$

Оценка эффективности метода, определенной согласно (3.15) приведена на рисунке 12.

Как видно из результатов имитационного моделирования (рисунок 11), эффективность метода повышается с ростом разброса значений СКО. Такая закономерность объясняется тем, что алгоритм кластеризации производит выбор положения центра минимизируя вероятность

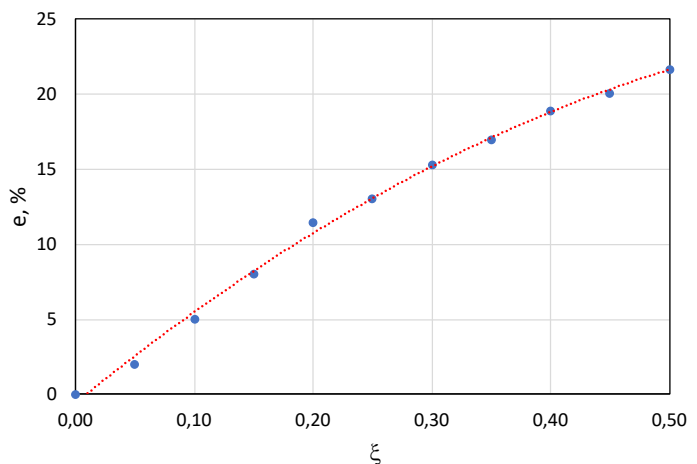


Рисунок 12 – Зависимость эффективности от разброса положений элементов сети

выхода элемента из кластера за счет приближения центра к наиболее «неустойчивым» элементам.

Четвертая глава диссертации посвящена модели и методу функционирования сети, отличающиеся от известных использованием бессерверной архитектуры для миграции групп типовых микросервисов при применении метаэвристического алгоритма стаи серых волков для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами, что позволяет как определить группу устройств, а не единичное устройство, так и уменьшить время принятия решения о миграции в десятки раз по сравнению с известным метаэвристическим алгоритмом роя частиц. При этом делается допущение о том, что все устройства находясь в условиях мобильности относительно базовой станции или сетевого координатора стремятся сохранять единый вектор перемещения при минимально возможных отклонениях между собой. На практике, такой сценарий может быть обнаружен в быстрых поездах, самолетах и других похожих условиях. Опираясь на данный сценарий, модель сети туманных вычислений при поиске группы Fog-устройств для дальнейшей живой миграции 4-х типовых контейнеров платформы FaaS, может быть представлена в следующем виде (рисунок 13):

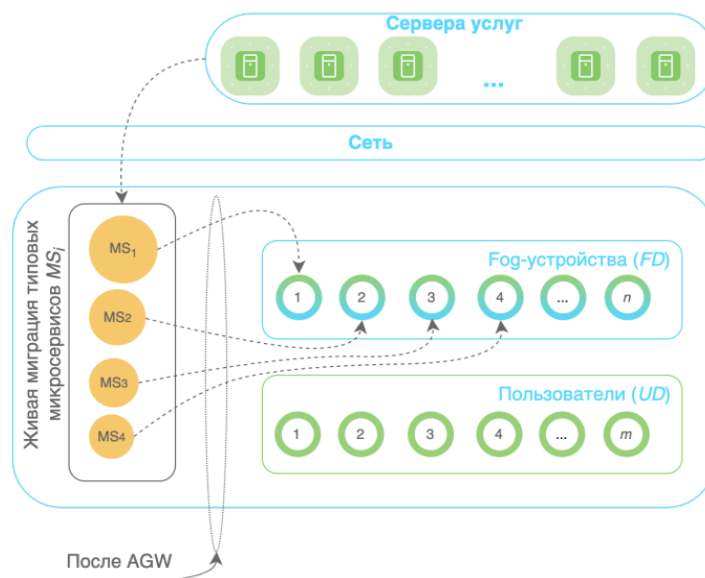


Рисунок 13 – Модель сети Туманных вычислений при поиске группы Fog-устройств

Каждое из Fog-устройств может быть представлено набором параметров, характеризующих устройство с точки зрения элемента вычислительного кластера: CPU (количество и частота ядер процессора), GPU (производительность графического процессора), Network (тип интерфейса и тип технологии связи, в том числе возможная скорость подключения), и многие другие. В текущей модели, для развертывания FaaS-unit, с 4-мя типовыми контейнерами ($MS_i, \forall i \in N$) и оценки предлагается использовать временные характеристики реализации задачи. Вводя типизацию

контейнеров MS_i , возможно перейти к оценке характеристик самого Fog-устройства, а также самого контейнера во времени, а именно: времени реализации задачи типовым контейнером $T_c[ms]$ и задержки передачи соответствующего объема информации $T_r[ms]$, который является конечным. Типовой контейнер решает одну задачу, например, сортировка данных методом пузырька, где определен соответствующий формат и объем принимаемых данных, а также формат и объем передаваемых результатов. В результате необходимо определить параметры, описывающие каждое из исследуемых Fog-устройств. При этом некоторые параметры могут оцениваться на уровне сравнения с предельными значениями, например, количество выделенной логической ОЗУ, необходимой для работы готовящегося к миграции микросервиса или группы микросервисов. В общем виде целевая функция оценки устройства может быть представлена следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^m k_i P_i, \quad (4.1)$$

где $0 \leq k_i \leq 1$ коэффициенты, при этом $\sum k_i = 1$, а P_i параметры оценки, где m -количество параметров, для $\forall i > 0, i \in N$, а основная задача сформулирована следующим образом:

$$\{F_1, F_2, F_3, F_4\} = \arg \min_{T_r, T_c, S} \{F\}, \quad (4.2)$$

где $\{F_1, F_2, F_3, F_4\}$ ряд решений $F(T_r, T_c, S)$ в порядке неубывания их значений, то есть: $F_1 \leq F_2 \leq F_3 \leq F_4$. При этом, T_c время выполнения типовой задачи в типовом контейнере MS_i . Параметр T_r характеризует связь узла с основным шлюзом-брокером в соответствующей зоне туманных вычислений, через который проходят все транзакции между устройствами и соответственно контейнерами и может быть представлен, как задержка при передаче типового запроса с соответствующим объемом данных до шлюза-брокера. Параметр S описывает степень стабильности кластера туманных вычислений, в частности рассматривается стабильность соответствующего устройства в кластере Fog. При этом вероятность того, что, расстояние между элементом кластера Fog и шлюзом-брокером превысит величину R может быть оценено как:

$$p(d > R) = 1 - Dis(R, \delta), \quad (4.3)$$

где $Dis(R, \delta)$ – функция распределения вероятности расстояния между устройством и координатором. В зависимости от условий она может быть описана Гамма-распределением или его частными формами, например: распределением Пирсона или распределением Райса. R расстояние между устройством и координатором. При этом вероятность того, что расстояние между координатором и хотя бы одним из элементов кластера превышает величину R определяется как:

$$p(> R) = 1 - \prod_{i=1}^k Dis(R, \delta_i), \quad (4.4)$$

где k – число устройств Fog-кластера, δ_i параметр распределения вероятности расстояния.

Таким образом, в работе было сформулировано предложение о максимальной стабильности Fog-кластера, где под стабильностью понимается стремление сохранить структуру, то есть связи между координатором и элементами кластера. То есть:

$$\min_R \{1 - \prod_{i=1}^k Dis(R, \delta_i)\}. \quad (4.5)$$

Стабильность кластера туманных вычислений может быть представлена как оценка, которая может быть описана как функция минимизации вероятности изменения географического состояния устройства относительно так называемого центра масс кластера или шлюза-брокера в кластере Fog, через который проходят все транзакции. Данная сторона вопроса может быть решена с использованием точечных процессов Неймана-Скотта.

Соответственно, стабильность самого устройства относительно его отношения к шлюзу-брокеру будет представляться следующим образом:

$$\min_R \{1 - Dis(R, \delta)\}, \quad (4.6)$$

а используемый параметр оценки стабильности S в основной целевой-функции может быть представлен следующим образом:

$$S = \max \left\{ \min_R \{1 - Dis(R, \delta)\} \right\}. \quad (4.7)$$

В данной работе предлагается рассмотреть частный случай, как ранее было упомянуто, в качестве исследуемых параметров взять оценку Fog-узла с точки зрения времени реализации задачи типовым контейнером T_c [мс], задержки передачи соответствующего объема данных T_r [мс] и параметра оценки стабильности устройства в кластере, где $0 < S \leq 1$. Таким образом, целевая функция, исследуемая в данной работе может быть представлена в следующем виде:

$$F = \sum_{i=1}^m k_i P_i = k_1 T_r + k_2 T_c + k_3 S. \quad (4.8)$$

Стоит отметить, что данный метод может быть использован при выполнении условия типизации контейнеров для развертывания Serverless-архитектуры.

Для решения поставленной задачи был исследован класс метаэвристических алгоритмов, которые позволяют определить глобальный экстремум целевой функции: алгоритм стаи серых волков (GWO), алгоритм оптимизации роя частиц (PSO), генетический алгоритм (GA) и алгоритм роя сальп (SSA). В результате анализа особенностей данных алгоритмов, в частности при рассмотрении требований к скорости сходимости, простоте (в том числе при настройке параметров), предлагается использовать алгоритм стаи серых волков. Метаэвристический алгоритм GWO имитирует социальное поведение стаи серых волков, чтобы решить оптимизационные задачи поиска экстремума целевой функции.

Алгоритм инициализирует популяцию волков (возможных решений) и оценивает каждого волка в популяции X_α , X_β , X_δ . Затем алгоритм итеративно обновляет положения волков на основе их текущих позиций и позиций других волков в стае. Таким образом, на каждой итерации алгоритма, в том числе финальной итерации, алгоритм в качестве результата будет выдавать 4 результата, которые по возрастающей будут отражать соответствующие устройства пригодные для последующего размещения типовых микросервисов услуг. В GWO позиция каждого волка рассчитывается на основе следующих выражений (4.9–4.11).

$$D_\alpha = |C_1 X_\alpha - X(i)|, D_\beta = |C_2 X_\beta - X(i)|, D_\delta = |C_3 X_\delta - X(i)|, \quad (4.9)$$

$$X_1 = X_\alpha - A_1(D_\alpha), X_2 = X_\beta - A_2 * (D_\beta), X_3 = X_\delta - A_3 * (D_\delta), \quad (4.10)$$

$$X(x+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}, \quad (4.11)$$

где $[X_\alpha, X_\beta, X_\delta, X_\omega]$:

- альфа-волк (X_α): лучшее решение в популяции;
- бета-волк (X_β): второе лучшее решение в популяции;
- дельта-волк (X_δ): третье лучшее решение в популяции;
- омега-волки (X_ω): остальные волки в популяции;

X_i – позиция решения на соответствующей итерации i . Также D_α , D_β , D_δ вспомогательные векторы для расчета соответственно значений X_1, X_2, X_3 . Также на каждой итерации алгоритма обновляются коэффициенты A и C , согласно следующим выражениям (4.12–4.14).

$$A = 2a \cdot r_1 - a, \quad (4.12)$$

$$C = 2r_2, \quad (4.13)$$

$$a = 2 - \left(i \cdot \frac{2}{I}\right), \quad (4.14)$$

где a параметр, линейно уменьшающейся от 2 до 0 на каждой итерации согласно выражению 4.14. r_1 , r_2 равномерно распределенные случайные числа от 0 до 1 и I количество итераций. Таким образом, параметрами, которые могут повлиять на эффективность алгоритма GWO являются количество волков, количество итераций, а также параметры a и C . При этом, величина C на

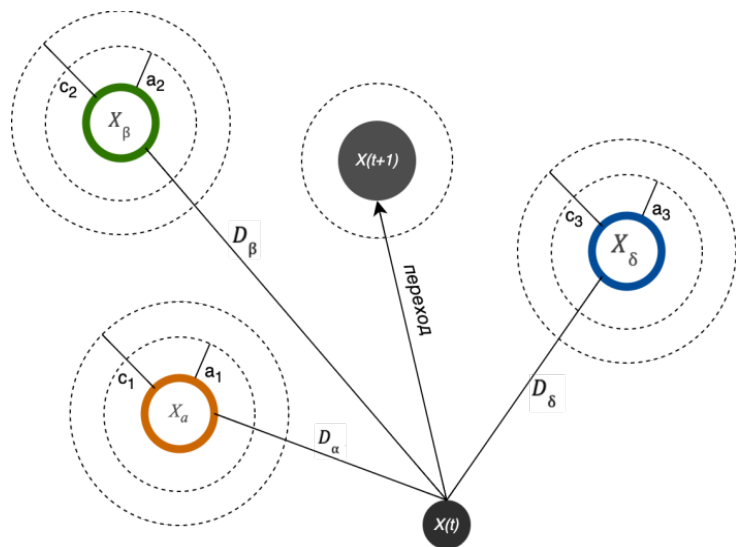


Рисунок 14 – Схема работы алгоритма

каждой итерации обеспечивает диверсификацию алгоритма GWO. Где a уменьшается линейно после каждой итерации. Схематично работа алгоритма представлена на рисунке 14.

