

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

На правах рукописи

Демидов Николай Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТРАФИКА И МЕТОДА
ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ
УСЛУГ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук , доцент
Маколкина Мария Александровна

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ТИП КОММУНИКАЦИИ	11
1.1 Терминологическая система исследования.....	11
1.2. Голографический тип коммуникации: анализ основных особенностей	19
1.3. Основные этапы развития голографических технологий	21
1.4. Внедрение голографического типа коммуникаций: проблематика научных исследований передачи голографических копий в сетях связи	31
1.5. Оборудование для голографической коммуникации: анализ и технические характеристики	38
1.5.1 Технические характеристики записывающих устройств.....	39
1.5.2. Воспроизводящее оборудование для голографического типа коммуникации.....	49
1.5.2.2 Голографические вентиляторы.....	56
1.5.2.3 Голографические станции: голографические 3D пирамиды и кубы	59
1.6 Выводы к 1 главе	64
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАФИКА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО.....	66
ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ТИП КОММУНИКАЦИЙ.....	66
2.1 Исследование передачи трафика 3D видеопотока с использованием технологии DWDM	67
2.1.1 Обоснование использования технологии DWDM	67
2.1.2 Модельная сеть для передачи 3D видеопотока на базе технологии DWDM	68
2.1.3 Анализ параметров передачи 3D видеопотока с использованием технологии DWDM	69
2.1.4 Исследование трафика приложений виртуальных аватаров	76
2.2 Исследование процессов обслуживания трафика 3D видеопотока в различной среде передачи	84
2.2.1 Исследование передачи трафика 3D видеопотока с использованием оптоволоконного кабеля.....	85
2.2.2 Исследование передачи трафика 3D видеопотока с использованием беспроводной среды (Wi-Fi)	88

2.2.3 Передача трафика 3D видеопотока с использованием технологии Ethernet	92
2.3 Исследование характеристик сетевого трафика	95
2.4 Исследование параметров и проведение сравнительного анализа трафика мультимедиа и голографического трафика	99
2.4.1 Разработка модели: оборудование, структура	99
2.4.2 Статистический анализ результатов натурального эксперимента	100
2.5 Выводы к 2 главе	107
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ТРАФИКА В СЕТИ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ.....	109
3.1 Постановка задачи для данного этапа исследования	110
3.2 Моделирование агрегированного потока голографического трафика	111
3.2.1 Описание имитационной модели	111
3.2.2 Моделирование передачи смешанного трафика	121
3.3 Выводы к 3 главе	125
ГЛАВА 4. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦСВЯЗЬ: ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОСПРИЯТИЯ.....	127
4.1 Анализ достижений в области голографической конференцсвязи.....	129
4.2 Описание экспериментального исследования качества восприятия голографической конференцсвязи.....	131
4.3 Результаты экспериментального исследования	134
4.4 Выводы к 4 главе	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	140
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ	166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время можно наблюдать стремительное развитие телекоммуникационных технологий и информационных услуг, повсеместно внедряемых во все сферы человеческой деятельности. За последние 20 лет услуги связи претерпели существенные изменения, включая расширение номенклатуры предоставляемых видеослужб, внедрение услуг дополненной реальности и как следствие появление голографического типа коммуникации (НТС, Holographic Type Communication).

Сегодня большой интерес у пользователей и исследователей во всем мире вызывает передача голографической информации для обеспечения эффекта присутствия собеседника. На практике это подтверждается появлением огромного числа разнообразного и разнотипного оборудования, позволяющего как формировать голографический поток, так и воспроизводить его на другой стороне в реальном режиме времени. Очевидно, что данный вид коммуникации предъявляет высокие требования к пропускной способности сети, которые для существующих сетей связи варьируются в диапазоне от 10 Мбит/с до 4,2 Тбит/с.

Основные сценарии использования и функциональные требования для систем телеприсутствия определены в рекомендации МСЭ-Т F.734. В соответствии с данной рекомендацией, телеприсутствие представляет собой сеанс интерактивной аудиовизуальной связи между удаленными относительно друг друга локациями, предоставляя при этом, благодаря оптимизации различных атрибутов, возможность ощущать эффект присутствия и испытывать чувство полной реальности. Новый вид телеприсутствия – голографический тип коммуникаций, открывающий перед пользователями новые возможности и ощущения.

Тенденции внедрения голографических услуг и голографического типа коммуникации, уже сегодня требуют пересмотра принципов планирования, проектирования и построения существующих сетей связи, а также подходов к реализации сетей шестого поколения 6G, в основе которых лежит интеграция разнообразных технологий и сетей связи в единую сеть. Отдельным вопросом

стоит оценка качества обслуживания и качества восприятия голографических услуг как объективными, так и субъективными методами оценки.

Практически отсутствуют критерии оценки качества голографического изображения, в том числе, шкалы и методы субъективной оценки качества предоставления голографических услуг. Более того, свойства голографического потока достаточно мало изучены, а тем более его влияние на сети связи и требования к параметрам сетей, что делает задачи исследования характеристик трафика и оценки качества обслуживания голографических услуг весьма актуальными.

Степень разработанности темы. Существует множество работ в области формирования, передачи в сетях связи пятого, шестого и последующих поколений, отображения голографических изображений как теоретического, так и экспериментального характера. Определяющий вклад в исследования, посвященные данной тематике, внесли российские и зарубежные ученые: В.М. Вишнеvский, К.Е. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака, А.Е. Кучеряvый, В.Г. Карташевский, О.И. Шелухин, А.И. Парамонов, С.Н. Степанов, Е.А. Кучеряvый, Д.А. Молчанов, А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, К. Matsushima, Y. Arima, I. F. Akyildiz, M.T. Vega.

Указанные авторы в своих работах исследуют вопросы, связанные с организацией, построением и функционированием сетей связи пятого и последующих поколений для предоставления новых услуг, таких как дополненная реальность, Тактильный Интернет, беспилотный автотранспорт и др. Их исследования направлены на решение задач математического описания сетей пятого и последующих поколений, разработке подходов построения сетей, с учетом появляющихся новых услуг, повышению эффективности функционирования сети, распределения вычислительных ресурсов, а также обеспечению надлежащего качества при предоставлении таких услуг.

В большинстве работ существенное внимание уделяется вопросам прогнозирования нагрузки на сеть, исследованию трафика новых услуг связи, однако, они не учитывают особенностей голографического трафика и его влияние

на функционирование сетей связи, а также оценку качества предоставления данного типа услуг субъективными методами. Все вышесказанное и определяет цель, задачи, объект и предмет данной диссертационной работы.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются голографический тип коммуникации, а предметом – характеристики трафика и качества обслуживания голографического типа коммуникаций.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы состоит в разработке моделей трафика голографического типа коммуникаций и субъективной оценке качества голографической конференцсвязи в сетях пятого и последующих поколений.

Цель работы достигается последовательным решением следующих задач:

- анализ голографических услуг и голографического типа коммуникаций, а также направлений развития сетей связи пятого и последующих поколений для предоставления данных услуг;

- анализ и исследование мультимедийного, в том числе голографического и трафика Интернета Вещей в сетях связи пятого и последующих поколений;

- анализ принципов построения сетей связи пятого и последующих поколений для предоставления голографических услуг и реализации голографического типа коммуникации;

- разработка структуры модельной сети для предоставления голографических услуг;

- исследование передачи трафика 3D видеопотока на модельной сети с использованием технологии DWDM;

- разработка модели мультимедиа трафика, включающая в себя трафик голографического типа коммуникации и Интернета вещей;

- моделирование процессов обслуживания голографического трафика в сетях связи пятого и последующих поколений;

- разработка и исследование субъективного метода оценки качества восприятия голографической конференцсвязи.

Научная задача, решаемая в работе, состоит в разработке моделей трафика для голографического типа коммуникаций, повышающих эффективность оценки качества восприятия данных услуг в сетях связи пятого и последующих поколений.

Научная новизна результатов состоит в следующем:

1. В отличие от известных результатов в области моделей и характеристик трафика для традиционных и новых услуг в сетях связи пятого и последующих поколений установлено, что модель трафик мультимедиа услуг представляет собой смесь 4-х гамма-распределений, в том числе модель трафика голографического типа коммуникации представляет собой смесь экспоненциального и гамма-распределений, а модель трафика Интернета вещей представляет собой смесь распределения Вейбулла, нормального распределения и 4-х гамма-распределений.

2. В отличие от известных результатов в области оценки качества восприятия голографического типа коммуникаций при предоставлении услуг голографической конференцсвязи экспериментальным путем на модельной сети лаборатории MEGANET LAB 6G было установлено, что субъективная оценка качества восприятия по шкале MOS начинает ухудшаться при наличии 32 голографических потоков и становится неудовлетворительной при 48 голографических потоках.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке и исследовании моделей трафика для нового вида услуг, голографического типа коммуникации, в сетях связи пятого и последующих поколений, что позволило определить количество и тип распределений, характеризующих данные модели трафика. Это определяет подходы к формированию принципов построения и организации услуг в сетях пятого и последующих поколений с учетом особенностей новых видов трафика. Значимым результатом, имеющим существенную теоретическую ценность, представляется оценка качества предоставления услуг голографической конференцсвязи субъективным методом оценки, базирующимся на известной

экспертной оценке качества обслуживания MOS (Mean Opinion Score), что позволит в дальнейшем определить концепцию оценки качества восприятия голографических услуг.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в диссертационной работе результаты могут быть положены в основу создания научно-обоснованных рекомендаций по планированию, проектированию и организации сетей связи пятого и последующих поколений с учетом особенностей трафика голографических услуг. А также разработке критериев и методов оценки качества обслуживания и качества восприятия голографического типа коммуникаций.

Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе высших учебных заведений, занимающихся подготовкой специалистов в соответствующей области при чтении лекций и проведении лабораторных и практических работ.

Результаты работы внедрены в ООО «НТЦ АРГУС» при проектировании систем принятия решений (DSS, Decision support system), что позволило расширить функциональные возможности системы при формировании оптимальной продуктовой линейки, отвечающей потребностям целевых клиентов, и при проведении многоуровневого автоматизированного анализа эффективности бизнеса оператора связи, в ООО «Связной альянс» при проектировании ЦОД с возможностью предоставления голографических услуг, а также в СПбГУТ при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по курсам «Сервисы конвергентных сетей» и «Математические методы проектирования услуг мультисервисных систем», и при выполнении СЧ ПНИ на тему «Разработка методов построения сетей связи на основе технологии сетей связи 2030-DD-FOG (распределенной динамической вычислительной системы туманных вычислений для микросервисных услуг), в условиях полного или частичного отсутствия инфраструктуры на территориях различного ландшафта», регистрационный номер 124040300004-8.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы системного анализа, теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории фракталов, теории математической статистики и методах аналитического имитационного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модели трафика мультимедиа, учитывающие голографический трафик и трафик Интернета вещей, отличающиеся от известных тем, что определено количество и тип распределений, что позволяет обоснованно планировать сети связи пятого и последующих поколений.
2. Метод субъективной оценки качества восприятия голографической конференцсвязи, позволяющий установить, что при нагрузке на сеть в 32 голографических потока качество предоставления услуги начинает ухудшаться, а при 48 соответствует неудовлетворительной оценке по шкале MOS.

Степень достоверности и апробация результатов. *Достоверность*, полученных автором в диссертационной работе научных и практических результатов, подтверждается обоснованным выбором предмета и объекта исследований, исходных данных при постановке задач исследования, принятых допущений и ограничений, а также соответствием результатов аналитического и имитационного моделирования, экспериментальных данных, проведенных лично автором, согласованностью с данными, полученными другими авторами и апробацией результатов на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» АПИНО (Санкт-Петербург, 2021, 2023, 2024), International Conference on Advanced Computing & Next-Generation

Communication (ICACNGC, 2023), Санкт-Петербургского НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио (2023, 2024).

Публикации по теме диссертации. По теме работы опубликовано 12 научных работ, из них 3 в рецензируемых научных изданиях (перечень ВАК), 9 в других изданиях и материалах конференций.

Соответствие специальности. Работа соответствует пунктам 1, 3, 7, 8 паспорта специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

ГЛАВА 1 ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ТИП КОММУНИКАЦИИ

Ключевой характеристикой современного развития информационно-коммуникационных технологий является интерактивность коммуникации.

Анализируя исследования можно определить, как ведущую, тенденцию к попытке решить проблему воссоздания голографического образа собеседника в режиме реального времени при общении в сетях связи. Абонент получает возможность наблюдать за собеседником и общаться с ним, используя голографический аватар. Голографическое изображение, в отличие от стереоскопического, появляется объективно и воспроизводит реальный объект. Для коммуникации с эффектом присутствия реализовали технологию голографической связи, которая позволяет передавать голографические копии.

1.1 Терминологическая система исследования

Рассматривая терминологическую систему данного исследования, выделим следующую основную группу терминов: голографический тип коммуникации (НТС), связь голографического типа, голографическое телеприсутствие, голографическая телепортация (голопортация), голографические копии, голографический аватар, иммерсивные технологии в телекоммуникациях.

В рекомендации МСЭ голографическая коммуникация (НТС) обозначается как технология, которая будет в интерактивном режиме доставлять цифровые 3D-изображения из одного или нескольких источников в один или несколько целевых узлов [8].

НТС может отправлять голограммы и другие мультисенсорные мультимедиа через беспроводные и проводные сети в удаленные места[9]. Система НТС в основном состоит из трех частей, а именно: источника, сетей и пункта назначения. голограммы и мультимедиа создаются или хранятся в

источнике, отправляются через сети НТС, визуализируются и представляются в пункте назначения.

Авторы [10] дают следующее определение: НТС – это технология общения между конечными пользователями, которая основывается на особом методе регистрации и воспроизведении 3D-объектов – голографии.

Многие авторы [11] обращают внимание на то, что голографический тип коммуникации (НТС) относится к технологиям передачи и получения 3D-голографических изображений и видео, создавая передовые и увлекательные коммуникационные впечатления.

В данном исследовании мы рассматриваем НТС как инновационную технологию связи, которая реализует возможность создания эффекта присутствия посредством передачи голографических копий в режиме реального времени. Технология голографической связи, состоящая из трех последовательных этапов – записи голографического контента, передачи и воспроизведения голографических копий, позволяет пользователям естественным образом взаимодействовать, сохраняя эффект иммерсивности при общении.

Автор [12] приходит к выводу, что технологии голографической связи — это новая цифровая технология, которая в настоящее время разрабатывается компаниями, чтобы стать доступной общественности в ближайшем будущем.

В исследовании связи голографического типа автор [13], в качестве НТС рассматривает голографическую телепортацию из нескольких источников, акцентируя внимание на необходимости синхронизации кадров, которая имеет решающее значение, поскольку задействовано множество участников, которые общаются в режиме реального времени.

Holoportation — это новый тип технологии 3D-захвата, которая позволяет реконструировать, сжимать и передавать высококачественные 3D-модели людей в любую точку мира в режиме реального времени. В сочетании с дисплеями смешанной реальности, такими как HoloLens, эта технология позволяет пользователям видеть, слышать и взаимодействовать с удаленными участниками

в 3D, как будто они на самом деле присутствуют в том же физическом пространстве. [14]

Исследовательская группа [15] представила новое средство коммуникации Holoportation с расширенными интерактивными возможностями. Авторы [15] разработали сквозную систему для телеприсутствия дополненной и виртуальной реальности, называемую Holoportation, которая демонстрирует высококачественные 3D-реконструкции в реальном времени всего пространства, включая людей, мебель и объекты, с использованием набора новых глубинных камер. Данные 3D-модели также могут передаваться в реальном времени удаленным пользователям, что позволяет абонентам, использующим дисплеи виртуальной или дополненной реальности, видеть, слышать и взаимодействовать с удаленными участниками в 3D, почти так, как если бы они присутствовали в том же физическом пространстве.

Расширенная реальность (XR) - термин, который относится ко всем реальным и виртуальным средам, таким как VR-технологии (виртуальная реальность), AR-технологии (дополненная реальность) и MR-технологии (смешанная реальность), объединёнными вместе [16].

XR-технология создает эффект полного погружения для пользователя, помогая ему ощутить максимальное присутствие в искусственно созданных мирах [17].

Вопросам изучения технологии телеприсутствия посвящены работы [18-22].

Авторы [18] обосновывают введение в научный лексикон термина «телеприсутствие» тем, что он связан с перемещением самовосприятия пользователя в компьютерно-опосредованную среду. Исследователи [20] подчеркивают, что виртуальное присутствие и телеприсутствие рассматриваются, как чувство присутствия в компьютерной среде и фактически являются психологически неразличимыми явлениями. Общий термин «телеприсутствие» отражает идею проекции в отдаленную среду и более адекватно описывает

процесс, чем термины «синтетическое присутствие», виртуальное присутствие, присутствие эго или социальное присутствие.

На следующем этапе, в исследовательской работе [21] авторы представляют инновационную систему иммерсивного телеприсутствия. Бека, Кунерта, Кулика и др.

На современном этапе более актуальным становится термин «голографическое телеприсутствие». Так, авторы [21] подчеркивают, что голографическое телеприсутствие — это развивающаяся технология для полномасштабных трехмерных (3D) видеоконференций. Системы голографического телеприсутствия могут проецировать реалистичные полноценные 3D-изображения удаленных людей и объектов, в реальном времени непосредственно в помещение, а также осуществлять аудиосвязь в реальном времени с уровнем реализма, соперничающим с физическим присутствием. Изображения удаленных людей и окружающих объектов захватываются, сжимаются, передаются по широкополосной сети, распаковываются и, наконец, проецируются с помощью лазерных лучей почти так же, как создается обычная голограмма. Голографическое телеприсутствие имеет потенциал для революции во многих различных типах коммуникаций [22].

Таким образом, в рамках данного исследования, термин «голографическое телеприсутствие» трактуется, как психическое состояние пользователя, при котором он ощущает взаимодействие с виртуальными объектами и субъектами, как с реальными в процессе голографической коммуникации.

Голографическое телеприсутствие рассматривается нами как результат эволюционного развития различных типов коммуникаций и представляет собой наиболее эффективный способ осуществления коммуникации, проецируя удаленных участников видеоконференции в виде голограмм.

В сфере изучения инновационных инфокоммуникационных технологий часто используется термин «голографические копии» для данного исследования было разработано следующее определение термина.

Голографическая копия это записанная и обработанная информация об объекте, необходимая и достаточная для визуализации голографического контента и взаимодействия с ним в процессе голографического типа коммуникации.

Исследователи видят [23] дальнейшее развитие приложений дополненной реальности в создании голографических копий различных объектов, что требует решение новых задач не только как дальнейшее совершенствование трехмерного отображения информации, но и формирования новых стандартов и рекомендаций для развития сетей связи.

Для реализации голографического типа коммуникации часто используют голографические аватары. Для данного исследования было разработано следующее определение термина Голографический аватар – это гиперреалистичная 3D модель человека, созданная по реальному прототипу пользователя, с использованием программных платформ искусственного интеллекта, обеспечивающих машинное обучение нейронной сети. В отличие от виртуальных цифровых аватаров, которыми управляют пользователи, голографический аватар является полностью автономным, автоматизированным, который контактирует с пользователем благодаря нейронной сети. [24]

Термину иммерсивные технологии в телекоммуникациях также уделяется достаточное внимание в работах ученых в сфере телекоммуникаций. В рамках данного термина, подразумевается технологии, приносящие в дистанционное общение пользователей эффект присутствия.

Под иммерсивными технологиями в телекоммуникациях, понимаем технологии, вносящие в дистанционное общение людей дополнительные виды информации, позволяющие создавать эффект полного присутствия человека в удаленной от него на большое расстояние среде за счет создания трехмерных моделей людей и пространства, а также воздействия на все органы чувств людей, участвующих в дистанционном общении [25].

Голографическое телеприсутствие — это развивающаяся технология для полномасштабных трехмерных (3D) видеоконференций. Системы

голографического телеприсутствия могут проецировать реалистичные, полноценные, 3D-изображения удаленных людей и объектов в реальном времени в комнату, а также аудиосвязь в реальном времени с уровнем реализма, соперничающим с физическим присутствием. Изображения удаленных людей и окружающих объектов захватываются, сжимаются, передаются по широкополосной сети, распаковываются и, наконец, проецируются с помощью лазерных лучей почти так же, как создается обычная голограмма.

Голографическое телеприсутствие имеет потенциал для революции во многих различных типах коммуникаций.

С учетом потребностей ключевых отраслей экономики и социальной сферы (образование, здравоохранение, строительство, транспорт, финансы, оборона страны, безопасность государства и др.) в современных телекоммуникационных сервисах до 2035 года большая часть федеральных органов исполнительной власти, государственных корпораций (компаний) и организаций с государственным участием заинтересованы в получении: подвижной радиотелефонной связи с использованием технологии 5G со скоростью доступа выше 50 Мбит/с; фиксированного широкополосного доступа к сети "Интернет" со скоростью доступа 1 Гбит/с и выше; спутниковой радиосвязи, в том числе широкополосного доступа к сети "Интернет"; беспроводной связи малого радиуса действия и профессиональной радиосвязи. Органы государственной власти субъектов Российской Федерации заинтересованы в расширении программ по устранению цифрового неравенства, а также в подключении удаленных и труднодоступных территорий с использованием волоконно-оптических линий связи. [6]

Резюмируя, отметим, что фактор развития инновационных инфокоммуникационных технологий (ИКТ) с использованием сетей 5G и 6G, обеспечивающих голографическую коммуникацию, оказывает принципиальное влияние на повышение уровня технологического суверенитета страны. В этом контексте необходимо констатировать, что существуют определенные предпосылки для расширения базы исследовательских работ, их согласованности

и необходимой равновесности в спектре исследуемых проблем связи голографического типа.

Комплекс основных терминов исследования отображен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Терминологическая система

Термин	Определение	Группа исследователей
Голографический тип коммуникации	Голографическая коммуникация (НТС) обозначается как технология, которая будет в интерактивном режиме доставлять цифровые 3D-изображения из одного или нескольких источников в один или несколько целевых узлов	[8]
	НТС может отправлять голограммы и другие мультисенсорные медиа (Мультимедиа) через беспроводные и проводные сети в удаленные места	[9]
	НТС – это технология общения между конечными пользователями, которая основывается на особом методе регистрации и воспроизведении 3D-объектов – голографии.	[10]
	НТС рассматривается в качестве голографической телепортации из нескольких	[13]

	источников, акцентируя внимание на необходимости синхронизации кадров, которая имеет решающее значение, поскольку задействовано множество участников, которые общаются в режиме реального времени.	
Holoportation	Holoportation — это новый тип технологии 3D-захвата, которая позволяет реконструировать, сжимать и передавать высококачественные 3D-модели людей в любую точку мира в режиме реального времени.	[14]
Голографическое телеприсутствие	Голографическое телеприсутствие — это развивающаяся технология для полномасштабных трехмерных (3D) видеоконференций. Системы голографического телеприсутствия могут проецировать реалистичные, полноценные, 3D-изображения удаленных людей и объектов в реальном времени в комнату, а также аудиосвязь в реальном времени с уровнем реализма, соперничающим с физическим присутствием.	[21]
Расширенная реальность	Расширенная реальность (XR) - термин, который относится ко	[16]

	<p>всем реальным и виртуальным средам, таким как VR-технологии (виртуальная реальность), AR-технологии (дополненная реальность) и MR-технологии (смешанная реальность), объединёнными вместе</p>	
<p>Телеприсутствие</p>	<p>Телеприсутствие рассматривается, как чувство присутствия в компьютерной среде и фактически являются психологически неразличимыми явлениями</p>	<p>[20]</p>
<p>Голографический аватар</p>	<p>Голографический аватар – это гиперреалистичная 3D модель человека, созданная по реальному прототипу пользователя, с использованием программных платформ искусственного интеллекта, обеспечивающих машинное обучение нейронной сети.</p>	<p>[24]</p>

1.2. Голографический тип коммуникации: анализ основных особенностей

Голографическая коммуникация, на данном этапе, это наиболее инновационная форма передачи информации, использующая голографическую технологию для создания трехмерных изображений и проецирующая их в реальном пространстве. В связи с этим, анализируя голографическую

коммуникацию, как новую технологию, в первую очередь, сфокусируем внимание на потенциальных возможностях технологии сделать общение более естественным, реалистичным и удобным. Создавая трехмерные объемные изображения, голографическая технология позволяет видеть собеседника с различных ракурсов, не прибегая ко всевозможным видам очков. Голограмма передает жесты и мимику абонента, делая общение более эмоциональным и понятным, нивелируя риск ошибочного восприятия информации, создавая иллюзию реального присутствия собеседника.

Следующая важная составляющая характеристики голографического типа коммуникаций, это обеспечение передачи данных и создание голограмм в режиме реального времени. Непосредственное – здесь и сейчас - общение с голограммой собеседника, вызывающее, именно в данный момент, отклик и эмоциональную реакцию, отличает голографическую коммуникацию от других типов коммуникации.

Такая особенность – коммуникация в режиме реального времени, подводит к логическому выводу о значимой особенности ГТК – возможности осуществления коммуникации только при передаче значительного объема данных [175].

Характерным для данного вида коммуникации является и обязательное наличие нескольких источников сбора (захвата) данных. Записывают информацию о субъекте или объекте, используя камеры (датчики), которые дают возможность создать 3D-реконструкцию, как основу для обработки голографических данных с последующими процедурами адаптации/реконструкции, кодирования, сжатия и др.

В качестве еще одной особенности голографической коммуникации (ГТК) выделим присущую ей иммерсивность. В отличие от традиционных двумерных (2D) изображений ГТК создает эффект присутствия (иммерсивность), делая коммуникационное взаимодействие реалистичным и естественным.

Наличие специальных требований к свойствам и характеристикам сетей связи, также выделяет этот вид коммуникации.

Следовательно, при использовании технологий НТС предполагается, что данные приложения требуют значительно большей пропускной способности, чем это необходимо для других видов услуг связи. С учетом того, что реализация цифровой телепортации, учитывая особенности передачи голографических копий, может предъявлять исключительно высокие требования к пропускной способности.

Высокая пропускная способность, ультра малые задержки, надежность соединения – необходимые условия для более активного внедрения новых услуг связи с использованием голографических технологий и, следовательно, расширение спектра исследовательских программ и проектов для изучения голографического типа коммуникаций (ГТК).

Авторы [26] обсуждают перспективы развития телекоммуникационных сетей, предполагая, что будущие технологии смогут обеспечивать сверхбыстрое и крайне надежное соединение с высокой пропускной способностью и минимальной задержкой.

1.3. Основные этапы развития голографических технологий

Актуальность исследования развития голографических технологий обусловлена переходом на новый этап внедрения современных инновационных технологий, который предполагает в перспективе активное использование голографии.

Прослеживается общая глобальная тенденция работы специалистов с трехмерными изображениями в различных областях деятельности человека. Голография, отображая объект в трех измерениях, является одним из наиболее перспективных направлений визуализации трехмерных объектов, что обосновывает появление определенного научного интереса к этой области исследований.

Отображая реальную действительность, голограмма проявляет уникальное свойство: голографическое изображение воспроизводит точную трехмерную

копию оригинального объекта, в отличие от фотографии, которая создает плоское изображение. Голографическое изображение с большим количеством ракурсов, изменяющихся с перемещением точки наблюдения, может быть настолько реалистичным, что часто неотличимо от реального объекта.

В условиях внедрения современных технологий голографический метод фиксации информации получил возможность раскрыть свой потенциал. Экспонентное увеличение количества научных публикация по результатам исследований теории голографии, ее практического применения говорит об интересе к теме, ее несомненной перспективности и актуальности.

В результате анализа опубликованных результатов научно-исследовательских работ, была разработана периодизация развития голографической технологии. Были предложены к рассмотрению следующие основные этапы.

Первым этапом, отправной точкой разворачивания исследований в области голографии, было открытие Деннисом Габором голографического метода записи информации, его изучение и подтверждение другими учеными на экспериментальном уровне.

Второй этап, объективно был связан с успехом в исследованиях, разрабатывающих инновационные источники света, дающих достаточную когерентность. Он может быть обозначен как этап развития оптической голографии. Оптическая голография, используя явление интерференции, записывает информацию о световом поле, его интенсивность, фазу световой волны. Вся информация о свете, падающем на носитель записи, сохраняется.

Ю.Н. Денисюк изобрёл способ записи изображения в трёхмерных средах, позволяющий сохранить информацию о фазе, амплитуде и спектральном составе волны, пришедшей от объекта. Он создал первую трёхмерную голограмму. Она может быть воспроизведена при освещении пучком обычного белого света.

Третий этап, во время которого голография получила новый стимул к развитию, начался с использования лазера. Голографический метод записи

информации приобретает большое практическое значение и способствует формированию перспективного направления – лазерной голографии.

Для следующего этапа было характерным развитие и оптической, и лазерной голографии. Анализ исследований показал, достаточно явно проявила себя тенденция увеличения количества работ связанных с разработкой различных методов создания голограмм. В зависимости от сферы их применения, активно стали появляться новые виды голографии - изобразительная голография, защитная голография, динамическая голография. Создание голограмм становится более доступным и, по аналогии с фотографическим делом, возникает и приобретает популярность любительская голография. Уникальным для этого периода можно назвать использование голографии как искусства и создание голографических образов в искусстве кинематографии.

Пятый этап развития голографии можем назвать – цифровым. С помощью компьютерных технологий проводится анализ, синтез и моделирование волновых полей. Цифровая голография значительно увеличивает производительность и практичность голографических методов.

Теоретические разработки в области цифровой голографии позволили создать уникальные по характеристикам приборы - голографический телевизор, цифровой голографический безлинзовый микроскоп, голографические очки, голографическую система управления беспилотными летательными аппаратами (дронами). Появляются голографические сетевые приложения, что является прямым развитием цифрового этапа. Голографический ассистент и голографическая коммуникация становятся наиболее популярными среди образов будущего для молодежи.

Одним из наиболее перспективных направлений является цифровая изобразительная голография. Достигается эффект присутствия в реальном времени, когда компьютерные программы синтезируют цветные объемные изображения объектов.

Проанализированные нами исследования, посвященные развитию голографических технологий, позволили обобщить изученный материал в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Хронология развития голографических технологий

Дата	Хронология событий связанных с развитием голографических технологий
1881	Альберт Михельсон изобретает интерферометр
1886	Французский физик Габриэль Липпман разработал теорию использования световых волн для передачи цвета в фотографии.
1891	Габриэль Липпман представил свою теорию «использования световых волн для передачи цвета в фотографии», а также некоторые простые примеры интерференционных цветных фотографий, в Академии наук.
1893	Габриэль Липпман представил в Академии цветные фотографии братьев Люмьер.
1894	Габриэль Липпманн опубликовал полную теорию. Габриэль Липпманн опубликовал свою теорию световых волн для передачи цвета в фотографии.
1908	Габриэль Липпман получил Нобелевскую премию по физике за «создание метода фотографического воспроизведения цветов на основе явления интерференции».[27]
1947	Денешем Габором во время работы в Британской исследовательской лаборатории имени Томсона-Хьюстона придумал название «голография» от греческого слова «holos» — «полный» и «graphie» — «пишу».
1948-1949	Деннис Габор публикует основополагающие статьи о реконструкции волнового фронта и рождении голографии, но лазер еще не доступен.
1958	Юрий Денисюк пробует воспользоваться новым методом голографии для записи трёхмерных изображений.

1960	<p>Советскими физиками - академиками Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым - и американским ученым Ч. Таунсом был изобретен первый лазер, который имел большое практическое значение для развития голографии</p> <p>Теодор Майман создает первый рубиновый лазер видимого света.</p>
1962	<p>Роберт Холл, работавший в лаборатории General Electric в Скенектади, изобрёл полупроводниковый инжекционный лазер, в последствии названный лазерным диодом.</p> <p>Денисюк создает новый способ записи изображения в трёхмерных средах, который позволяет сохранить информацию о фазе, амплитуде и спектральном составе волны, пришедшей от объекта.</p> <p>Эмметт Лейт и Юрис Упатниекс разрабатывают голографию внеосевого пропускания на основе радара бокового обзора.</p> <p>Денисюк создает первую голограмму, видимую в белом свете.</p>
1964	<p>Независимо от советского ученого, американские физики Эмметт Лейт и Юрис Упатниекс из Мичиганского Технологического Института записали первую объемную пропускающую голограмму, восстанавливаемую в лазерном свете.</p>
1965	<p>Опубликована первая статья по голографической интерферометрии Powell & Stetson.</p>
1966	<p>Лейт и Упатниекс, в сотрудничестве с исследователем Фрицем Горо, разработали первую голограмму, предназначенную для демонстрации способности носителя показывать объекты по разными углами, способную актуализировать все позитивные характеристики нового способа хранения информации.</p>
1967	<p>Ларри Зиберт из Conductron Corporation создает первую голограмму человека, используя импульсный лазер.</p> <p>Разработан процесс DCG для голографии.</p> <p>Издана Всемирная книжная энциклопедия, в которую вошла первая серийная трансмиссионная голограмма</p>

	<p>Б.Томпсоном была предложена новая схема для записи голограмм Фраунгофера, которая была очень похожа на схему Габора.</p> <p>Появляется динамическая голография, это направление, объединяющее голографию и нелинейную оптику становится перспективным.</p>
1968	<p>Первые высококачественные голограммы по методу, предложенному Ю. Н. Денисюком, были выполнены в СССР - Г.А. Соболевым и Д.А. Стаселько, а в США - Л. Зибертом.</p> <p>Стивен Бентон разработал голографию передачи белого света (радуги).</p> <p>Цифровая голография: А. Ломан предложил синтезировать голограммы с помощью численных методов.</p> <p>Создана первая компьютерная голограмма.</p> <p>Первую серию голограмм художника Брюса Наумана представили в Галерее Николоса Уайлдера в Лос-Анджелесе в 1968 году.</p>
1969	<p>Стивен Бентон из Polaroid Research Laboratories (США) изготовил пропускающую голограмму, которую можно видеть в обычном белом свете.</p>
1971	<p>Д. Габор получил Нобелевскую премию за «изобретение и развитие голографического метода» по физике, который он представил в 1947 году. [28, С.3]</p> <p>Открывается школа голографии в Сан-Франциско.</p>
1972	<p>Ллойд Кросс начал разрабатывать мультиплексную голограмму, которая должна состоять из десятков ракурсов.</p> <p>Подготовлена интегральная голограмма «Поцелуй», за авторством Ллойдом Кроссом.</p> <p>Привлекает внимание поляризационная голография. Ш.Д. Какичашвили доказывает возможность записи и воспроизведения состояния поляризации излучения путем регистрации голограмм в средах с фотоиндуцированной анизотропией.</p>

1974	Разработано тиснение голограмм.
1975	Начинают исследования в области спектральной голографии. Е.И. Штырков, В.В. Самарцев работают над обоснованием возможности голографической регистрации изменений параметров волнового поля во времени с использованием резонансных сред, сред с выжиганием провалов, а также методов спектрального разложения волновых полей.
1976	Советский учёный Виктор Комар разработал принципы голографического кинематографа, которые легли в основу создания широкоформатной кинематографической системы IMAX. Музей голографии открывается в Нью-Йорке. Метод получения радужных голограмм был предложен С.А.Бентоном. Теоретическое исследование объемных высокоэффективных голограмм сложных волновых полей: сформулирована модовая теория.
1977	Ллойд Кросс в результате исследований разработал мультиплексную голограмму, которая состоит из множества обычных фотографий объекта, сделанных с разных точек, лежащих в одной горизонтальной плоскости.
1980	При создании регистрирующих сред для объемной голографии большой вклад был внесен научными школами Государственного Оптического Института им. С.И.Вавилова. В 80-х годах XX века были выдвинуты принципы конструирования, на основе которых был создан целый ряд принципиально новых объемных высокоразрешающих светочувствительных материалов
1983	На кредитной карте MasterCard появляется первая голограмма.
1984	Ключевым событием в области коммерческой голографии стала публикация на обложке международного издания «National Geographic» радужной голограммы.