Для моделирования было проведено предварительное натурное исследование существующих платформ: kata, firecracker, wasm, docker. Тестирование проводилось на базе серверного оборудования лаборатории Meganetlab 6G кафедры ССипД СПбГУТ. Для исследования были выбраны два метода распределения поступающей нагрузки:

1. Метод 1. Каждый новый запрос, приходящий на агент (брокер/шлюз) направлялся на типовой микросервис/контейнер, который обслуживал запросы в порядке очереди FIFO.

2. Метод 2. Каждый новый запрос приходящий на агент обслуживался вновь созданным клоном типового микросервиса, после чего данный клон уничтожался. Таким образом система гибко масштабировалась под рост нагрузки.

Для этого рассматривался пример работы типового микросервиса, который был представлен в виде контейнера и решал типовую задачу расчет числа Пи. На рисунке 15 в виде пузырьковой диаграммы отражены результаты тестирования первого метода на реальном стенде, где были развернуты платформы и реализованы типовые контейнеры.

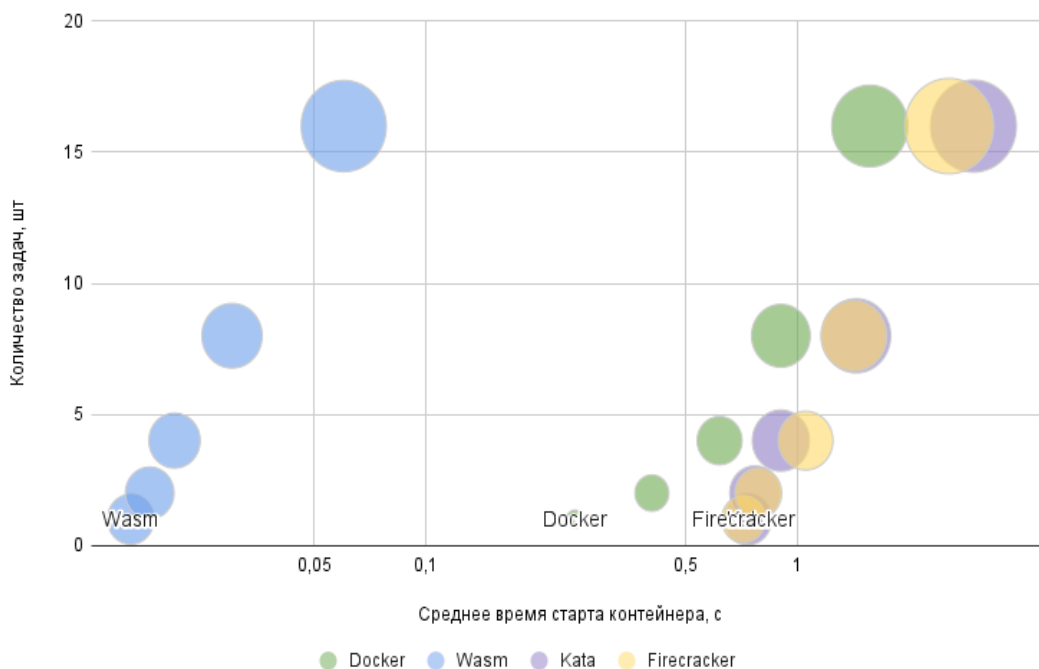


Рисунок 15 – Диаграмма по методу 1

На рисунке 16 в виде пузырьковой диаграммы отражены результаты тестирования второго метода на реальном стенде, где при поступлении новой задачи, происходил принудительный старт нового контейнера в кластере и задача выполнялась параллельно.

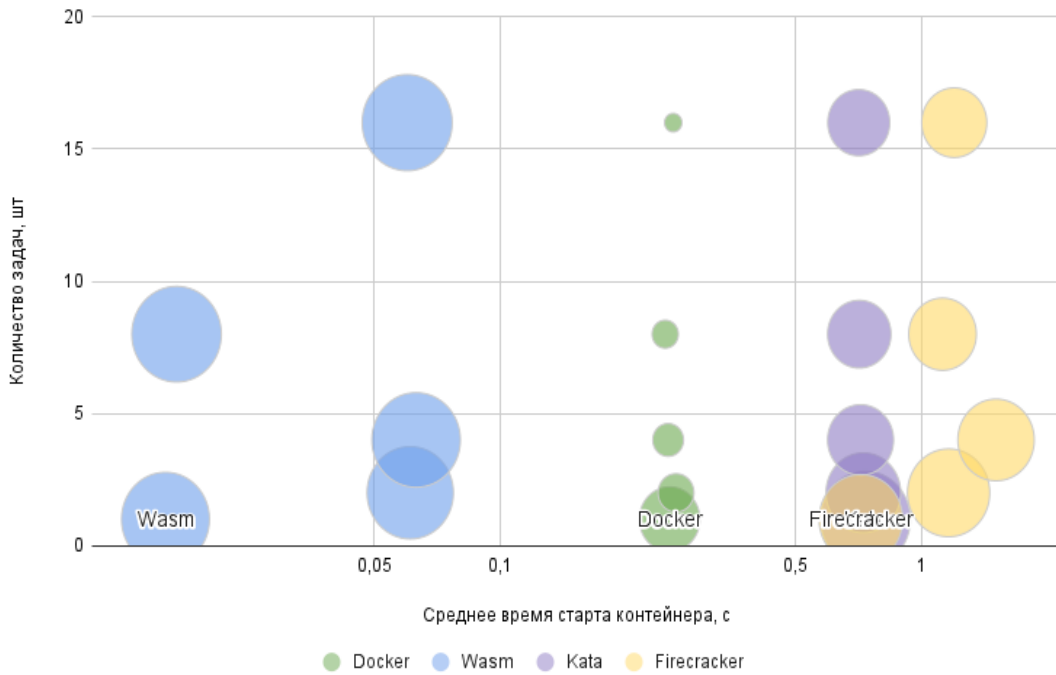


Рисунок 16 – Диаграмма по методу 2

На рисунке 15 и 16 размер пузырька является средним временем решения типовой задачи, вычисленным на базе пяти повторных экспериментах. При этом, ось абсцисс представлена в логарифмическом масштабе на обоих рисунках. Согласно рисунку 16, Docker при росте нагрузки и сравнительно равным (в меньше степени изменяющимся) временем старта нового контейнера для каждый задачи, уменьшает время реализации типовой задачи. При этом Docker находится на втором месте после Wasm, относительно времени старта типового контейнера.

Для дальнейшего моделирования были взяты за основу данные, которые измерялись на стенде при работе Docker-контейнеров. Полученные экспериментальные данные легли в основу набора данных T_r и T_c , которые были составлены для 100 устройств туманных вычислений, при этом структура этих данных была согласована с целевой функцией, представленной ранее (формула 4.8). При этом для визуализации данных, параметр устойчивости узла был установлен в виде константы $S = const = 1$, а коэффициенты k_1 , k_2 и k_3 равными 0,33. Результаты моделирования Fog-устройств представлены на рисунке 17. Ось абсцисс это значение $k_1 T_r$, ось ординат представляет значение $k_2 T_c$, а ось аппликат, соответственно, это значение целевой функции F .

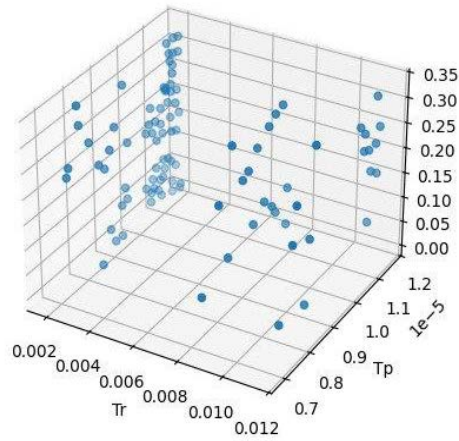


Рисунок 17 – Результаты моделирования Fog-устройств

Результат поиска группы устройств с помощью данного алгоритма представлен на рисунке 18.

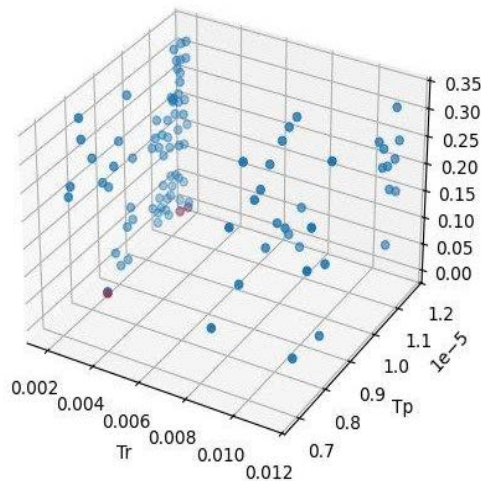


Рисунок 18 – Результат работы алгоритма GWO

В результате поиска устройств были найдены основные три устройства, выделенные фиолетовым цветом (рисунок 18), а четвертое устройство является первым устройством во множестве данных ω .

Для оценки эффективности предложенного метода выше, предлагается сравнить алгоритм GWO с алгоритмом PSO, который также является одним из эффективных с точки зрения скорости схождения и затрат вычислительных ресурсов. Ниже представлено описание данного алгоритма.

Каждая отдельная частица i состоит из трех векторов: её положение в D -мерном пространстве поиска $\bar{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, лучшая найденная позиция, $\bar{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, направленная скорость движения $\bar{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. При запуске алгоритма частицы равномерно, случайным образом инициализируются по всему пространству поиска, при этом скорость частиц также инициализируется случайным образом. Алгоритм обновляет весь рой на каждом временном шаге,

обновляя скорость и положение каждой частицы в каждом измерении по следующим правилам:

$$v_{id} = v_{id} + c\varepsilon_1(p_{id} - x_{id}) + c\varepsilon_2(p_{gd} - x_{id}), \quad (4.15)$$

$$v_{id} = x_{id} + v_{id}, \quad (4.16)$$

где c – константа со значением 2. ε_1 , ε_2 – независимые случайные числа, уникально генерируемые при каждом обновлении для каждого отдельного измерения от $d = 1$, до D . p_{gd} – это положение, найденное любой соседней частицей.

Для оценки эффективности алгоритмов была проведена серия экспериментов, где отслеживалось время схождения алгоритмов, то есть время поиска устройств для последующей миграции группы типовых контейнеров. Функция счета времени была реализована в разработанном ПО модели на языке Python. Результаты представлены на рисунке 19.