	Б.Я. Зельдович, В.В. Шкунов выдвигают спекл-модовую теорию и теорию спеклона.
1986	Абрахам Секе выдвигает идею создания источника когерентного излучения на поверхности материала с помощью рентгеновского излучения.
1988	Бартон разработал новый метод восстановления трёхмерного изображения, который основывается на использовании фурье-подобных интегралов. National Geographic публикует полную радужную голограмму мира. Фотополимерная пленка, разработанная Polaroid, позволяет осуществить массовое производство голограмм с очень ярким отражением.
1990	Проведено первое восстановление трёхмерного изображения атома.
1999	Geola патентует изобретенные принтеры для цветной цифровой печати голограмм с помощью импульсных лазеров.
2000	Первая цифровая цветная голограмма произведена Geola с помощью импульсного RGB-лазера.
2003	Медиа-лаборатория Массачусетского технологического института приступила к разработке электрооптической технологии, которая позволила графическому процессору в терминале пользователя создавать голографические видеоизображения в реальном времени с использованием недорогих экранов.
2005	В корпорации Optware and Maxell разработали голографический многоцелевой диск, который использует голографический слой для хранения данных до 3,9 ТБ. Первая цветная портретная голограмма, снятая в Geola с помощью оборудования HoloCam и напечатанная на цифровом RGB-принтере.
2008	Разработаны Цифровые голограммы компанией Geola, которые были названы i-Lumograms - Integrated Light Writings

2013	Philips объединился с RealView для разработки голографических изображений для кардиохирургии. Решение позволяет создавать трехмерное изображение «в воздухе» с помощью ангиографа и ультразвуковой кардиосистемы.
2015	Исследователи из Университета ИТМО разработали первый способ печати голограмм с помощью струйного принтера
2016	Голографический телевизор был запатентован компанией Samsung
2018	Немецкие исследователи создали голографический просвечивающий электронный микроскоп. Совместили голографические разработки с просвечивающим электронным микроскопом.
2015	Впервые представлены голографические очки HoloLens от компании Microsoft [29]
2017	Verizon (США) и Korea Telecom (Южная Корея) <u>совершили</u> первый международный голографический звонок с помощью технологии 5G. [30]
2018	В Москве проведена голографическая коммуникация (голографический звонок), Билайн и Huawei продемонстрировали возможности мобильной связи поколения 5G [31]
2019	27 мая 2019 года компания <u>Accenture</u> объявила о создании голографического виртуального ассистента мастерской инноваций Liquid Studio Accenture [32] МТС провела первый в мире двусторонний междугородный голографический звонок на 5G [33])
2020	Прошла презентация голографическая система управления беспилотными летательными аппаратами (дронами). [34]
2021	Впервые в России представили коллекцию одежды в формате AR-голограмм 30 апреля 2021 г. [35]

2022	<p>Студенты из Института космических исследований Университета Западного Онтарио (Western Space) осуществили первую международную голографическую телепортацию, или голопортацию, «отправившись» из Онтарио в Алабаму.</p> <p>[36]</p>
-------------	--

Рассматривая траекторию развития средств связи в соответствии с повышением технологического уровня системы коммуникации, можно представить графически от стационарного телефона до голографического типа коммуникаций через этап использования мобильных средств связи и последовательно через этап видеоконференции. На рисунке 1.1 представлено схематично развитие системы коммуникации.

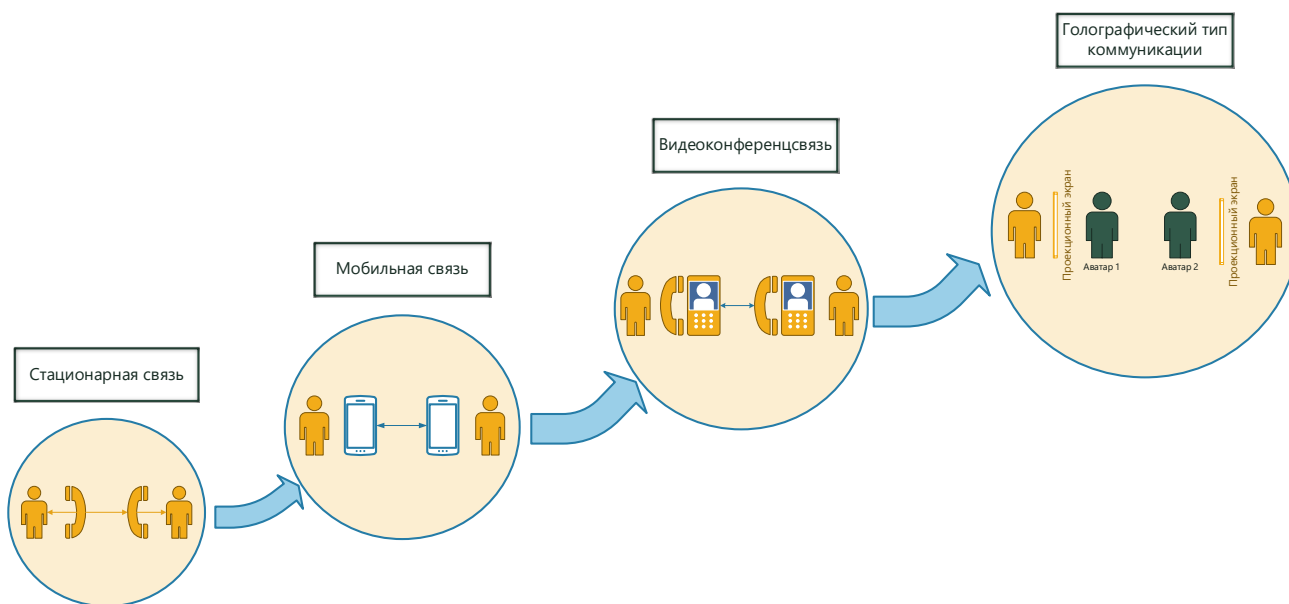


Рисунок 1.1 - Развитие системы коммуникации

В результате проведенного исследования можно сделать следующий вывод. Голографический метод записи информации, лежащий в основе голографических технологий и голографических коммуникаций, только начинает раскрывать свой потенциал. Многие сферы человеческой деятельности будут кардинально изменены, получены инновационные продукты, возникнут новые уникальные

области деятельности, способы применения голографии, если стратегическим направлением станет реализация принципа общедоступности этого метода записи информации.

1.4. Внедрение голографического типа коммуникаций: проблематика научных исследований передачи голографических копий в сетях связи

Решение задачи сбалансированного развития всего спектра инновационных технологий, необходимых для передачи данных в сетях связи, создает противоречие между растущим потенциалом использования голографического типа коммуникации и недостаточно изученными проблемами передачи голографического контента в сетях связи. Данное противоречие создает потребность в проведении серии исследований по проблемам записи данных, обработке/адаптации/реконструкции, кодирования, сжатия, передачи, синхронизации, воспроизведения. А также решения задач: применения, внедрения, повышения качества воспроизведения.

Изучая направления исследований по развитию голографического типа коммуникации, остановимся на вопросе изучения захвата (сбора) информации, из которой, впоследствии будет сформирован голографический контент, необходимый для передачи. Видеокамеры с эффектом глубины, фиксирующие информацию, как камеры (датчики), находятся на уровне активного внедрения и становятся стандартом.

Итак, на первом этапе подготовки к передаче иммерсивного видео одна или несколько камер (датчиков) должны запечатлеть требуемые объекты или субъекты. Датчики, используемые для 3D-реконструкции, существенно влияют как на качество результатов, так и на выбор алгоритмов реконструкции. Количество доступных датчиков постоянно увеличивается. Данное направление непрерывно эволюционирует: методы сбора данных, использующих датчики RGB и RGB-D, сложные процедуры обработки голографических данных, включающих 3D-реконструкцию объектов.

Предоставляя пользователю услугу голографической связи, все запечатляемые объекты требуют трехмерной реконструкции. Объекты можно захватывать либо с помощью решений на основе изображений, либо с использованием объемного видео. Решения на основе изображений предполагают съемку под различными углами и наклонами, создавая множество изображений либо последовательно (например, с использованием одной камеры для статических сцен), либо одновременно (например, с использованием нескольких камер для динамических сцен). Такие решения основаны на принципах, при которых видео хранится на сервере в виде последовательности изображений. В отличие от них, существуют принципы, которые требуют набора точек в пространстве, содержащих информацию о координатах и особенностях поверхности объекта. Зная положение каждой точки, объект можно визуализировать с любого ракурса и угла зрения.

Исследования по разработке инновационных технологий записи голографической копии продолжаются в лабораториях различных стран и представлены в таблице 1.3.

После того, как была проведена запись голографической копии одной или несколькими специальными камерами, она должна быть подвержена обработке перед тем, как проводить сжатие. При использовании нескольких камер (например, в установке для съемки объемного видео), полученные потоки необходимо объединить, чтобы предоставить потребителю единое, унифицированное представление контента.

Для снижения вычислительной нагрузки на стороне сервера и ограничению общих требований к необходимому объему памяти сервера, предпочтительным является прямое использование облака точек.

Существует два варианта реализации сжатия и передачи облака точек: путем обработки необработанных 3D-данных, упорядочивая их неоднородную и разреженную структуру; или преобразовывая и сохраняя облака точек в формат глубины. В этом случае данные могут быть сжаты и переданы по сети способом, весьма похожим на то, что делается для обычных 2D-изображений [26, 37].

Проблема сжатия данных для голографической связи, использующей метод набор точек, заключается в том, что набор данных облака точек [38] содержит объекты (движущиеся люди, предметы и т.д.), которым требуется в среднем значительных объемов данных высокую пропускную способность. Это связано с тем, что каждая точка данных (около миллиона на кадр) содержит информацию о координатах (x, y, z) и особенностях поверхности (например, цвет в формате RGB, шероховатость и т.д.). Для эффективной передачи такого контента необходимы усовершенствованные методы сжатия, способные работать в условиях ограниченной пропускной способности.

Авторы [39] исследуют влияние метода сжатия облака точек на качество восприятия контента. Эксперты просматривают во время теста 3D-реконструкции и оценивают уровень качества воспринимаемого материала. Подводя итог, исследователи отметили, что объективные и субъективные метрики значительно коррелируют, при адаптивной потоковой передаче облака точек.

Методы сжатия предназначены не только для уменьшения объема данных, требуемых для реконструкции объекта, они необходимы и для обеспечения свободного доступа к этим данным. В стандартных видеоформатах предусмотрена возможность декодировать видеопоследовательность определенных моментов времени при прямой трансляции. Для НТС, также необходимо техническое решение проблемы пространственной сегментации.

Предоставить конечному пользователю возможность чувствовать эффект присутствия в иммерсивной среде, можно поддерживая качество его восприятия (QoE) на максимальном уровне. Вместе с тем, отсутствие синхронизации между различными сегментами данных может серьезно повлиять на восприятие и иммерсивность. Следовательно, важно разработать методы, которые обеспечат не только эффективное сжатие, но и синхронизированное и своевременное предоставление данных, поддерживая высокий уровень QoE и QoS для иммерсивного контента.

Предполагается, что системы голографического телеприсутствия должны обладать преференцией декодировать только те части контента, которые

актуальны для конечного пользователя. Таким образом, требования к полосе пропускания значительно снижаются, поскольку конечному пользователю передается только область требуемая область точек, например, объект. Однако, необходимо найти компромисс между эффективностью сжатия и уровнем качества.

Методы сжатия, ориентированные на улучшение качества голопортации, как научная проблема, постоянно находятся в поле зрения исследователей, однако, основная задача - найти баланс между временем обработки данных и процент сжатия, еще требует изучения. Затраты времени на обработку и сжатие должны быть как можно меньше, особенно при коммуникации в реальном времени, чтобы ограничить сквозную задержку. А при этом процент сжатия должен быть как можно выше, чтобы уменьшить нагрузку на сеть.

Передача данных.

Одной из важнейших в научной проблематике внедрения голографического типа коммуникация является проблема передачи голографических копий конечному пользователю с высоким качеством воспроизведения.

Повсеместное внедрение голографических копий будет зависеть от того, как сети связи смогут поддерживать высококачественную интерактивную передачи видеоголограмм в реальном времени.[23]

Авторы отмечают, что хотя в технологиях 3G и 4G пиковые скорости передачи данных составляют 21 Мбит/с и 100 Мбит/с, на практике, часто регистрируются меньшие значения [40,41]. На данном этапе, технология 5G обеспечивает теоретический максимум 20 Гбит/с [42]. Данного значения скорости передачи достаточно для обеспечения высококачественного всенаправленного видео, но его может быть недостаточно для обеспечения голографического типа коммуникации. Потенциально, технология 6G с обеспечением пиковой скорости передачи данных до 1 Тбит/с [43] создаст условия для широкого использования иммерсивных видеосервисов и активного внедрения голографических технологий.

Исследователи [44] приходят к выводу, что инфраструктура должна поддерживать эластичную реконфигурацию и быть адаптивной к различным сценариям применения.

Следующим направлением для изучения является поиск решения проблемы передачи значительных и все возрастающих объемов данных.

Ожидается, что связь голографического типа (НТС) будет доставлять 3D-изображения в цифровом виде из одного или нескольких источников в один или несколько узлов назначения в интерактивном режиме, поэтому мы можем предвидеть, что полностью иммерсивное 3D-изображение создаст большие проблемы для будущих сетей [8].

В таблице 1.3 приведена проблематика научных исследований развития голографического типа коммуникаций.

Таблица 1.3 - Проблематика научных исследований развития голографического типа коммуникаций

Проблематика	Аспекты изучения	Ссылка
Запись данных (системы захвата)	захват динамических сцен (3D-моделей) в реальном времени с использованием нескольких камер	[45-58]
	специфические системы записи в реальном времени фиксируя окружение	[59-62]
	особенности и технические характеристики камер глубины	[63, 64].
	современные системы захвата (TELEPORT)	[59, 62, 65-68]
Методы сжатия	Метод сжатия с использованием облаков точек,	[39, 69-74]
	метод сжатия,	[75-78]

	основанный на сегментации	
	Методы сжатия с потерями и без потерь данных	[79-81]
	метод раскрашивания для изображений глубины	[82]
	Новый подход, использующий общую структурную информацию в данных RGB-D для уменьшения кросс-модальной избыточности в карте глубины.	[83]
	Инновационный метод сжатия, основанный на использовании концепции объема интереса (VOI).	[84,86]
методы обработки	методы генерации/создания голограмм	[87-89]
	методы обработки голографических данных, включая трехмерную (3D) реконструкцию объектов	[50,90-95]
	Метод для телеприсутствия в смешанной реальности (MR)	[96]
	Синхронизация потоков, поступающих от нескольких датчиков	[97,98].
	Синхронизация в многопользовательских приложениях смешанной реальности (MR) и виртуальной реальности (VR).	[74, 99]
Передача	Проблемы передачи	[100-103]
	новая платформа телепортации на основе голографической связи (НТС)	[104]
	достижения и проблемы внедрения голографической коммуникации через сети 5G	[105]

	технические сетевые проблемы для обеспечения HolographicType Communication (НТС).	[106-110]
	новый протокол - SLAM-CAST	[111]
Воспроизведе ние	Различные виды дисплеев:	[112]
	Стереоскопический дисплей	[65,66,113]
	автостерео	[114,115]
	цилиндрического	[116],
	объемного	[117],
	светового поля	[118]
Внедрение	Проблемы внедрения НТС	[103]
	Симметричная система 3D-телеприсутствия	[66]
	внедрение в различных приложениях, таких как развлечения и игры, архитектура и строительство, здравоохранение, образование и обучение, туризм и наследие, промышленное строительство и т. д.	[119-121]
	Потенциальное использование ИИ и интеллекта периферии в НТС было изучено в	[101].

Актуализирует научную проблематику данного направления и выводы, которые обозначены в Стратегии развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года [6], там в частности отмечается, что увеличение объемов трафика в сегментах домохозяйств и пользователей мобильного широкополосного доступа к сети "Интернет" в дальнейшем будет связано с растущим потреблением мультимедийного контента высокого качества, включая онлайн-игры, приложения дополненной реальности и виртуальной реальности, иммерсивные (с эффектом присутствия) сервисы для массового потребителя, потоковое видео в разрешении сверхвысокой четкости, а также с увеличением количества подключенных устройств.

1.5. Оборудование для голографической коммуникации: анализ и технические характеристики

Исследуя голографический тип коммуникации, необходимо комплексно рассмотреть и такие вопросы, как оборудование для записи голографической информации и для ее воспроизведения. Отметим, что новое оборудование для голографических технологий с инновационными техническими характеристиками, постоянно появляется на рынке, что способствует активизации работы над внедрением новых услуг связи для абонентов.

Передача информации в современном коммуникационном пространстве традиционно рассматривается в ракурсе решения проблемы ее фиксации и последующего воспроизведения. Инновационные голографические технологии обеспечивают переход на новый этап в развитии высокотехнологичных способов записи и воспроизведения информации.

Их основные принципы идентичны классической голографии - весь процесс по-прежнему разделен на две фазы: фаза записи и фаза восстановления. Изучению проблемы записи информации, создания голографических изображений максимально соответствующим реальным объектам, посвящены многочисленные исследования. Отметим, что активизируются исследования собственно технологий записи, а также 3D видеокамер и другого оборудования.

Записывающее оборудование, используемое для оцифровки трехмерных объектов, формирует цвет путем трех световых лучей (Red, Green, Blue) разной интенсивности. Современные устройства RGB-D (Red-Green-Blue-Depth) присваивают каждому пикселю одновременно два значения: цвет и глубина, вследствие чего производится цифровизация реальных трехмерных объектов и различных сред [122].

Для воспроизведения таких 3D-изображений, на данном этапе развития голографических технологий, разработано оборудование, создающее реальную

трехмерную визуализацию объектов, не требующее специальных очков или специального позиционирования в пространстве пользователя.

Оцифрованные голограммы, по сути, состоят из больших массивов изображений, каждое из которых содержит тесно взаимосвязанные движущиеся изображения [106].

Основными компонентами систем телеконференций являются сбор, передача и отображение.

Одним из показателей растущего потенциала использования голографических технологий можно назвать активную работу исследователей в направлении разработки нового оборудования, записывающего и воспроизводящего.

1.5.1 Технические характеристики записывающих устройств

В первую очередь необходимо определить, какие виды сбора данных существуют, их способы и особенности.

Для обеспечения голографической коммуникации требуется, чтобы все объекты в сцене были представлены в трехмерной форме. Для этого применяются два основных типа технологий захвата контента: методы на основе объемного видео и методы, основанные на определенной последовательности изображений.

Объемное видео позволяет представлять объекты через набор точек в пространстве, каждая из которых содержит информацию о геометрии (координаты x , y , z) и текстуре (например, цветовые значения YUV или RGB). Это приводит к созданию так называемого облака точек — группы точек, которые вместе формируют трехмерное изображение объекта. Благодаря тому, что положение каждой точки известно, объект можно визуализировать с любой точки и под любым углом, обеспечивая реалистичность восприятия.

Технология облаков точек может быть расширена до использования сеток — набора треугольников, соединенных для формирования трехмерного представления объекта. Вершины этих треугольников содержат координаты,

которые используются для визуализации (рендеринга) объекта в зависимости от положения и угла обзора пользователя. Хотя сетки не так эффективны для создания мозаики и обработки пустот, как облака точек, они более оптимизированы для работы с графическими конвейерами. Использование сеток позволяет применять технологии, такие как MIP-карты (мультимасштабные текстуры) и анизотропную фильтрацию, что приводит к улучшению визуального качества, особенно при высоких битрейтах.

MIP-карты — это текстурные карты, созданные для оптимизации производительности графического рендеринга, особенно при масштабировании текстур на объектах. Анизотропная фильтрация, в свою очередь, повышает качество отображения текстур при наклонах и удалении объектов от зрителя. Эти технологии делают сетки адекватным выбором для графически интенсивных приложений, где важна высокая четкость и детализация изображения, несмотря на их меньшую гибкость по сравнению с облаками точек.

Как правило, для измерения расстояния до объекта используются два основных метода: триангуляция и времяпролетное измерение, также известное как ToF (Time-of-Flight).

Триангуляция может применяться в двух вариантах: пассивном и активном. В пассивном варианте, называемом стереозрением, метод основывается на анализе двух изображений, снятых с разных точек. Сравнивая эти изображения, система вычисляет различия между ними, что позволяет определить глубину сцены. Стереозрение работает по принципу человеческого зрения, где наши глаза играют роль двух камер, создающих немного разные изображения, которые мозг объединяет в одну трехмерную картину.

Активные системы, такие как структурированный свет, используют другой подход. Здесь на объект проецируется определенный узор, обычно инфракрасный, и система анализирует искажения этого узора, вызванные разными расстояниями до различных частей объекта. Это позволяет точно определить форму и положение объекта в пространстве. Структурированный свет отличается от

стереозрения тем, что требует активного источника света, тогда как стереозрение полагается на естественное освещение.

LIDAR (Light Detection and Ranging) и камеры ToF работают на основе измерения времени, которое требуется световому импульсу для достижения объекта и возвращения обратно. LIDAR — это метод, использующий лазерные лучи для сканирования сцены и создания трехмерных карт, основанных на времени, за которое свет отражается от поверхности объектов и возвращается к датчику. LIDAR-системы обычно включают механические компоненты, такие как вращающиеся зеркала, чтобы охватить всю сцену.

Камеры ToF реализуют времяпролетный метод измерения, используя современные технологии производства интегральных схем, такие как CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) и CCD (Charge-Coupled Device). Эти камеры измеряют время, за которое свет достигает объекта и возвращается, и используют эту информацию для создания карты глубины сцены. Преимущество ToF-камер заключается в их способности быстро и точно определять расстояние до объектов, что делает их незаменимыми в приложениях, требующих высокой точности и скорости, таких как распознавание жестов и автономные транспортные средства.

Для реализации этого типа коммуникаций в первую очередь требуется сканирование объекта с последующей передачей его по сети. Как отмечается [10], "сканирование 3D-объекта для создания голограммы осуществляется несколькими способами: традиционный (аналоговый), в котором используется лазер; цифровой, для создания голограмм в котором применяется различное программное обеспечение для 3D-моделирования, например, Blender, 3Ds Max и CINEMA 4D; цифровой, для создания голограмм в котором используются 3D-сканеры, базирующиеся на различных технологиях: Structured Light, Time of Flight, Depth from Stereo, Light Field, Lidar."

На рисунке 1.2 отображена глубинная камера Intel® RealSense™ D457.



Рисунок 1.2 - Глубинная камера Intel® RealSense™ D457

Камера Intel® RealSense™ D457 представляет собой устройство, разработанное для высокопроизводительных приложений с использованием технологий стереоскопического захвата. Стереокамера оснащена интерфейсом GMSL/FAKRA, который обеспечивает высокую пропускную способность передачи данных.

Основные характеристики Intel® RealSense™ D457:

1. Технология стереоскопического захвата: Камера использует стереоскопическую технологию для измерения глубины, что позволяет ей точно определять расстояние до объектов в диапазоне от 52 см до 6 м с точностью менее 2% на расстоянии 4 м.

2. Встроенный сериализатор Max10: В камере интегрирован чип сериализатора Max10, который необходим для передачи данных через интерфейс GMSL/FAKRA.

3. Производительность и разрешение:

- Глубина: Камера поддерживает разрешение потока глубины до 1280×720 пикселей с частотой до 90 кадров в секунду, обеспечивая плавное и детализированное воспроизведение глубинных данных.

- RGB-сенсор: Камера оснащена 1-мегапиксельным RGB-сенсором с глобальным затвором, который обеспечивает разрешение 1280×800 пикселей и частоту 30 кадров в секунду. Поле обзора RGB-сенсора составляет $90^\circ \times 65^\circ$.

4. Физические параметры:

- Размеры: Камера имеет следующие размеры: 124 мм × 29 мм × 36 мм, что способствует упрощенной интеграции в различные системы.

D457 предназначена для использования в самых разных условиях и сценариях, от промышленных приложений до систем автономного вождения и робототехники, где требуется высокая точность и надежность измерений глубины и передачи данных.

На рисунке 1.3 отображена глубинная камера Intel® RealSense™ D415



Рисунок 1.3 - Глубинная камера Intel® RealSense™ D415

Камеры серии Intel® RealSense™ D400 представляют собой устройства для измерения глубины, использующие стереоскопическое зрение для создания точных 3D-карт сцены. В частности, камера D415, работающая через интерфейс USB, оснащена парой сенсоров для захвата глубины, RGB-датчиком и инфракрасным проектором. Эти компоненты делают D415 идеальным инструментом для разработчиков и производителей, стремящихся интегрировать восприятие глубины в свои прототипы.

Ключевые особенности Intel® RealSense™ D415:

1. Визуальный процессор:

- Процессор камеры основан на 28-нанометровом технологическом процессе и поддерживает до пяти 2-полосных интерфейсов MIPI, что позволяет обрабатывать изображения глубины в реальном времени и ускорять вывод данных.

2. Усовершенствованный алгоритм стереоскопического видения:

- Новый стереоалгоритм глубины обеспечивает высокую точность измерений на больших расстояниях, что особенно важно для сложных сценариев.

3. Высокое разрешение и точность:

- Камера способна фиксировать несоответствия между изображениями с разрешением до 1280×720 пикселей, обеспечивая точное и детализированное восприятие глубины. Это достигается благодаря набору сенсоров изображения, которые работают синхронно для обеспечения точных данных.

4. Инфракрасный проектор:

- Для улучшения данных о глубине камера оснащена инфракрасным проектором, который подсвечивает объекты, что особенно полезно при работе в условиях низкой освещенности или на текстурированных поверхностях.

5. Поддержка кроссплатформенного SDK:

- Камера поддерживает Intel® RealSense™ SDK 2.0 с открытым исходным кодом, что упрощает разработку и интеграцию в различные системы и устройства.

6. Высокое разрешение и узкое поле обзора:

- D415 разработана с подвижным затвором и узким полем обзора ($64^\circ \times 41^\circ \times 77^\circ \pm 3^\circ$), что позволяет достичь высокого разрешения по глубине, особенно когда требуется измерение небольших объектов с высокой точностью.

Технические характеристики:

- Диапазон глубины: камера эффективно работает в диапазоне от 45 см до 3 метров, с точностью определения глубины менее 2% на расстоянии 2 метров.

- Частота кадров: поддерживает до 90 кадров в секунду для глубинных данных и до 30 кадров в секунду для RGB-потока с разрешением 1920×1080 .

- Поле обзора: поле обзора глубины составляет $65^{\circ} \times 40^{\circ}$, что обеспечивает широкое покрытие сцены.

- Форм-фактор и подключение: Компактные размеры (99 мм × 20 мм × 23 мм) и разъем USB-C 3.1 Gen 1 делают камеру удобной для интеграции в различные устройства. Механизм крепления включает одну точку с резьбой $\frac{1}{4}$ 20 UNC и две точки с резьбой M3, что позволяет легко закрепить камеру на штативе или другом оборудовании.

На рисунке 1.4 отображена камера Kinect v1 (Kinect для Xbox 360)



Рисунок 1.4 - Kinect v1 (Kinect для Xbox 360)

Kinect v1, разработанный Microsoft в 2009 году. Камера является устройством для захвата движений и 3D-сканирования. Выпуск Kinect Software Development Kit (SDK) в 2011 году позволил использовать камеру в исследовательских и научных проектах.

Основные компоненты Kinect v1:

1. VGA-камера:

- RGB-камера с разрешением 640×480 пикселей и частотой 30 кадров в секунду. Она используется для распознавания лиц, съемки видео и обработки мимики.

2. Лазерный проектор:

- Излучает инфракрасный (ИК) свет, создавая сетку точек для измерения глубины. Этот метод известен как структурированный свет (Structured Light, SL).

3. Инфракрасная камера (CMOS-сенсор):

- Фиксирует отраженный ИК-свет, позволяя устройству определять расстояние до объектов и создавать 3D-карту глубины.

4. Микрофоны:

- Обеспечивают локализацию звука и подавление шума, работая на частоте дискретизации 16 кГц.

5. Сервопривод:

- Автоматически наклоняет устройство в вертикальной плоскости для оптимального захвата.

Принцип работы сенсора глубины:

Сенсор глубины Kinect v1 использует структурированный свет, проецируя инфракрасную сетку на объекты. ИК-камера захватывает искажения этой сетки, вызванные рельефом поверхности, и на основе этих данных строит 3D-изображение. Захваченные данные обрабатываются микросхемой PrimeSense, которая сравнивает полученные координаты с эталонными, определяя точное расстояние до каждого объекта в сцене.

Процессор преобразует собранные данные в карту глубины с VGA-разрешением. Эта карта представляет собой изображение, где каждый пиксель кодирует расстояние до объекта в градациях серого от белого (ближе) до черного (дальше). Таким образом, сенсор Kinect v1 фактически создает облако точек, которое можно использовать для построения трехмерной модели.

На рисунке 1.5 отображена камера Kinect v2



Рисунок 1.5 - Kinect v2

Kinect v2, представленный в 2014 году, значительно улучшил характеристики по сравнению с первой версией устройства. Основное отличие Kinect v2 заключается в использовании технологии измерения времени полета (Time of Flight – ToF) вместо технологии структурированного света, примененной в Kinect v1. Это обновление сделало Kinect v2 более эффективным в условиях яркого освещения, включая солнечный свет, что позволило использовать устройство на открытом воздухе.

Основные особенности Kinect v2:

1. Технология ToF: Kinect v2 использует технологию измерения времени полета для определения глубины. Эта технология основана на непрерывной модуляции инфракрасного сигнала и измерении фазы отраженной волны, что позволяет достигать высокой точности в измерении глубины.

2. Процесс измерения глубины:

- Инфракрасный излучатель проецирует модулированную инфракрасную волну.

- Волна отражается от объектов и возвращается к сенсору.

- Фазовый сдвиг отраженной волны измеряется для вычисления расстояния до объекта.

3. Разрешение и дальность: Kinect v2 обеспечивает карту глубины с разрешением 512×424 пикселей в диапазоне от 50 до 450 см и цветное изображение (RGB) в разрешении 1080p (1920 x 1080 пикселей).

4. Устойчивость к внешнему освещению: Инфракрасное изображение Kinect v2 менее чувствительно к окружающему свету по сравнению с Kinect v1, что обеспечивает лучшее качество данных в различных условиях освещения.

В таблице 1.4 обобщены технические характеристики записывающего оборудования.

Таблица 1.4 - Сравнительный анализ технических характеристик записывающего оборудования

Камера сенсор / Характеристики	Глубинная камера Intel® RealSense™ D415	Глубинная камера Intel® RealSense™ D457	Microsoft Kinect v1	Microsoft Kinect v2
Среда использования	В помещении/На открытом воздухе	Внутри/Снаружи помещений	В помещении	В помещении
Технология глубины	Стереоскопическая	Стереоскопическая	Структурированный свет, SL	Время пролета, ToF
Минимальное расстояние по глубине (Min-Z) при максимальном разрешении	~45 см	~52 см	40 см в режиме ближнего действия	50 см
Точность определения глубины	<2% на расстоянии 2 м	<2% на расстоянии 4 м	0,8-4	0,5-4,5
Поле обзора по глубине (FOV)	65° × 40°	87° × 58°	62° - горизонталь, 48,6° - вертикаль	84,1° - горизонталь, 53,8° - вертикаль
Разрешение выходного потока глубины	До 1280 × 720	До 1280 × 720	320x240 30	512x424 30

Частота кадров выходного потока глубины	До 90 кадров в секунду	До 90 кадров в секунду	До 90 кадров в секунду	До 90 кадров в секунду
Разрешение кадра RGB	1920 × 1080	1280 × 800	640x480 30	1920x1080 30
Частота кадров RGB	30 кадров в секунду	30 кадров в секунду	30 кадров в секунду	30 кадров в секунду
Датчик RGB FOV	69° × 42°	90° × 65°	57° × 43°	70° × 60°
Размеры камеры (Длина × Глубина × Высота)	99 мм × 20 мм × 23 мм	124 мм × 29 мм × 36 мм	305x76,2x63,5	249x66x67

1.5.2. Воспроизводящее оборудование для голографического типа коммуникации

Воспроизведение зафиксированной голографической информации, непосредственно связанное с первой фазой, фазой записи, также находится в интенсивной разработке [123].

Рассмотрим вторую фазу процесса голографической технологии - фазу восстановления. Для восстановления - воспроизведения видеоизображения используют различное оборудование. В рамках исследования, посвященного проблеме передачи трафика голографических копий, в процессе разработки

модели для натурального эксперимента, была поставлена задача изучения технических характеристик и выбора необходимого оборудования. Для данного исследования представляют интерес голографические вентиляторы и голографические проекторы [178].

Голографическим вентилятором устройство называют в связи с тем, что для воспроизведения трехмерного изображения, светодиоды размещены по центральной линии каждой лопасти вентилятора. Лопасти вентилятора вращаются с высокой скоростью, светодиоды синхронизируются с частотой вращения. Эффект вращения не воспринимается глазами человека и голографическое изображение появляется в воздухе.

Работа лазерного проектора основана на синтезе видимого телевизионного изображения путем модуляции и развертки лазерных лучей трех основных цветов (R, G, B) [124].

Принцип действия голографического проектора - следующий. Для создания 3D-голограммы необходима одна опорная световая волна и вторая, объектная, которая направляется на объект. Из многочисленных исследований воссоздания голографических изображений, приведем, в качестве цитаты, слова Ю.Ю. Чопоровой, которая так описывает процесс воспроизведения голограммы. «Чтобы восстановить изображение объекта, голограмму надо осветить опорной волной, тогда в результате дифракции на голограмме произойдет повторение волнового фронта объектной волны и будет наблюдаться изображение объекта» [125].

В качестве волн используются специальные лазеры, при их пересечении происходит интерференция, вызывающая трехмерную картинку.

Появление мощных полупроводниковых лазеров и технологий DLP (Digital Light Processing) с микрозеркальными модуляторами света позволило разработать новый тип лазерных DLP-проекторов. В таких проекторах в качестве источника света используются полупроводниковые лазеры красного (615,25нм), зеленого (532,5нм) и синего (465нм) цветов [124].

Технология голографической проекции ломает традиционную форму записи и представления изображений, сочетая 3D-технологии и голографические

технологии, позволяет не только записывать и воспроизводить трехмерные изображения с более высокой точностью, но также может осуществлять коррекцию с помощью технологии цифровой голографической микроскопии и реконструкции трехмерного изображения, микроскопического наблюдения объектов и воспроизведения недостающих изображений [126].

Рассмотрим технические характеристики следующих воспроизводящих устройств: голографический лазерный проектор LG CineBeam HF85LSR, голографический вентилятор N20 и голографический вентилятор DseeLab-65H.

1.5.2.1 Голографические проекторы

Рассмотрим следующие воспроизводящие устройства: голографические лазерные проекторы LG CineBeam HF85LSR, Samsung 120" 4K The Premiere LSP7T, Samsung 130" 4K The Premiere LSP9T.

Голографический проектор LG CineBeam HF85LSR с поддержкой 3D демонстрирует яркое изображение – голограмму при любом уровне освещения в помещении.

Принцип действия устройства – следующий. Для создания 3D-голограммы необходима одна опорная световая волна и вторая, объектная, которая направляется на объект. Из многочисленных исследований воссоздания голографических изображений, приведем цитату Ю.Ю. Чопоровой, которая так описывает процесс воспроизведения голограммы. «Чтобы восстановить изображение объекта, голограмму надо осветить опорной волной, тогда в результате дифракции на голограмме произойдет повторение волнового фронта объектной волны и будет наблюдаться изображение объекта» [127]. В качестве волн используются специальные лазеры, при их пересечении происходит интерференция, вызывающая трехмерную картинку.

В проекторе LG CineBeam HF85LSR, в качестве источника света, используется лазерный диод – яркость 1500 люмен (lm), который обеспечивает эффективное функционирование на период не менее 20 тысяч часов. Энергопотребление в режиме работы 140 Вт.

Ультракороткофокусный объектив устройства, при установке его на расстоянии в 8 см от стены, позволяет проецировать изображение с диагональю в 90 дюймов. Соотношение сторон изображения: 16:9 / Original / 4:3 / Vertical Zoom / All-Direction Zoom.

Инновационность данного прибора можно рассматривать и в использовании технологии Motion Estimation/Motion Compensation (MEMC). Технология динамической компенсации качества изображения (MEMC) позволяет сделать смену изображений без рывков и максимально плавной, поддерживая необходимую четкость их отдельных частей. В модели решена проблема трапецеидальных искажений - они корректируются автоматически, и по горизонтали, и по вертикали.

В проекторе есть два HDMI-входа (один с ARC-каналом), LAN-интерфейс и два выхода: 3,5 мм аналоговый для наушников и оптический. Кроме того, встроены два динамика с 3-ваттным усилителем, которые работают в стереорежиме. Устройство использует алгоритм обработки голоса (Clear Voice III). Поддерживаются, также, кодеки Dolby Surround Audio, DTS-HD.

Управление устройством осуществляется через Wi-Fi соединения. Можно вывести любой формат контента: видео, анимацию, gif-изображения, статичную объемную картинку. Специальная программа позволяет создать плей-лист. Дистанционная загрузка контента возможна через интернет. Функция Screen Share обеспечивает беспроводную передачу AV-контента.

Прибор компактный с габаритами – 353 мм x 118 мм x 189 мм и весом 3 кг.

Голографический лазерный проектор Samsung 120" 4K The Premiere LSP7T имеет разрешение 3840 x 2160, пиковую яркость 2200 л при мощности 320 Вт. Тип источника света - лазер, с ресурсом около 20 000 часов. В нормальном режиме контрастность 1000:1, а динамическая контрастность составляет 2 000 000:1. При этом усиление контрастности возможно – адаптирована технология Contrast Enhancer. Возможно, также, повышение четкости передачи динамичных сцен - технология Auto Motion Plus.

Звук – адаптивный. Два звуковых канала. Мощность акустической системы - 30 Вт. Для улучшения диалога используется технология Dialog Enhancement, а для прослушивания звука в других помещениях - технологии Multiroom Link. Работает поддержка передачи звука через Bluetooth.

Размеры экрана 90~120' . Уровень рабочего шума не более 32 дБ(А).

Устройство достаточно компактное. Размеры: ширина – 532мм, глубина 132.7 мм, высота - 342 мм позволяют перемещать его без проблем.

Голографический проектор Samsung 130" 4K The Premiere LSP9T

В данном лазерном проекторе в качестве источника света применяется три лазера. Пиковая яркость – до 2800 люмен в системе ANSI. Мощность - 410 Вт. Контрастность в устройстве повышена до 1500:1 - в нормальном режиме и динамическая 2 000 000:1. В данной модели возможно усиление контрастности с использованием технологии Contrast Enhancer и повышение четкости передачи динамичных сцен на базе технологии Auto Motion Plus. Подключены режимы "Кино" и режиссера Filmmaker Mode (FMM). Адаптивный звук. Четыре звуковых канала. Повышена мощность акустической системы до 40 Вт. В модели используется динамик типа Hole Array Speake, а для выполнения функции улучшения диалога - технология Dialog Enhancement. Лазерный проектор Samsung 130" 4K The Premiere LSP9T имеет встроенную поддержку беспроводной сети (WiFi5), поддержку быстрого переключения HDMI Quick Switch, Bluetooth (BT4.2), используется технология Anynet+ (HDMI-CEC).

Источник питания 100-240 В 50/60 Гц. При этом, максимальное энергопотребление -410 Вт, в режиме ожидания -0.5 Вт. Есть функция автовыключения питания. Размеры устройства - 550 x 141 x 367 мм. Вес – 11,5 кг.

Сравнительная характеристика оборудования отображена в таблице 1.5

Таблица 1.5 - Сравнительный анализ технических характеристик голографических проекторов

Голографический проектор / Характеристики	Samsung 120" 4K The Premiere LSP7T	Samsung 130" 4K The Premiere LSP9T	LG CineBeam HF85LSR
---	------------------------------------	------------------------------------	---------------------

Размеры (ШxГxВ):	532 x 132.7 x 342 мм	550 x 141 x 367 мм	118x189x353 мм
Максимальный угол поворота:	Размеры экрана 90~120'	Размеры экрана100~130'	Размеры экрана 90~120'
Масса:	9.1 кг	11.5	3 кг
Мощность:	320 Вт	410 Вт	140 Вт
Управление:	Дистанционное / голосом	Дистанционное	Дистанционное
Светодиоды/ Тип лампы	-	-	Laser diode
Wi-Fi поддержка	WiFi Direct Да	да	да
Поддержка Ethernet (LAN)	да	да	да
Разрешение:	3840 x 2160	3840 x 2160	1920 x 1080
Яркость:	2200 (пиковая)	2800	1500 люмен
срок службы	20000 часов	20000 часов	до 20000 часов
Источник света	Один лазер	Три лазера	лазерный диод (LD + P/W)
Система проецирования	DLP	DLP	DLP-чип с поддержкой

			разрешения Full HD (1920x1080)
--	--	--	--------------------------------

Все рассмотренные проекторы – ультракороткофокусные, однако лазерный проектор Samsung 130" 4K The Premiere LSP9T обладает некоторыми преимуществами. Для просмотра контента нет необходимости в полном затемнении помещения. Достаточно небольшого затемнения, так как устройство передает изображение на 12 процентов ярче, чем другие ультракороткофокусные проекторы. Такой эффект достигается благодаря использованию технологии тройного лазера, при этом пиковая яркость – 2800 люмен.

Две модели: LSP7T и LSP9T. Первая стоит в России 300 тысяч рублей, а вторая — 550 тысяч. Отличаются наличием HDR 10+, дальностью расположения от поверхности от 11,3 см до 23,8 см. Разрешение, частота, время отклика, процессор и ОС практически идентичны.

Проектор LG CineBeam HF85LSR, в изучаемой линейке устройств, наиболее компактный, его можно комфортно разместить в небольшом помещении. Удобен для транспортировки - имеет вес всего 3 кг.

Как показал анализ, данные проекторы обеспечивают визуализацию за счет использования ярких светодиодов, создают изображение высокого качества, имеют дистанционное управление, специальную программу для работы с использованием ноутбука или компьютера, позволяют поддерживать достаточно большую площадь охвата изображения, обладают функцией считывания SD-карт для оперативной смены контента.

Рассмотрев характеристики изучаемого оборудования, можно выделить голографический проектор LG CineBeam HF85LSR. Он обеспечивает яркую контрастную картинку и индифферентен к характеристикам поверхности, на которую проецируется изображение. Срок службы источника света составляет порядка 20 000 часов. При этом может доставлять дискомфорт мерцание, есть претензии к неестественной насыщенности цветов. Главный недостаток – высокая цена.

1.5.2.2 Голографические вентиляторы

Голографический вентилятор — это устройство, предназначенное для воспроизведения голограмм, создающее эффект «подвешенного» в пространстве изображения. Задний фон - лопасти голографического вентилятора не воспринимаются человеческим зрением и, создается впечатление, что голограмма - парящее в воздухе объемное изображение. В данном устройстве используется технология непрерывного движения, также, как и в голографическом проекторе. Однако для работы вентилятора нет необходимости в наличии плоскости для вывода изображения. Голографический вентилятор имеет лопасти, на которых установлены LED пиксели высокой плотности. Во время вращения лопастей, LED пиксели то включают, и они загораются, то выключают в определенный момент времени. Человеческий глаз, как известно, не способен различать сверхбыстрое мигание светодиодов. Таким образом, из-за сверхбыстрого воспроизведения сигналов каждого светодиода, достигается эффект «парящего в воздухе» объемного объекта. И зритель видит яркую и красочную голографическую проекцию объекта в воздухе. Создается так называемый POV эффект.

Разработаны вентиляторы разного диаметра. Наиболее часто используемые размеры - 50 см, 60 см, 65 см и 100 см.

Анализируемый голографический вентилятор DseeLab-65H имеет диаметр 65 см и, следовательно, воспроизводит изображение размером 65 см. Так как диаметр вентилятора это и есть диаметр самой проекции изображения. Энергопотребление такого устройства достаточно низкое - около 30-50Вт. Четыре лопасти при 1200 -1500 оборотов в минуту дают объемное и динамичное изображение объекта, парящего в воздухе.

Энергопотребление в режиме работы 48 Вт. Качество изображения: 720x720 пкс.

Креативность в разработке новых устройств, продуктов, приборов, использующих голографию, отражает реальный огромный потенциал этого

метода. Развитие технологии голографической визуализации позволило создать инновационную линейку приборов, которые могут создавать четкие 3D видеоизображения повышенной яркости.

Для реализации задач первого этапа данного исследования, мы провели сравнительную характеристику устройств - голографический проектора LG CineBeam HF85LSR и голографического вентилятора DseeLab-65H.

Одним из преимуществ голографического лазерного проектора является то, что форма экрана не влияет на качество проецируемого изображения.

Современное развитие технологий связи дает возможность работать над проблемой обеспечения эффекта присутствия собеседника.

С помощью встроенного микропроцессора, каждому светодиоду посылаются фиксированное количество сигналов через равные промежутки времени. Это обеспечивает мигание светодиодов в сверхбыстром темпе. Глаз человека это сверхбыстрое мигание воспринимает как полноценное красочное изображение.

Сравнительная характеристика воспроизводящего оборудования отображена в таблице № 1.6

Таблица 1.6 - Технические характеристики воспроизводящего оборудования

Воспроизводящее оборудование / Характеристики	Голографический вентилятор N20	Голографический вентилятор DseeLab-65H	Проектор с поддержкой 3D LG CineBeam HF85LSR
Размеры:	420 X 130 X 110 мм	65 x 65 см/25,6 x 25,6 дюйма	118x189x353 мм
Масса:	1,5 кг	575г	3 кг
Мощность:	15 Вт	48 Вт	140 Вт (максимальная), standby: 0,5 Вт
Площадь	42 см	0,283 м ²	3.05 м

покрытия:			
Управление:	С помощью 8 ГБ SD-карты, wi-fi	Поддержка android, ios, ПК window и mac,	Поддержка android, ios, ПК window и mac, пульт.
Светодиоды/ Тип лампы	Светодиоды: RGB0603LED	Светодиоды: RGB0605LED	Laser diode
Wi-Fi поддержка	есть	есть	есть
Поддерживаемые форматы:	MP4 / AVI / RMVB / MKV / GIF / JPG / PNG	jpg, gif, mp4, avi, rmvb, mpeg	asf, wmv, avi, mp4, m4v, mov, 3gp, 3g2, mkv, ts, trp, tp, mts, mpg, mpeg, dat, vob, rm, rmvb mp3, wav, ogg, wma, flac JPEG, PNG, BMP
Максимальная поддержка карт памяти:	16G	8Gb	-
Разрешение:	800x480 / 720x720	720 x720	1920x1080
Яркость люмен:	1400	1200	1500
срок службы	продолжительность работы более 30000 часов	продолжительность работы более 30000 часов	до 20000 часов
Отображение в нескольких экранах:	-	Поддержка голографического взаимодействия нескольких экранов	-

		в качестве расширения ПК для увеличения размера изображения	
Источник света	Светодиоды	Светодиоды	лазерный диод (LD + P/W)
Система проецирования	-	-	DLP-чип с поддержкой разрешения Full HD (1920x1080)
Встроенный Bluetooth-передатчик	Нет	Нет	для беспроводной трансляции аудио на Bluetooth-колонки
Ethernet (RJ-45)	-	-	есть

1.5.2.3 Голографические станции: голографические 3D пирамиды и кубы

Голографические станции мы рассматриваем, как устройства, которые проецируют трехмерные изображения и создают иллюзию объёмного изображения внутри специальной конструкции без использования специальных очков. По конструкции и техническим характеристикам различают голографические 3D пирамиды и 3D кубы.

Голографические пирамиды имеют прозрачные грани, на внутренние поверхности которых, проецируются изображения. Изображения проецируются при помощи дисплея, который находится на вершине пирамиды. Оптические

свойства голографической 3D пирамиды позволяют каждому глазу пользователя видеть свой специфический угол проекции, что в результате дает эффект голографического изображения. Яркое и четкое объемное изображение, видимое с разных сторон, усиливает реалистичность демонстрации.

Голографические кубы, в свою очередь, имеют форму куба с внутренними светодиодными или другими источниками света. Каждая грань куба отображает часть общей сцены, что в совокупности создаёт впечатление объёмного изображения. Конструкция куба такова, что видимый объемный объект располагается в центре, как бы висит в воздухе внутри куба. В отличие от голографической пирамиды, 3D объект в голографическом кубе просматривается только спереди и сзади. Нанесение специального покрытия на стёкла и использование тёмных тонов в фоновом освещении усиливают эффект глубины и реалистичности.

Рассмотрим отдельные устройства, представленные разработчиками, которые уже эффективно используются для проведения рекламных компаний, презентаций, демонстрационных проектов в лекториях и других образовательных мероприятиях.

На рисунке 1.6 отображен голографический куб Wizard



Рисунок 1.6 - голографический куб Wizard

Голографический куб Wizard представляет собой инновационное устройство, разработанное для визуализации и дополнения реальных объектов информацией, не только в статичной форме, но и с помощью специально подготовленной голографической анимации, использующей программное обеспечение для голографической проекции. Именно индивидуально разработанное ПО предоставляет новые возможности пользователю креативно работать с аудиторией, используя Wizard Holographic Cube для образовательных, рекламных, маркетинговых и культурно-просветительных целей.

На рисунке 1.7 отображена голографическая 3D пирамида HighPyramide 55"



Рисунок 1.7 - Голографическая 3D пирамида HighPyramide 55"

Голографическая 3D пирамида HighPyramide (трехсторонняя 55) подходит для визуализации 3D-моделей в музеях, на выставках, форумах, а также как необходимый элемент для ГТК. Это устройство объединяет голографическое изображение с реальными объектами, создавая эффект совмещения виртуального и физического миров. HighPyramide позволяет демонстрировать трехмерные объекты, используя контент, который загружается посредством flash-накопителя

или с компьютера, находящегося в одной локальной сети. Данное устройство способно воспроизводить разнообразные материалы — от анимированных логотипов до рекламных роликов, интегрируя искусство и голографические технологии.

На рисунке 1.8 отображен голографический куб **AxeTech Cube 32" Medium**.



Рисунок 1.8 - Голографический куб AxeTech Cube 32" Medium

Голографический куб AxeTech Cube 32" Medium имеет прозрачные грани, которые помогают создать эффект парящего в воздухе объемного объекта в виде вращающейся 3D-модели. AxeTech Cube 32" Medium представляет собой инновационное решение для визуального сопровождения event-мероприятий, разнообразных выставок, образовательных форумов и научно-практических конференций.

На рисунке 1.9 отображен голографический куб HighCube.



Рисунок 1.9 - Голографический куб HighCube

Голографический куб HighCube представляет собой высокотехнологичное интерактивное устройство, созданное для демонстрации трёхмерных объектов. Конструкция устройства имеет вид прямоугольного объёмного корпуса, одна из сторон которого используется для проекции голографического изображения. Куб HighCube позволяет создать эффект «парящего» в воздухе объекта или героев анимированного видеоролика, проецировать 3D-графику в высоком разрешении. Технические характеристики устройства предоставляют возможность воссоздания интерактивных инсталляций.

Далее приведена таблица сравнения технических характеристик голографических систем воспроизведения: голографической 3D пирамиды HighPyramide, голографических кубов HighCube, AxeTech Cube 32" Medium, Wizard.

Далее приведена таблица 1.7 технических характеристик голографических систем воспроизведения.

Таблица № 1.7 - Сравнительная характеристика голографических устройств

Воспроизводящее оборудование / Характеристики	HighCube	Голографическая 3D пирамида HighPyramide	AxeTech Cube 32" Medium	Wizard

Диагональ:	55	55	32	32
Разрешение экрана:	4K UltraHD 3840x2160	4K UltraHD 3840x2160	FullHD	Full HD
Яркость:	270 - 350 Кд/м ²	270 - 350 Кд/м ²	250 - 350 Кд/м ²	250 - 350 Кд/м ²
Потребляемая мощность:	110 - 160 Вт	110 - 160 Вт	110 - 160 Вт	110 - 160 Вт
Процессор:	Intel Core i3/i5/i7	Intel Core i3/i5/i7	Intel Core i3/i5/i7	Intel Core i3/i5/i7/i9
Оперативная память:	До 64 Гб	До 64 Гб	До 64 Гб	До 64 Гб
Жесткий диск:	До 1 Тб	До 1 Тб	До 1 Тб	До 1 Тб
ОС:	Linux/Windo ws	Linux/Windows	Linux/Windows	Linux/Win dows
Wi-Fi	Да	Да	Да	Да
Ethernet (RJ-45)	Да	Да	Да	Да

1.6 Выводы к 1 главе

На основе результатов исследования можно прийти к следующим выводам.

Наблюдаемая тенденция к потенциальному изменению структуры трафика в направлении увеличения объемов передачи мультимедиа и голографического контента, выдвигает на первый план решение проблемы развития сетей связи.

Среди важнейших параметров, определяющих стабильность качества услуг сетей связи, при передаче голографического трафика, можно назвать следующие: малая и сверхмалая задержка, пропускная способность, коэффициент потери пакетов.

Следовательно предмет данного исследования, разработка и исследование моделей трафика для передачи голографических копий, приобретает большую значимость.

Голографические коммуникации подразумевают формирование голограммы собеседника — объёмного изображения, позволяющего точно передавать эмоции и жесты человека. Для работы таких систем потребуется высокая пропускная способность канала связи, которую нынешние технологии обеспечить не могут.

Появление новых видов услуг и распространение нового типа коммуникаций – голографического типа коммуникаций имеет социальную значимость.

Данная позиция аргументируется и в Стратегии развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года, в которой подчеркивается, что отрасль связи играет социально значимую роль, обеспечивая общество услугами связи [6].

Стоит также выделить проблему, которая связана с недостаточной разработкой терминологической системы в сфере голографических коммуникаций.

Проведенные терминологические исследования стали основой для разработки определений функционального содержания следующих терминов: голографический тип коммуникаций, голографические копии, голографические аватары.

В заключение следует отметить, что развитие голографических технологий прогнозируемо повлияет на формирование новых требований к сетям связи.

Реализовать возможность получения высококачественного голографического контента становится реальным только при условии инновационных решений в эволюции сети и оборудования. Уже на данном этапе можно наблюдать тенденцию значительного роста количества исследований, предметом изучения которых является увеличение пропускной способности сети и минимизации задержки передачи пакета данных.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАФИКА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ТИП КОММУНИКАЦИЙ

Голографический тип коммуникации открывает новые возможности для различных сфер жизни. В будущем эти технологии могут значительно изменить способ взаимодействия людей. Это инновационное направление, которое требует разработки специализированного оборудования, обеспечивающего функционирование этих систем и высоких требований к сетям связи.

Цель данного этапа экспериментального исследования состоит в последовательном изучении 3D-видеотрафика, трафика мультимедиа и голографического трафика; сопоставлении их основных характеристик и требований к сетям связи; построении аналитической модели путем постановки натурного эксперимента, приближенного к условиям функционирования перспективной сети связи.

Подчеркнем, что задача построения сети связи является задачей выбора компромисса между качеством обслуживания трафика и выделяемыми для этого ресурсами. Для ее решения необходим выбор математического аппарата, специфика которого определяется свойствами трафика и системы обслуживания. Адекватность решения этой задачи зависит, в частности, от знаний свойств трафика.

Для решения задачи исследования был выбран метод натуральных измерений, как наиболее соответствующий логике данного исследования.

Идея метода состоит в проведении измерений параметров трафика в условиях, приближенных к повседневным эксплуатационным процессам.

В рекомендации ITU-T Q.3900, модельная сеть определена как сеть связи, которая имитирует возможности, аналогичные существующим в действующих сетях электросвязи, имеет подобную архитектуру и обладает теми же функциональными возможностями, а также использует те же технические средства электросвязи [128].

При разработке стендовой натурной модели для проведения экспериментального исследования было учтено положение о том, что модельная сеть может включать в себя и телекоммуникационное оборудование, и специализированное программное обеспечение, выполняющее виртуализацию отдельных функций управления.

Разработанная программа проведения экспериментального исследования включала несколько этапов:

1. Исследование передачи трафика 3D видеопотока с использованием технологии DWDM;
2. Исследование трафика 3D видеопотока в различных средах передачи;
3. Изучение параметров и проведение сравнительного анализа трафика мультимедиа и голографического трафика;
4. Разработка модели для тестирования трафика приложений виртуальных аватаров в процессе реализации голографического типа коммуникаций;
5. Анализ статистических данных, полученных в результате натурального эксперимента и построение аналитической модели

2.1 Исследование передачи трафика 3D видеопотока с использованием технологии DWDM

2.1.1 Обоснование использования технологии DWDM

Технология DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) дает возможность решить проблему повышения пропускной способности сети и уплотнения трафика, мультиплексируя несколько информационных каналов по одному оптическому волокну. При этом, для передачи разных потоков данных используются разные длины волн. Для обеспечения применения всего диапазона,

Международный союз электросвязи (ITU-T), Сектор стандартизации электросвязи (the International Telecommunication Union Telecommunication Standardisation Sector (ITU-T), определил таблицу всех длин волн (и

соответствующих им центральных частот). Таблица размещена в рекомендации ITU-T G.694.1.

Отметим, что системы DWDM позволяют расширить существующую полосу пропускания без прокладки дополнительных волокон в оптических кабелях. Возможности существующей системы расширяются с помощью мультиплексоров и демультиплексоров на концах системы [129,130,131].

Использование технологии мультиплексирования с плотным разделением длин волн является перспективным, так как исследователи утверждают, что ожидаемо при эволюции данной технологии будут использованы, как существующие принципы суперканала, так и более мощная обработка сигналов, гибкие сетевые решения и спектрально эффективные методы передачи [132].

2.1.2 Модельная сеть для передачи 3D видеопотока на базе технологии DWDM

В разработанной модели было использовано следующее оборудование: камера Microsoft Kinect, два сервера, два коммутатора Mikrotik, оборудование DWDM (DWDM T8 «Волга» V6 и V10), проектор. Среда передачи данных – оптоволокно – патч-корд SC-SC, коммутационный шнур UTP 4-х парный cat.5e 3.0м [177].

Для имитации работы в сети было подключено два сервера к коммутаторам, которые, используя оптоволоконный кабель, соединяются по технологии DWDM.

На подготовительном этапе эксперимента изучение параметров трафика проводилось с помощью цифрового оптического аттенюатора, который позволяет поддерживать определенный диапазон затухания от 0 до 75 с возможностью выбора шага в 1Дб. На наш взгляд, будет достаточным затухание в 2 Дб, что тождественно, в данном случае, десяти километрам.

Возможность формирования 3D видео потока, была реализована с помощью специального программного инструмента – OBS. Для перехвата и анализа

сетевого трафика применялась программа Wireshark. На виртуальном сервере были запущены веб-интерфейсы коммутаторов для мониторинга трафика, а также сделаны снимки экрана. SDN контроллер – виртуализирует уровень управления сетью.

Модель сети представлена на рисунке 2.1.

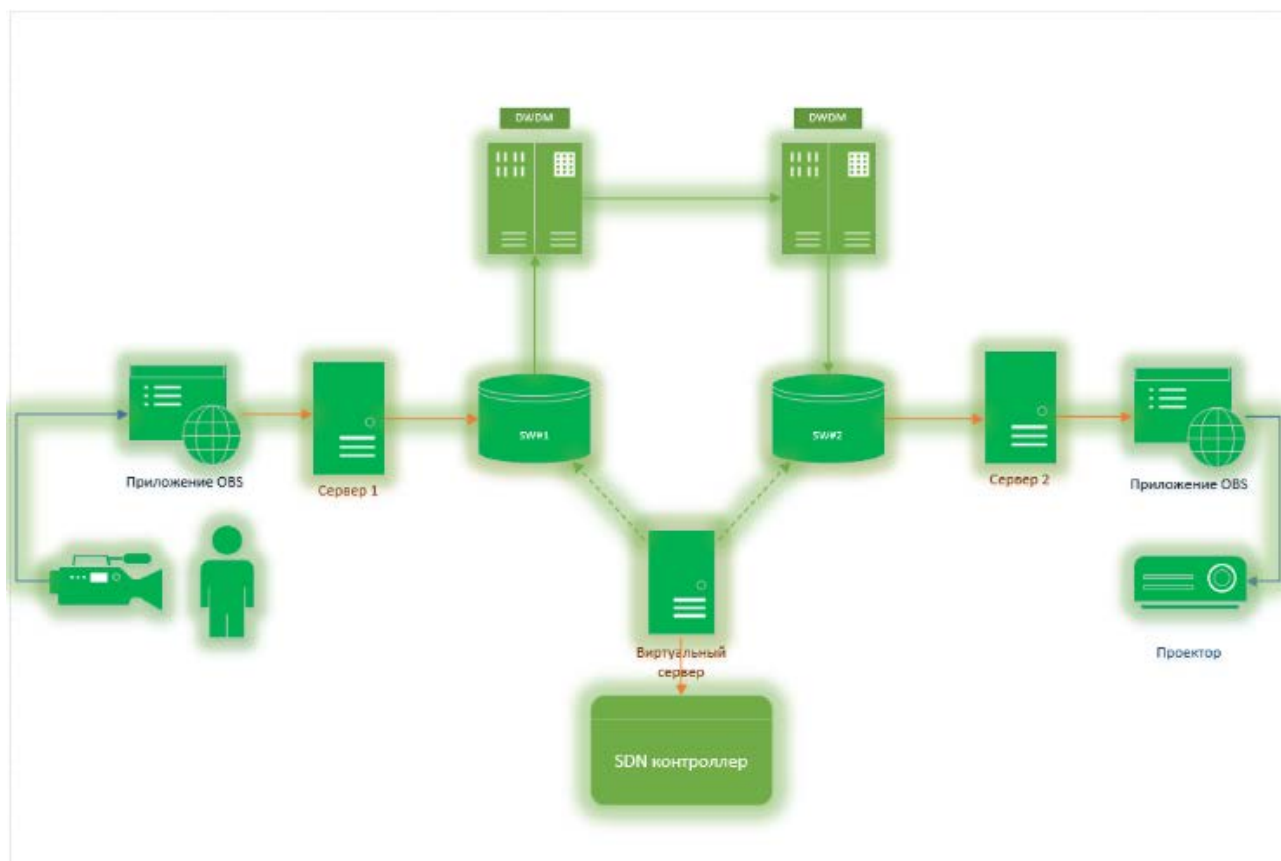


Рисунок 2.1 – Модель сети для передачи 3D видеопотока

2.1.3 Анализ параметров передачи 3D видеопотока с использованием технологии DWDM

Сделанное допущение о необходимости проведения сравнительного анализа данных ввода и вывода в процессе передачи 3D видеопотока, позволило прийти к следующей последовательности экспериментального исследования. Передавая трафик с использованием технологии DWDM, во время натурального эксперимента, был проведен мониторинг и обработка данных на передающей стороне и на принимающей стороне.

При анализе результатов изучения трафика были рассмотрены следующие характеристики: длины пакетов, RTT (время передачи пакета от отправителя к получателю и обратно), пропускная способность.

График ввода/вывода представлен на рисунке 2.2.

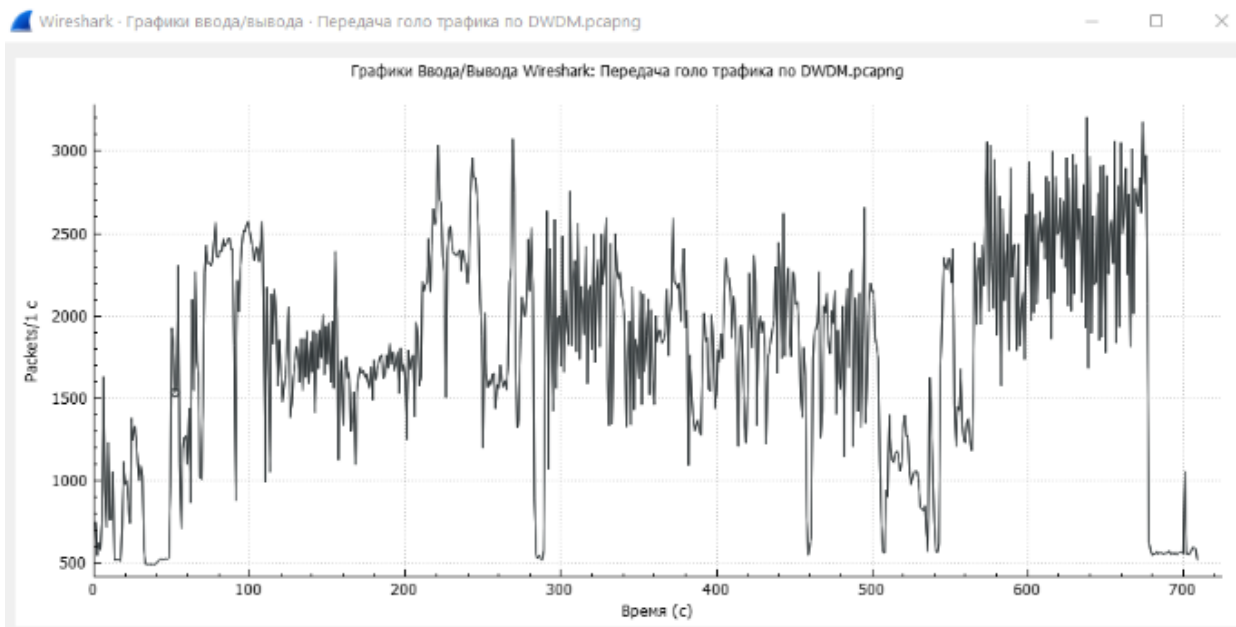


Рисунок 2.2 – График ввода/вывода на передающей стороне.

Статистика передачи длин пакетов обобщена на рисунке 2.3.

Topic / Item	Count	Average	Min Val	Max Val	Rate (ms)	Percent	Burst Rate	Burst Start
Packet Lengths	1262468	887,71	54	1514	1,7784	100%	4,1600	638,445
0-19	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
20-39	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
40-79	492329	60,02	54	79	0,6935	39,00%	2,0800	638,591
80-159	1190	118,63	80	159	0,0017	0,09%	0,0400	130,880
160-319	2548	237,88	160	319	0,0036	0,20%	0,0400	68,967
320-639	50498	388,06	320	639	0,0711	4,00%	0,2100	269,083
640-1279	9342	954,96	640	1279	0,0132	0,74%	0,0400	0,845
1280-2559	706561	1502,89	1280	1514	0,9953	55,97%	2,4800	269,083
2560-5119	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
5120 and greater	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-

Рисунок 2.3 – Анализ показателей длин пакетов после окончания передачи.

На рисунке 2.4 представлен график показателей пропускной способности по результатам эксперимента.

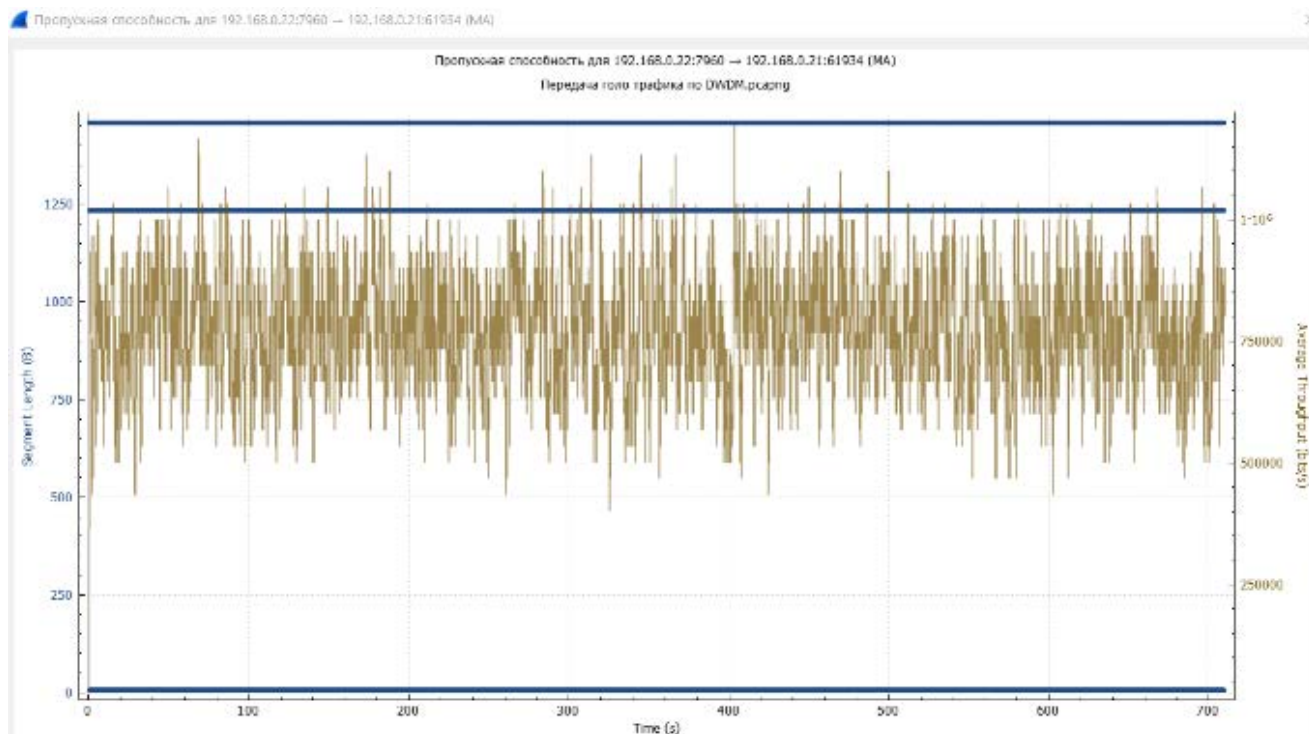


Рисунок 2.4 – График показателей пропускной способности по результатам эксперимента

Рассматривая следующую характеристику трафика, приводим показатели RTT – времени передачи от отправителя к получателю и обратно. Отображено на рисунке 2.5.

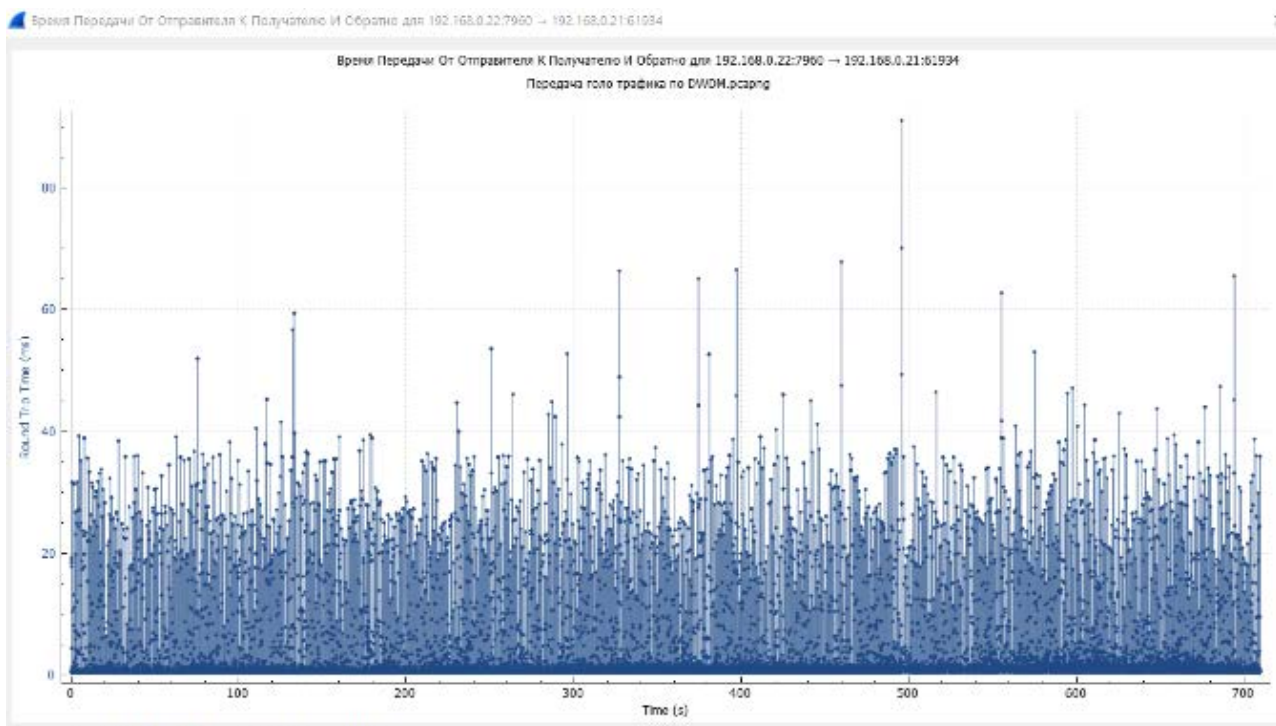


Рисунок 2.5 – График времени передачи от отправителя к получателю и обратно

Далее приведены результаты эксперимента, собранные с помощью перехвата пакетов на принимающем устройстве.

На рисунке 2.6 можно видеть график ввода/вывода на принимающей стороне.