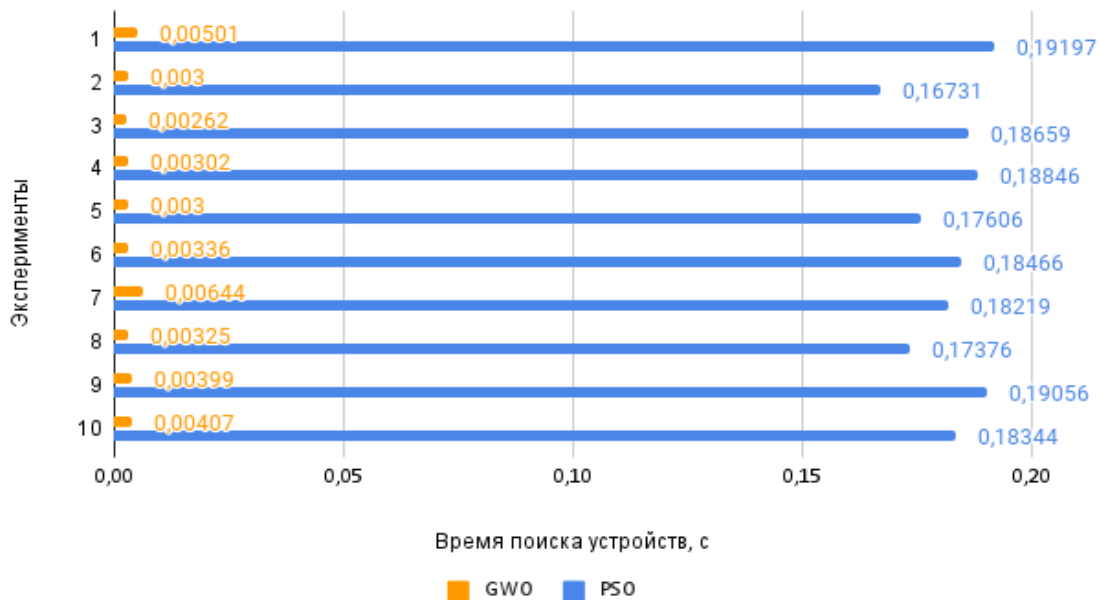


Рисунок 19 – Сравнение алгоритмов PSO и GWO

Среднее время в течении 10-ти экспериментов по алгоритму PSO составило 0,18249 секунды, в то время, когда по алгоритму GWO среднее значение времени составило 0,00377 секунды, что меньше примерно в 48 раз. Также стоит учесть, что PSO в результате работы выдавал значение глобального экстремума целевой функции, то есть находил одно устройство, наиболее подходящее для миграции контейнера, в то время как GWO позволял найти группу устройств (α , β , δ , ω) соответственно.

Пятая глава посвящена вопросу разработки нового протокола маршрутизации, отличающегося от известных тем, что этот протокол обеспечивает взаимодействие устройств Туманных вычислений для миграции микросервисов. При этом предлагаемый алгоритм учитывает кроме оценки состояния соединения оценку возможности самих узлов для передачи контейнера по сети Fog. На рисунке 20 представлена модель.

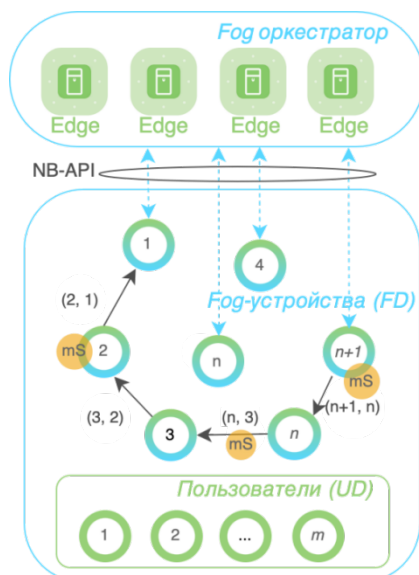


Рисунок 20 – Исследуемая модель

На модели (рисунок 20) представлены следующие элементы:

- Fog-устройства (FD). Соответственно, представлены следующим набором: FD-1, FD-2, FD-3, FD-4, FD-n, FD-(n+1);

- пользователи UD, Представлены набором UD-1, UD-2, UD-m;

- микросервис mS, располагающийся на устройствах FD-(n+1), FD-2 и мигрирующий между устройствами FD-n и FD-3;

- Fog оркестратор, который представлен набором серверов граничных вычислений Edge;

- NB-API – северный программный интерфейс, который обеспечивает связь между FG и соответствующим оркестратором. На рисунке приведены примеры связи между оркестратором и FD. Для полноценной работы сегмента Туманных вычислений, каждое устройства FG имеет соответствующую связь с оркестратором через NB-API для обмена в первую очередь служебной информации.

В первую очередь, рассматривается архитектура сети, где туманные устройства коммуницируют согласно принципу D2D, соответственно, важнейшей задачей здесь является выбор транзитных узлов для пересылки пакетов от отправителя к получателю. Отслеживаемые в данном случае характеристики:

- задержка на канале (D_{FD-n}) связи между узлами FD(n+1) и FG-n. Данные о задержке, при передаче данных через канал связи, являются достаточно важным параметром, так как миграция должна происходить достаточно быстро, чтобы остановка сервиса, перенос страниц его памяти и состояния, а также возобновление работы в новой среде, были незаметны для пользователей;

- доля потерянных пакетов (PL_{FD-n}) на канале связи между узлами FD(n+1) и FG-n. Важно знать долю потерянных пакетов при передаче данных через канал связи, так как доставка микросервиса на устройство назначения должна быть

гарантированной. Соответственно, недопустимо долгое ожидание завершения миграции в том числе потому, что сервер, на который происходит миграция сервиса, резервирует для него необходимое количество ресурсов, невозможность использования которых на протяжении продолжительного времени, при не останавливаемом процессе обработки данных может вызвать увеличение времени отклика на запросы и сбои в работе сети;

Нагрузка процессоров (CPU_{FD-n}) и оперативной памяти (RAM_{FD-n}) узла $FD-n$; Важно знать нагрузку процессора и оперативной памяти узла в активном состоянии, так как при предельном количестве используемых ресурсов у устройства может не хватить оставшихся для приема и пересылки пакетов при миграции микросервиса.

Выбор маршрута включает соответствующий процесс взаимодействия оркестратора сети Туманных вычислений и n -го устройства FG, сам алгоритм выбора оптимального маршрута миграции микросервиса на базе расчета фитнес функции. Алгоритм осуществляет сбор статистики по использованию сетевых и вычислительных ресурсов, хранение данной статистики и последующее вычисление оптимального маршрута миграции микросервиса среди всех доступных маршрутов от узла $FD(n+1)$ до $FG-n$. Данный процесс отражен на рисунке 20.

Используется следующая фитнес-функция для нахождения стоимости одного ребра:

$$f_{FD(n+1),FD-n} = CPU_{FD-n}w_{CPU} + RAM_{FD-n}w_{RAM} + D_{FD-n}w_D + PL_{FD-n}w_{PL}, \quad (5.1)$$

где определены следующие веса:

$$\begin{aligned} w_{CPU} = w_D = w_{PL} = 0,275, \\ w_{RAM} = 0,175 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Исследование влияния данных весов на конечный результат, а также обоснование их значений представлено в работе. Существующие веса были рассчитаны на основе метода парных сравнений. В контексте рассматриваемой задачи были выдвинуты следующие условия:

–нагрузка процессора узла имеет больший приоритет, чем нагрузка оперативной памяти узла;

–нагрузка процессора узла приоритетом эквивалентна задержке канала связи и оценке потерянных пакетов на этом канале связи;

–оперативная память узла Туманных вычислений имеет чуть меньший приоритет по отношению к задержке на канале связи и оценке потерянных пакетов на этом же канале связи;

–задержка канала связи и доля потерянных пакетов на этом канале связи имеют одинаковую значимость.

Функция расчета стоимости маршрута в общем виде:

$$F_{route}(1, n + 1) = \sum f_{FD(n+1),FD-n}, \quad (5.3)$$

а искомым путь миграции микросервиса:

$$route_{migration} = \min_{CPU, RAM, D, PL} \{F_{route}(1, n + 1)\} \quad (5.4)$$

Полученный маршрут (5.4) принимается за оптимальный и сообщается вместе с остальной служебной информацией (способ миграции, узел-отправитель, узел-получатель и т.д.) соответствующим узлам Туманных вычислений. Узлы принимают от оркестратора указания, после чего происходит миграция микросервиса с узла $(n+1)$ на узел 1 (рисунок 20).

Процесс обнаружения новых устройств в сети является важной частью стабильного функционирования Туманных вычислений. Подключение нового устройства в сеть будет инициироваться самим устройством, путем регистрации на сервере своих учетных данных для дальнейшего предоставления ресурсов устройства под задачи обработки данных. Рассмотрим возможные состояния (рисунок 21) на протяжении жизненного цикла этого устройства в качестве Fog-узла.

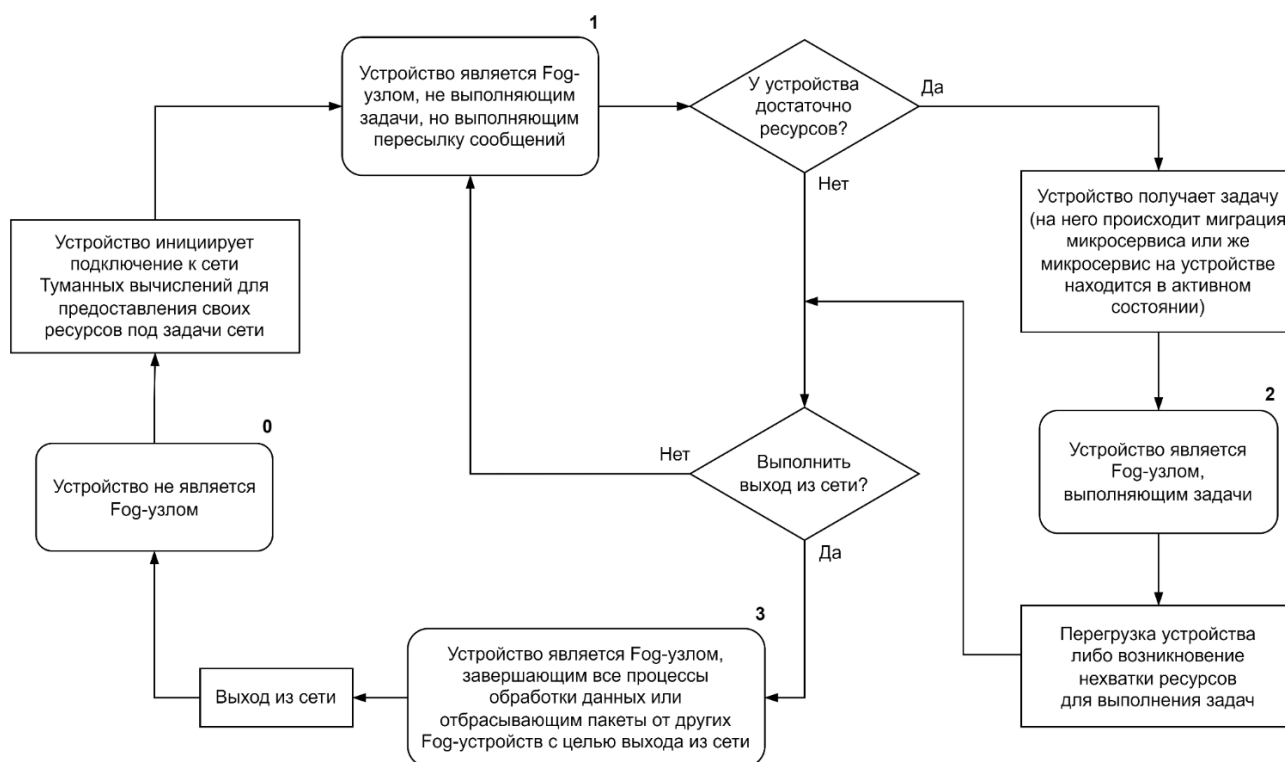


Рисунок 21 – Диаграмма состояния FD- n

На рисунке 21 состояние 0 соответствует начальному состоянию узла, именно с него начинается жизненный цикл устройства в роли Fog-узла. Далее единственным возможным действием, выполняемым для перехода в состояние 1, является включение режима “поделиться ресурсами”. После аутентификации устройства и его подключения к сети, как это было уточнено выше, устройство начинает считаться Fog-узлом и может выполнять пересылку пакетов, то есть узел переходит в состояние 1. Более подробное описание процессов перехода устройства в различные состояния приведено в тексте диссертации.