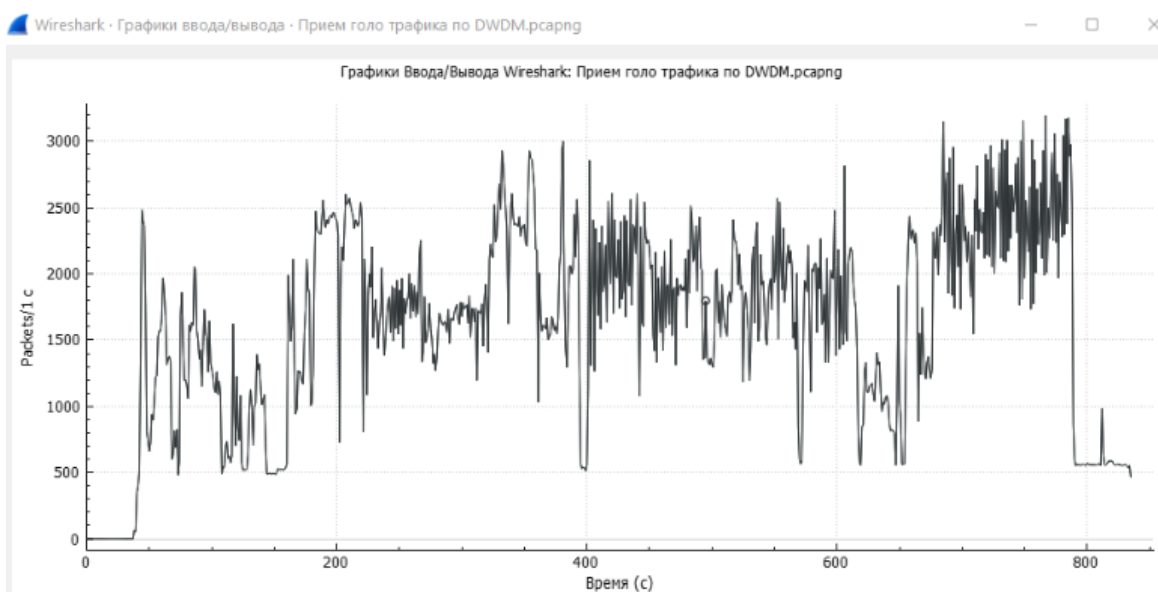
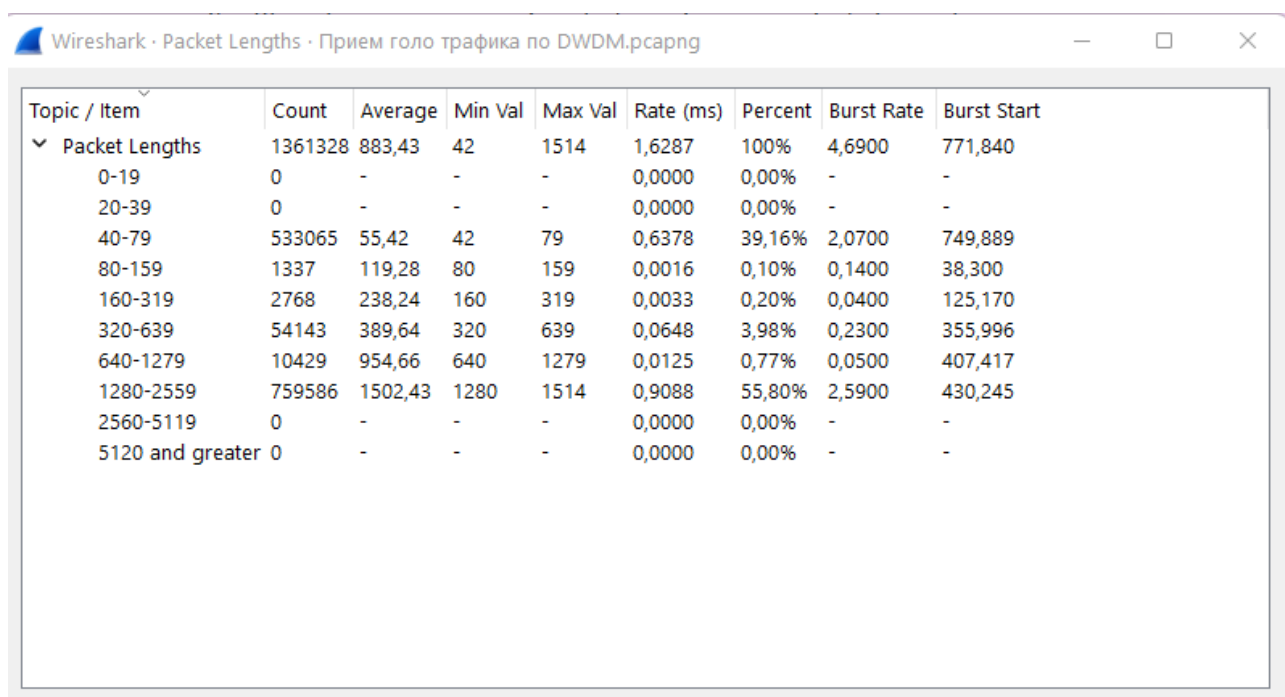


Рисунок 2.6 – График ввода/вывода на принимающей стороне.

Статистика на принимающем устройстве приведена на рисунке 2.7.



The screenshot shows the Wireshark interface with the 'Packet Lengths' statistics window open. The window title is 'Wireshark · Packet Lengths · Прием голо трафика по DWDM.pcapng'. The table below represents the data shown in the window.

Topic / Item	Count	Average	Min Val	Max Val	Rate (ms)	Percent	Burst Rate	Burst Start
Packet Lengths	1361328	883,43	42	1514	1,6287	100%	4,6900	771,840
0-19	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
20-39	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
40-79	533065	55,42	42	79	0,6378	39,16%	2,0700	749,889
80-159	1337	119,28	80	159	0,0016	0,10%	0,1400	38,300
160-319	2768	238,24	160	319	0,0033	0,20%	0,0400	125,170
320-639	54143	389,64	320	639	0,0648	3,98%	0,2300	355,996
640-1279	10429	954,66	640	1279	0,0125	0,77%	0,0500	407,417
1280-2559	759586	1502,43	1280	1514	0,9088	55,80%	2,5900	430,245
2560-5119	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
5120 and greater	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-

Рисунок 2.7 – Статистика длин пакетов на принимающей стороне.

В результате анализа научных публикаций, посвященных исследованию мультимедийного трафика, было сделано допущение о необходимости проведения мониторинга трафика видеопотока и трафика 3D видеопотока. В связи с этим, на втором этапе эксперимента была проведена обработка и накопление показателей параметров трафика потока 3D изображений.

На рисунке 2.8 показаны результаты мониторинга видеопотока на модельной сети.

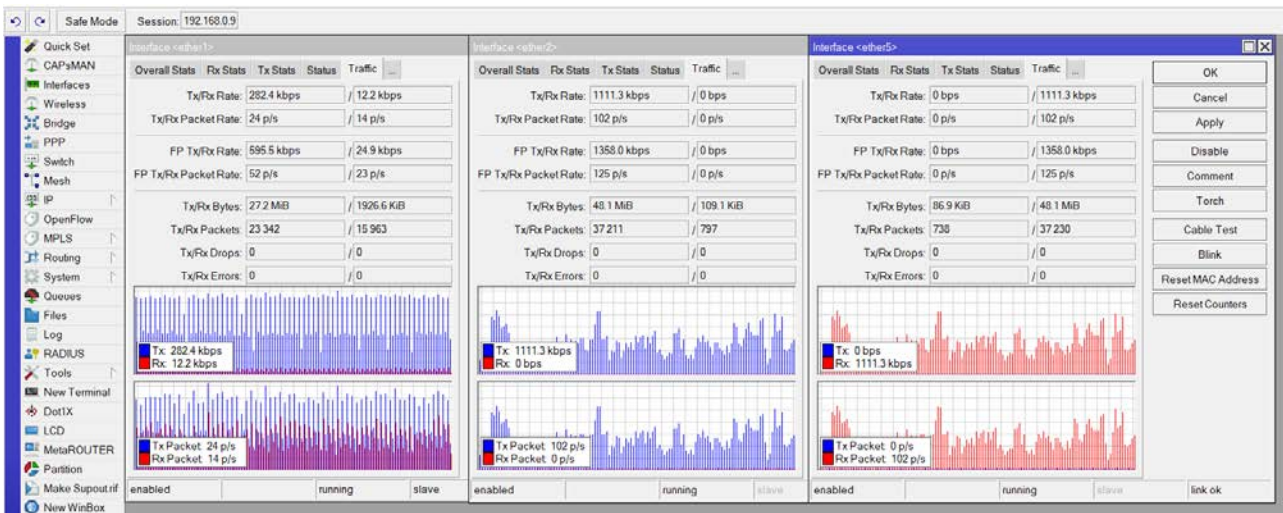


Рисунок 2.8 – Демонстрация результатов мониторинга видеопотока

Результаты передачи видеопотока на передающей стороне приведены на рисунке 2.9.

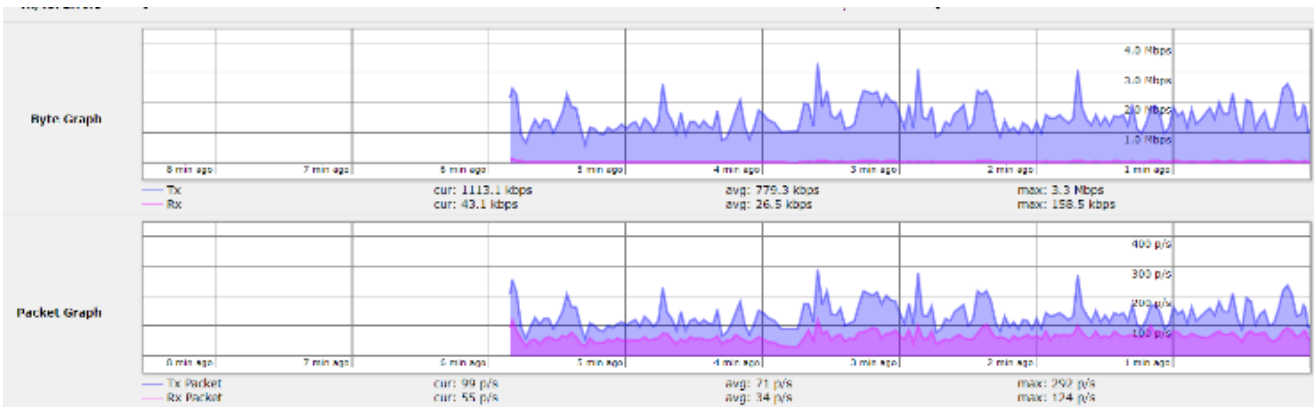


Рисунок 2.9 – Графические результаты передачи видео потока на передающей стороне.

На принимающей стороне график выглядит как показано на рисунке 2.10.

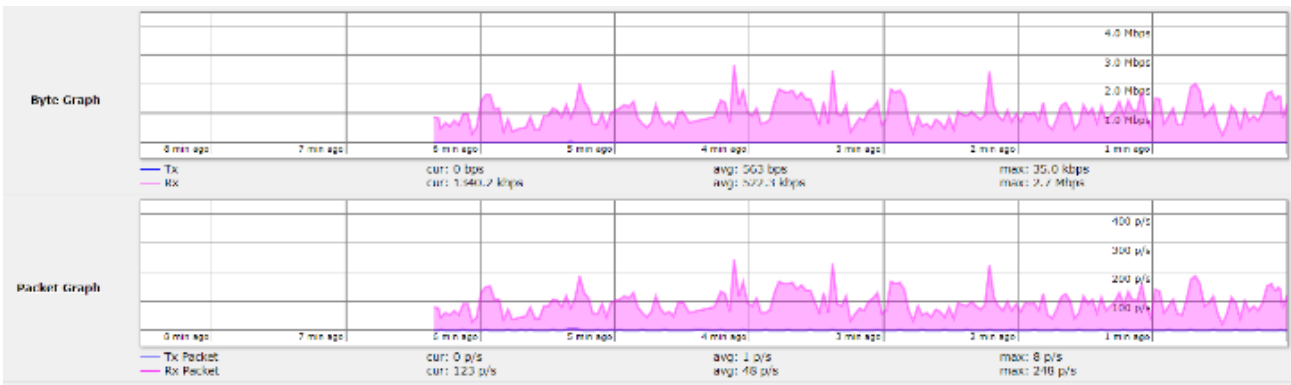


Рисунок 2.10 – Видеопоток на принимающей стороне.

Далее представлены результаты мониторинга передачи трафика 3D видеопотока на рисунке 2.11.

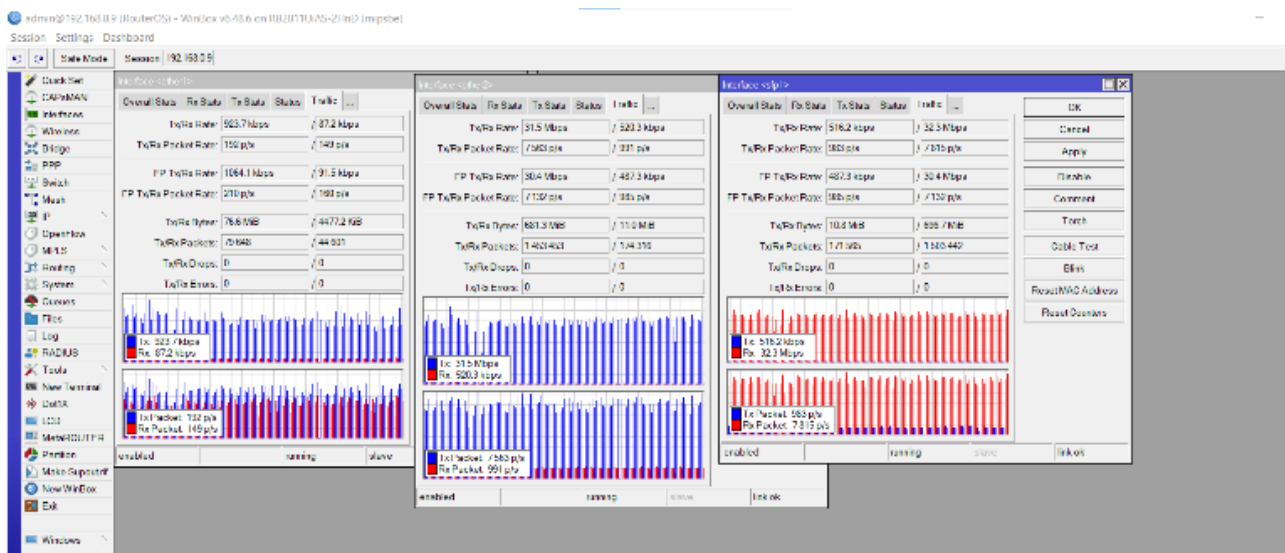


Рисунок 2.11 – Демонстрация результатов мониторинга передачи трафика 3D видеопотока

График передачи 3D видеопотока на передающей стороне показан на рисунке 2.12.

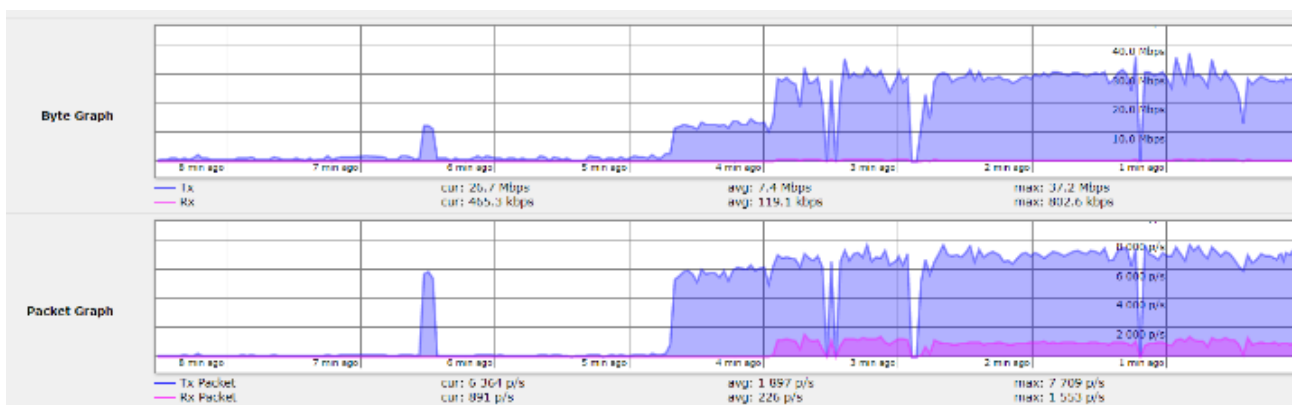


Рисунок 2.12 – График передачи 3D видеопотока на передающей стороне

На принимающей стороне график выглядит как показано на рисунке 2.13.

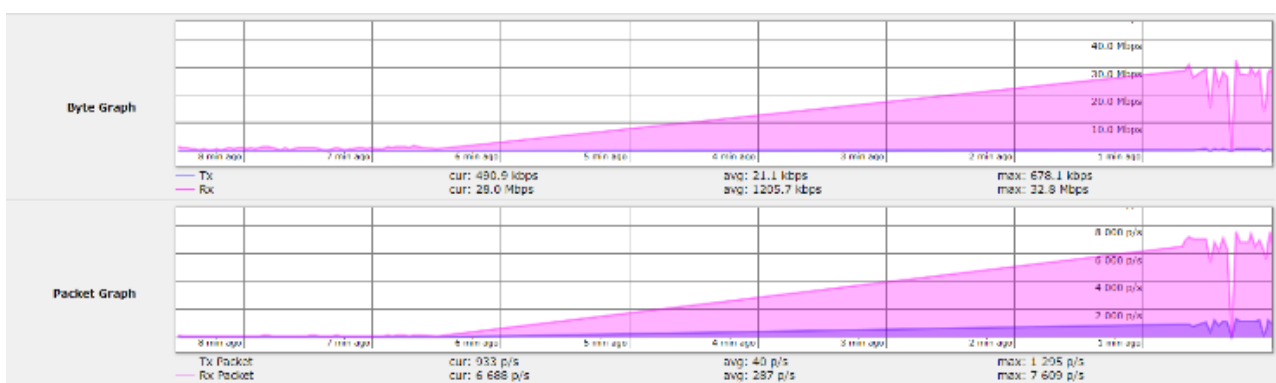


Рисунок 2.13 – Графические результаты передачи 3D видеопотока на принимающей стороне

2.1.4 Исследование трафика приложений виртуальных аватаров

Возрастающее значение исследования развития голографических технологий может быть обусловлено переходом на новый этап внедрения современных технологий коммуникации, который предполагает активное использование голографических проекций. На наш взгляд, востребованными будут и такие перспективные направления, как создание и использование голографических аватаров [176].

Так, рассматривая перспективы развития сетей связи, авторы отмечают, что «при использовании голографических приложений и аватаров будет возможно,

например, смотреть футбольный матч не по телевизору, а как голографическую модель под любым углом» [7]

Меняющиеся современные условия технического оснащения, в которых разрабатывается теория голографии, требуют не только новых подходов к изучению, но и анализа исследований голографических технологий с точки зрения передачи данных в режиме реального времени для воспроизведения голографических изображений.

Рассмотрим инновационный участок в спектре разработок технологий 3D изображений – создание виртуальных аватаров. В условиях интегрирующихся информационных ресурсов информационно-коммуникационного пространства, где доступ к информации становится жизненно необходимым, человек получает возможность создать и сохранить свой цифровой профиль. На данном этапе, этот цифровой профиль, также называемый цифровой аватар, представляет собой набор биометрических и персональных данных. Биометрические данные – изображение лица, радужная оболочка глаз, отпечатки пальцев и другие необходимы для идентификации личности. Персональные данные, как правило, содержат следующую информацию: ФИО, пол, дата и место рождения, место жительства, образование, семейное положение, занимаемая должность и так далее. Однако, рассматриваемое понятие «цифровой аватар» имеет тенденцию к постоянному расширению комплекса его содержательных элементов. Так, в сети, цифровой аватар может представлять пользователя через его анимационное изображение либо собирательный художественный образ, иметь описание интересов, увлечений, жизненной позиции и так далее.

«Аватар, - отмечают авторы, изучающие данную научную проблему, виртуальное тело, которое представляет людей в ландшафтной среде, сгенерированной компьютером, — это явление, которое появилось в цифровую эпоху интерактивных вычислений» [133]. Они приходят к выводу, что в онлайн-чатах и на веб-сайтах, а также в компьютерных играх и виртуальных мирах становится все более распространенным взаимодействие с другими пользователями через эти искусственно созданные личности.

Некоторые авторы говорят об “аватарификации”, которую определяют «как использование виртуальных самопрезентаций в опосредованной среде с целью облегчения взаимодействия в этой среде» [134]. Они акцентируют внимание, что термин «аватар» не является стандартизированным в академической литературе.

Гораздо более четко и сформулированным, на наш взгляд, является термин «виртуальный аватар». Виртуальный аватар, как термин, трактуется нами, как фотореалистичная 3D модель человека. Речь идет о виртуальной модели пользователя. По степени реалистичности она может быть низкополигональной, не отражать лицевые эмоции, не отображать некоторые детали внешности, а может быть более реалистичной, например, анимационные аватары. Разработаны графические программы, использующие готовые образцы для анимации пользователя (MetaHuman, Reallusion Character creator, DAZ3D). В данном исследовании мы рассматриваем наиболее близкую к совершенству модель человека. Мы называем ее голографическим аватаром.

Голографический аватар – это гиперреалистичная 3D модель человека, созданная по реальному прототипу пользователя, с использованием программных платформ искусственного интеллекта, обеспечивающих машинное обучение нейронной сети. В отличие от виртуальных цифровых аватаров, которыми управляют пользователи, голографический аватар является полностью автономным, автоматизированным, который контактирует с пользователем благодаря нейронной сети.

Вместе с тем, при активном внедрении данной голографической технологии могут возникать некоторые сложности.

Необходимо констатировать, что при передаче трафика голографических копий для получения голографических аватаров, объем его резко возрастает. Достаточно часто наблюдается его приближение к границам максимальной пропускной способности сети связи. В свою очередь, это может вызвать перегрузку сети. Такие пиковые нагрузки требуют значительного выделения большого объема ресурсов сети одновременно, разово.

Исследуя особенности трафика приложений для передачи по сети анимированных аватаров, использовали разработанную модель передачи трафика.

Многоплановый и многоаспектный характер объекта исследования – процесс передачи голографического трафика, сделал необходимым обозначить определенные рамки изучения и выделить его значимые этапы. В программе обозначили проведение изучения двух вариантов передачи трафика: мультимедийного контента и голографического с последующим сравнительным анализом. Для реализации данной задачи была разработана модель для трафика приложений виртуальных аватаров и мультимедийного трафика. В данном исследовании мы используем определение мультимедийного трафика, сформулированное А.М. Голиковым. Под мультимедийным трафиком, отмечал данный автор, мы понимаем «цифровой поток данных, который содержит различные виды сообщений, воспринимаемых органами чувств человека (обычно звуковая и/или видеоинформация)» [7].

Итак, рассмотрим передачу цифрового потока данных – мультимедийного трафика. Передача видеопотока осуществляется в реальном времени. Видео изображение представляет собой видеобраз, мультимедийный контент. Данный контент полностью готов к воспроизведению на устройстве, входящем в систему технических средств модели. Вышеназванный трафик требует определенных ресурсов сети связи, увеличивая нагрузку на сеть передачи данных, увеличивая стоимость услуги. Для сохранения качества обслуживания, при данном варианте передачи видеопотока, необходимо вносить изменения в параметры сети, например, увеличивать пропускную способность и так далее.

Именно на эту тенденцию указывают авторы исследования – А.И. Парамонов и Н.С. Сенькина [135], которые, в частности, отмечают, что «развитие технологий и услуг связи неизбежно приводит к изменению свойств абонентского трафика. Это изменение определяется рядом факторов, таких как: изменение базовых принципов реализации услуг связи во внедряемых технологиях; изменение набора услуг связи; изменение спроса пользователей на услуги связи;

изменением проникновения технологий (числа пользователей); изменение стоимости услуг связи; изменение способов учета стоимости услуг».

Сделаем допущение, что нагрузку на сеть, в рассматриваемой модели, можно уменьшить в случае внесения изменений в перечень функций конечного, воспроизводящего устройства. С тем, чтобы, впоследствии, при передаче голографической копии, оборудование воссоздавало требуемый образ анимированного объекта.

Следовательно, при передаче пакетов данных в экспериментальной модели необходимо минимизировать нагрузку на сеть. Для решения данной задачи передавали только движения объекта. То есть, все его движения относительно осей x, y, z . Для воспроизведения виртуального аватара, обработка его движений производится на воспроизводящем устройстве, а не передается в пакетах данных по сети. Анимационный аватар, воспроизведенный подобным образом не нуждается в регулировании размеров, соотношении его размеров с размерами объекта. Таким образом, в приложении необходимо определить главный объект, с движениями которого будет проходить работа, обозначить его первоначальное положение в выбранной системе координат (x, y, z) , а также относительно других объектов. Передавать данные, с зафиксированным движением выделенного объекта, не затрагивая окружающие объекты, не работая с ними. Используя технологию искусственного интеллекта, мы получаем возможность обрабатывать данные с видеокамеры и выделять только необходимый, обозначенный нами объект для передачи его движения.

Структурная лабораторного стенда представлена на рис. 2.14.

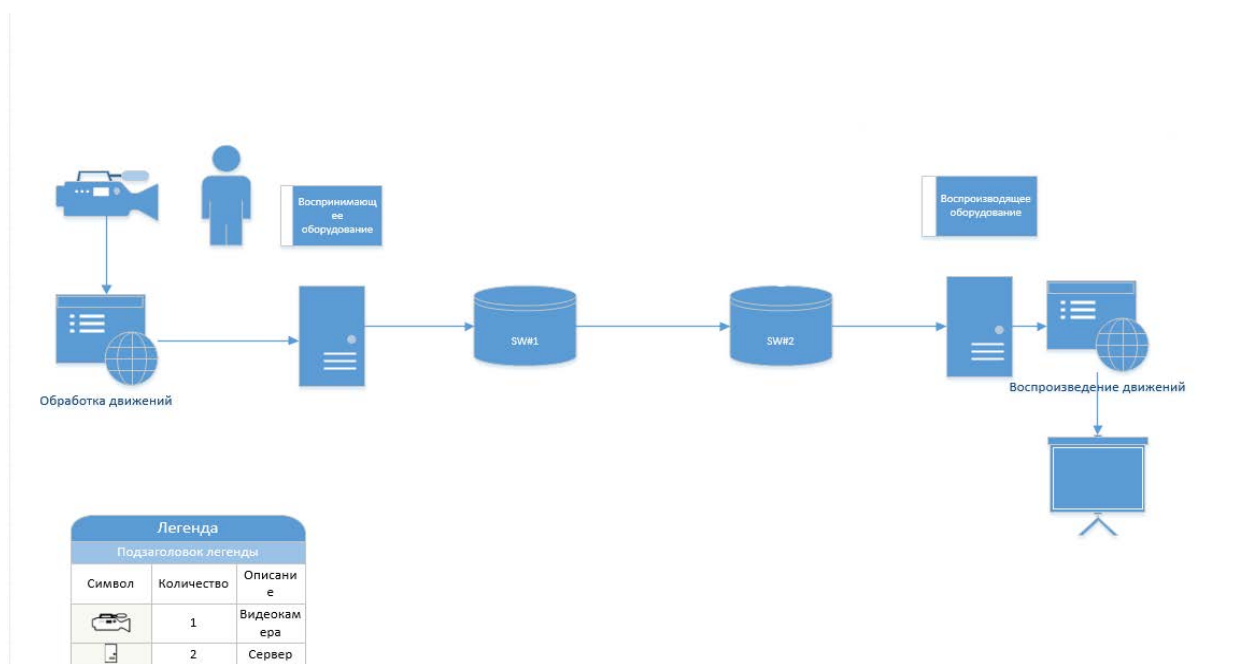


Рисунок 2.14 – Модель сети для трафика приложений виртуальных аватаров и мультимедийного трафика.

Рассмотрим модель сети, разработанную для проведения эксперимента по передаче трафика приложений виртуальных аватаров и мультимедийного трафика. В состав технических средств входит следующее оборудование: видеокамера, которая записывает информацию, сервер, на котором обрабатывается записываемая информация в реальном времени и создается виртуальный аватар. Далее используется два маршрутизатора, для имитации среды передачи данных, которые передают трафик на второй сервер. Второй сервер воспроизводит полученную копию виртуального аватара. Передающий сервер обрабатывает только движение заранее выбранного объекта. Сервер отправляет данные по сети на конечное устройство, на котором производится обработка движений и анимация сформированного аватара.

Для анализа и сбора трафика было использовано приложение Wireshark.

Полученные значения длин пакетов по результатам передачи данного трафика приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Длины пакетов мультимедийного трафика

Topic / Item	Count	Average	Min Val	Max Val	Rate (ms)	Percent	Burst Rate	Burst Start
Packet Lengths	246750	1686,28	42	40934	0,4429	100%	11,2400	340,393
0-19	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
20-39	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
40-79	201589	60,03	42	78	0,3619	81,70%	6,3800	340,393
80-159	354	117,16	80	159	0,0006	0,14%	0,4600	343,083
160-319	343	231,58	160	319	0,0006	0,14%	0,0700	205,413
320-639	312	437,66	320	639	0,0006	0,13%	0,0900	339,486
640-1279	608	957,59	643	1279	0,0011	0,25%	0,0800	340,413
1280-2559	3317	1785,47	1280	2557	0,0060	1,34%	4,1200	340,393
2560-5119	19120	4131,04	2560	5117	0,0343	7,75%	0,4900	340,399
5120 and greater	21107	15077,54	5120	40934	0,0379	8,55%	0,6600	342,049

На рисунке 2.15 отображена интенсивность передачи пакетов мультимедийного трафика.

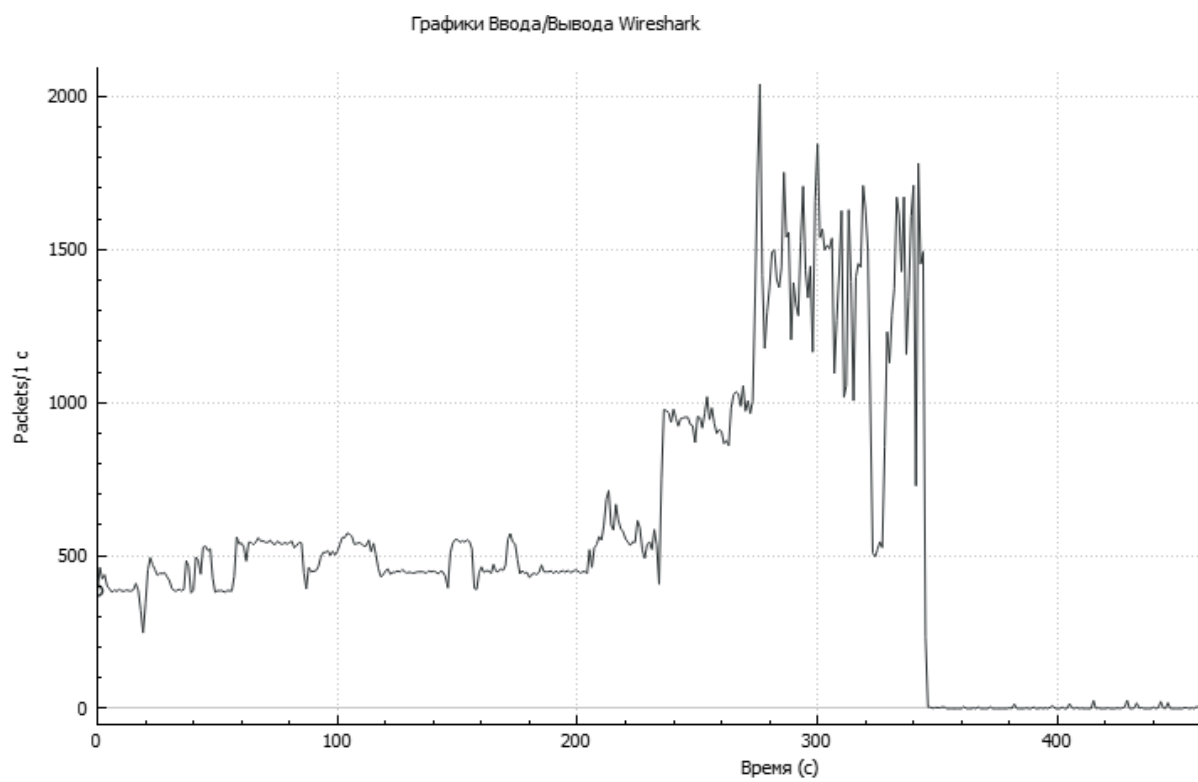


Рисунок 2.15 – Интенсивность мультимедийного трафика

На рисунке 2.16 отображена интенсивность передачи пакетов приложений виртуальных аватаров.

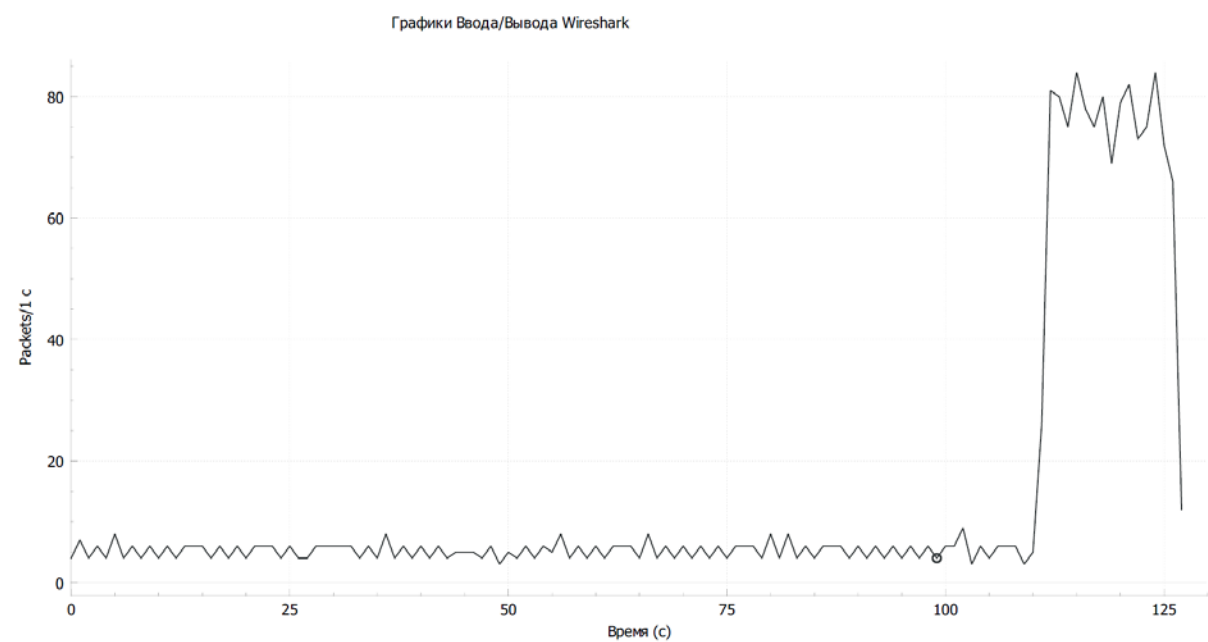


Рисунок 2.16 – График трафика приложений виртуальных аватаров

Объяснить наличие пульсации в конце работы тестирования, можно увеличением обрабатываемых точек движений. Проводится анимация движений корпуса и конечностей объекта во всех плоскостях системы координат.

Если проанализировать полученные графики, можно сделать два вывода. Первый – потоки имеют явные различия. Графики представлены в разных интервалах измерения. Диапазон интервалов различается на порядок. Это показывает, что во втором варианте приложения, использован объем трафика на порядок меньше, чем в первом варианте. Из этого, можно сделать вывод, что предложенный нами вариант, имеет ресурсосберегающий характер.

Второй вывод – увеличение двигательной активности объекта приводит к возрастанию объемов передаваемого трафика, что достаточно значимо для использования ресурсов сети.

Предложенный нами вариант работы модели, также имеет некоторые недостатки. Требуются больше вычислительных мощностей у оборудования, обрабатывающего движение модели объекта. Для персональных компьютеров, это означает увеличение расхода батареи, увеличение загруженности оперативной

памяти, либо вовсе невозможность использовать некоторые устаревшие модели устройств.

Резюмируя, необходимо акцентировать внимание на следующих, на наш взгляд, значимых положениях.

Комплексный подход, реализуемый в исследовании, позволил сделать вывод о недостаточном масштабе распространения технологии приложений голографических аватаров.

Таким образом, подчеркнем, что интересующий нас, в рамках проводимого исследования, опыт использования приложений голографических аватаров недостаточен. Следовательно, логичным будет отложить исследования в этом направлении до момента накопления достаточного материала практики использования этих приложений, с оценкой преимуществ и недостатков внедрения данной технологии.

2.2 Исследование процессов обслуживания трафика 3D видеопотока в различной среде передачи

Передача различных видов трафиков непосредственно связана с исследованием проблемы влияния среды передачи данных на качество обслуживания. Можно выделить три типа среды передачи данных, а именно: электрические (медные) кабели на основе витых пар проводов (twisted pair); беспроводная среда (wi-fi); оптоволоконные кабели (fiber optic).

Рассмотрим объективно присущие особенности среды передачи данных. Остановимся на трех наиболее важных из них:

- полоса пропускания (частотный диапазон сигналов) и затухание сигнала. Данные характеристики непосредственно связаны между собой. Подчеркнем, что с увеличением частоты сигнала растет его затухание.
- помехозащищенность среды передачи;
- скорость распространения сигнала.

Трафик, как процесс перемещения данных через сеть, также, в зависимости от среды, в которой происходит передача, может быть проводным и беспроводным. Используются различные технологии и протоколы (IEEE 802.3 (Ethernet), TCP/IP). Проводные сети обеспечивают высокую скорость передачи данных (от 10 Мбит/с до 100 Гбит/с и выше) и надежное соединение. Для передачи трафика используют оптоволоконный кабель, витая пара (Cat5e, Cat6, Cat6a и т.д.), коаксиальный кабель.

2.2.1 Исследование передачи трафика 3D видеопотока с использованием оптоволоконного кабеля

Оптоволоконные сети используют световые импульсы для передачи данных, что позволяет достичь очень высоких

Оптоволоконные сети используют световые импульсы для передачи данных, что определяет основные, присущие им, преимущества: высокую стабильность соединения, низкую задержку, высокую скорость, надежность и безопасность передачи данных.

На данном этапе исследования, в модели, разработанной для изучения трафика, в качестве среды передачи был выбран оптоволоконный кабель.

Исходя из положения о том, что для экспериментального исследования необходимо создать условия для воспроизведения явления с минимальным внешним воздействием, на модели, отличающейся простотой в использовании. Была разработана и апробирована модель для наблюдения за поведением трафика, с целью проверки определенных сформулированных предположений.

На рисунке 2.17 представлена структурная схема лабораторного стенда для мониторинга исследуемого трафика.

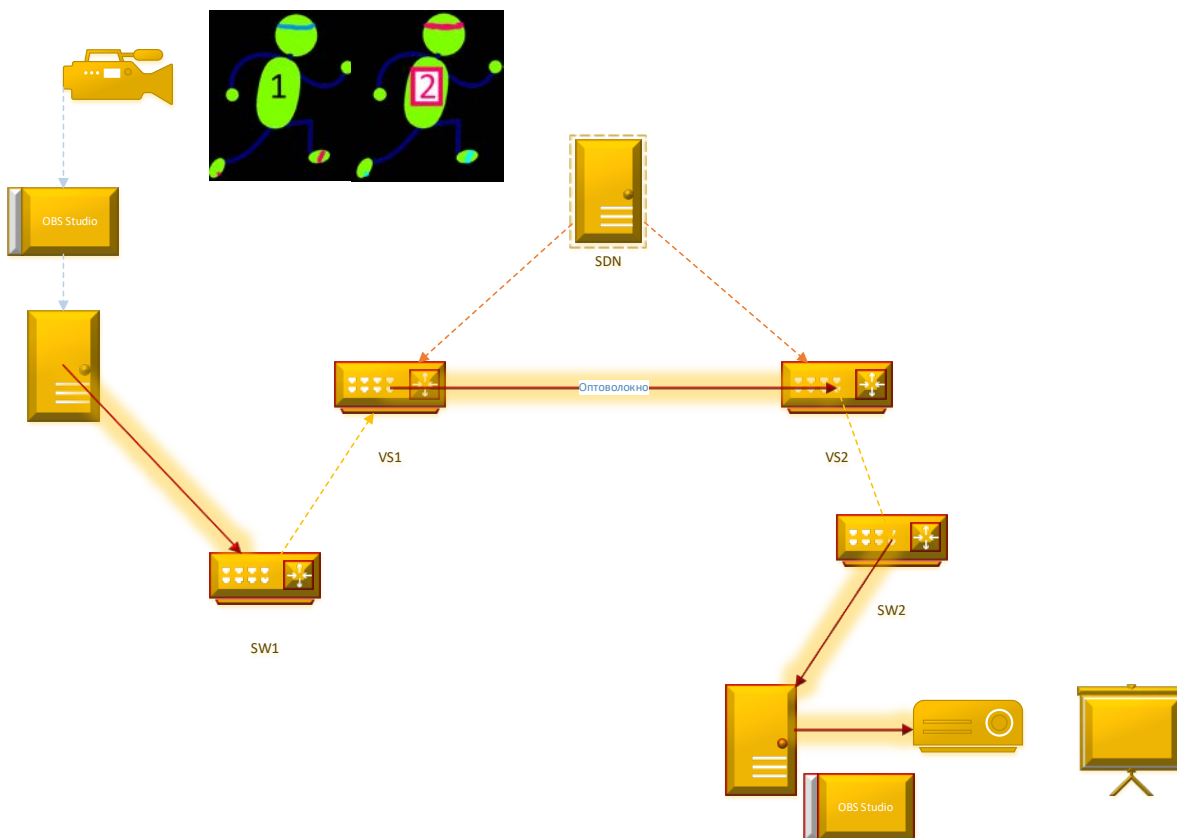


Рисунок 2.17 – Структурная схема лабораторного стенда для мониторинга 3D видеопотока

Эксперимент подразумевал исследование передачи изображения одного движущегося объекта на однотонном фоне и передачи двух объектов в движении на том же однотонном фоне, с последующим сравнением.

Для создания трафика 3D видеопотока на первом этапе, была использована камера RGB-D, которая фиксировала одного человека в движении. Трансляцию и воспроизведение осуществляли с помощью приложения OBS Studio.

В модели, в сеть передачи данных вошли два коммутатора, на которых были реализованы виртуальные коммутаторы с поддержкой openflow. Наблюдение трафика на принимающем коммутаторе осуществляли с помощью виртуального сервера с технологией SDN.

Результаты мониторинга последовательно представлены на рисунках 2.18 и 2.19.



Рисунок 2.18 – График мониторинга при передаче одного подвижного объекта на зеленом фоне

Для передачи двух подвижных объектов на зеленом фоне потребовалось в двое больше пропускной способности, это можно наблюдать на рисунке 2.19.

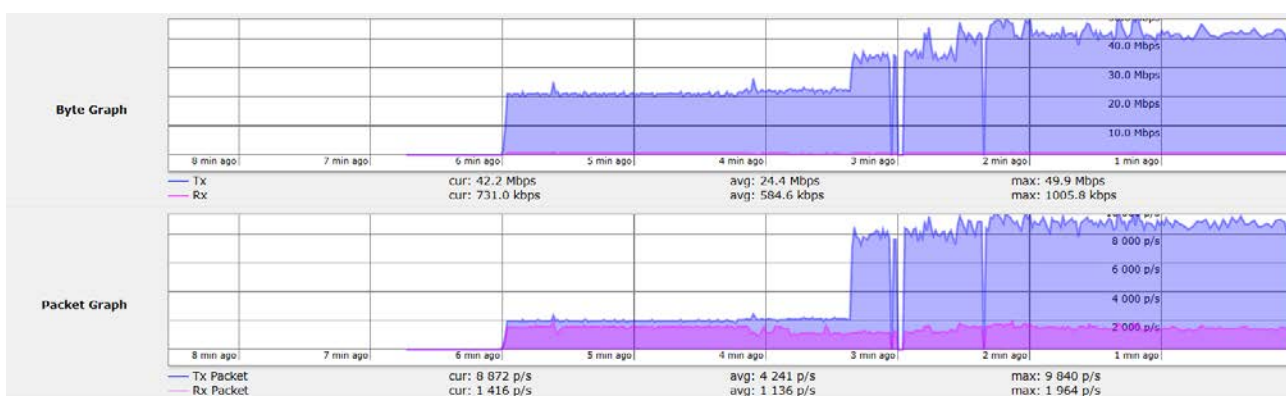


Рисунок 2.19 – Графики мониторинга при передаче двух подвижных объектов на зеленом фоне

На рисунке 2.18 можно отметить, что начало передачи требует 20 Мбит/с пропускной способности. Это происходит в связи с тем, что объекты начинали движения плавно. Для передачи 3D видеопотока, движущегося человека с высокой скоростью, в ускоренном темпе движения, хаотично, требовалось свыше 40 мегабит в секунду.

В результате экспериментального исследования была подтверждена рабочая гипотеза о необходимой пропускной способности для передачи трафика 3D видеопотока.

Разработанные, для экспериментального исследования, модели, могут быть использованы для мониторинга поведения трафика при передаче данных, с последующим анализом взаимозависимостей различных свойств трафика 3D видеопотока в режиме реального времени.

Перспективным направлением дальнейшего исследования может быть проведение сравнительного анализа передачи трафика 3D-видеопотока с помощью технологии SDN и Openflow и без их использования.

2.2.2 Исследование передачи трафика 3D видеопотока с использованием беспроводной среды (Wi-Fi)

Современная тенденция расширения сферы использования (Wi-Fi) в качестве среды передачи данных обусловили необходимость изучения трафика 3D видеопотока и обеспечения инновационных услуг голографического типа коммуникации

Действительно, мобильность, простота развертывания, низкая стоимость установки, возможность создания общественных точек доступа и подключения устройств интернета вещей (IoT), подтверждают перспективность дальнейшего развития этой технологии.

Исследуя передачу голографических копий в различной среде, необходимо провести, также, изучение передачи голографического контента, используя Wi-Fi. Для данного этапа исследования была разработана структурная модель натурального эксперимента. Схема лабораторного стенда отображена на рисунке 2.20.

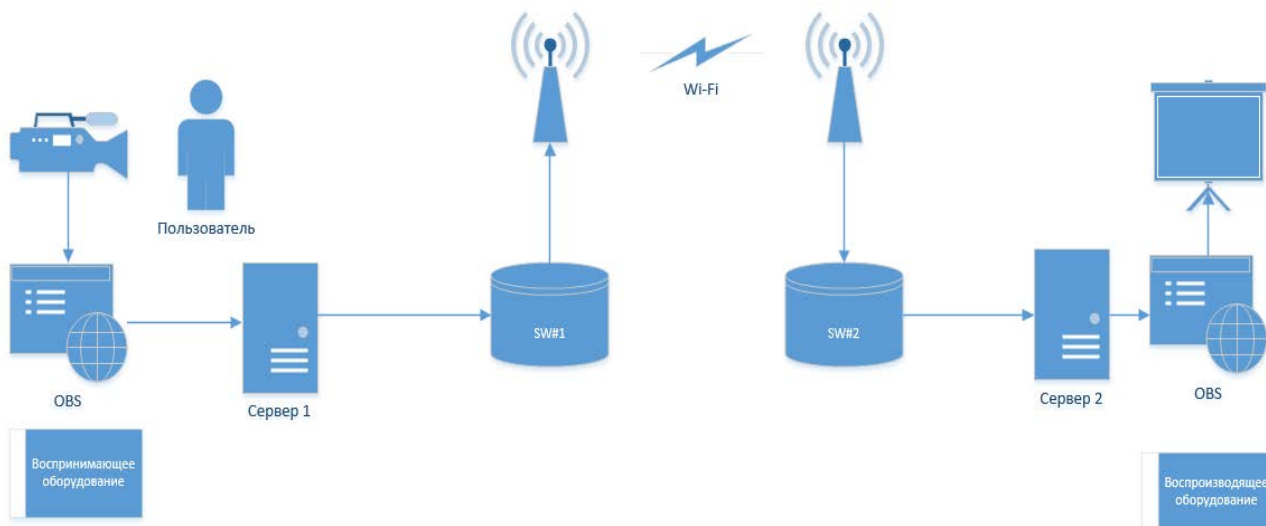


Рисунок 2.20 – Схема лабораторного стенда

Комплектация необходимого оборудования для лабораторного стенда осуществлялась на современной технической базе. Взаимодействие между коммутаторами осуществлялось по беспроводному каналу.

Далее приведены графические материалы мониторинга трафика на коммутаторах. Результаты передачи 3D видеопотока на передающей стороне приведены на рисунке 2.21.

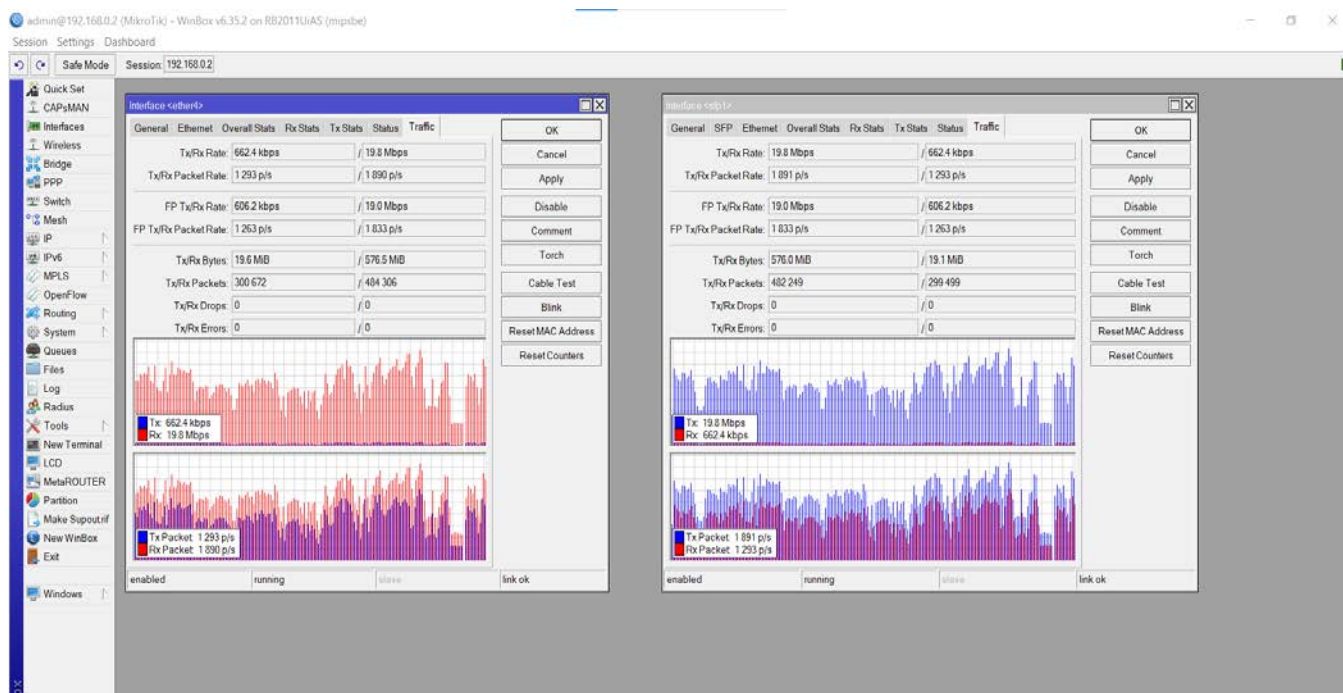


Рисунок 2.21 – Результаты мониторинга передачи 3D видеопотока на коммутаторах.

Интенсивность передачи пакетов в течение сеанса наблюдений представлена на рисунке 2.22.

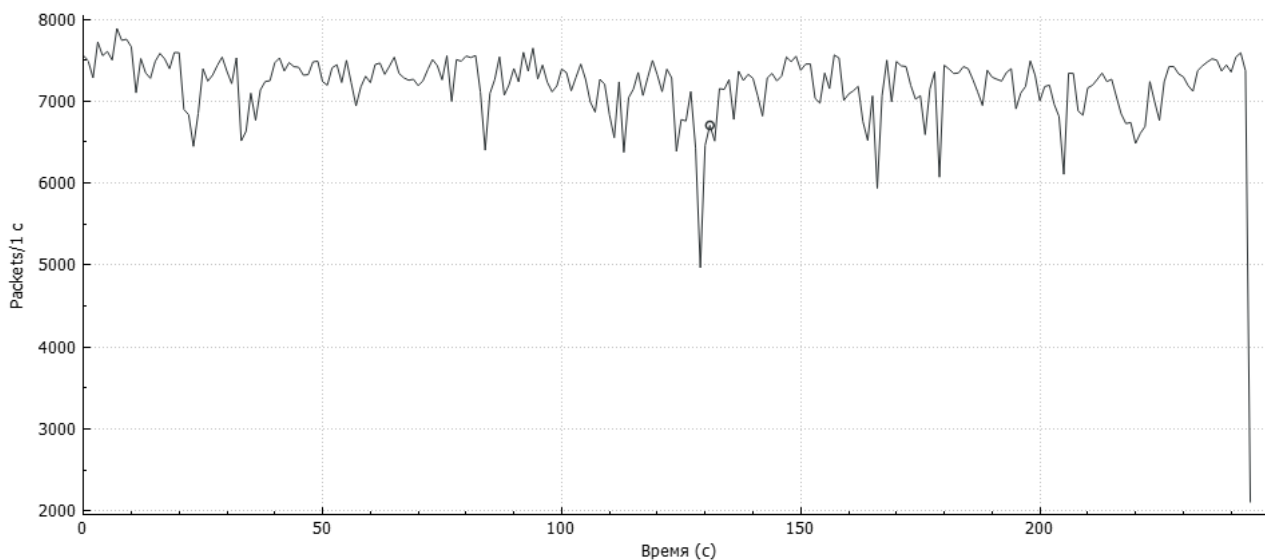


Рисунок 2.22 – Интенсивность передачи пакетов в течение сеанса наблюдений.

В таблице 2.2 представлены длины пакетов, собранные с помощью программного обеспечения Wireshark.

Таблица 2.2 – Длины пакетов трафика передачи данных

Тема емент	Количество	Среднее	Мин. Значение	Макс. Значение	Скорость (мс)	Процент	Скорость всплеска	Начало всплеска
Пакет Длина	332011	707,26	42	1514	2,1683	100%	4,92	128,49
0-19	0 -	-	-	-	0	0,00%	-	-
20-39	0 -	-	-	-	0	0,00%	-	-
40-79	472639	69,13	54	79	1,9347	26,85%	4,32	92,017
80-159	334	115,67	80	159	0,0014	0,02%	0,05	205,185
160-319	620	237,39	160	319	0,0025	0,04%	0,04	72,091
320-639	1237	483,34	320	639	0,0051	0,07%	0,04	9,625
640-1279	3703	1004	640	1279	0,0152	0,21%	0,04	0,266
1280-2559	1281783	1512,14	1280	1514	5,2469	72,82%	8,15	234,599
2560-5119	0 -	-	-	-	0	0,00%	-	-
5120 и больше	0 -	-	-	-	0	0,00%	-	-

Итак, при использовании беспроводной среды передачи данных (Wi-Fi) между коммутаторами, возможно ухудшение качества воспроизведения голографического контента. Следовательно, для внедрения данной технологии в массовое пользование, необходимо решать задачу повышения устойчивости сети к пиковым нагрузкам и влиянию внешней среды.

2.2.3 Передача трафика 3D видеопотока с использованием технологии Ethernet

Для проведения эксперимента была построена натурная модель сети, структура которой представлена на рисунке 2.23. С ее состав входит следующее оборудование: камера-сенсор Microsoft Kinect, которая позволяет производить запись движущегося объекта в реальном времени, два сервера, два коммутатора Mikrotik (SW#1, SW#2) и голографический лазерный проектор LG поддержкой 3D для воспроизведения объемного изображения. Среда передачи данных между коммутаторами – оптоволокно, между коммутатором и сервером – патч-корд SC-SC или коммутационный шнур UTP четырехпарный cat.5e 3.0м, так как в сетях доступа используется витая пара.

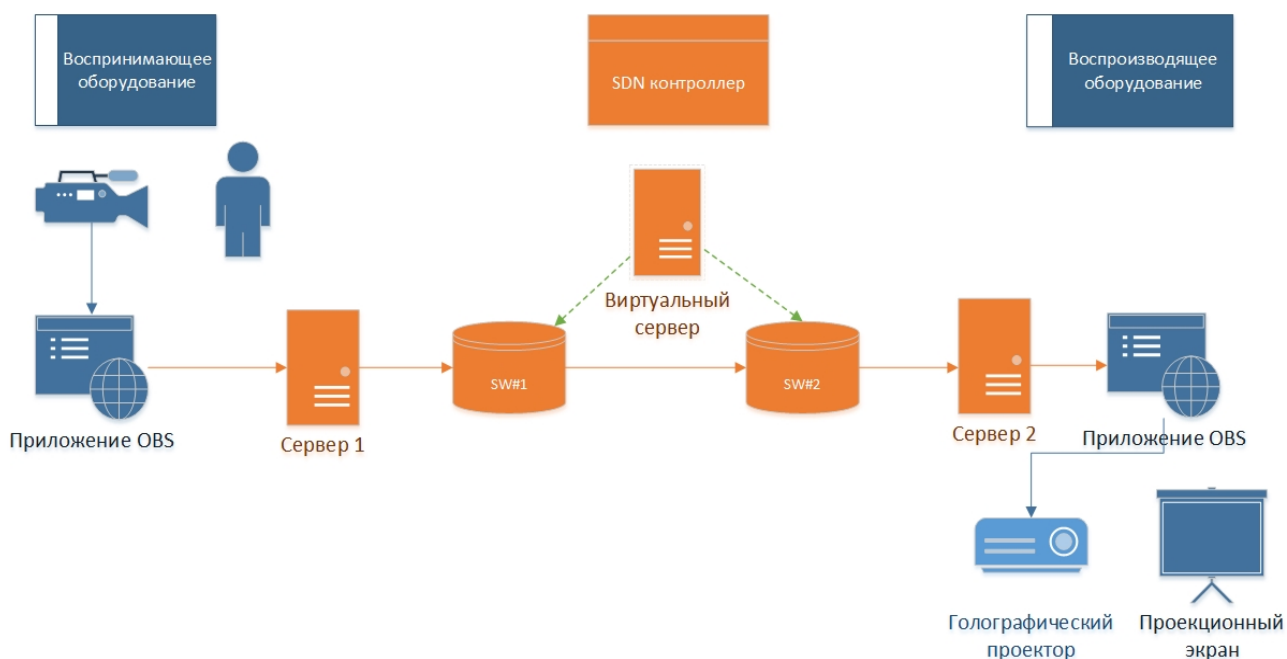


Рисунок 2.23 – Структура модельной сети

Видео-трафик был получен при помощи 3D-камеры Microsoft Kinect (Full HD (1920×1080)). Формирование 3D-видеопотока было реализовано с помощью специального программного инструмента – OBS Studio (Open Broadcaster

Software) [136]. Для перехвата и анализа сетевого трафика применялась программа Wireshark [137]. На виртуальном сервере были запущены веб-интерфейсы коммутаторов для мониторинга трафика. Для виртуализации уровня управления сетью был реализован SDN контроллер.

На рисунке 2.24 приведен график, демонстрирующий динамику изменения интенсивности пакетов за сеанс наблюдения (350 с – общее время фиксации трафика). Трафик был получен при фиксации 3D-камерой движений человека и передаче полученного видеоизображения через модельную сеть на лазерный голографический проектор для воспроизведения.

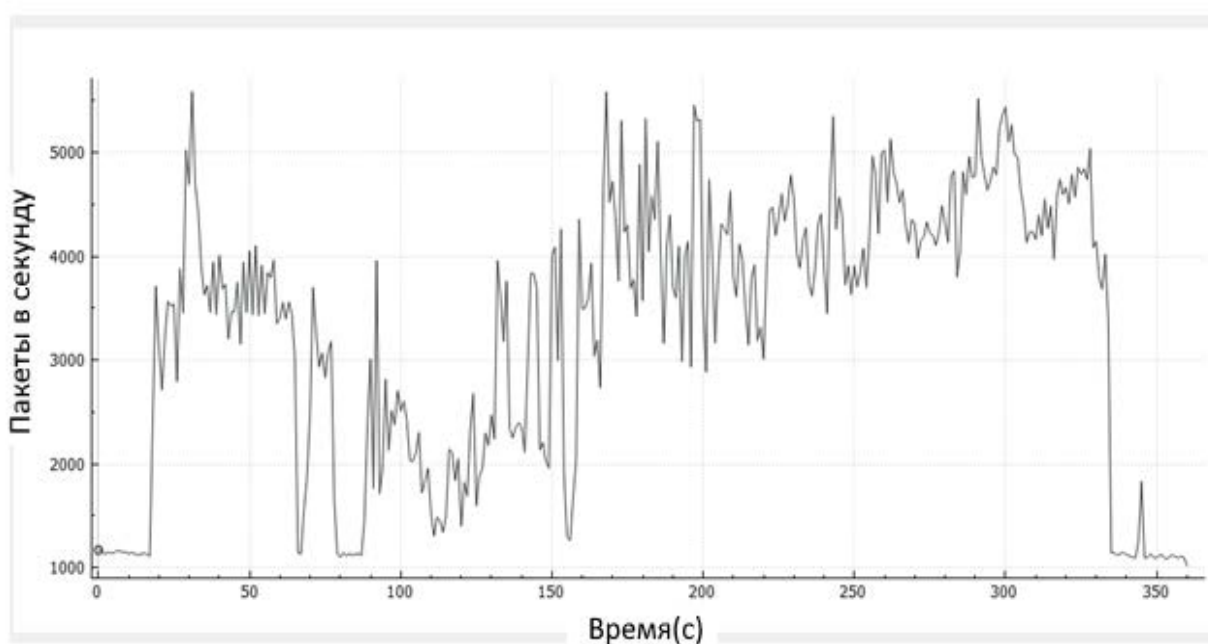


Рисунок 2.24 – Интенсивность передачи пакетов в течение сеанса наблюдений

Основные параметры исследуемого трафика приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Численные значения параметров трафика

Параметр	Значение
Интенсивность пакетов	$3290,7 \pm 113$ пакетов/с
Интенсивность трафика	$32,3 \pm 1,1$ Мбит/с

Средний размер пакета	1226 ± 1 байт
Общее количество наблюдаемых пакетов	1151745 шт.
Продолжительность наблюдений	350 с
Общий объем трафика	1412,04 Мбайт

На рисунке 2.25 приведена гистограмма, иллюстрирующая распределение длин пакетов.

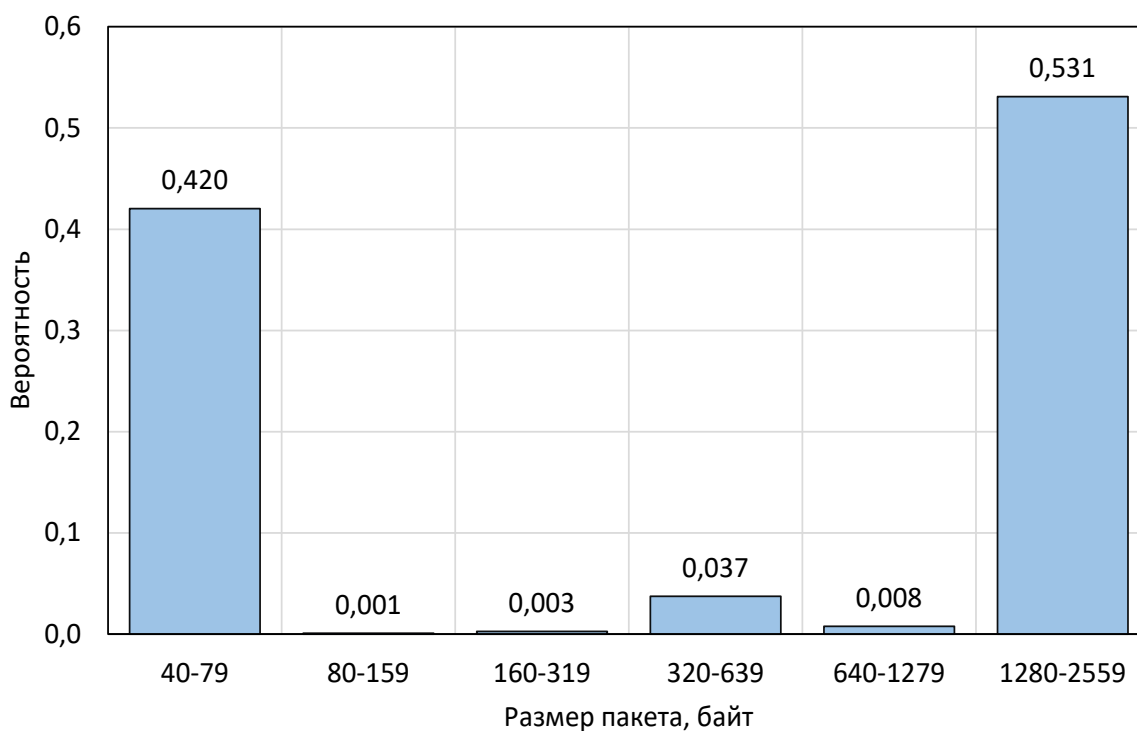


Рисунок 2.25 – Распределение длин пакетов

Из приведенной гистограммы видно, что наибольшую долю пакетов (более 95%) составляют пакеты размером от 40 до 80 байт и пакеты размером от 1280 до 2560 байт. Средняя длина пакета и среднеквадратическое отклонение от нее составили 1226 байт и 544 байт соответственно. Этот результат имеет значение

для описания модели обслуживания потока сетью как системой массового обслуживания в части выбора модели времени передачи пакета.

2.3 Исследование характеристик сетевого трафика

Одним из способов описания случайных потоков является определение его автокорреляционной функции (АКФ), которая наглядно описывает зависимость настоящего состояния процесса от его прошлого, что позволяет расширить представления о свойствах случайного потока. АКФ вычисляется по формуле [138]

$$r(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{(N - \tau)\sigma^2(X)}, \quad (1)$$

где \bar{X} – выборочное среднее ряда X ; $\sigma^2(X)$ – выборочная дисперсия ряда X , $k=0,1,\dots$

На рисунке 2.26 отображена автокорреляционная функция (АКФ) потока на интервале от 0 до 50 мс.

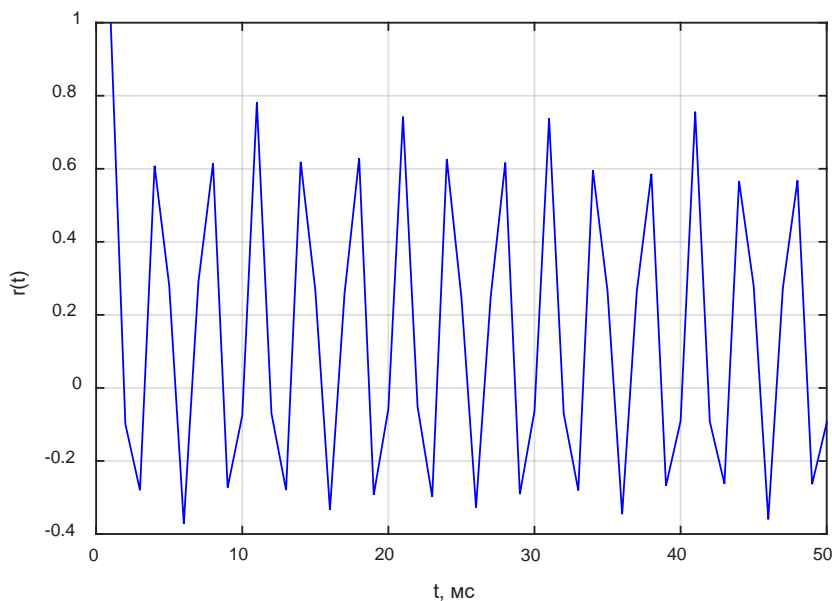


Рисунок 2.26 - АКФ потока на интервале от 0 до 50 мс

Как видно из рисунка 2.26, на данном интервале АКФ представляет собой функцию с выраженной периодичностью. Это позволяет предположить сходность процессов передачи пакетов для разных интервалов времени.

На рисунке 2.27 приведена АКФ для интервала времени от 0 до 30 с.

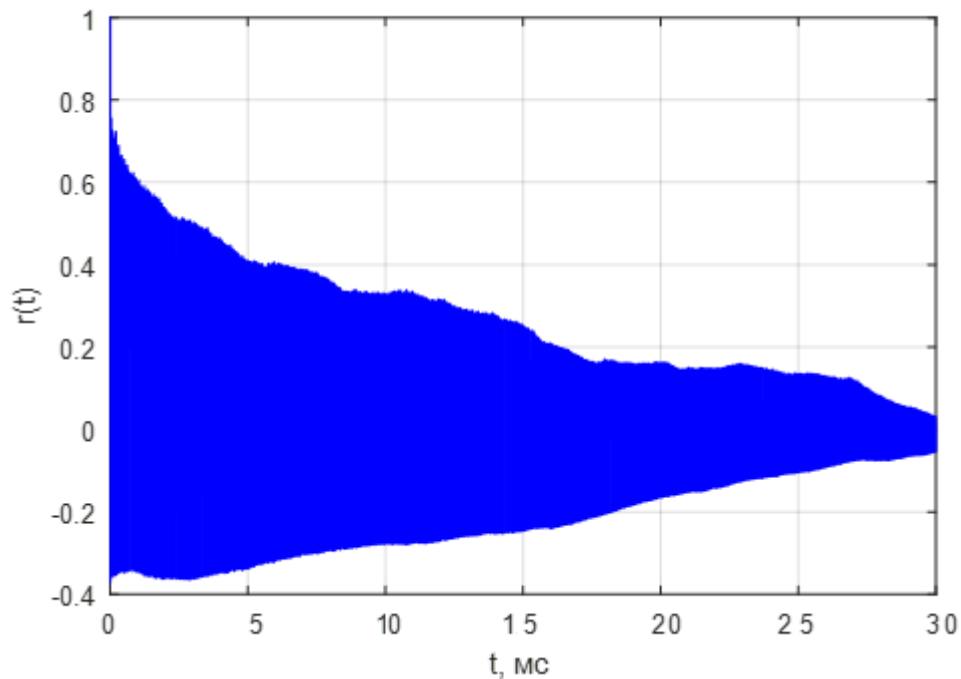


Рисунок 2.27 АКФ потока на интервале от 0 до 30 с

Из графика на рисунке 2.27 видно, что значение АКФ медленно убывает в течении времени наблюдения, при этом функция сохраняет свойства периодичности на рисунке 2.26 на всем интервале наблюдений.

На рисунке 2.28 представлена гистограмма распределения интервалов времени между пакетами.

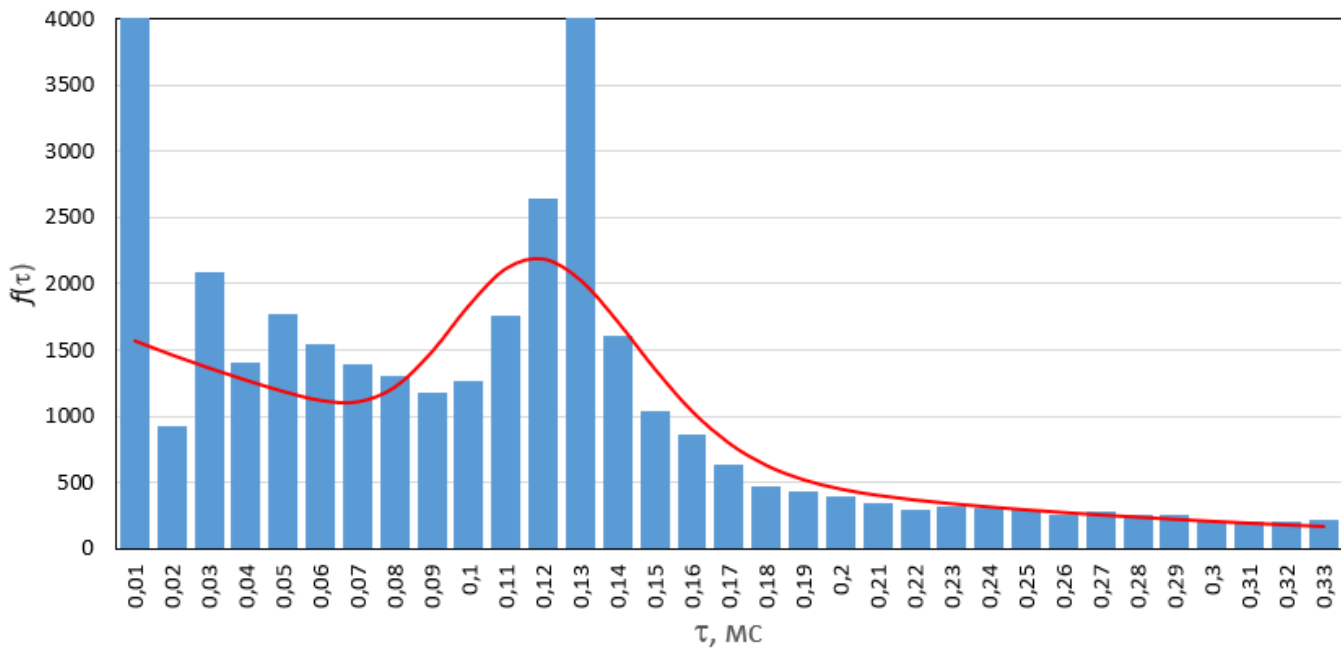


Рисунок 2.28 Распределение интервалов времени между пакетами и их функция плотности вероятности

Из рис. 6 видно, что распределение длин пакетов имеет мультимодальный характер. Плотность вероятности интервалов времени между пакетами описывается смешанным распределением вида:

$$f(x) = \sum_{i=1}^k \eta_i f_i(x), \quad \sum_{i=1}^k \eta_i = 1, \quad (2)$$

где η_i – численный коэффициент; $f_i(x_i)$ – функция плотности вероятности.

В приведенной аппроксимации (красная кривая на рис. 6) $k=2$; $f_1(x)$ представляет собой плотность вероятности экспоненциального распределения

$f_1(x) = \frac{1}{\theta} e^{-\frac{1}{\theta}x}$; $f_2(x)$, $f_3(x)$, $f_4(x)$ – плотности вероятности гамма-распределения

$f_i(x) = \frac{x^{\beta_i-1}}{\theta_i^{\beta_i} \Gamma(\beta_i)} e^{-\frac{1}{\theta_i}x}$, $i=2, 3, 4$, где θ_i и β_i – параметры распределений.