Для апробации предложенного протокола и его анализа была разработана программная модель и реализованы ряд сценариев. Предложенный протокол для динамических туманных вычислений был реализован в среде моделирования NS-3. Рассмотрим взаимодействие “устройство Fog” (В первом сценарии производилась оценка эффективности предлагаемого протокола, когда устройства выгружают свои задачи на FD-n. Для этого была рассмотрена топология из пяти устройств UD, подключенных к узлу Туманных вычислений);

В таблице 1 представлены рассматриваемые параметры моделирования, использованные для настройки моделирования.

Таблица 1 – Параметры моделирования

Параметр	Значение
Сценарий I: UD-FD	1×1 км ²
Сценарий II: FD-FD	10×10 км ²
Количество устройств UD (N)	5
Количество FD	10
МЕС размещение	равноудален
Fog скорость	$V_i \in \{10, 20, 30, 40, 50\}$ км/ч
Дальность радиопередачи	500 м
Максимальный уровень передачи	20 дБм
Память/ RAM	2048 Мб
Память/HDD	5 Гб
Процессор/ CPU	$\in [0.7, 2.4]$ ГГц

При выполнении моделирования рассматривались разнородные данные различных приложений. Например, исследовались такие данные, как: данные датчиков, обработка изображений, обработка видео и управление дорожным движением. Наборы данных для моделирования были составлены из открытых наборов данных. Различные наборы данных позволяют исследовать различные вычислительные задачи, от простых до сложных. Задачи были разделены на четыре основные категории по сложности вычислений:

- Категория (I): Очень простые задачи, включая данные датчиков;
- Категория (II): Простые задачи, эквивалентные обработке простых изображений и веб-сайтов;
- Категория (III): Задачи средней сложности, включая 3D-изображения и простые видеоролики;
- Категория (IV): Сложные задачи, в том числе обработку видео высокого качества;
- Категория (V): Высокосложные задачи, включая работу с 3D-видео.

В рамках моделирования задачи случайным образом распределялись между рассматриваемыми устройствами, при этом, каждая последующая задача назначалась после выполнения предыдущей не узле. Для оценки предлагаемого протокола рассматривались три основных показателя производительности:

- надежность предложенного протокола оценивалась путем измерения количества успешно полученных пакетов. Коэффициент доставки пакетов (PDR) был рассчитан для предложенного метода и также сравнен с традиционными протоколами.
- энергоэффективность с точки зрения затрат энергии на задачу;
- задержка оценивалась через расчет улучшения значения задержки обработки назначенных задач.

Следующее выражение (5.5) использовалось для расчета процентного улучшения задержки по сравнению с традиционными протоколами:

$$\text{Latency improvement (\%)} = \frac{\text{Average latency}_{\text{Traditional}} - \text{Average latency}_{\text{System}(i)}}{\text{Average latency}_{\text{Traditional}}} \quad \forall i \in \mathbb{R}. \quad (5.5)$$

На рисунке 22 представлены PDR пяти рассматриваемых устройств на разных расстояниях от устройства Туманных вычислений. На рисунке 22 представлены результаты предлагаемого метода и существующего традиционного подхода. PDR отличается от одного устройства к другому из-за разнородности устройств. Однако все устройства достигли более высокого PDR при использовании предлагаемого протокола. По мере удаления устройства UD от FD узла тумана PDR уменьшается; однако это снижение меньше при использовании предлагаемого протокола.

В результате анализа полученных результатов, можно утверждать, что предложенный протокол улучшил PDR в среднем на 34% по сравнению с существующими традиционными подходами.

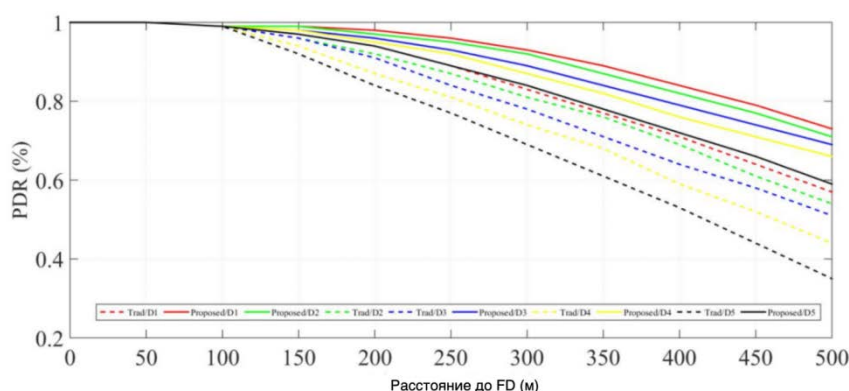


Рисунок 22 – Значение PDR

На рисунке 23 представлен средний процент потребляемой энергии конечных устройств (по сравнению с полной батареей) в пяти случаях для трех методов. Три рассматриваемыми методами являются рассматриваемая топология сети с традиционным протоколом (метод 1), рассматриваемая топология с протоколом,

введенным в другой научной статье (метод 2), и топология с предлагаемым протоколом (метод 3).

Пять рассмотренных случаев относятся к пяти категориям задач, особенности которых были приведены выше. Во всех пяти случаях предложенный метод позволил потреблять меньше энергии, чем два других. Предложенный протокол значительно снизил потребление энергии при больших рабочих нагрузках. В основном это связано с внедрением микросервисов и их грамотным распределением в Туманных вычислениях. В результате анализа полученных данных моделирования, можно сделать вывод, что предложенный протокол позволил добиться среднего снижения потребляемой энергии на 41% по сравнению с системой (1) (традиционный протокол) и на 29% по сравнению с системой (2) (протокол определен в другой научной статье).

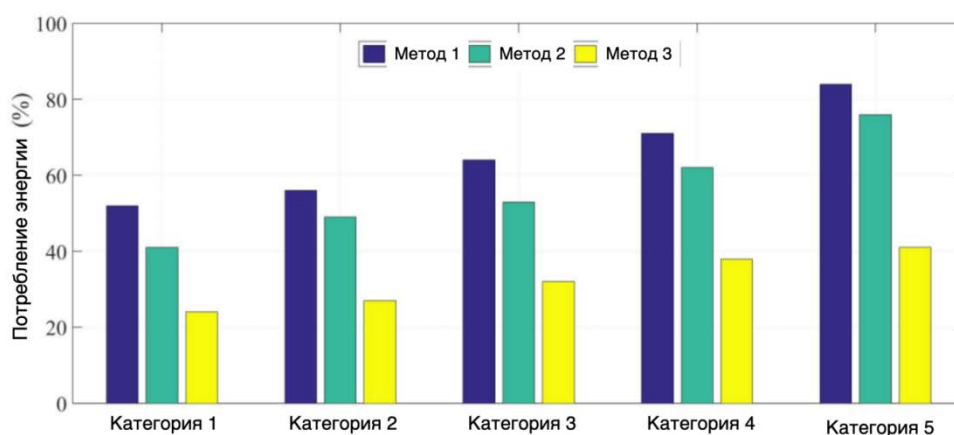


Рисунок 23 – Потребление энергии

На рисунке 23 представлен процент улучшения задержки предлагаемой модели по сравнению с традиционными протоколами для передаваемых данных пяти устройств. Результаты были получены для пяти категорий сервисов (определены выше). Предложенный протокол сократил задержку для всех передаваемых данных; При этом для данных, например, сервиса высококачественного видео, задержка была значительно снижена по сравнению с традиционными протоколами.

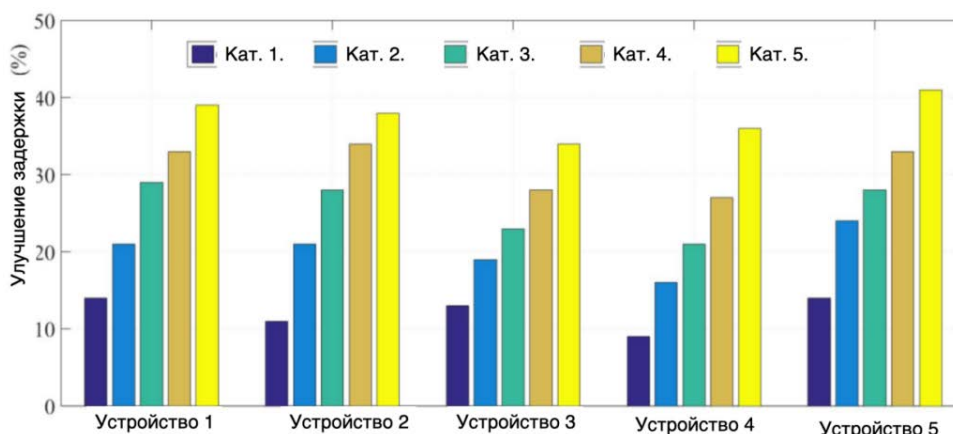


Рисунок 24 – Процент улучшения задержки

Таким образом, в результате проведенного моделирования, была доказана эффективность предложенного протокола как с точки зрения уменьшения задержек, так и для сохранения энергоресурсов устройств Туманных вычислений.

Шестая глава диссертации посвящена вопросу модели данных для датчиков и актуаторов, а также методу передачи этих данных, отличающиеся от известных тем, что данные формируются с использованием костюма телеприсутствия и передаются в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), что позволяет обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных. При внедрении услуг телеприсутствия, которые лягут в основу создания мультивселенной, необходимо решить задачу интерфейса взаимодействия человека/пользователя, то есть: получения, доставки и представления информации о движении человеческого тела, температуре, давлении. В данной работе для этой цели используется так называемый костюм телеприсутствия (КТП). КТП представляет собой систему получения и представления информации о движении и тактильных ощущениях, реализованную на основе одежды, в которую внедрены соответствующие датчики и актуаторы, которые обеспечивают получение и представление информации.

Количество таких датчиков определяется спецификой задач, решаемых с помощью КТП. В данной работе полагаем, что КТП может использоваться для решения двух основных задач: создания виртуальной копии человека (численного представления в памяти вычислительной машины) и управления роботом-аватаром (механическим устройством, повторяющим или управляемым движениями человеческого тела). Для повышения иммерсивности, КТП обеспечивает обратную связь между объектом взаимодействия и оператором в виде тактильных ощущений (механическое сопротивление движению, температура поверхности). Для решения задачи доставки данных между КТП и сервером или роботом-аватаром требуется обеспечить доставку информации от датчиков к актуаторам. При этом возникает задача обеспечения точности и своевременности ее доставки. Ее решению и посвящена настоящая работа.

При реализации услуг телеприсутствия КТП реализует функции сбора данных о двигательной активности человека и формирование воздействий на органы чувств человека с целью обеспечения интерфейса человек-машина на уровнях двигательного аппарата и тактильных ощущений. Сбор данных о двигательной активности человека является одной из основных функций это устройства, обеспечивающей формирование адекватной модели движения виртуальной копии человека или робота-аватара. Для выполнения этой функции необходим сбор данных об изменении положения рук и туловища человека. С этой целью КТП может быть оборудован группой их m датчиков, регистрирующих изгибы, углы поворота, ускорения, степени давления в различных точках и др. Таким образом, с точки зрения сбора данных о поведении человека, модель КТП содержит датчики $s_1 \dots s_m$, актуаторы $a_1 \dots a_k$, аналого-цифровые и цифро-

аналоговые преобразователи и контроллер C , осуществляющие получение преобразование и сбор данных с датчиков передачу сигналов в канал связи. Принимаемые данные проходят обработку контроллером и через цифро-аналоговые преобразователи передаются на актуаторы, реализующие тактильные и двигательные ощущения. Отметим, что аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи не являются обязательным элементом для каждого датчика и актуатора. Необходимость их использования определяется назначением и функциональностью конкретных устройств. Модель рассматриваемого КТП приведена на рисунке 25.