Численные значения параметров распределения приведены в табл. 2.4

Таблица 2.4 - Численные значения параметров распределения

k	η_i	θ_i	β_i
1	0,4	0,00014	1

2	0,6	$5 \cdot 10^{-6}$	25
---	-----	-------------------	----

Для полученных результатов изменений, как временного ряда, была произведена оценка свойств самоподобия путем вычисления параметра Хёрста, который характеризует поток и является мерой длительности долгосрочной зависимости процесса [139, 140]. Для каждого временного ряда можно вычислить его показатель Херста как коэффициент регрессии логарифма нормированного накопленного размаха к логарифму длины выборки. Детерминация такой регрессии покажет, с какой точностью исследуемый процесс можно аппроксимировать процессом Херста. Для определения параметра Херста H в частности используют метод R/S-анализа временных рядов: $R/S=(N/2)^H$, где R – размах временного ряда, S – среднеквадратичное отклонение, N – объем выборки [141]. На рис. 2.29 приведена зависимость логарифма нормированного размаха (R/S) от логарифма размера временного интервала.

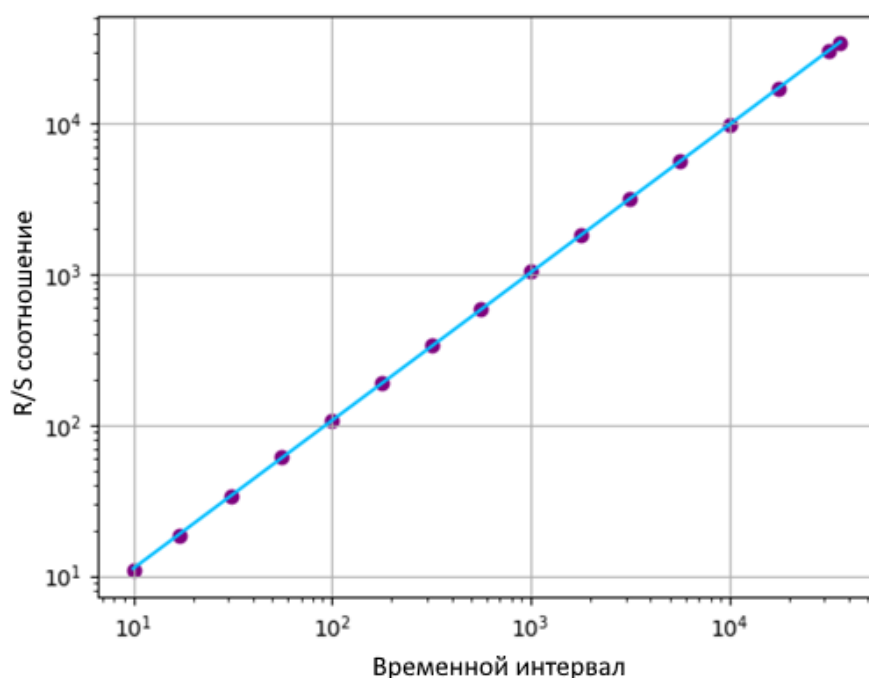


Рисунок 2.29 - Зависимость логарифма нормированного размаха (R/S) от логарифма размера временного интервала

Для оценки параметра Хёрста H было использовано программное обеспечение Mathcad [142].

Полученная оценка показала значение $H \approx 0,75$. Это позволяет сделать вывод о самоподобии 3D-видеотрафика.

На основании вышеизложенного, отметим, что в 3D-видеопотоке доминируют пакеты двух размеров: большого (более 50%) и малого (более 40%) размера, их суммарная доля составляет более 95%.

2.4 Исследование параметров и проведение сравнительного анализа трафика мультимедиа и голографического трафика

2.4.1 Разработка модели: оборудование, структура

В рамках нашего исследования был использован сегмент сети, предназначенный для НТС теле присутствия. Данный сегмент состоял из 3D камеры, ПК отправителя данных (к которому подключена 3D камера), сервера, ПК получателя данных, и подключенному к данному ПК голографическому оборудованию.

Натурный эксперимент проводился в лаборатории MEGANET LAB 6G.

Генерации данных от устройств интернета вещей осуществлялась с использованием программы iperf3. Передача данных осуществлялась в направлении от ПК отправителя до ПК получателя с передачей данных по протоколу UDP, пропускной способностью 10 Мбит/с и размером буфера для чтения/записи данных.

Для генерации данных мультимедиа на ПК отправителя осуществлялась видеотрансляция по протоколу UDP с использованием программы VLC Media Player. Прием видеотрансляции осуществлялся на ПК получателя данных также с использованием программы VLC Media Player.

Камера с поддержкой 3D использовалась и при видеотрансляции и при генерации голографического трафика.

Имитация передачи служебного трафика осуществлялась с использованием команды ping.

Структура сети показана на рисунке 2.30.

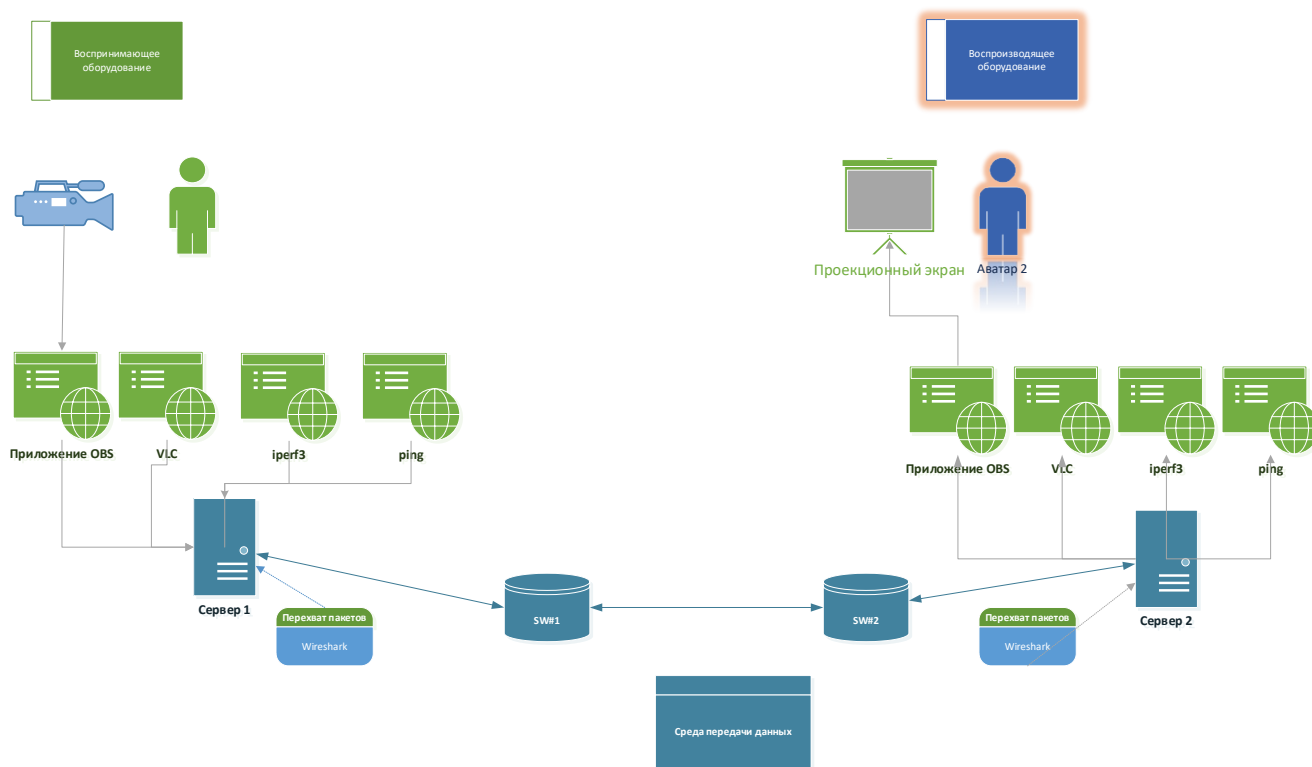


Рисунок 2.30 - Структура сети

2.4.2 Статистический анализ результатов натурального эксперимента

При проведении натурального эксперимента на ПК, передающем данные, осуществлялся сбор служебного трафика, трафика мультимедиа, трафика «Интернета Вещей» (IoT) и трафика голографических копий.

Для каждого из четырех видов перехваченного трафика проводилось исследование распределения промежутков между вызовами и длинами пакетов.

На основе проведенного анализа размера пакетов, было установлено, что длина пакетов для каждого трафика может быть описана следующим образом:

1. Служебный трафик (ping) генерировался с размером пакета равным 74 байтам.

2. Трафик мультимедиа (от VLC Media Player) дискретный, состоящий из пакетов трех длин – 1358 байт с вероятностью появления 92,87%, 590 байт с вероятностью появления 6,79% и 60 байт с вероятностью появления 0,34%

3. Трафик iperf3, имитирующий нагрузку от устройств «Интернета Вещей», описывается дискретным распределением длин пакетов с вероятностью, представленной в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Распределение длин пакетов для трафика, имитирующего нагрузку от устройств «Интернета Вещей»

Длина пакета, байт	288	480	672	870	1074	1278	1482	1686
Вероятность распределения, %	6,20	5,17	4,35	3,75	5,32	7,16	9,10	58,95

4. Распределение длин пакетов для голографического трафика представляет собой сумму дискретных распределений:

- Распределения, при котором длина пакета равна 1514 байтам. Доля данного распределения относительно суммарного распределения длин пакетов голографического трафика составляет 0,3745.
- Триангулярного распределения с минимальной, максимальной длиной пакета и модой равными 64, 75 и 75 байтам соответственно. Доля данного распределения относительно суммарного распределения длин пакетов голографического трафика составляет 0,6255.

Результаты статистического анализа эмпирических данных распределения промежутков между вызовами оформлены в виде гистограмм. На графиках отображены полученные функции распределения промежутков между вызовами.

Собранный голографический трафик обладает средним значением промежутков между вызовами равными 0,14 мс. Голографический трафик может быть описан непрерывным распределением, представляющим собой сумму

экспоненциального и гамма распределения с параметрами, представленными в таблице 2.6

Гистограмма распределения интервалов между вызовами для голографического трафика представлена на рисунке 2.31.

Функция плотности вероятности распределения промежутков между вызовами для голографического трафика может быть представлена формулой:

$$f(t) = \eta_1 f_1(t_1) + \eta_2 f_2(t_2) \quad (3)$$

где $f_1(t_1) = e^{-\lambda t}$ for $t > 0$, $f_2(t_2) = \text{gamma } f(t)$

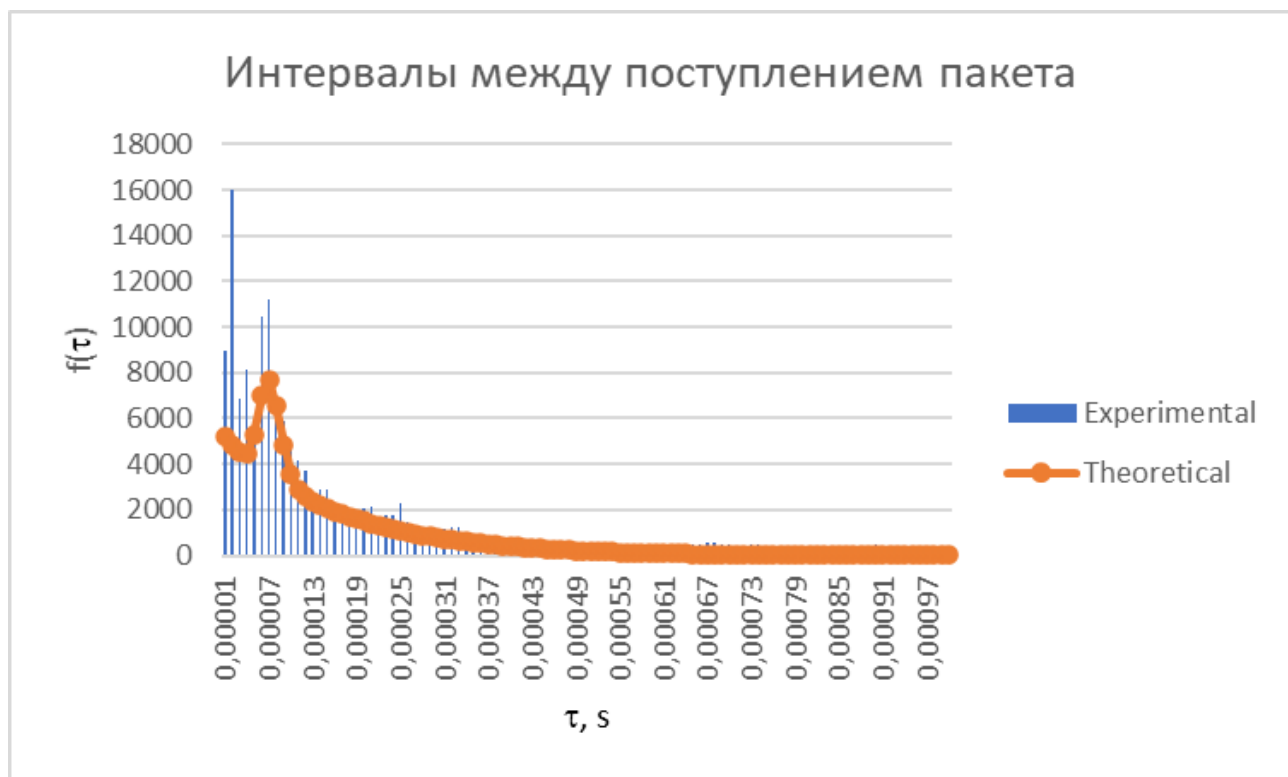


Рисунок 2.31 - Распределение интервалов времени между пакетами и их функция плотности вероятности для голографического трафика

Таблица 2.6 - Численные значения параметров распределения для голографического трафика

№	Функция	Значение η_i	Численное значение параметров распределений
---	---------	-------------------	---

			θ_i	β_i
1	Exponential	0,85	$1,538 \cdot 10^{-4}$	1
2	Gamma	0,15	$2,9 \cdot 10^{-6}$	25

Трафик мультимедиа обладает средним значением промежутков между вызовами равными 5,47 мс. Трафик мультимедиа может быть описан непрерывным распределением, представляющего собой сумму четырех гамма распределений с параметрами, представленными в таблице 2.7.

На рисунке 2.32 отображена гистограмма распределения интервалов между вызовами для трафика мультимедиа.

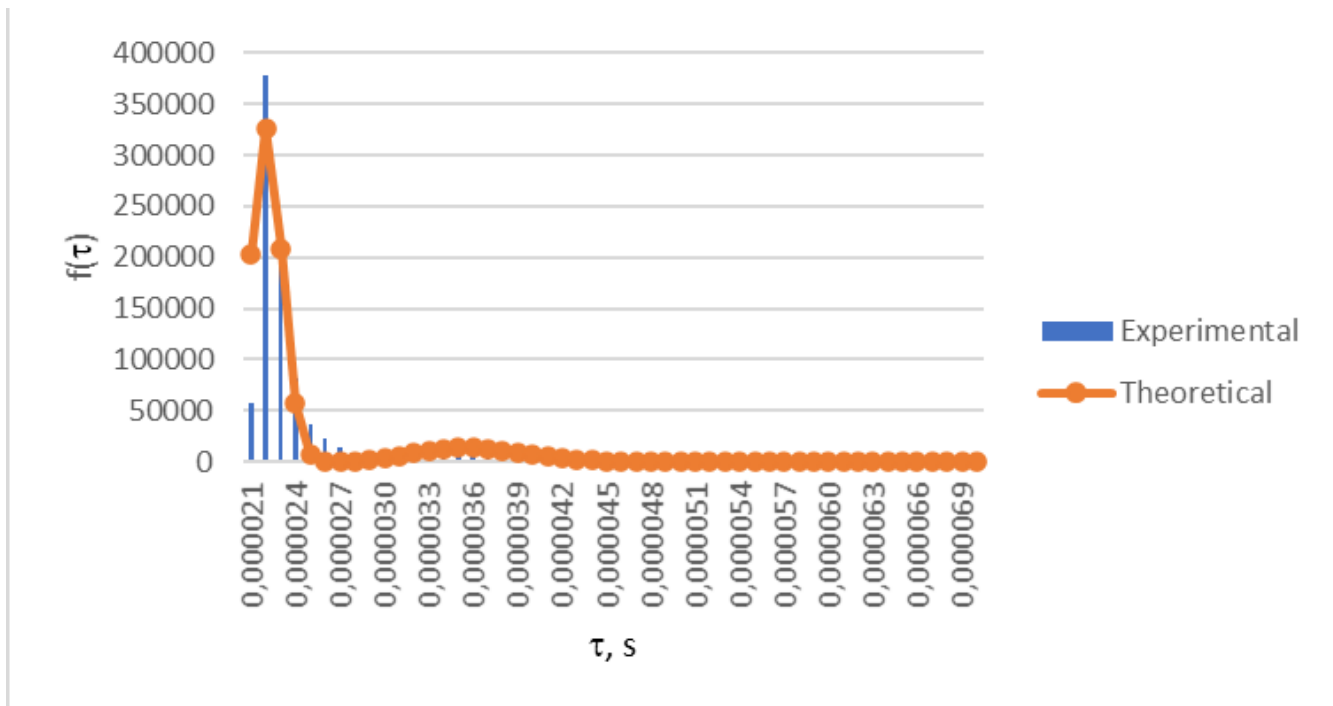


Рисунок 2.32 - Распределение интервалов времени между пакетами и их функция плотности вероятности для трафика мультимедиа.

Функция плотности вероятности распределения промежутков между вызовами для трафика мультимедиа может быть представлена формулой:

$$f(t) = \eta_1 f_1(t_1) + \eta_2 f_2(t_2) + \eta_3 f_3(t_3) + \eta_4 f_4(t_4) \quad (4)$$

где $f_1(t_1) = e^{-\lambda t}$ при $t > 0$, $f_2(t_2) = \text{gammaf}(t)$, $f_3(t_3) = \text{gammaf}(t)$, $f_4(t_4) = \text{gammaf}(t)$

Таблица 2.7 - Численные значения параметров распределения для трафика мультимедиа

№	Функция	Значение η_i	Численное значение параметров распределений	
			θ_i	β_i
1	Gamma	0,85	450	$4,9 * 10^{-8}$
2	Gamma	0,1252	100	$3,6 * 10^{-7}$
3	Gamma	0,01	$2 * 10^7$	$1 * 10^{-8}$
4	Gamma	0,0148	$2 * 10^7$	$1,17 * 10^{-8}$

Трафик, имитирующий нагрузку от устройств интернета вещей, обладает средним значением промежутков между вызовами равными 1,089 мс. Данный трафик может быть описан непрерывным распределением, представляющего собой сумму одного распределения вейбулы, четырех гамма распределений и одного нормального с параметрами, представленными в таблице 2.8.

На рисунке 2.33 отображена распределение интервалов времени между пакетами и их функция плотности вероятности для трафика, имитирующего нагрузку от устройств «Интернета вещей».

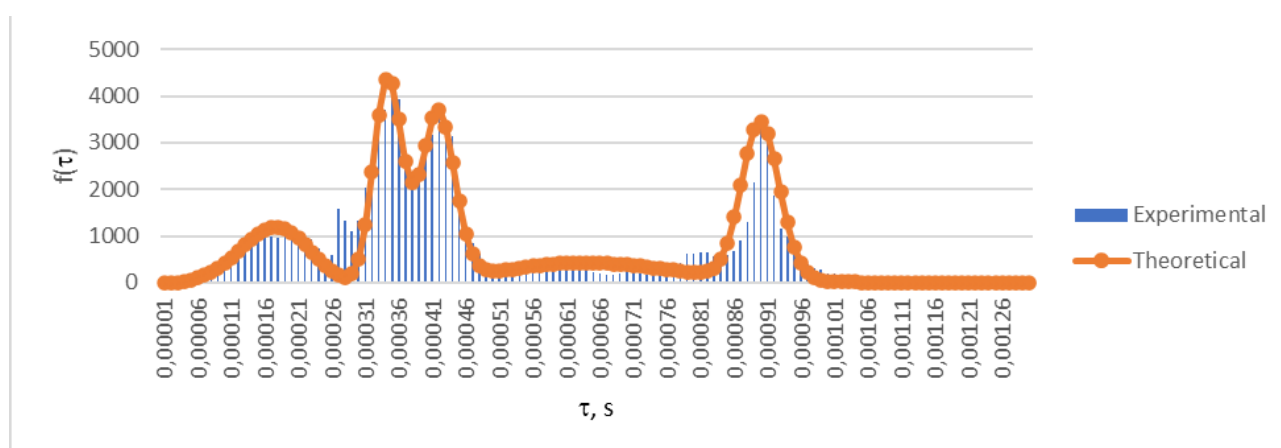


Рисунок 2.33 - Гистограмма плотности вероятности распределения интервалов между вызовами для трафика, имитирующего нагрузку от устройств «Интернета вещей».

Функция плотности вероятности распределения промежутков между вызовами для трафика, имитирующего нагрузку от устройств «Интернета вещей», может быть представлена формулой:

$$f(t) = \eta_1 f_1(t_1) + \eta_2 f_2(t_2) + \eta_3 f_3(t_3) + \eta_4 f_4(t_4) + \eta_5 f_5(t_5) + \eta_6 f_6(t_6) \quad (5)$$

где $f_1(t_1) = 1 - e^{(-t/\beta)^\alpha}$ (Weibull) for $t > 0$, $f_2(t_2) = \text{gamma}f(t)$, $f_3(t_3) = \text{gamma}f(t)$, $f_4(t_4) = \text{gamma}f(t)$, $f_5(t_5) = \text{gamma}f(t)$, $f_6(t_6) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t-\mu}{\sigma})^2}$ (Normal)

Таблица 2.8 - Численные значения параметров распределения для трафика, имитирующего нагрузку от устройств «Интернета вещей».

Функция	Значение η_i	Численное значение параметров распределений	
		θ_i	β_i
Weibull	0,15	4	0,00019
Gamma	0,24	250	0,00000138
Gamma	0,22	300	0,0000014
Gamma	0,14	25	0,0000265
Gamma	0,24	1000	0,0000009
Normal	0,01	0,071	0,015

Служебный трафик (представленный сообщениями ping) обладает средним значением промежутков между вызовами равными 512,78 мс. Служебный трафик (представленный сообщениями ping) может быть описан нормальным распределением по формуле:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (6)$$

где, $\sigma = 0,512784$ и $\mu = 0,263251$

На рисунке 2.34 представлено распределение интервалов времени между пакетами и их функция плотности вероятности для служебного трафика.

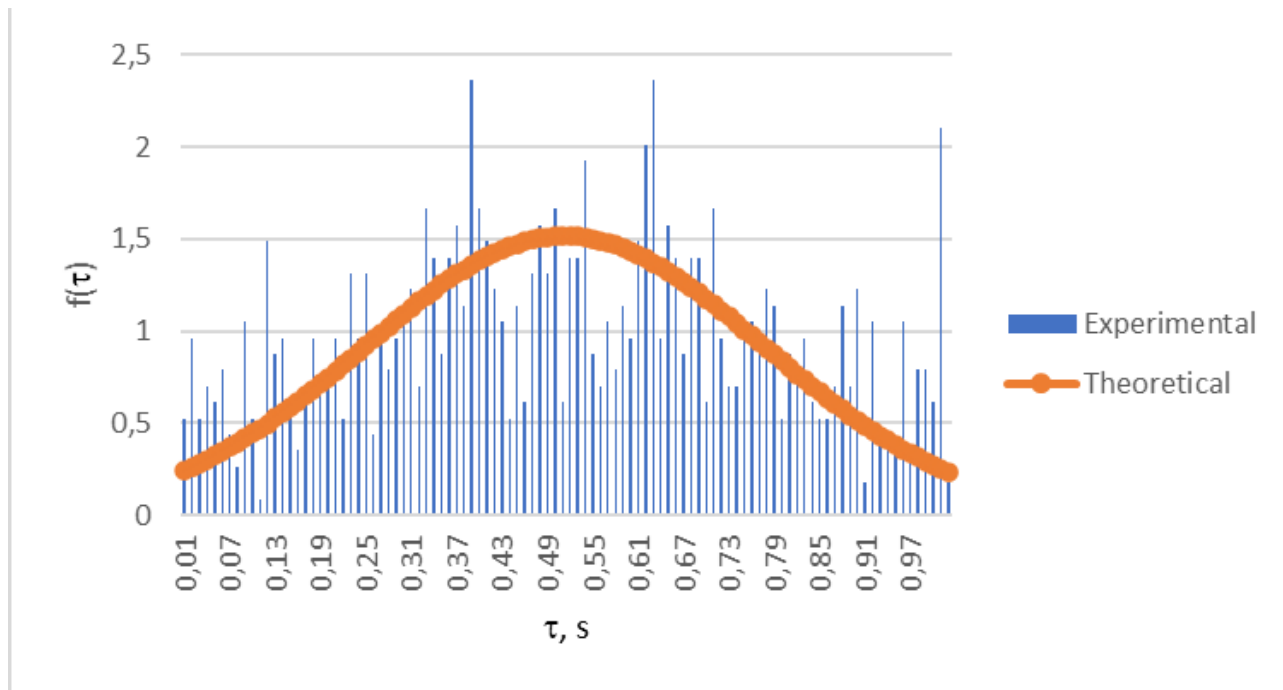


Рисунок 2.34 - Гистограмма плотности вероятности распределения интервалов между вызовами для служебного трафика

Основные параметры различных видов трафика, полученные в результате эксперимента представлены в таблице 2.9

Таблица 2.9 - Основные параметры собранного трафика.

Вид трафика	Средний размер пакета данных, байт	Пропускная способность, пакеты/с	Пропускная способность, Мбиты/с	Пропускная способность, Кбайты/с	Среднее значение промежутков между вызовами, с

Служебный	74	1,95	0,017848	2,231	0,512784
Мультимедиа	1301	182,9	1,904	238	0,005466
Интернета Вещей	1392	918,13	10,23	1278,186	0,001089
Голографических копий	986	6929,9	54	6831	0,000148

2.5 Выводы к 2 главе

Актуальная тенденция экспонентного увеличения объема трафика и, соответственно, возрастание нагрузки на сеть, обозначает серьезную проблему в сфере обеспечения ресурсов сети.

Основные выводы из исследования трафика 3D-видеопотока можно сформулировать следующим образом.

1. Распределение интервалов времени между пакетами имеет мультимодальное распределение и может быть описано смешанным распределением.

2. Анализ АКФ и параметра Хёрста ($H \approx 0,75$) показали выраженные свойства самоподобия трафика.

Полученные характеристики трафика позволяют судить о нем как о случайном процессе, а также получить численные оценки основных его параметров. Набор данных достаточен для выбора моделей и расчета основных параметров обслуживания трафика.

Высокая пропускная способность, низкая задержка, надежность соединения и стандартизация сетей связи являются необходимыми условиями для успешной реализации голографической коммуникации.

Приведенные выше результаты могут быть использованы для моделирования обслуживания 3D-видеотрафика в сети связи. Результаты исследования распределения интервалов между пакетами и длин пакетов дает

возможность использования приближенных моделей из теории массового обслуживания для описания временных параметров функционирования сети связи.

Также, результатом исследования стала разработанная аналитическая модель трафика 3D-видеопотока, полученная на основе данных натурального эксперимента и результатов статистической обработки, которая может быть использована при решении задач исследования трафика, а также планирования новых сетей и услуг связи с учетом требований к качеству обслуживания.

Перспективным направлением исследования может стать более разностороннее изучение голографического трафика и проблем передачи голографических копий.

Необходимость внедрения новых способов визуализации объектов на основе голографических технологий, создает потребность в исследовании свойств нового вида трафика, передающего 3D видеопоток в режиме реального времени.

Важность и актуальность проблемы подчеркивает значительное число исследований, посвященных изучению характеристик видео-трафика, мультимедийного трафика, трафика 3D-изображений, моделированию трафика в условиях развития сетей связи.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ТРАФИКА В СЕТИ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

В главе рассматриваются результаты исследования, полученные на основе разработанной имитационной модели. Определены базисные шаги для разработки и подтверждения гипотезы данного исследования. Приводится обоснование положения гипотезы о том, что при агрегации большого количества потоков голографического трафика, наблюдаем, как сформированный поток приобретает свойство простейшего потока.

Приведены данные интервала между прибытиями, времени обслуживания и времени доставки, полученные с использованием имитационного моделирования.

Развитие инновационных информационно-коммуникационных технологий потенциально вызывает необходимость решать все новые задачи в сфере передачи информации в сетях связи. Поступательное движение, от разработки требований к параметрам сети при передаче голосовых сообщений к формированию характеристик сети для получения качественного видео-контента, с высокой долей вероятности продолжится в направлении изучения необходимых условий для обеспечения качественной передачи голографического трафика. Прослеживается общая глобальная тенденция активизации работы специалистов над проблемой внедрения голографического типа коммуникаций (НТС). Предоставить стабильное качество обслуживания при передаче голографических копий, будет возможно при условии проведения разноаспектных исследований характеристик трафика.

В диссертации Парамонова разработан и исследован комплекс моделей трафика для сетей связи общего пользования [143]. М.А. Маколкина исследовала методологию представления трафика дополненной реальности, разработала комплекс моделей и методов оценки трафика дополненной реальности и его выгрузки в сети [144]. В статье [145] приведен анализ свойств мультимедийного трафика. В следующем исследовании приводится разработка аналитической модели обслуживания мультимедийного трафика с распределением Парето,

позволяющей рассчитывать показатели своевременности обслуживания трафика в сетевом устройстве коммутации с помощью аналитических выражений, полученных на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования [146]. Авторы изучили особенности видеотрафика для сетей связи следующего поколения [147]

3.1 Постановка задачи для данного этапа исследования

Перспективы появления новых видов услуг при дальнейшем развитии информационно-коммуникационных технологий становятся все более четко обозначаемыми. Решение проблемы организации обслуживания голографического трафика постепенно переходит в практическую область и приобретает значение приоритетного направления.

Цель данного исследования – разработать модель обслуживания голографического трафика, позволяющую оценить задержку при прохождении пакета по сети связи.

Время обслуживания, описывается с помощью аналитических выражений, полученных на основе аппроксимации результатов натурального эксперимента.

Для реализации поставленной цели определены следующие задачи:

- подобрать соответствующие аналитические выражения, которые могут быть использованы для построения модели;
- построить модель для первоначальной оценки характеристик сети;
- провести имитационное моделирование обслуживания голографического трафика со смешанным распределением при различном количестве источников;
- подготовить анализ известных способов аппроксимации результатов имитационного моделирования;
- провести анализ конечных показателей, полученных в результате имитационного моделирования.

3.2 Моделирование агрегированного потока голографического трафика

3.2.1 Описание имитационной модели

Для изучения свойств агрегированного трафика, были использованы следующие методы моделирования: аналитический и имитационный.

Методы имитационного моделирования, как универсальные методы исследования количественной оценки свойств функционирования сетей, позволяют реализовать программу эксперимента изучения свойств агрегированного трафика.

Аналитическая модель, в свою очередь, позволяет сформулировать соответствующие аналитические выражения, которые дают возможность рассчитать параметры и характеристики системы массового обслуживания.

Точность аналитической модели оценивается путем сравнения результатов аналитического и имитационного моделирования.

Сопоставление двух функций позволит выявить соответствие аналитической модели данным, полученным в результате имитационного моделирования. Исходя из статистических показателей, также вычислить процент ошибки.

На первом этапе исследования [148], был проведен натурный эксперимент. Его результаты легли в основу разработки модели в программном комплексе anylogic.[149]

На рисунке 3.1 представлена разработанная модель [173].

Ноло $\{i\}$ – источники, полученные в результате проведенного натурального эксперимента.

В элементе Switch – указана пропускная способность для канала в 1 гбит/с, а также собираются данные по суммарному трафику, проходящему через коммутатор в единицу времени.

Delaytransfer – задержка передачи.

$$D^{transfer} = \frac{V}{cap}, \quad (7)$$

где C_{ap} – пропускная способность сети,

V – объем собираемых данных

$$V = u * T, \quad (8)$$

где u – средний объем генерируемых данных в секунду (Мбит/с), T – период сбора данных.

Delaydistribution – задержка распространения:

$$D^{distribution} = \frac{d}{k * c}, \quad (9)$$

где k коэффициент распространения, c – скорость света, d – расстояние между узлами или между последним узлом и пользователем.

TS и TE - используются для получения времени обработки в системе.

Результаты проведенного имитационного моделирования позволили выдвинуть гипотезу о том, что агрегированный поток, состоящий из некоторого количества потоков голографического трафика, приобретает вид простейшего.

На рисунке 3.1 представлена разработанная имитационная модель в программном комплексе Anylogic.

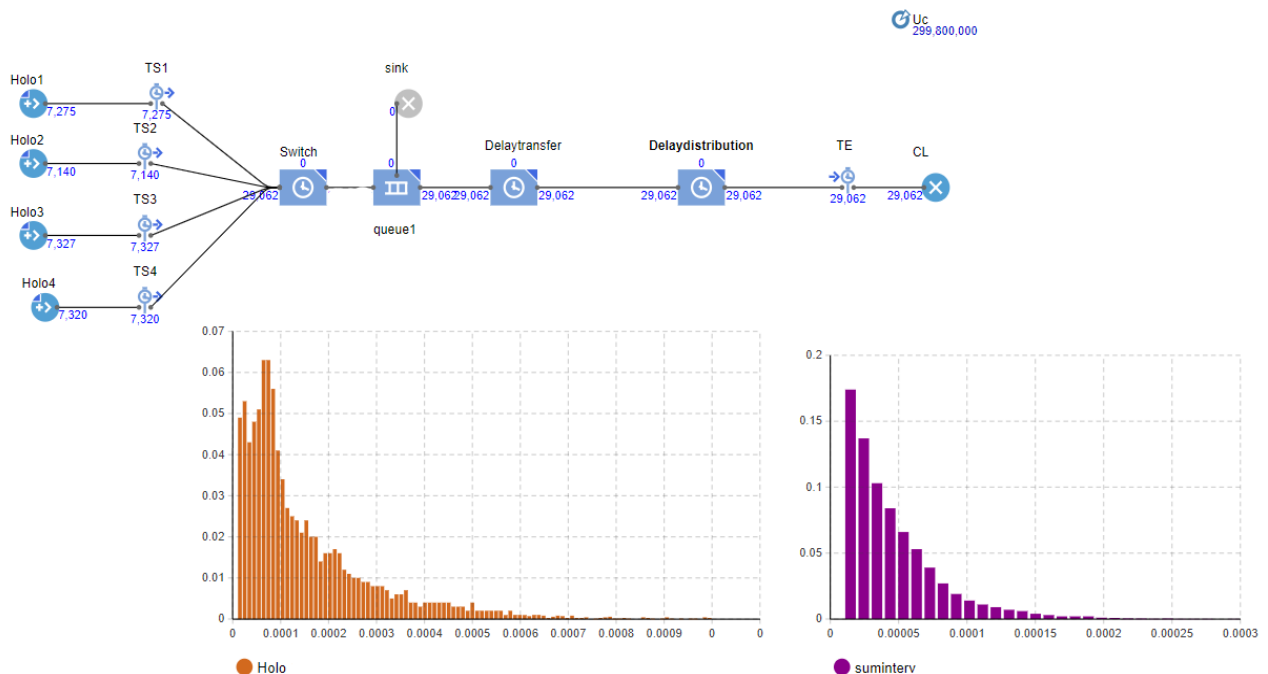


Рисунок 3.1 - Разработанная модель в программном комплексе Anylogic

Анализируя гистограмму агрегации потоков голографического трафика, можно выдвинуть предположение, что полученный поток приобретает свойство простейшего потока. Для обоснования данного предположения была использована теорема Пальма-Хинчина [150] о сходимости потоков в простейший поток. Теорема позволяет оценить степень сходимости между реальным потоком и его аппроксимацией простейшим потоком для анализа и прогнозирования работы системы.

На основании критерия Пирсона(хи-квадрат) [151], были сформулированы следующие гипотезы: нулевая гипотеза - рассматриваемые временные интервалы распределены экспоненциально и альтернативная гипотеза - рассматриваемые временные интервалы не распределены экспоненциально. Затем была построена гистограмма наблюдаемых распределений. Следующим шагом стало оценивание параметра коэффициент вариации на основе наблюдаемых данных. В дальнейшем, было произведено вычисление статистики хи-квадрат. Для вычисления была использована формула

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = \sum_{k=0}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (10)$$

- где O_i – наблюдаемое распределение, E_i - ожидаемое распределение.

Критическая область для заданного уровня значимости, была определена с использованием распределения хи-квадрат с $k-1$ степенями свободы (где k - число интервалов). Основанием для вывода, подтверждающим нашу гипотезу, будет следующие: если значение статистики хи-квадрат попадает в критическую область, то нулевая гипотеза отвергается в пользу альтернативной. В противном случае нулевая гипотеза не отвергается.