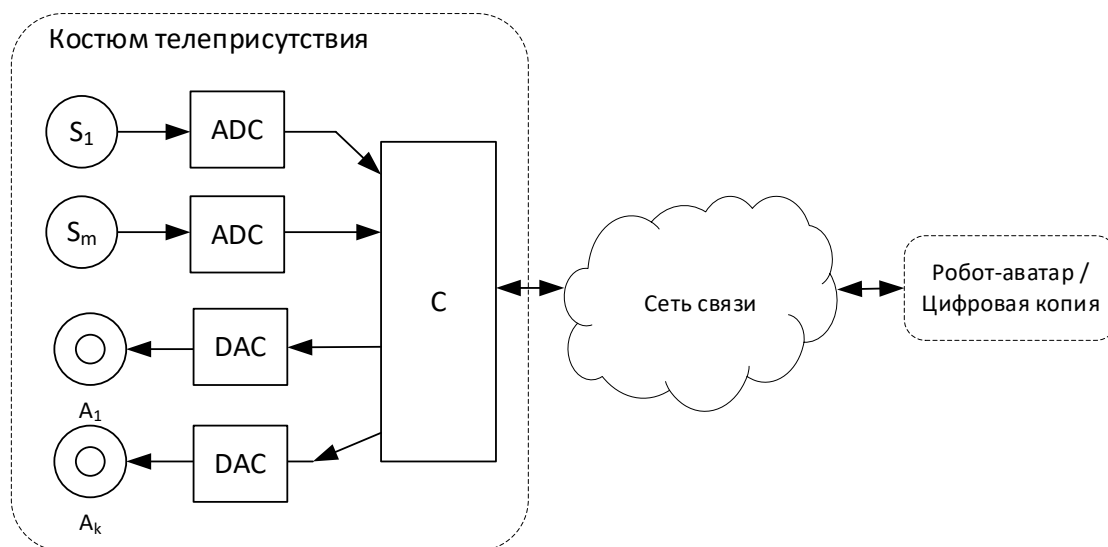


Рисунок 25 – Модель КТП

Канал связи соединяет КТП, возможно через сеть связи, с устройством назначения, в качестве которого может быть робот-аватар или цифровая копия, реализуемая в информационной среде. С точки зрения обмена информацией между КТП и роботом-аватаром, процесс передачи информации от датчиков до актуаторов идентичен процессу передачи от датчиков робота-аватара к актуаторам КТП, поэтому далее будем рассматривать лишь одно направление, в качестве которого выберем направление от КТП к роботу-аватару.

Датчики $s_1 \dots s_m$ можно подразделить на группы по виду регистрируемой величины: датчики угла поворота, ускорения, давления и температуры.

Актуаторы $a_1 \dots a_k$ также можно подразделить на актуаторы температуры, давления сопротивления движения. Данные, передаваемые от датчиков, и данные, передаваемые к актуаторам можно разделить на три группы по семантическому аспекту передаваемой информации это: данные движения, данные температуры, данные давления.

Данные КТП также можно классифицировать по отношению к частям тела, на которых установлены датчики. Модель данных приведена на рисунке 26.

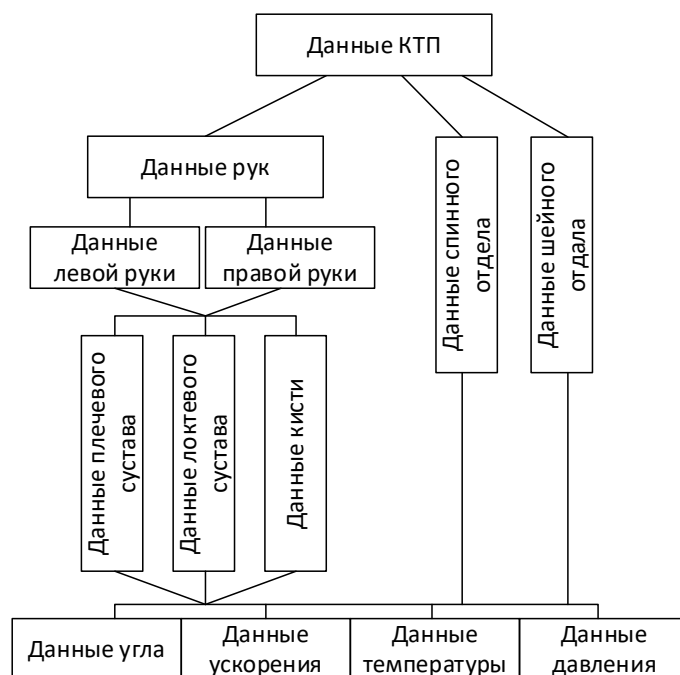


Рисунок 26 – Модель данных КТП

Задачей контроллера, управляющего сбором информации с датчиков КТП является формирование данных, отражающих поведение человека с достаточной точностью. Данные, получаемые от сенсоров, представляют собой значения аналоговых сигналов, полученные в некоторые моменты времени. Для адекватного функционирования системы необходимо обеспечить точность и своевременность доставки и обработки данных от сенсоров и доставки данных к актуаторам. Для решения данной задачи необходимо описать модели сигналов, получаемых от датчиков КТП. В данной работе будет рассмотрена одна из моделей – модель сигналов движения кисти руки. Модель доставки сигналов КТП. Сигналы, поступающие с выхода датчиков угла поворота, будем рассматривать их как случайный процесс, опишем его реализацию, энергетический спектр и автокорреляционную функцию. Это описание необходимо для выбора метода цифровизации этих сигналов и оценки необходимых сетевых ресурсов для их своевременной доставки в вычислительное устройство. Модель последовательности этапов доставки сигналов между сенсорами КТП и актуаторами робота-аватара приведена на рисунке 27.

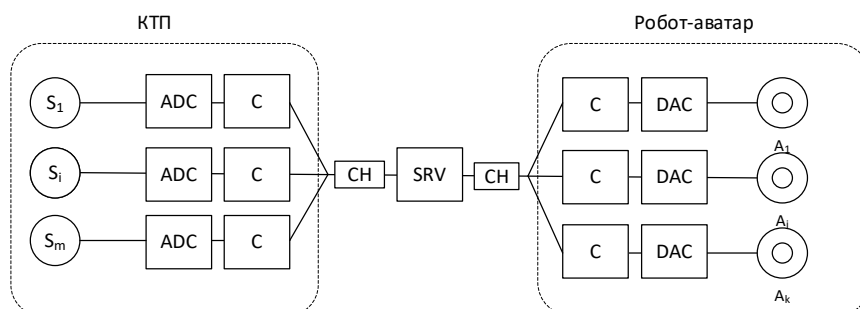


Рисунок 27 – Состав маршрута передачи сигнала от датчика к актуатору

Процесс преобразования сигналов в цифровую форму, и их передача вносят ошибку, которая в конечном итоге отражается на функционировании робота-аватара или на формировании виртуальной копии. В общем эта ошибка включает в себя множество составляющих, обусловленных техническими характеристиками датчиков (сенсоров) и актуаторов, процессами дискретизации, квантования и восстановления сигнала, передачей данных по каналу связи.

В общем, вносимую системой ошибку можно проиллюстрировать как показано на рисунке 28. Исходный сигнал $x(t)$, который описывает изменение какого-либо параметра, после цепочки преобразований и передачи по каналу связи претерпевает изменения до состояния, отражаемого сигналом $\tilde{x}(t)$, тогда ошибка может быть выражена как

$$e(t) = x(t) - \tilde{x}(t) \quad (6.1)$$

Ошибку можно рассматривать как отличие между состояниями сигнала (точками кривой), т.е. между точками на кривых, описывающих исходный и восстановленный сигналы, в моменты времени относящиеся к одному и тому же состоянию датчика КТП и актуатора или виртуальной копии. Иными словами, движения робота-аватара могут не в полной мере повторять движения оператора, а также запаздывать во времени.

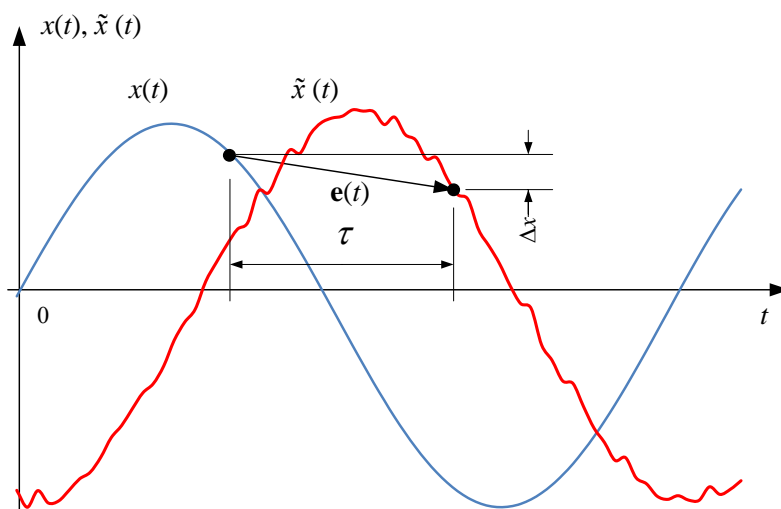


Рисунок 28 – Модель исходного и восстановленного сигналов

Равносильно сказанному выше, модель ошибки $e(t)$ можно описать вектором, длина и направление которого определяются составляющими Δx и Δt , рисунок 28. Длину вектора (модуль) будем рассматривать как показатель качества функционирования системы, т.е. показатель, учитывающий как ошибку квантования, так и задержку доставки:

$$\|e(t)\| = \sqrt{\text{Re}(e(t))^2 + \text{Im}(e(t))^2} \quad (6.2)$$

или

$$\|e(t)\| = \sqrt{\Delta x^2 + \tau^2} \quad (6.3)$$

Как ошибка квантования, так и задержка отрицательно отражаются на функционировании системы, поэтому целесообразно минимизировать длину вектора ошибки. Однако, $\Delta x(t)$ и $\tau(t)$ могут принимать численные значения, отличающиеся на порядок или более, также эти величины могут иметь различное влияние на конечный результат управления. В одних задачах, точность позиционирования манипулятора может быть менее критична, чем задержка выполнения операции, а в других наоборот первостепенное значение имеет точность, а время менее критично.

Разумеется, при отсутствии противоречий следует минимизировать оба эти параметра, однако при их наличии возникает задача выбора компромисса, которую можно сформулировать как задачу оптимизации:

$$O = \min_{\Delta x, \Delta \tau} (\omega_x \Delta x + \omega_\tau \tau), \quad \Delta x, \tau \geq 0, \quad \omega_x, \omega_\tau \geq 0 \quad (6.4)$$

которую следует рассматривать как минимизацию суммарных издержек на ошибку и время, а значение коэффициентов ω_x , ω_k , как условную единицу стоимости ошибки квантования и условную единицу стоимости задержки, соответственно.

Сигналы, производимые датчиками КТП были условно разделены на две группы по скорости изменения измеряемых параметров: «быстрые» и «медленные». К «медленным» относятся сигналы от датчиков движения рук, туловища, температуры. К быстрым относятся сигналы датчиков движения кистей рук и пальцев. Ниже приведены характерные реализации «медленных» и «быстрых» сигналов, получаемых при выполнении регулярных движений.

Одна из типовых реализаций «медленного» сигнала, как функция времени $x(t)$ приведена на рисунке 29-а. На рисунке 29-б приведен энергетический спектр этого сигнала $S(f)$. Из приведенного графика видно, что сигнал представляет собой непрерывную функцию времени, которая сравнительно медленно изменяется между минимальным и максимальным значениями.

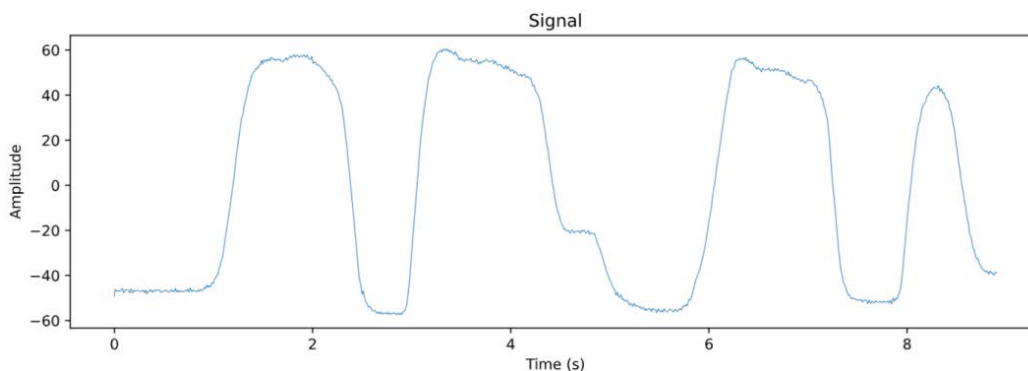


Рисунок 29-а – Форма сигнала

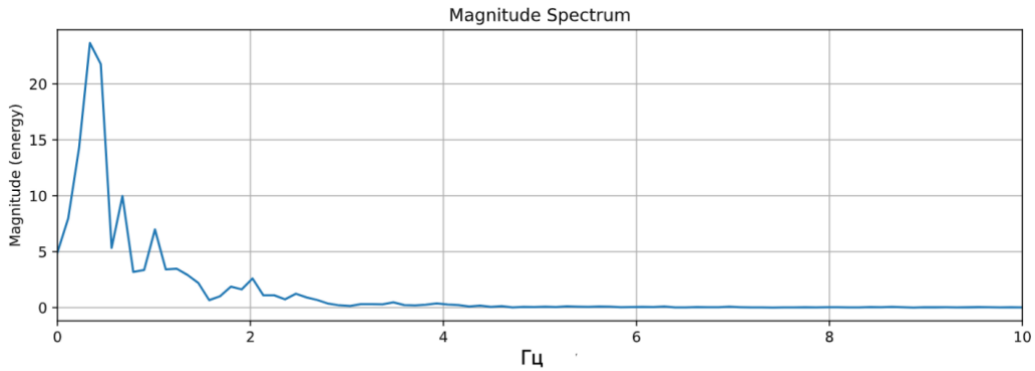


Рисунок 29-б – Энергетический спектр сигнала

Из приведенного графика энергетического спектра сигнала видно, что наибольшая доля энергии сосредоточена в сравнительно малом диапазоне частот, приблизительно от 0 до 4 Гц. Типовой пример реализации «быстрого» сигнала как функция времени, приведен на рисунке 30-а. Из рисунка видно, что этот сигнал также представляет собой непрерывную зависимость. На рисунке 30-б приведен график энергетического спектра сигнала. Визуальный анализ приведенного позволяет заметить, что наибольшая доля его энергии в этом случае также сосредоточена в сравнительно малом диапазоне частот. В полосе частот от 0 до 7 Гц сосредоточено более 85% энергии сигнала, 90% энергии сигнала сосредоточено в полосе от 0 до 12 Гц, а более 99% в полосе до 50 Гц.

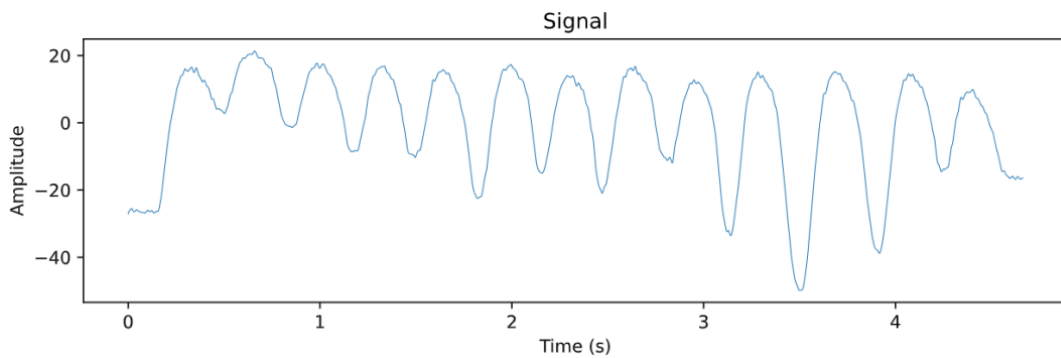


Рисунок 30-а – Форма сигнала

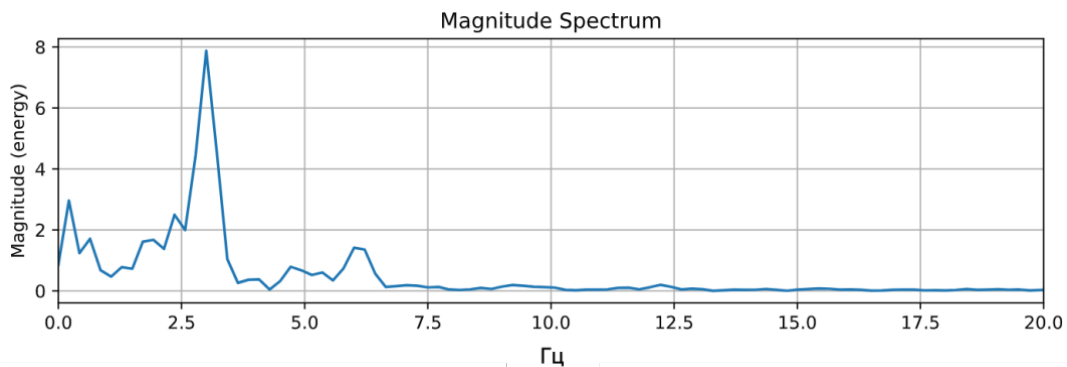


Рисунок 30-б – Энергетический спектр сигнала

Из теории обработки сигналов известно, что для точного восстановления сигнала, сигнала с ограниченным (конечным) спектром, частота дискретизации должна выбираться согласно теореме Котельникова (Котельникова-Шеннона-Найквиста) и не менее, чем вдвое превосходить верхнюю частоту спектра преобразуемого сигнала. Для описания сигналов на выходах датчиков КТП рассматривалась их форма $x(t)$ (ряд типовых реализаций при выполнении характерных движений) и их энергетический спектр $S(f)$ (модуль спектральной плотности мощности сигнала):

$$S(f) = \left\| \int_0^T x(t) e^{-j2\pi f t} dt \right\| \quad (6.5)$$

где f – частота (Гц).

Детальный анализ зависимости доли энергии $R(w)$ от полосы частот приведен на рисунке 31.

$$R(w) = \frac{\int_0^w S(f) df}{\int_0^{F_{\max}} S(f) df} \quad (6.6)$$

где F_{\max} – максимальная частота, полученная в результате измерений сигналов на выходах датчиков КТП. Из него видно, что наибольшая доля энергии «медленных» сигналов (>80%) сосредоточена в полосе частот от 0 до 1,7 Гц. Более 90% энергии сигнала сосредоточено в полосе от 0 до 2,7 Гц. Доля энергии более 99% лежит в полосе частот от 0 до 42 Гц (на рисунке не показано).

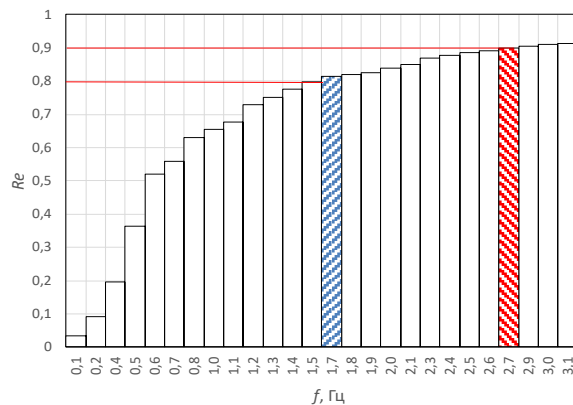


Рисунок 31 – Зависимость доли энергии «медленного» сигнала от частоты

Из полученных результатов можно сделать вывод о выборе частоты дискретизации, которая необходима для адекватного представления сигнала. Согласно полученным результатам, частота дискретизации должна быть не менее 6 Гц.

На рисунке 32 приведена гистограмма, иллюстрирующая зависимость доли энергии сигнала от полосы частот $R(w)$. На ней показана зависимость доли энергии от полосы частот «быстрых» сигналов, на которой выделены точки, соответствующие 80 и 90%. Из графика видно, что наиболее заметный прирост энергии имеет место на

интервале от 0 до 7 Гц, как это и было отмечено выше. Дальнейший прирост характеризуется пологим участком, вплоть до 50 Гц (на графике не приведен).

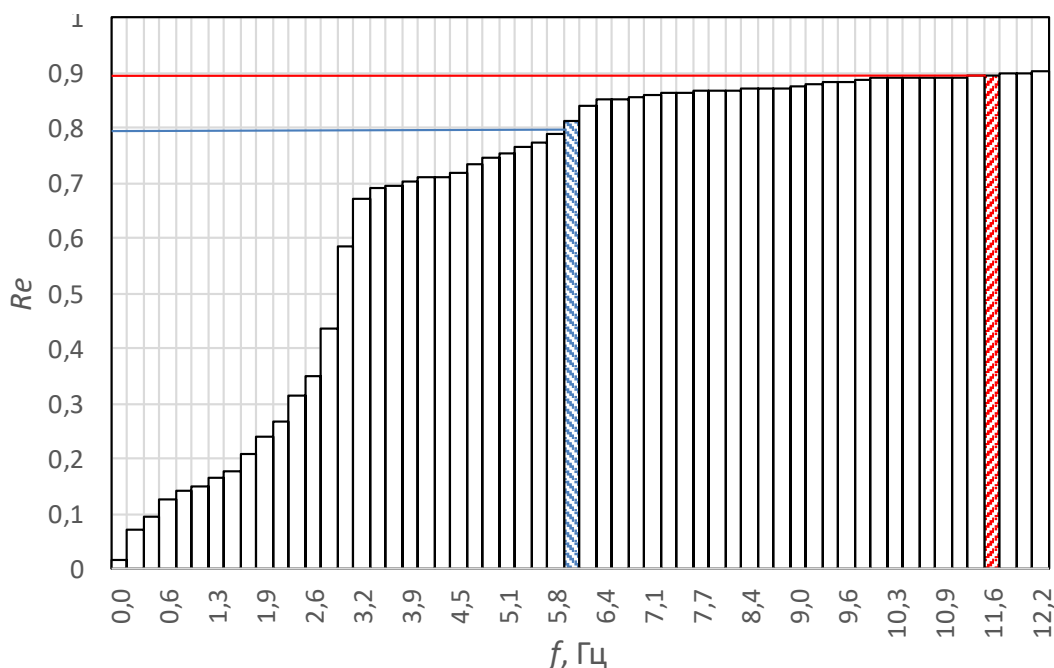


Рисунок 32 – Зависимость доли энергии «быстрого» сигнала от частоты

Рассмотренный пример для «быстрых» сигналов также позволяет сделать выбор частоты дискретизации для этого случая, которая может составить 14 Гц.