Следующим этапом исследования стало моделирование агрегации потоков от различного количества источников.

Первоначально было использовано три источника.

Представлены статистические характеристики потока, сформированного из трех источников с $k=30$ в таблице 3.1., отображены среднее значение, коэффициент вариации, λ и среднеквадратичное отклонение.

Таблица 3.1 - Статистические характеристики потока модели 3-х источников

Значения	В цифровом выражении
среднее	0,0000487
среднеквадратичное отклонение Δ	0,0000478
коэффициент вариации	0,98
λ	20550,76

коэффициент вариации рассчитываем следующим образом -

$$\frac{\text{Среднеквадратичное отклонение}}{\text{среднее значение}} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{1}{\text{среднее значение}} \quad (12)$$

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = 378,8$$

$$\chi_{\text{крит}}^2 = 39,1$$

Плотность распределения агрегированного трафика указана на рисунке 3.2:

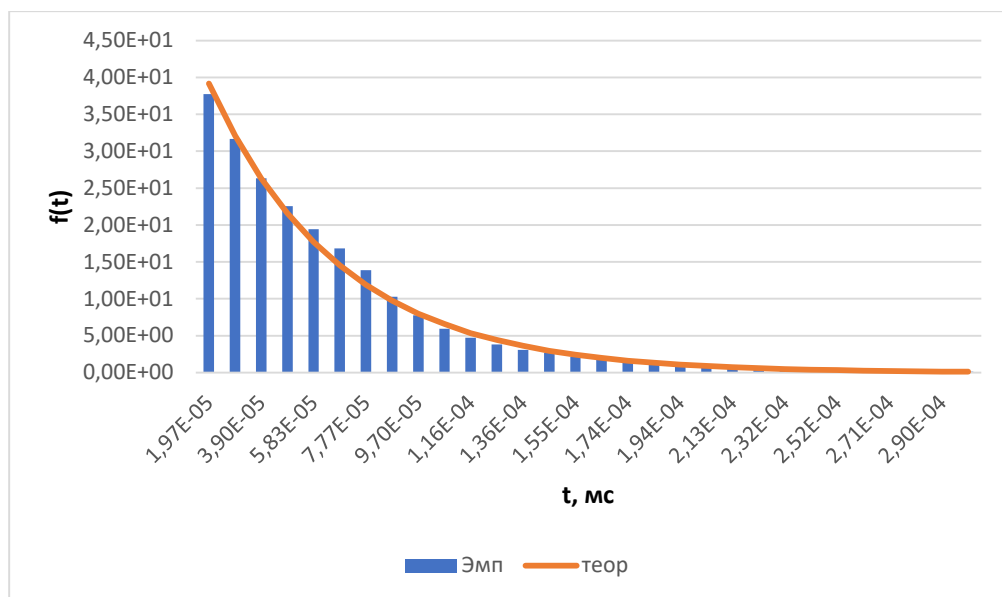


Рисунок 3.2 - Плотность распределения агрегированного трафика 3 источников

Полученный результат считаем отрицательным.

На следующем этапе исследования в модель был добавлен еще один источник.

Результат отображен в таблице 3.2

Таблица 3.2 - Статистические характеристики потока модели 4-х источников

Значения	В цифровом выражении
среднее	0,00003645
среднеквадратичное отклонение Δ	0,00003578
коэффициент вариации	0,98
λ	27434,84

Распределение интервалов времени агрегированного трафика и их функция плотности вероятности на рисунке 3.3

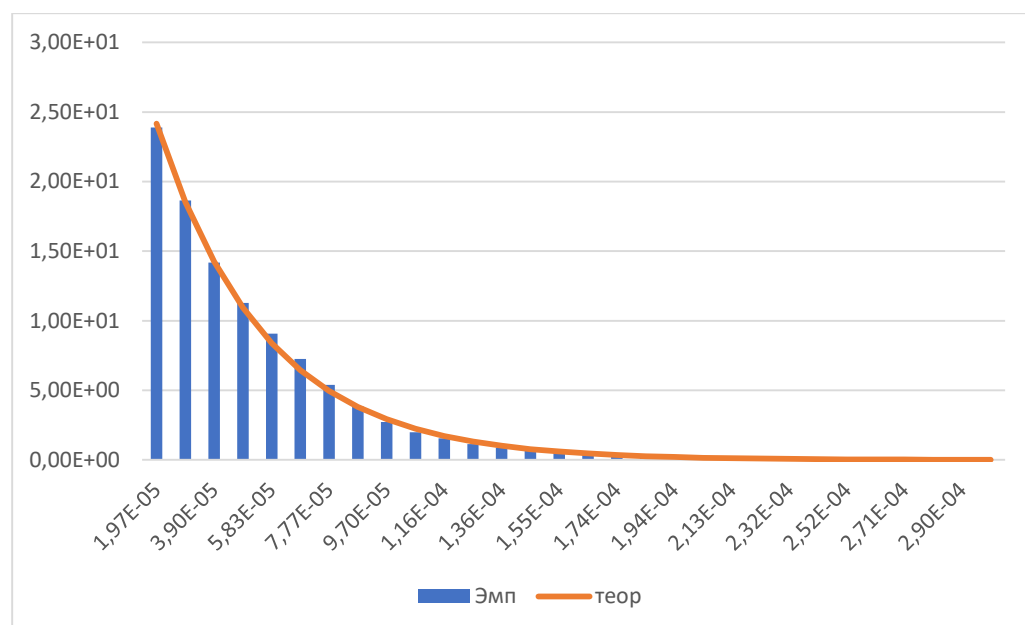


Рисунок 3.3 - Плотность распределения агрегированного трафика 4 источников

$$\chi_{\text{Эмп}}^2 = 112,5$$

$$\chi_{\text{крит}}^2 = 39,1$$

Анализ полученных статистических данных, позволил прийти к выводу, что данное количество потоков не сходятся к простейшему потоку, так как $\chi_{\text{эмп}}^2 = 112,5 > 39,1 = \chi_{\text{крит}}^2$

Альтернативная гипотеза выполняется - рассматриваемые временные интервалы не распределены экспоненциально.

Тогда, в модели используем 11 источников, при $k=30$. Статистические характеристики потока модели, представленные в таблице 3.3. На рисунке 3.4 отображена плотность распределения агрегированного трафика от 11 источников.

Таблица 3.3 - Статистические характеристики потока модели 11 источников

Значения	В цифровом выражении
среднее	0,00001328
среднеквадратичное отклонение Δ	0,00001312
коэффициент вариации	0,98
λ	75301,21

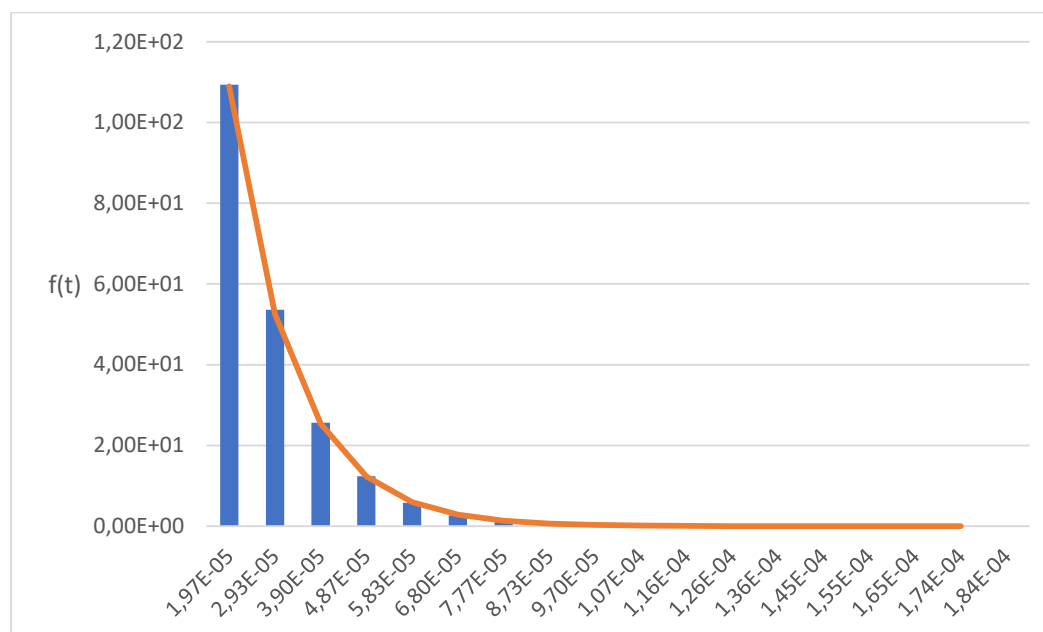


Рисунок 3.4 - Плотность распределения агрегированного трафика 11 источников

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = 39,3$$

$$\chi_{\text{крит}}^2 = 39,1$$

Так как, $\chi_{\text{эмп}}^2 = 39,3 > 39,1 = \chi_{\text{крит}}^2$ то, альтернативная гипотеза выполняется.

Важно отметить, что одиннадцать источников являются критической точкой (границей).

На следующем этапе моделирования, используем 12 источников с $k=30$. Результаты отображены в таблице 3.4

На рисунке 3.5 отображена плотность распределения агрегированного трафика 12 источников.

Таблица 3.4 - Статистические характеристики потока модели 12 источников

Значения	В цифровом выражении
среднее	0,00001217
среднеквадратичное отклонение Δ	0,00001204
коэффициент вариации	0,99
λ	82169,26

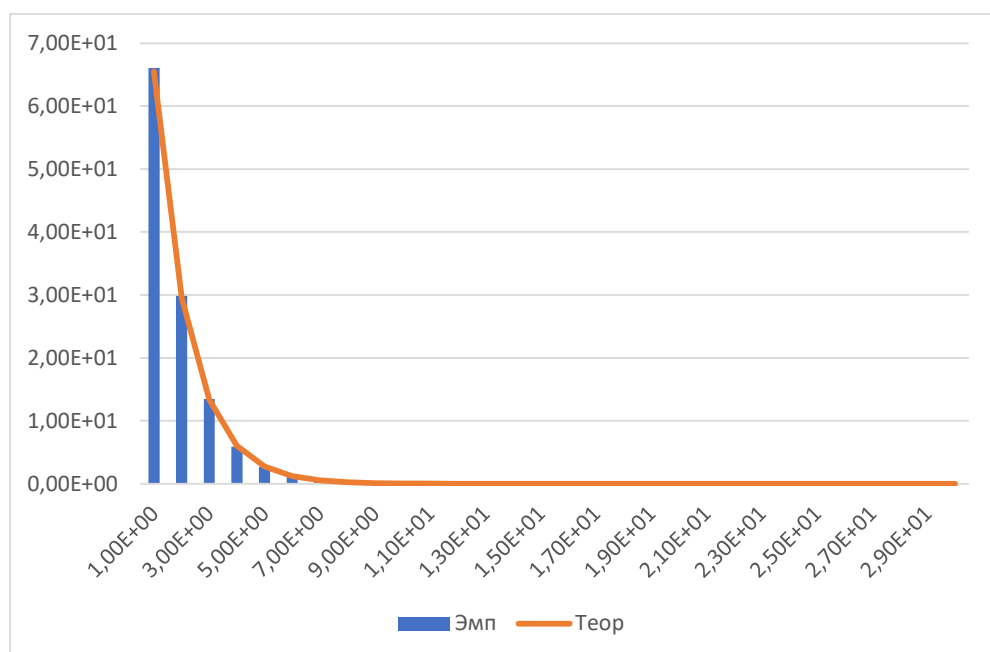


Рисунок 3.5 - Плотность распределения агрегированного трафика 12 источников

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = 23,6$$

$$\chi_{\text{крит}}^2 = 39,1$$

В результате проведенного сравнения показателей, $\chi_{\text{эмп}}^2 = 23,6 < 39,1 = \chi_{\text{крит}}^2$, нет оснований отвергать нулевую гипотезу подтверждающую, что агрегированный поток приобретает свойство простейшего.

Для подтверждения полученной тенденции, проверяем на модели с 20 источниками при $k=30$. Статистические характеристики потока модели отображены в таблице 3.5

Плотность распределения агрегированного трафика от 20 источников представлена на рисунке 3.6

Таблица 3.5 - Статистические характеристики потока модели от 20 источников

Значения	В цифровом выражении
среднее	0,00000730
среднеквадратичное отклонение Δ	0,00000726
коэффициент вариации	0,99
λ	136967,53

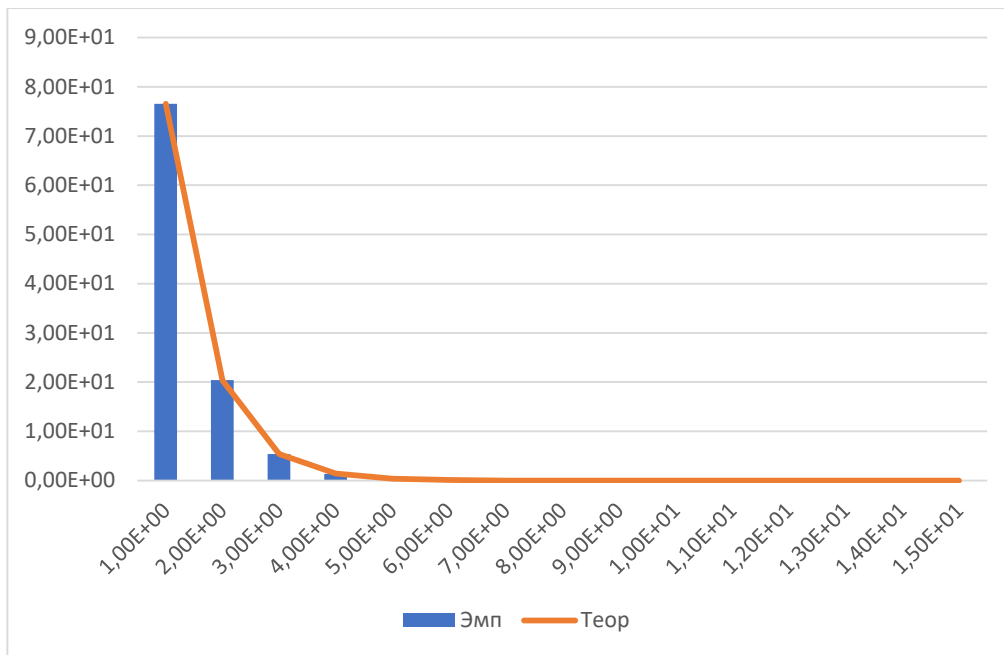


Рисунок 3.6 - Плотность распределения агрегированного трафика 20 источников

$$\chi_{\text{Эмп}}^2 = 5,2$$

$$\chi_{\text{крит}}^2 = 39,1$$

Так как, $\chi_{\text{Эмп}}^2 = 5,2 < 33,2 = \chi_{\text{крит}}^2$ то, нет оснований отвергать нулевую гипотезу.

Итак, приходим к выводу, что голографический трафик при большом количестве пользователей имеет свойство простейшего потока.

Зависимость полученных данных критерия хи-квадрат от количества источников показана на рисунке 3.7.

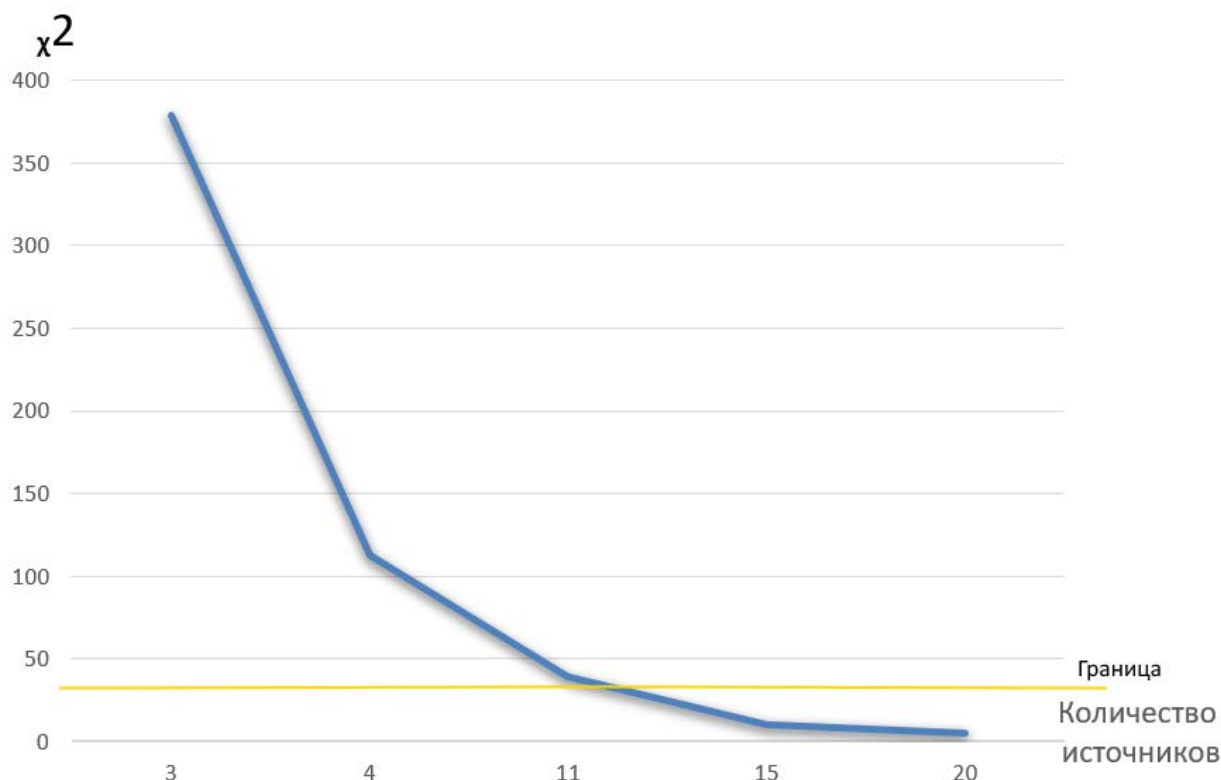


Рисунок 3.7 - Зависимость полученных данных критерия хи-квадрат от количества источников.

Для оценивания задержки в разработанной модели, применяем формулу Поллячека-Хинчика[152].

Так как, формула Поллячека-Хинчина применяется для расчета характеристик системы массового обслуживания M/G/1, где поступающие запросы имеют произвольное распределение времени обслуживания. В случае системы M/G/1 среднее время обслуживания обозначается \bar{W} и общее время обслуживания системы W.

$$\bar{W} = \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} \left(1 + \left(\frac{\bar{t}}{\sigma_t} \right)^2 \right) \quad (13)$$

где ρ - нагрузка, \bar{t} - среднее время ожидания в очереди, σ_t - среднеквадратичное отклонение времени ожидания в очереди.

$$W = \bar{W} + D_{transfer} + D_{distribution} \quad (14)$$

Разница между данными аналитической и имитационной модели, подтверждающая процент ошибки, не превышает 10%

На рисунке 3.8 представлено графическое изображение сравнения данных полученных от аналитической и имитационной модели.

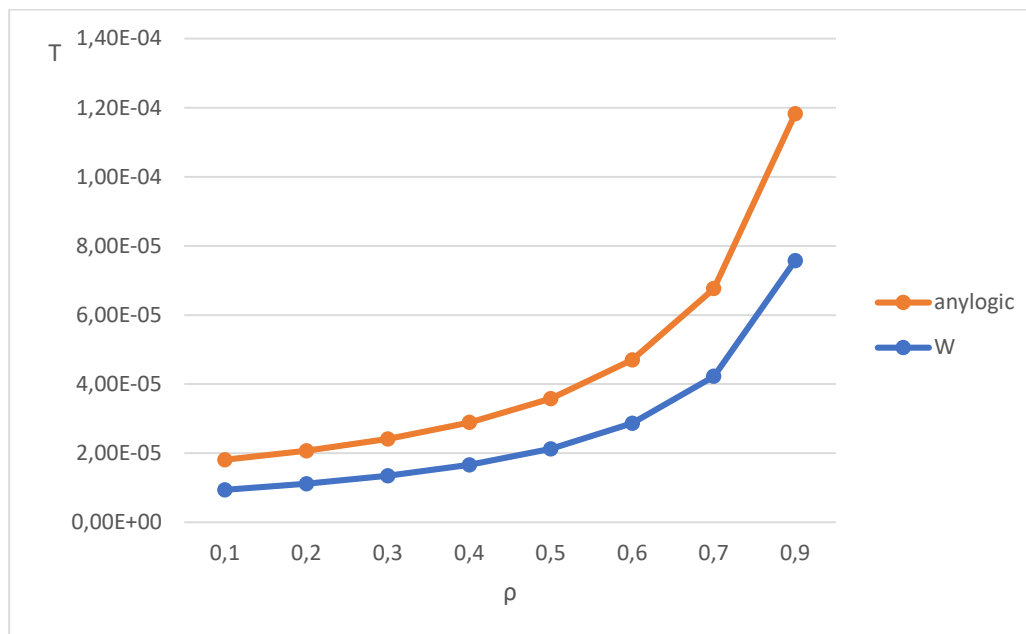


Рисунок 3.8 - Сравнение данных полученных от аналитической и имитационной модели

Сравнение двух кривых позволяет оценить точность аналитической модели и ее соответствие реальным данным, полученным при имитационном моделировании.

График дает представление о том, как время ожидания изменяется в зависимости от загрузки системы.

3.2.2 Моделирование передачи смешанного трафика

Размещение вычислительных серверов (виртуальных серверов) ближе к границе сети радиодоступа позволяет уменьшить задержку распространения пакетов данных. Поэтому время на передачу данных до вычислительного сервера на границе сети радиодоступа при сохранении собранных данных и при

осуществлении передачи данных граничного вычислительного облака до конечного пользователя будет обладать меньшей задержкой передачи данных, по сравнению с аналогичными процессами для главного облака.

Однако ресурсы вычислительных серверов на границе сети радиодоступа значительно меньше, чем у главного облака (удаленного ЦОД). Поэтому необходимо определить критерии выбора вычислительного облака для хранения данных.

Основные критерии для выбора вычислительного облака для хранения данных могут быть следующие:

1. Ресурсы хранения данных. Вычислительный сервер должен обладать возможностью сохранить данные от одного устройства за определенный период времени.
2. Пропускная способность вычислительного сервера. Данный параметр имеет особое значение при передаче собранных данных.
3. Задержка передачи данных от вычислительного сервера для конечного пользователя.

Вычислительные облака граничных серверов могут быть организованы на платах Raspberry Pi с модулями Wi-Fi 802.11n и ресурсами хранения по умолчанию до 32 ГБ. В качестве Микро-серверов и Мини серверов могут рассматриваться сервера фирмы Adlink MECS-6120 и MECS-7211 соответственно. Данные сервера могут обладать до 4 оптическими модулями 10Гбит/с и максимальными ресурсами хранения от 2 до 8 Тбайт. В таблице 3.6 представлено время периода хранения данных от одного устройства, которое могут хранить вычислительные облака для трафика мультимедиа и голографического трафика [179, 180].

Таблица 3.6 - Максимальное время периода хранения данных от одного устройства

Трафик	Максимальный срок хранения, часы
--------	----------------------------------

Тип	Требуемая минимальная пропускная способность, Мбит/с	Rasbery PI, 32 GB	Микро сервер, 2ТВ	Мини сервер, 8ТВ
Мультимедиа	1,9	4,79	306,6	1226,41
Голографический	54	0,17	10,79	43,15

Выбор сервера для последующего хранения предлагается осуществлять с использованием сетевого оркестратора, который может быть размещен на главном сервере. Сетевой оркестратор также будет ответственен за определение нагрузки генерируемого для хранения трафика.

На данном этапе исследования рассматривался случай, когда хранение данных от одного устройства за выбранный период времени осуществлялось на одном вычислительном облаке.

Было предложено осуществлять хранение данных на сервере с минимальной средней задержкой передачи данных до конечного пользователя. При этом необходимо учитывать, обладает ли сервер достаточными вычислительными ресурсами для хранения данных одного устройства за заданный промежуток времени (для выполнения данной задачи необходимо для каждого устройства сбора данных определить объемы трафика, генерируемые за данный промежуток времени). Задержка передачи данных в данной работе рассматривалась как сумма задержки распространения и обработки данных (зависящей от пропускной способности вычислительного облака).

В программном комплексе Anylogic была создана модель передачи собираемого трафика на одно из четырех вычислительных серверов: микро-сервер, граничный сервер, мини сервер, главный сервер. На рисунке 3.9 отображена структура имитационной модели. В качестве интервалов между вызовами для каждого трафика использовались ранее подобранные распределения. Передача данных в локальной среде по Ethernet, оптическому

кабелю, Wi-Fi, от роутера 5G до граничного сервера и от базовой станции до микро-сервера осуществлялась на расстояние 50 метров, с пропускной способностью 100, 150, 1000 Мбит/с соответственно. Передача данных до Cloudlet осуществлялась с пропускной способностью 1 Гбит/с. Передача данных до базовой станции осуществлялась с пропускной способностью 1,55 Гбит/с на расстояние 1.2 км (в соответствии с результатами теста, проводимого компаниями NTT DoCoMo и Huawei). Расстояние от Базовой станции было выбрано 50м, 4 км, 45 км соответственно. В таблице 2.7 представлены значения средней задержки передачи данных до вычислительных облаков для каждого типа трафика.

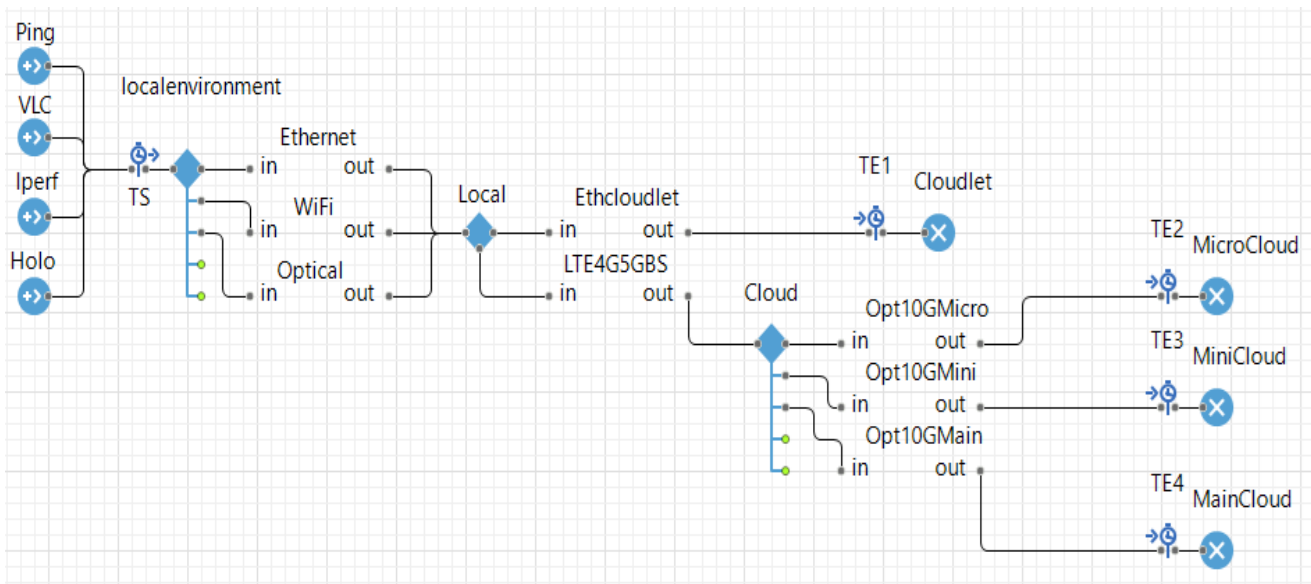


Рисунок 3.9 - Имитационная модель в программном комплексе Anylogic.

Таблица 3.7 - Значения средней задержки передачи данных до вычислительных облаков для каждого типа трафика

Тип трафика	Задержка			
	Граничный сервер	Микро-сервер	Мини сервер	Главный сервер
Служебный	$1,43 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-5}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$2,30 \cdot 10^{-4}$
Мультимедиа	$3,64 \cdot 10^{-4}$	$3,57 \cdot 10^{-4}$	$3,83 \cdot 10^{-4}$	$5,77 \cdot 10^{-4}$
«Интернета Вещей»	$8,58 \cdot 10^{-5}$	$8,70 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$3,03 \cdot 10^{-4}$

Голографический	$6,38 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$8,47 \cdot 10^{-5}$	$2,83 \cdot 10^{-4}$
Смешанный	$7,33 \cdot 10^{-5}$	$7,49 \cdot 10^{-5}$	$9,37 \cdot 10^{-6}$	$2,93 \cdot 10^{-4}$

3.3 Выводы к 3 главе

В результате исследования подтверждено положение выдвинутой гипотезы о том, что при агрегации большого количества потоков голографического трафика, сформированный поток приобретает свойство простейшего потока.

Исследование позволяет получить оперативную оценку производительности системы при различных уровнях нагрузки и выявить критические точки, которые требуют дополнительной оптимизации или масштабирования.

Рассчитана аналитическая модель по формуле Поллячека-Хинчина для расчета характеристики системы массового обслуживания, в процессе проведения исследования, был получен график сравнения расчетов аналитической модели и имитационной, который указывает, что процент ошибки не превышает десяти процентов.

Полученные результаты исследования обладают практической значимостью, так как могут быть использованы для решения задач исследования голографического трафика, прогнозирования развития инновационных видов услуг связи с учетом требований к качеству обслуживания.

Проведенное исследование позволяет определить основные направления для дальнейшего изучения всех аспектов голографического типа коммуникации.

В ходе работы была изучена реализация трафика в течении времени наблюдения.

Данные, полученные в результате проведенного экспериментального исследования, позволили определить оптимальный выбор сервера хранения данных.

Резюмируя, отметим следующее. На данном этапе развития сетей связи, мы сталкиваемся с феноменальным ростом трафика видеопотока, в связи с

чем, важно понимать его характеристики и свойства, как для эффективного использования сетевых ресурсов, так и для прогнозирования их развития.

Экстраполируя положение об увеличении объема трафика видеопотока (в соответствии с данными статистики) на процессы формирования и развития трафика голографического видеопотока, можно сделать предположение о потенциальном увеличении объема данного вида трафика и необходимости его исследования.

Перспективным направлением исследований, на наш взгляд, может быть дальнейшее изучение голографического трафика и работа над созданием моделей СМО.

ГЛАВА 4. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦСВЯЗЬ: ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОСПРИЯТИЯ

Вариативность использования голографических технологий особенно хорошо прослеживается в сферах деятельности потенциально позитивных к разработкам инновационных продуктов на основе голографических технологий, в них решение многих задач невозможно без уникальных методов, которые дает голография. Среди сфер деятельности, где 3D визуализация активно используется можно перечислить следующие. Это, в первую очередь, восстановительная хирургия, протезирование, где большое значение имеет предоперационное планирование, в рамках которого наиболее эффективным является использование трехмерных методов визуализации. Данная методика повышает точность оперативного вмешательства, позволяет проводить оперативное вмешательство с минимальной степенью травматичности, снижает вероятность последующих осложнений, что подтверждается многочисленными клиническими примерами [1]. Протезирование получило новую возможность для развития. Альтернативой выполнения биологических реконструктивных и калечащих операций стало индивидуальное протезирование с помощью 3D технологий [2].

На основе голографических технологий формируют новые подходы в робототехнике, станкостроении, машиностроении. Так, в машиностроении на основе 3D-моделей проводят моделирование движения промышленных роботов [3]. Для экспериментальной отработки бортовых полетных операций, выполняемых с помощью антропоморфных роботов, используют виртуальные 3D модели [4]. В ходе производства ситуационных баллистических экспертиз в криминалистике применяется технология лазерного 3D-сканирования для последующей работы с 3D-моделью, что предоставляет возможность, как следователю, так и эксперту возвращаться на место происшествия, где все детали, начиная от мельчайших следов, заканчивая погодными условиями, не подвергаются изменениям [153].

Внедрение и разработка новых проектов с использованием голографических технологий ведется в целом спектре отраслей военно-промышленного комплекса. Разнообразные тренажеры и симуляторы для обучения и формирования навыков становятся все более совершенными. В образовании, как средство для повышения его качества, начинают использовать трехмерные изображения, однако, 3D-видео еще не получило широкого распространения. В начальной стадии находится применение виртуальных 3D-моделей для изучения и популяризации крупномасштабных научно-технических объектов [153]. К потенциально перспективным, в рамках инновационных продуктов на основе голографических технологий, можем отнести музейное дело, разнообразные рекреационные направления (отдых и развлечения). Новое направление в развитии музейного дела, например, обеспечило создание ультрареалистичной полноцветной трехмерной копии артефакта, изображение которого, в экспозиции музея, практически неотличимы от воссозданного объекта [5]. Вместе с тем, создание в музейном пространстве, например, батальных сцен в 3D-видео формате, находится на уровне идей и возможных проектов. Необходимость внедрения новых способов визуализации объектов на основе голографических технологий, создает потребность в исследовании свойств нового вида трафика, передающего 3D видеопоток в режиме реального времени [154].

Внедрение инновационных технологий, в первую очередь, способствует реализации основной цели - улучшению качества жизни населения. Пользователи сети чувствительно относятся даже к кратковременному снижению качества обслуживания, поэтому необходимо постоянно поддерживать высокий уровень предоставляемых услуг [6]. Повышение качества и эффективности работы в сфере медицинского обслуживания, педагогической деятельности на каждом уровне системы образования, организации работы производственных комплексов, во многом зависит от эффективной организации информационно-коммуникационной деятельности и качества обслуживания в сетях связи. Инновационный подход может быть реализован посредством развития голографического типа коммуникации.

Среди приоритетных направлений исследований в сфере развития инновационных процессов обслуживания в сетях связи, можно назвать исследования характеристик голографического и мультимедийного трафиков. Актуальность изучения перспективного потенциала голографических технологий и их влияния на развитие вычислительной инфраструктуры и сетей связи обоснована в значительном количестве исследований [7, 44, 145, 147, 154, 155]

Голография становится одним из наиболее перспективных направлений визуализации трехмерных объектов, что обосновывает появление определенного научного интереса к этой области исследований. Прослеживается общая глобальная тенденция активизации работы специалистов над проблемой использования голографических технологий в различных областях деятельности человека.

4.1 Анализ достижений в области голографической конференцсвязи

Российский разработчик систем видеоконференций [156] представил комплекс оборудования HoloLive, позволяющий организовать 3D-видеозвонок для проведения голографической конференции.

В статье [157] рассматриваются один из основных технологических элементов для эффективного включения многопользовательских систем голоконференций.

Исследования [158,159] доказывают реальное повышение качества учебного процесса с использованием голографической видеоконференции.

Исследователи [160] утверждают, что основанная на голографии видеоконференция, может сохранять полное трехмерное качество объекта, и помогает зрителям воспринимать его как настоящее трехмерное изображение. В частности, подчеркивается, что голографическая видеоконференция может использоваться в нескольких аудиториях одновременно независимо от места их нахождения и позволяет делиться опытом с более широкой аудиторией без каких-либо ограничений по времени и расстоянию.

В работе [161] обсуждаются потенциальные преимущества многосторонней голографической коммуникации и показаны ключевые проблемы, которые необходимо решить для реализации потенциала голоконференций. Возрастает количество исследований [158,162] в которых дан анализ практического применения голоконференций, подтверждающие положительный результат внедрения.

В работе [163] предложено описание разработанного и интегрированного сервиса для обеспечения многопользовательских услуг голопортации в реальном времени.

Авторы [164] утверждают, что видеоконференции могут быть менее личными, чем встреча лицом к лицу, можно упустить важный язык тела. Руководители предпочитают реализацию удаленной голографической связи в форме голоконференций для достижения гуманизации виртуального удаленного контакта, стимулирование командной работы. Авторы подчеркивают, что голографические конференции способны заменить реализованные типы систем связи на инновационные.

В полученных результатах [165] обосновывается предположение, что эмоциональное осознание взгляда партнера при голоконференции - способность отслеживать его направление, становится даже более важным, чем простой зрительный контакт при видеоконференции.

Инновационность голоконференции отчетливо видна в полученных результатах исследователей []

Универсальность инновационного эффекта голоконференции подтверждается реализацией многочисленных проектов.