Рассмотрев приведенные примеры, можно сделать вывод, что большинство сигналов, производимых датчиками КТП являются сравнительно низкочастотными. Следует отметить, что наиболее высокочастотные составляющие как «медленных», так и «быстрых» сигналов, обусловлены шумом на выходах датчиков, поэтому можно предположить, что определяет приблизительно равную частоту 99% уровня, которая соответствует 42 Гц для «медленных» сигналов и 50 Гц для «быстрых» сигналов. Поэтому при выборе частоты дискретизации целесообразно ограничиться уровнем 90%. В таком случае, следуя теореме Котельникова, для «медленных» сигналов можно выбрать частоту дискретизации приблизительно 6 Гц, а для «быстрых» 25 Гц. Для устранения шумовой составляющей целесообразно использовать фильтр низкой частоты с частотой среза, превышающей верхнюю частоту сигнала, но вдвое ниже частоты дискретизации.

Общее количество датчиков КТП может быть различно, в зависимости от степени детализации движений, например, в используемом для экспериментов КТП используется один датчик сгибания пальца руки, в то время как отдельным датчиком может быть оснащена каждая из фаланг пальца, тогда число датчиков положения пальцев увеличится втрое с 5 до 15. Это не является пределом, могут использоваться датчики давления, температуры, угла, общее их количество может исчисляться от нескольких десятков, до нескольких сотен или даже тысяч.

Одним из важнейших факторов, влияющих на качество функционирования системы управления роботом-аватаром или виртуальной копией (аватаром) на базе КТП, являются время (задержка) доставки данных и ошибка позиционирования. Определенная выражением (6.4) задача минимизации ошибки предполагает взаимосвязь между ошибкой позиционирования и задержкой. Рассмотрим более подробно эти составляющие. Ошибка позиционирования, в общем случае определяется совокупностью ошибок, всеми элементами в цепи доставки сигнала: ошибкой сенсора, ошибкой аналого-цифрового преобразования (ошибкой квантования), ошибками передачи данных, ошибкой аналого-цифрового преобразования и ошибкой актуатора.

Будем полагать, что среди перечисленных элементов, наиболее значимой является ошибка квантования. Такое допущение возможно так как ошибки датчика и актуатора, определены их техническими возможностями, а вероятность ошибок в канале передачи пренебрежимо мала (может быть сведена к малой величине использованием соответствующего протокола передачи). Тогда вносимая составляющая ошибки Δx , будет определяться только ошибкой квантования, которая зависит от числа уровней квантования n_c , и будет определяться как

$$\Delta x = \Delta x(k) = \frac{A}{n_c} = \frac{A}{2^k} \quad (6.7)$$

где A – размах сигнала (В), n_c – число уровней квантования, k – разрядность АЦП. Согласно сделанным допущениям, составляющая ошибки Δx зависит только от числа уровня квантования (разрядности АЦП).

Задержка доставки, в общем случае, определяется совокупностью задержек, вносимых: датчиком, аналого-цифровым преобразованием, временем передачи по каналу связи, аналого-цифровым преобразованием и актуатором. Заметим, что при формировании пакетов, накопление данных за несколько интервалов дискретизации, например, как это реализуется при работе аудиокодеков, в данном случае невозможно, так как период дискретизации сравнительно велик и это повлечет за собой недопустимый рост задержки. В данном случае сделаем допущение, что существенной является только составляющая задержки, определяемая временем передачи данных по каналу связи. Как правило, канал является «узким местом», поэтому такое допущение возможно. Оно справедливо, когда канал протяженный или имеет сравнительно низкую скорость передачи данных или возможны его перегрузки трафиком.

Тогда составляющая ошибки $\Delta \tau$ будет определяться скоростью передачи данных в канале и их количеством. В данном случае мы не учитываем отдельным фактором задержку данных в канале, которая может быть вызвана ожиданием передачи в узлах связи, эта составляющая может быть учтена соответствующей корректировкой скорости передачи. С учетом сказанного $\Delta \tau$ может быть определена как

$$\tau = \tau(L) = \frac{L}{b} \quad (6.8)$$

где L – размер передаваемого пакета (бит), b – скорость передачи данных в канале (бит/с).

Размер пакета определяется количеством опрашиваемых датчиков m , количеством бит, представляющих данные каждого из датчиков и способом кодирования данных.

$$L = \psi \sum_{i=1}^m \eta_i, \quad i = 1 \dots m, \quad \psi \geq 1, \quad \eta_i \geq 1 \quad (6.9)$$

где $\eta_i = 2k_i$ – число бит, представляющих отсчет i -го датчика, ψ коэффициент, учитывающий избыточность используемого кода, m – количество датчиков.

Время передачи данных в канале в таком случае может быть определено как

$$\tau = \frac{L + \nu}{b} = \frac{1}{b} \left(\psi \sum_{i=1}^m \eta_i + \nu \right), \quad i = 1 \dots m, \quad \psi \geq 1, \quad \eta_i \geq 1, \quad \nu \geq 1 \quad (6.10)$$

где ν – число бит в заголовке пакета (число служебных бит из расчета на один пакет), b – скорость передачи данных (бит/с).

С учетом полученных выражений для составляющих ошибки, выражение (6.4) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} r(k_i) &= \sum_{i=1}^m \omega_x^{(i)} \frac{A}{2^{k_i}} + \frac{\psi}{b} \sum_{i=1}^m \left[\omega_\tau^{(i)} (2^{k_i} + \nu) \right], \\ O(k_i) &= \min_{k_i} (r(k_i)), \\ 1 \leq k_i &\leq k_{\max}, \quad \omega_x, \omega_\tau \geq 0, \quad i = 1 \dots m \end{aligned} \quad (6.11)$$

Выражение (6.11) определяет целевую функцию и ограничения для решения задачи оптимизации состава пакета с данными КТП. Оптимизация производится по разрядности АЦП датчиков k_i , данные которых помещаются в пакет. Значение разрядности k_i может принимать значения от 1 до максимально возможного значения k_{\max} , которое определяется типами используемых устройств. В отличие от задачи постановки (4) здесь рассматривается множество различных датчиков, данные которых могут иметь различную значимость для выполнения задачи, поэтому в выражении используются условные единицы стоимости ошибок $\omega_x^{(i)}$ и $\omega_\tau^{(i)}$ для каждого из m типов датчиков (данных). В общем случае, задача (6.11) это задача поиска экстремума (минимума) функции многих переменных.

При рассмотрении всего двух датчиков, можно данную зависимость изобразить в виде графика поверхности. Для $m = 2$, постоянной скорости передачи $b = 10^6$ бит/с, целевая функция имеет вид, приведенный на рисунке 33.

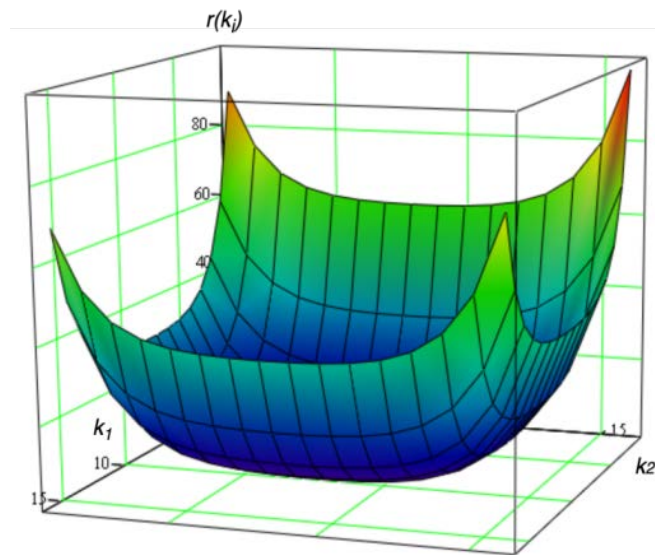


Рисунок 33 – Вид целевой функции при $m = 2$

Из приведенного графика видно, что целевая функция имеет выраженный минимум, который достигается при некотором соотношении разрядностей первого и второго датчиков. В приближенной к реальности ситуации количество датчиков составляет несколько десятков, для решения такой задачи требуется использовать численный метод оптимизации. Функция (6.11) выпуклая, поэтому могут быть использованы различные методы оптимизации функций многих переменных. В данном примере применялся метод сопряженных градиентов, который при принятых значениях дал решение $k_1 = 8$ бит, $k_2 = 9$ бит.

Получение данных о состоянии КТП требует опроса и преобразования сигналов множества датчиков и их доставки в точку назначения, которой может быть робот-аватар или цифровая копия. При этом вносится ошибка, которая включает в себя две основные составляющие: ошибку контролируемой величины и ее задержку.

При этом, передача данных КТП вносит задержку, существенная составляющая, которой определяется временем передачи пакета и пропорциональна его размеру, который в свою очередь зависит от разрядности АЦП, используемых для получения данных о сигналах датчиков. Поэтому повышение разрядности (точности представления сигнала) приводит к росту задержки доставки. Задачу доставки данных КТП можно решать с позиции минимизации ошибки, для чего нужно обеспечить компромисс между разрядностью используемых АЦП и временем доставки. Для этого введены условные единицы стоимости (штрафа) за ошибку контролируемой величины и за ее задержку. Для решения задачи минимизируется суммарная величина издержек (штрафа) путем выбора разрядности используемых АЦП.

В заключении изложены итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Решена научная проблема разработки и исследования комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия в (мета-)мультивселенной при использовании костюмов телеприсутствия.

2. Проведены исследования в области сетей связи пятого и последующих поколений, включая сети ИМТ-2030. Определены роли и место туманных вычислений, миграции микросервисов для услуг телеприсутствия в развитии сетей и систем связи. Представлены архитектурные решения для туманных вычислений, определены задачи в данной области исследований. Определены существующие вызовы развития перспективных сетей ИМТ-2030 и услуг телеприсутствия, учитывая возросшие потребности в предоставлении качества обслуживания и соответствующие сложности ввиду гетерогенности сетей, устройств, а также сложившейся конъюнктуры рынка, представленной в стратегии развития сети Российской Федерации и технических отчётах МСЭ.

3. Проведены исследования существующего положения дел в области разработок мета и мультивселенных, а также костюмов телеприсутствия как интерфейса между вселенными и пользователями, в том числе аватарами. Представленный анализ международных отчётов по метавселенным позволил сформулировать существующую научную проблему развития метавселенных, а также их архитектурные принципы построения, и определить ряд потенциальных технологий, таких как: генеративный искусственный интеллект, аватары, цифровые двойники, блокчейн, применимых в метавселенных. Представлена существующая дорожная карта стандартизации метавселенных, которая была принята в технической спецификации фокус-группы МСЭ по Метавселенным при TSAG;

4. Предложена новая архитектура сети, в которой все услуги связи могут быть предоставлены на базе распределенных туманных вычислений, а для динамического распределения ресурсов сети образуются новые структуры -туманности, как результат её кластеризации. Оценка эффекта от внедрения туманных вычислений в перспективные сети связи показала, что при сделанных допущениях, основанных в том числе на основе данных из открытых источников, внедрение туманных вычислений позволит достичь доли замыкания пользовательского трафика до 35%, при этом её распределение близко к бета-распределению. Если же учесть оценку для традиционного построения сети, стандартизованную в РД 45.120-2000, в частности то, что процент интенсивности внутристанционной нагрузки для крупномасштабных сетей имеет величину 15–17% и оценку внедрения туманных вычислений

(представлена в главе 2 диссертации), то уменьшение доли трафика, поступающего в ядро сети, может составить до 20%.

5. Предложена новая архитектура сети с поддержкой распределенных оркестраторов и динамических туманных вычислений в рамках общей интегрированной сети. Архитектура учитывает территориальную статистику РФ, для которой были дальше проведены исследования, в частности разработана модель для труднодоступных регионов. Был рассмотрен сценарий движения сельскохозяйственной техники, которая также может быть представлена в виде динамического кластера туманных вычислений. Рассмотренный сценарий далее был уточнен предложенной моделью сети динамических туманных вычислений, основанной на точечных процессах Нейманна-Скотта ввиду гетерогенности кластера.

6. В главе 3 диссертации также был предложен метод обеспечения стабильности кластера динамических туманных вычислений, где была предложена целевая функция и метод её минимизации. В качестве метода был предложен алгоритм динамической кластеризации, который производит выбор положения центра кластера динамических туманных вычислений (точка нахождения координатора), минимизируя при этом вероятность выхода элемента из кластера за счёт приближения центра к наиболее «неустойчивым» элементам.

7. В главе 4 диссертации представлен результат проведённых исследований в области применения бессерверной архитектуры в динамических туманных вычислениях. Было определено, что данный тип архитектуры позволит достичь более эффективного использования ресурсов, особенно в динамических туманных вычислениях.

8. В главе 4 диссертации была также представлена разработанная модель сети туманных вычислений для поиска группы устройств с целью последующей миграции группы контейнеров бессерверной платформы. Здесь же был разработан метод функционирования сети с использованием бессерверной архитектуры для миграции групп типовых микросервисов при применении метаэвристического алгоритма стаи серых волков для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами.

9. В главе 5 диссертации были представлены разработанная модель и метод маршрутизации в сети динамических туманных вычислений, в том числе для решения задачи миграции микросервисов в условиях ячеистой топологии кластера туманных вычислений. Метод обеспечивает учёт весов не только рёбер графа, но и весов самих устройств туманных вычислений, что в результате позволило по сравнению с существующими методами достичь снижения потребляемой энергии устройствами туманных вычислений на 41% и уменьшить долю потерянных пакетов в среднем до 34%.

10. В главе 6 представлена новая научная проблема в области создания интерфейсов для взаимодействия с объектами метавселенных – костюма телеприсутствия. В главе 6 была разработана и представлена модель данных для датчиков и актуаторов костюма телеприсутствия, а также разработан и представлен метод передачи этих данных в объекты метавселенных (например, в цифровые и/или физические аватары), при этом позволяющий обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных.

11. На основе представленных результатов исследований могут быть сформулированы следующие рекомендации: как определено, сети 2030 будут представлять собой интегрированную сеть связи, включая наземный, морской, воздушный и низкоорбитальный сегмент, которая позволит достичь ЦУР, сети 2030 в том числе последующего поколения должны быть достаточно автономны (внедрены технологии искусственного интеллекта), технологии построения сетей и услуг должны учитывать требования по их энергоэффективности, а также эффективности используемых вычислительных ресурсов (использование граничных и туманных вычислений), при этом архитектура услуг телеприсутствия должна учитывать микросервисный принцип и возможности использования бессерверной архитектуры совместно с туманными вычислениями.

12. Представленное в диссертации решение научной проблемы разработки и исследования комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия, в том числе при использовании костюмов телеприсутствия, позволяет определить актуальное направление исследований в области сетей связи – (мета-)мультивселенные.

**СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Работы, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК

1. Волков А.Н. Интерфейс взаимодействия с Метавселенной // Электросвязь. 2024. № 7. С. 36-42.
2. Волков А.Н. Задача маршрутизации в сети динамических туманных вычислений // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10, № 4. С. 27-37.
3. Волков А.Н. Динамические туманные вычисления и бессерверная архитектура: на пути к зеленым ИКТ // Труды учебных заведений связи. 2024;10(3). С. 24-34.
4. Волков А.Н. Стабильность кластера в динамических туманных вычислениях // Электросвязь. 2024. № 6. С. 8-17.
5. Волков А.Н. Туманность в перспективных сетях связи для услуг телеприсутствия // Электросвязь. 2024. № 4. С. 7-13.
6. Волков А.Н. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G Meganetlab СПбГУТ / А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, А.И. Парамонов, С.С. Владимиров, Г.А. Фокин, Р.А. Дунайцев, М.В. Захаров, Л.С. Горбачева, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов // Электросвязь. 2023. № 6. С. 5-14.
7. Волков А.Н. Метод прогнозирования нагрузки на контроллеры SDN с помощью технологий Искусственного интеллекта / А.Н. Волков, А.Е. Кучерявый // Электросвязь 2021. № 2.
8. Волков А.Н. Искусственный Интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений / А.Н. Волков, А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, А.С.А. Мутханна // Электросвязь. 2021. № 1. С.17-22
9. Волков А.Н. Структуры распределенной динамической вычислительной системы туманных вычислений для микросервисов (DD-Fog) // Электросвязь. 2021. № 7. С. 34-43.
10. Волков А.Н. Идентификация трафика сервисов в сетях связи ИМТ-2020 и последующего поколения на основе метаданных потоков и алгоритмов машинного обучения / А.Н. Волков, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2020. № 11. С. 21-28.
11. Волков А.Н. Анализ среднего времени задержки в системе массового обслуживания при обработке коррелированного трафика / И.В. Карташевский, А.Н. Волков, Р.В. Киричек // Электросвязь. 2019. № 3. С.41-50.

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science

12. A.A.A. Ateya, A.A.A. El-Latif, A. Muthanna, A. Volkov, A. Koucheryavy. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Network. – River Book, 233 p., 2024.

13. Volkov A. Microservice-Based Fog Testbed for 6G Applications / Kuzmina, E., Tefikova, M., Muthanna, A., Ateya, A.A., Koucheryavy, A. // International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT, pp. 174-182.
14. Volkov A. Traffic Type Recognition in 6G Software-Defined Networking for Telepresence Services / Mineeva, V., Muthanna, A., Koucheryavy, A. // In 2024 26th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT), pp. 01-06. IEEE, February 2024.
15. Volkov A. Migration Routing Algorithm for Microservice Based Fog Computing System / Kuzmina, E., Tefikova, M., Muthanna, A., Koucheryavy, A. // In 2024 26th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT), pp. 183-186. IEEE, February 2024.
16. Volkov A. Efficient Transmission of Holographic Images: A Novel Approach Toward 6G Telepresence Services / Svechnikov, D., Pankov, B., Nesterova, Y., Ateya, A.A., Koucheryavy, A. // In International Conference on Distributed Computer and Communication Networks, pp. 34-43. Cham: Springer Nature Switzerland, September 2023.
17. Volkov A. Load Balancing Algorithm in SDN Multicontroller Network / Zhetov, A., Kaijalainen, V., Mogilatov, A., Muthanna, A. // In Proceedings of the 7th International Conference on Future Networks and Distributed Systems, pp. 689-693. December 2023.
18. Volkov A. AR/VR service migration algorithm based distributed edge computing system for Telesurger. / Kharlamov, M., Al-Sveiti, M., Karpichev, M., Muthanna, A. // In Proceedings of the 7th International Conference on Future Networks and Distributed Systems, pp. 647-656. December 2023.
19. Volkov A. Service Migration Algorithm for Distributed Edge Computing in 5G/6G Networks / Kuznetsov, K., Kuzmina, E., Lapteva, T., Muthanna, A., Aziz, A. // In International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking, pp. 320-337. Cham: Springer Nature Switzerland, December 2023.
20. Volkov A. Resource Allocation Computing Algorithm for UAV Dynamical Statements based on AI Technology / Kovalenko, V., Rodakova, A., Hamza Mohammed Ridha Al-Khafaji, Muthanna, A., Koucheryavy, A. // Webology, Volume 19, Number 1. January 2022.
21. Volkov A. Deep Learning for IoT Traffic Prediction Based on Edge Computing / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Abdelah, A., Galyamov, D. // Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. DCCN 2020. Communications in Computer and Information Science, vol 1337. Springer, Cham, 2021.
22. Volkov A. IoT Traffic Prediction with Neural Networks Learning Based on SDN Infrastructure / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Abdelah, A., Makolkina M., Paramonov A. // Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol. 12563. Springer, Cham, 2021.

23. Volkov A. Clustering algorithms for UAV placement in 5G and Beyond Networks / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Abaz, A., Kovalenko, V. // 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2020.

24. Volkov A. Detection and Recognition of Moving Biological Objects for Autonomous Vehicles using Intelligent Edge Computing / LoRaWAN Mesh System / Muthanna, A., Kovtunencko, A., Al-Sveity, M., Elgendy I. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and System, 2020.

25. Volkov A. Approaches for Multi-tier cloud structure management / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Kovalenko, V. // In 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2019.

26. Volkov A. Novel AI-based scheme for traffic detection and recognition in 5G based networks / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Ateya, A. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems., 2019.

27. Volkov A. SDN Load Prediction Algorithm Based on Artificial Intelligence / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Adam, A., Ateya, A., Proshutinsky K. // Communications in Computer and Information Science, vol 1141. Springer, Cham., 2019

28. Volkov A. Framework of QoS management for time constraint services with requested network parameters based on SDN/NFV infrastructure / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Khakimov, A., Muhizi, S., Kirichek R. // In 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)» – IEEE-2018.

29. Volkov A. Interaction of the IoT traffic generated by a smart city segment with SDN core network / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Khakimov, A., Vladuko, A., Kirichek R. // In 2017 Lecture Notes in Computer Science – Springer-Verlag GmbH-2017.

30. Volkov A. SDN approach to control internet of thing medical applications traffic / Muthanna, A., Pirmagomedov, R., Kirichek R. // In Communications in Computer and Information Science» Springer-Verlag GmbH-2017.

Работы, опубликованные в изданиях РИНЦ

31. Волков А.Н. Сетевая вселенная / Кучерявый А.Е., Мутханна А.С.А. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4 т. СПб. : СПбГУТ, 2024. Т. 1. С. 9-11.

32. Волков А. Н. Интерфейс взаимодействия Пользователь – Метавселенная // 79-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2024. С. 213-215.

33. Волков А.Н. Метавселенная как следующий виток развития сетевых технологий // 79-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2024. С. 210-212.

34. Волков А.Н. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 / А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т.8, № 2. С. 32-43.

35. Volkov A. AI/machine learning for ultra-reliable low-latency communication / A. Volkov, A. Muthanna, A. Koucheryavy // ITU News No. 5. December 2020. p. 62-65.

36. Волков А.Н. Туманные вычисления в сетях ИМТ-2030 для услуг телеприсутствия / А.Н. Волков, А.Е. Кучерявый // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления. Россия, Москва, ИПУ РАН, 2024.

37. Волков А.Н. Влияние изменения методов обеспечения качества обслуживания на цифровой аватар / А.Н. Волков, В.Д. Минеева, А.А. Житов, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления. Россия, Москва, ИПУ РАН, 2024.

38. Волков А.Н. Архитектура беспроводных сетей на базе дронов в условиях разрушенной инфокоммуникационной инфраструктуры / Г. Инкин, А. Морачевский, А. Волков // Материалы 77-ой региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 2023. С. 145-149.

39. Волков А.Н. Определение маршрута миграции микросервиса в сети туманных вычислений / М.Р. Тефилова, Е.А. Кузьмина, А.Н. Волков // Информационные технологии и телекоммуникации. 2023. Т. 11. № 1. С. 50-60.

40. Волков А.Н. Искусственный интеллект в сетях связи / А.Н. Волков, А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, А.С.А. Мутханна, А.Р. Абделлах // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. X Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПбГУТ. Санкт-Петербург, 2021. С. 8-18.

41. Волков А.Н. Исследование и разработка методов эффективного развертывания микросервисов в распределенной вычислительной среде / Д.С. Королев, А.Н. Волков // Студенческая весна – 2023. Материалы 77-ой региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 2023.

Отчеты о НИР, где использованы результаты диссертации:

42. Волков А.Н. Исследование сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного интеллекта для сетей 6G / Кучерявый А.Е, Абд Эль-Латиф А.А., и др. // Мегагрант. Соглашение с Министерством науки и высшего образования РФ: № 075-15-2022-1137.

43. Волков А.Н. Прикладные научные исследования в области создания сетей связи 2030, включая услуги телеприсутствия с сетевой поддержкой, и экспериментальная проверка решений при подготовке отраслевых кадров / Брусиловский С.А., Нестеров А.А., Кучерявый А.Е., и др. // Номер учета НИР: 123060900012-6.