Авторы-разработчики предложили новую систему для проведения голографических конференций - HoloKinect [166]

Компании Polycom, Cisco, Google позиционируют реализованные проекты телеприсутствия. Компания Google представила в режиме реального времени сверхреалистичную голографическую копию собеседника (конференция Google I/O 2021)[167]

Прототип системы голографической конференцсвязи с эффектом присутствия был представлен на выставке Integrated Systems Europe (ISE) 2023 компанией Logitech, которая проходила в Барселоне, еще один был установлен в офисе Steelcase в Мичигане.[169]

Следующий пример реализации голографической конференцсвязи был представлен на выставке **CES 2024**, которая прошла в Лас-Вегасе. Это устройство называется HoloBox, оно позволяет общаться с полноразмерной голографической проекцией человека.[169]

4.2 Описание экспериментального исследования качества восприятия голографической конференцсвязи

Потенциально, более широкое использование голографического типа коммуникации, повышает значение решения проблемы качества голографического изображения.

В диссертации Парамонова А.И. отмечено, что в дополнение к имеющейся метрике QoS добавилась еще одна – качество восприятия QoE (Quality of Experience), определяющая субъективную *оценку* пользователем. [143]

Авторы [170] отмечают, что с появлением 3D-технологий, в последние годы одной из проблем, с которыми сталкивается индустрия, является оценка качества 3D-контента и оценка качества впечатлений зрителя (QoE). В работе акцентируется внимание на том, что если для 2D-контента определены основные факторы, влияющие на качество восприятия (яркость, контрастность и резкость), то, в случае 3D, восприятие глубины меняет влияние вышеупомянутых факторов на общее воспринимаемое качество 3D-видео.

Исследователи определяют среди основных факторов качества 3D следующие: «количество глубины» и «визуальный комфорт» [171].

Анализ публикаций показал, что передача голографических копий недостаточно изучена. На данный момент можно констатировать, что

исследование проблемы в рамках изучения взаимовлияния нагрузки и качества не проводилось [181].

Цель исследования на данном этапе: изучение качества восприятия голографических копий, полученных в результате передачи голографического трафика в режиме реального времени в виде услуги голографической конференции.

Для достижения цели исследования сформулированы **следующие задачи:**

- определить базисные шаги для разработки программы проведения стендовых испытаний;
- изучить технические характеристики оборудования для эксперимента;
- подготовить программу натурального эксперимента работы стенда для испытаний;
- разработать/выбрать необходимую многоуровневую систему критериев для оценки качества восприятия голографических копий;
- провести стендовые испытания, дать анализ полученных показателей, обобщить материал и сделать выводы;

Для проведения прикладной части диссертационного исследования **«Разработка и исследование моделей трафика для голографических копий»** местом испытаний определена лаборатория MEGANETLAB6G кафедры Сетей связи и передачи данных СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Выводы первого этапа исследования позволили предположить необходимость изучения качества восприятия при увеличении количества источников голографического трафика [148].

Натурный эксперимент для исследования качества восприятия голографических копий, полученных в результате передачи голографического трафика в режиме реального времени, был проведен на модельной сети лабораторного стенда [174]. Участниками данного исследования были

сотрудники лаборатории, имеющие соответствующие прикладные компетенции для проведения стендовых испытаний.

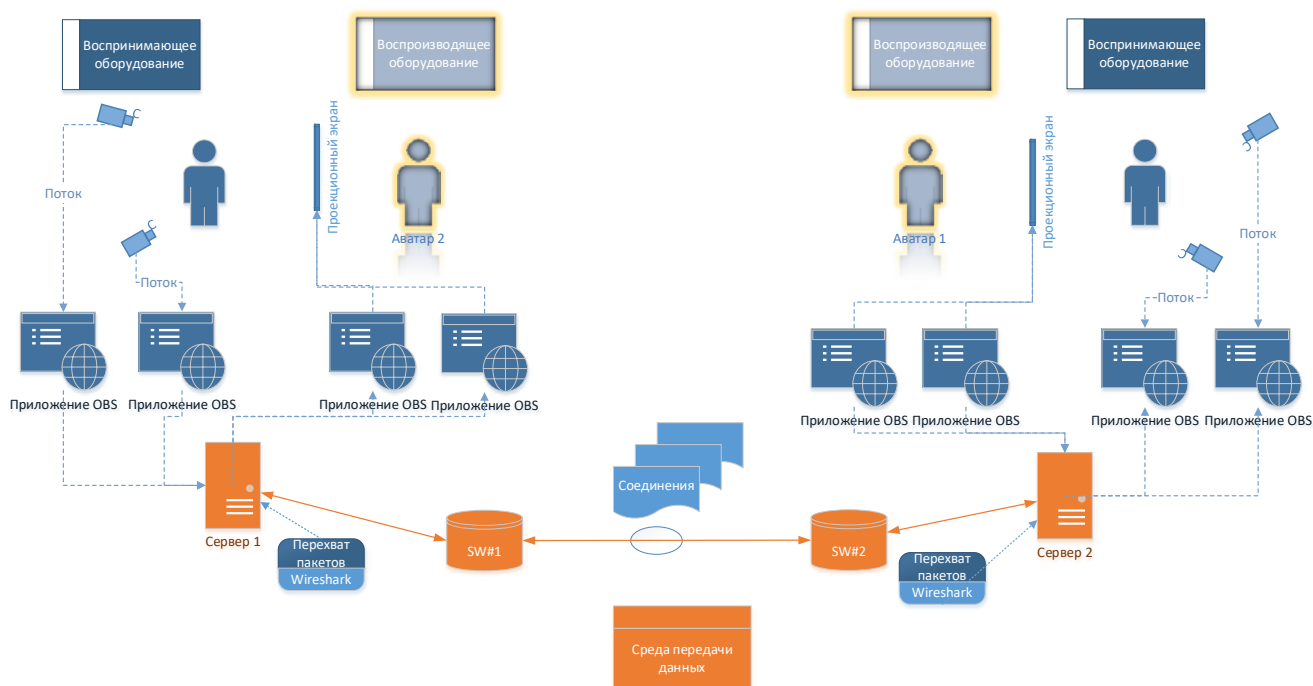


Рисунок 4.1 - Схема(структура) стенда для натурального эксперимента.

Натурный эксперимент был проведен с использованием следующего оборудования лаборатории: 3D-камер Microsoft Kinect, которые в реальном времени записывают движущийся объект передавая глубину и обеспечивают визуальный комфорт восприятия голографического изображения, проекционный экран для воспроизведения объемного изображения, два сервера, два коммутатора D-Link (SW#1, SW#2). Между коммутаторами, серверами средой передачи данных был выбран UTP кабель cat.5e.

Схема натурального эксперимента представлена на рис. 4.1.

Голографический тип коммуникации был реализован посредством двух сенсорных RGB-D камер Microsoft Kinect на одной и второй стороне голографического телемоста для передачи аватаров каждому пользователю.

Полученный поток был сформирован с помощью специального программного инструмента – OBS Studio (Open Broadcaster Software) [136]

Для перехвата и анализа сетевого трафика применялась программа Wireshark [137].

На лабораторном стенде - на одно устройство – 2 потока 3D трафика, соответственно.

Для телемоста – необходимо два оконечных терминала, что соответствует нагрузке в 4 источника (потока).

Последовательно увеличивая количество соединений, реализовывали инновационный тип услуги – голографическую конференцсвязь и провели наблюдения за изменением качества получаемого контента.

Увеличив количество соединений, наблюдали увеличение количества потоков, число которых возрастало с шагом в 4 единицы. Для моделирования последовательного увеличения количества соединений эти соединения создавались на одном и том же оборудовании. Так как проводили экспериментальное исследование по созданию голографической конференцсвязи, придерживались параметров прогнозируемого возникающего самого узкого места – 1 гбит в секунду на выгрузку и 1 гбит/с на загрузку по стандарту 5G.

Как утверждают авторы [172], оценка качества изображения может быть проведена как объективными методами, так и субъективными. Каждый из них имеют свои достоинства и недостатки. Объективную оценку проводят с помощью программных и аппаратных средств. Субъективная или экспертная оценка проводится, как правило, с группой лиц для качественно/количественной оценки свойств объекта.

4.3 Результаты экспериментального исследования

В данном исследовании, во время эксперимента фиксировали субъективную оценку качества восприятия каждого эксперта, по предложенным критериям. Субъективная оценка качества восприятия голографического изображения определялась группой экспертов по таким показателям как: эффект глубины,

естественность изображения, визуальный комфорт, целостность, плавность движения.

При каждом увеличении количества соединений снимали показатели и проводили оценку QoE. Было проведено более 20 экспериментов с вариацией времени наблюдения от 60 с до 80 с. Вычисление средней оценки R для каждой демонстрации определялось:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N r_i \quad (15)$$

где r_i — оценка качества от i -го пользователя, N — количество пользователей.

Измеряя показатели, используя **Wireshark**, в результате получили статистические данные, которые позволили определить основные характеристики агрегированного потока, построить графики.

На рисунке 4.2 отображен график ввода/вывода Wireshark для 1 соединения.

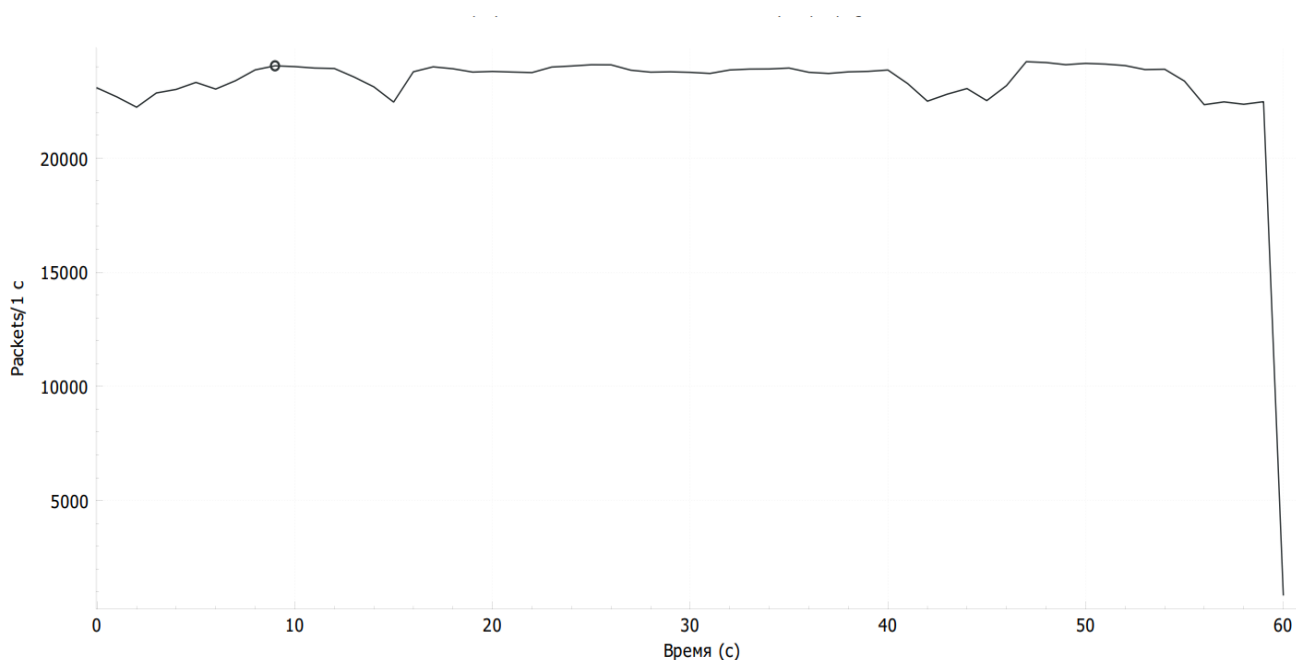


Рисунок 4.2 - Интенсивность передачи пакетов для 1 соединения в течение сеанса наблюдений

На рисунке 4.3 отображен график ввода/вывода Wireshark для 5 соединений.

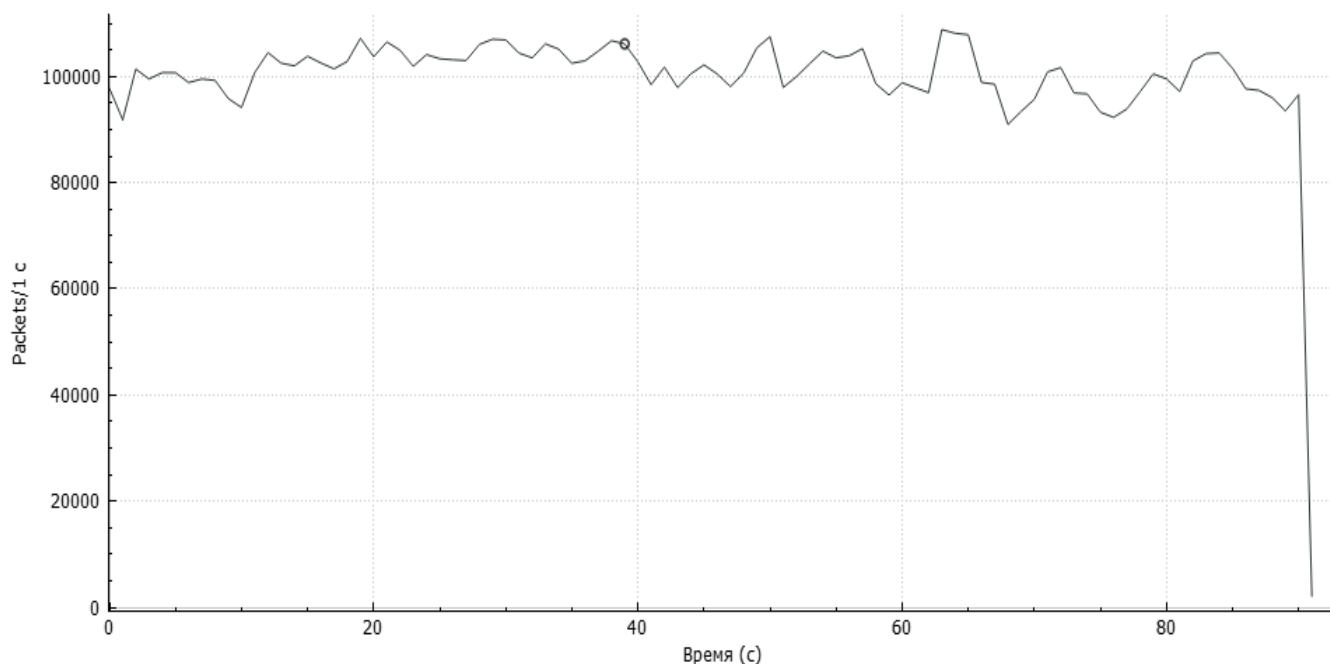


Рисунок 4.3 - Интенсивность передачи пакетов для 5 соединений в течение сеанса наблюдений

Экспертная группа оценивала голографический контент в 5 баллов по пятибалльной системе вплоть до 8-9 соединений. Резкое снижение качества восприятия было зафиксировано при 12-13 соединений – эксперты показали оценку в 3 балла. Гипотеза о зависимости качества восприятия от количества соединений была подтверждена экспериментально. Получены данные о предельном количестве соединений сохраняющим высокую оценку качества восприятия пользователями.

На рисунке 4.4 отображен график ввода/вывода Wireshark для 14 соединений.

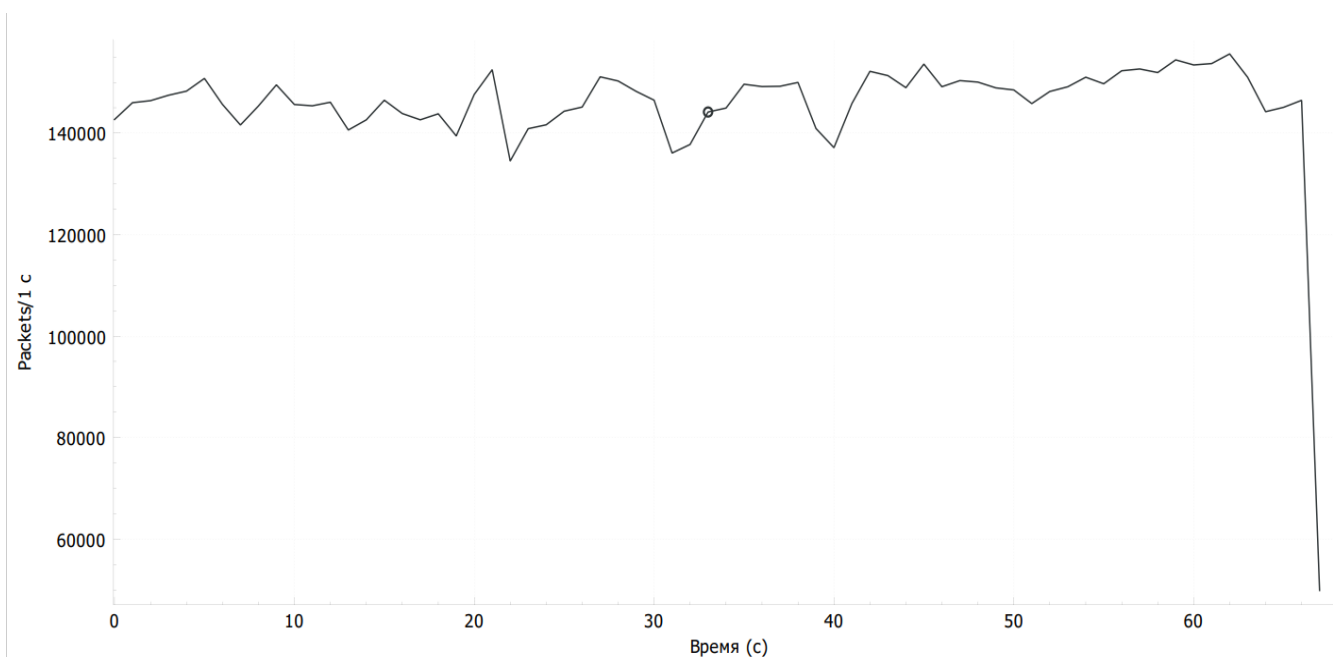


Рисунок 4.4 - Интенсивность передачи пакетов для 14 соединений в течение сеанса наблюдений

Выполняя задачу исследования – провести оценку влияние нагрузки на качество восприятия голографического контента, полученного в результате передачи голографического трафика в режиме реального времени, установили количество соединений, являющиеся граничным уровнем, после которого качество изображения значительно ухудшается.

Результаты данного этапа эксперимента представлены таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Статистические результаты эксперимента

Количество соединений	Число потоков	Пакетов/с	Мбит/с	Оценка QoE
1	4	24000	282,624	5
3	12	72000	847,872	5
5	20	110000	1295,36	5
8	32	145000	1472	5
11	44	142000	1648,64	4
12	48	145000	1672,192	3

13	52	125000	1707,52	3
14	56	140000	1707,52	2
15	60	150000	1736,96	1
19	76	147500	1766,4	1

Наивысший балл (5) определялся, когда голографический контент по всем параметрам соответствовал оригиналу.

Приближаясь к числу десять и одиннадцать соединений, наблюдали ухудшение качества отображения голографических аватаров.

На рисунке 4.5 отображена зависимость оценки восприятия от количества соединений.

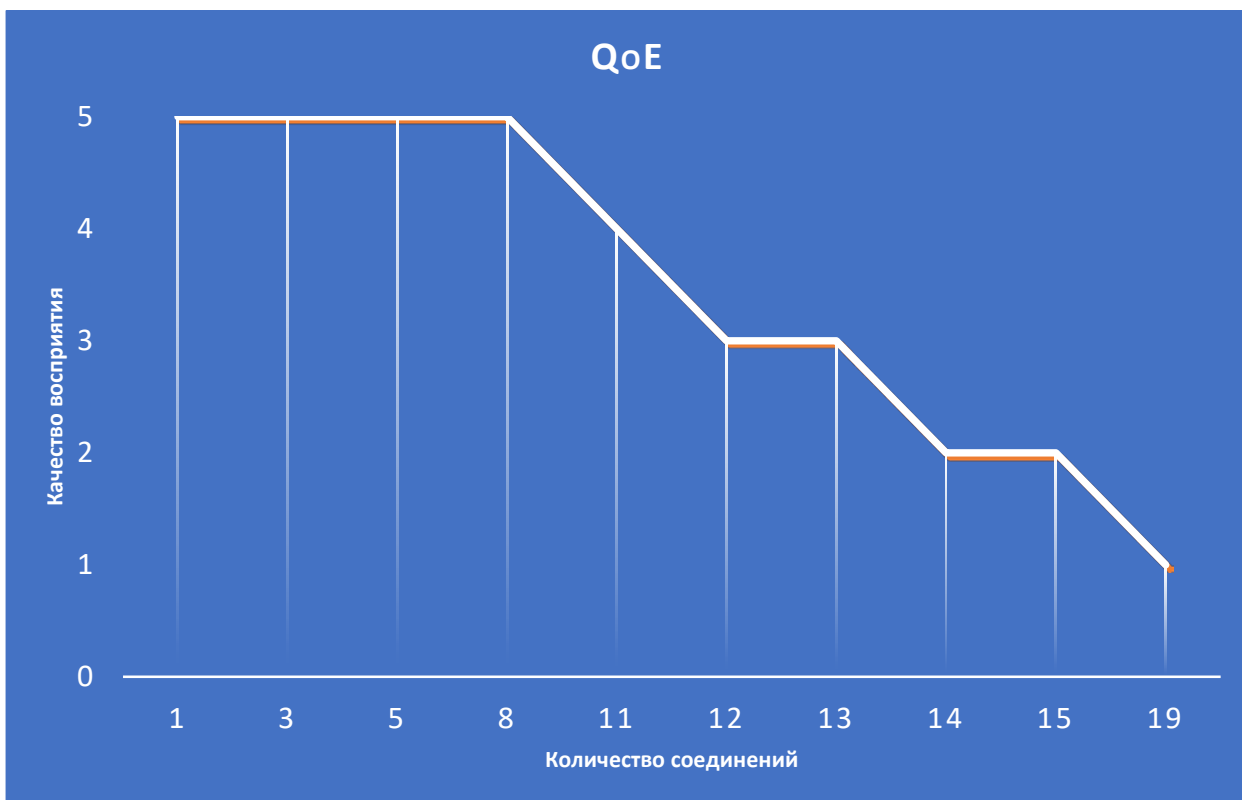


Рисунок 4.5 - График зависимости оценок восприятия от количества соединений

Экспертная группа оценивала голографический контент в 5 баллов по пятибалльной системе вплоть до 8-9 соединений. Резкое снижение качества

восприятия было зафиксировано при 12-13 соединений – эксперты показали оценку в 3 балла. Гипотеза о зависимости качества восприятия от количества соединений была подтверждена экспериментально. Получены данные о предельном количестве соединений сохраняющим высокую оценку качества восприятия пользователями.

4.4 Выводы к 4 главе

На основе разработанной схемы стенда был проведен натурный эксперимент, в результате которого группой экспертов были определены показатели качеств восприятия при возрастании нагрузки на сеть в зависимости от увеличения количества соединений.

Опираясь на результаты экспериментального исследования, в дальнейшем могут быть сформулированы требования к необходимым характеристикам сетей связи для передачи качественного контента.

Интерпретация и обобщение полученных результатов позволила прийти к следующим выводам: снижение нагрузки в рамках организации соединений путем сжатия передаваемых данных, требует найти\установить\соблюдать баланс между поддержкой необходимого уровня качества предоставления услуги и возникающей нагрузки, требующей выделения ресурсов сети. Для достижения высокого качества голографического контента количество соединений не должно превышать десяти.

Данное исследование позволит прогнозировать дальнейшие направления исследований и планировать постановку научно-исследовательских задач в сфере развития голографического типа коммуникаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ и исследование голографических услуг, в ходе которого установлено, что рост трафика, производимого голографическими услугами увеличиться в разы в обозримом будущем. Обозначены основные особенности, которые присущи голографическому типу коммуникации. Предлагается авторское определение понятий «голографический тип коммуникации» и «голографический аватар».
2. Проведено исследование инновационных технологий записи голографических копий, методов сжатия данных для обеспечения голографической связи, передачи голографических копий конечному пользователю с высоким качеством воспроизведения.
3. Проведен анализ трафика мультимедиа и голографических услуг, а также услуг Интернета Вещей, разработаны модели трафика, определено что трафик данных услуг представляет собой смесь различных распределений, а, также, что трафик голографических услуг обладает свойством самоподобия.
4. Проведен анализ принципов построения сетей пятого и последующих поколений для предоставления голографических услуг. Проведена классификация оконечного оборудования для воспроизведения голографической трафика, определены особенности предоставления данных услуг и требования к оборудованию сетей связи.
5. Построена модельная сеть для исследования трафика 3D видеопотока с использованием технологии DWDM, Wi-Fi, Ethernet и др. на основе полученных экспериментальных данных построена аналитическая модель трафика голографических услуг.
6. Субъективная оценка качества восприятия голографического изображения показала, что в случае предоставления услуги голографической конференцсвязи по модели MOS, качество восприятия начинает ухудшаться при наличии 32 голографических потоков и становится

неудовлетворительной при 48 потоках, что необходимо учитывать при планировании экспериментальных работ по оценке качества восприятия.

7. Результаты исследования могут стать основой для формирования новых компетенций и навыков у студентов высших учебных заведений при подготовке к профессиональной деятельности в сфере оказания услуг связи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ГТК Голографический тип коммуникации

ИИ Искусственный Интеллект

ИВ Интернет Вещей

ИКТ Инфокоммуникационные Технологии

ИТ Иммерсивные технологии

МСЭ Международный Союз Электросвязи

МСЭ-Т Международный Союз Электросвязи, сектор стандартизации телекоммуникаций

ПКС Программно-Конфигурируемые Сети

ПО Программное Обеспечение

ЦОД Центр Обработки Данных

5G Fifth Generation Of Mobile Communications

3D Three Dimensional

AI Artificial Intelligence

AR Augmented Reality

CGH Computer-Generated Holograms

DWDM Dense-Wavelength Division Multiplexing

HT Holographic Teleportation

HTC Holographic Type Communication

IoT Internet of Things

IT Immersive technologies

ITU-T International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector

QoE Quality-of-Experience

QoS Quality of Service

MR Mixed Reality

RTT Round trip Time (время передачи от отправителя к получателю и обратно)

SDN Software-Defined Networking

VR Virtual Reality

XR Extended Reality

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасенко, С.В. Использование навигационных хирургических шаблонов при дентальной имплантации у пациентов с частичной вторичной адентией / С.В. Тарасенко, С.В. Загорский // Клиническая стоматология. 2018. N 4 (88). С. 18–21.
2. Imanishia, J. Three-dimensional printed calcaneal prosthesis following total calcanectomy / Jungo Imanishia, Peter FM Choong // International Journal of Surgery Case Reports. 2015. N 10. PP. 83–87.
3. Крахмалев, О.Н. Моделирование движения промышленных роботов в программном комплексе «Универсальный механизм» на основе 3D-моделей / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Транспортное машиностроение. 2014. N 4 (44). С. 52–57.
4. Sokhin, I. G. The usage of virtual 3D models for experimental exercising the flight operations performed with the help of anthropomorphic robots / I.G. Sokhin, B. V. Burdin., M. V. Mikhaylyuk, M. A. Torgashev // Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2013, No. 1. PP. 42–46.
5. Готовчиц, В.А. Голографические технологии в музейном пространстве / В.А. Готовчиц // Республиканская научно-практическая интернет-конференция молодых исследователей MediaLex-2018. Брест, 2018. С. 56–60.
6. Стратегия развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года: утверждена распоряжением Правительств Российской Федерации от 24 ноября 2023 г. № 3339-р
7. 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. Том 8. № 2. С. 32–43. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43.
8. ITU-T Recommendations by series: Y.3000-series: Representative use cases and key network requirements for Network 2030 (Y Suppl. 67 (07/2020) – Текст :

- электронный // ITU : [сайт]. – 2020. – URL : <https://handle.itu.int/11.1002/1000/14386> (дата обращения: 03.08.2024).
9. Akyildiz, I. F. Holographic-type communication: A new challenge for the next decade / I. F. Akyildiz, H. Guo //ITU Journal on Future and Evolving Technologies. – 2022. – Т. 3. – №. 2. – С. 421-442.
 10. Харламов, М. А. Исследование характеристик сети передачи данных и методов уменьшения объема трафика технологии Holographic Type Communication / М. А. Харламов, М. А. Маколкина // Информационные технологии и телекоммуникации. - 2021. - Том 9. -№ 2. - С. 64– 76. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-2-64-76.
 11. Giuliano, R. From 5G-Advanced to 6G in 2030: New Services, 3GPP Advances and Enabling Technologies / R. Giuliano //IEEE Access. – 2024.
 12. Giogiou, N. A qualitative study on the ethical and/or legal challenges based on the stakeholders' perspectives / N. Giogiou // Holographic Communications Technologies – 2022.
 13. Anmulwar S. Frame Synchronisation for Multi-Source Holographic Teleportation Applications. – 2023.
 14. Holoportation™ – Текст : электронный // Microsoft : [сайт]. – URL : <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/holoportation-3/> (дата обращения: 02.06.2024)
 15. Orts-Escolano S. et al. Holoportation: Virtual 3D teleportation in real-time //Proceedings of the 29th annual symposium on user interface software and technology. – 2016. – С. 741-754.
 16. Костина, И. Б. Использование XR технологии в процессе обучения / И. Б. Костина, О. С. Смолякова // Педагогический вестник. 2023. №26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-xr-tehnologii-v-protsesse-obucheniya> (дата обращения: 02.08.2024).
 17. Диков, А.В. Ресурсы интернета и обучение в социальных сетях / А.В. Диков // Народное образование. -2018. - № 8-9. - С. 135-143.

18. E. Ackerman and E. Guizzo, “Marvin minsky (1927-2016) and telepresence,” 2016. Available: <https://ispr.info/2016/02/01/marvin-minsky-1927-2016-and-telepresence/>
19. W. A. S. Buxton, “Telepresence: Integrating shared task and person spaces,” in Proceedings of the Conference on Graphics Interface '92, (San Francisco, CA, USA), p. 123–129, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1992.
20. Draper, J. V., Kaber, D. B., & Usher, J. M. (1998). Telepresence. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 40(3), 354–375. doi:10.1518/001872098779591386
21. S. Beck, A. Kunert, A. Kulik, and B. Froehlich, “Immersive group-to-group telepresence,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 19, no. 4, pp. 616–625, 2013.
22. Al Jamal A. The impact of the holographic principle build the whole into the parts on organizational performance //Management Studies and Economic Systems. – 2020. – Т. 5. – №. 3/4. – С. 127-136.
23. Кучерявый, А. Е. Новые перспективы научных исследований в области сетей связи на 2021–2024 годы / Кучерявый А. Е., Киричек Р. В., Маколкина М. А., Парамонов А. И., Дунайцев Р. А., Пирмагомедов Р. Я., Бородин А. С., Владыко А. Г., Мутханна А. С. А., Выборнова А. И., Владимиров С. С., Гришин И. В. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 3. С. 1–19. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-3-1-19.
24. Демидов Н.А. Некоторые аспекты исследования трафика голографических аватаров в режиме реального времени / Н.А. Демидов // В сборнике: SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH - 2022. Сборник статей V Международной научно-практической конференции. г. Петрозаводск, - 2022. - С. 33-39.
25. Выборнова А. И. Иммерсивные технологии в телекоммуникациях: обзор и перспективы / А. И. Выборнова // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Том 9. № 3. С. 1–10. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-3-1-10

26. Nardo, F.; Peressoni, D.; Testolina, P.; Giordani, M.; Zanella, A. Point cloud compression for efficient data broadcasting: A performance comparison. In Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Austin, TX, USA, 10–13 April 2022; pp. 2732–2737.
27. G. Saxby. The Manual of Practical Holography. Focal Pr, 1991.
28. Международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике : материалы XXX Международной школы-симпозиума / Под ред. канд. физ.-мат. наук И. В. Алексеенко ; БФУ им. И. Канта. — Калининград, 2017. — 221 с.
29. Christina Kretsu «Когда голограммы войдут в повседневную жизнь» – Текст : электронный // vc.ru : [сайт]. – URL : <https://vc.ru/future/26828-kogda-gologrammy-voydut-v-povsednevnuyu-zhizn> (дата обращения: 18.12.2020)
30. Карасёв С. «Осуществлён первый в мире голографический звонок в сети 5G» – Текст : электронный // 3Dnews : [сайт]. – URL : <https://3Dnews.ru/950264> (дата обращения: 19.11.2020)
31. Голограммы вместо телефонов и видеосвязи – Текст : электронный // beeline : [сайт]. – URL : <https://spb.beeline.ru/business/special-projects/5g/> (дата обращения: 19.11.2020)
32. Голографический виртуальный ассистент – Текст : электронный // TADVISER : [сайт]. – URL : <https://www.tadviser.ru/a/458924> (дата обращения: 15.11.2020)
33. МТС провела первый в мире двусторонний междугородный голографический звонок на 5G – Текст : электронный // ТАСС : [сайт]. – URL : <https://tass.ru/nacionalnye-proekty/7331865> (дата обращения: 15.11.2020)
34. Появилась голографическая система управления дронами. – Текст : электронный // ХАЙТЕК : [сайт]. – URL : <https://hightech.fm/2020/08/07/holo-drones> (дата обращения: 19.11.2020)
35. Victoria Andreyanova и Carrpacity впервые в России представили коллекцию одежды в формате AR-голограмм – Текст : электронный // CRN : [сайт]. –

URL : <https://www.crn.ru/news/detail.php?ID=153328> (дата обращения: 30.04.2021)

36. Western team achieves international holographic teleportation – Текст : электронный // Western News : [сайт]. – URL : <https://news.westernu.ca/2022/08/western-team-achieves-worlds-first-international-holographic-teleportation/>(дата обращения: 30.10.2022)
37. Bletterer, A.; Payan, F.; Antonini, M.; Meftah, A. Point Cloud Compression using Depth Maps. *Electron. Imaging* 2016, 28, art00005. [CrossRef]
38. E. d'Eon et al., "8i Voxelized Full Bodies – A Voxelized Point Cloud Dataset," ISO/IEC JTC1/SC29 Joint WG11/WG1 (MPEG/JPEG) input document WG11M40059/WG1M74006, 2017.
39. J. van der Hooft, M. T. Vega, C. Timmerer, A. C. Begen, F. De Turck, and R. Schatz, "Objective and subjective qoe evaluation for adaptive point cloud streaming," in 2020 Twelfth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), pp. 1–6, 2020.
40. H. Riiser or al., "Commute Path Bandwidth Traces from 3G Networks: Analysis and Applications," in ACM Multimedia Systems Conference, 2013.
41. J. van der Hooft et al., "HTTP/2-Based Adaptive Streaming of HEVC Video Over 4G/LTE Networks" *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 11, 2016.
42. Пчелинцев Н. М. Перспективы использования и развития технологии WBA / Н. М. Пчелинцев // Мир в эпоху глобализации экономики и правовой сферы: роль биотехнологий и цифровых технологий. – 2021. – С. 133.
43. Попова Ю. П., Увакин Д. П. 6G беспроводные системы связи: приложения, требования, технологии, проблемы и исследование направления / Ю.П. Попова., Д. П. Увакин // Наука и общество в эпоху перемен. – 2019. – №. 1. – С. 36-44.
44. Кучерявый, А. Е. Сети связи 2030 / А. Е. Кучерявый, А. С. Бородин, Р. В. Киричек // Электросвязь. – 2018. – № 11. – С. 52-56. – EDN YMVOPB.
45. Kanade, T., Rander, P., and Narayanan, P. Virtualized reality: Constructing virtual worlds from real scenes. *IEEE multimedia*, 1 (1997), 34–47.

46. Fuchs, H. Virtual space teleconferencing using a sea of cameras / Fuchs, H., Bishop, G., Arthur, K., McMillan, L., Bajcsy, R., Lee, S., Farid, H., and Kanade, T. // In Proc. First International Conference on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, vol. 26 (1994).
47. Towles, H. 3D tele-collaboration over internet2 / Towles, H., Chen, W.-C., Yang, R., Kum, S.-U., Kelshikar, H. F. N., Mulligan, J., Daniilidis, K., Fuchs, H., Hill, C. C., Mulligan, N. K. J. // In In: International Workshop on Immersive Telepresence, Juan Les Pins, Citeseer. - 2002.
48. Tanikawa, T. Real world video avatar: real-time and real-size transmission and presentation of human figure / Tanikawa, T., Suzuki, Y., Hirota, K., and Hirose, M. // In Proceedings of the 2005 international conference on Augmented tele-existence, ACM. – 2005. C. 112–118.
49. Kurillo, G. Immersive 3D environment for remote collaboration and training of physical activities / Kurillo, G., Bajcsy, R., Nahrsted, K., and Kreylos, O. // In Virtual Reality Conference, IEEE. -2008. – C. 269–270.
50. Newcombe, R.A. Real-time dense surface mapping and tracking / Newcombe, R.A.; Izadi, S.; Hilliges, O.; Molyneaux, D.; Kim, D.; Davison, A.J.; Kohi, P.; Shotton, J.; Hodges, S.; Fitzgibbon, A. Kinectfusion // In Proceedings of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Basel, Switzerland, 26–29 October. - 2011. - P. 127–136.
51. Tonchev, K. Kinect sensors network calibration in controlled environment based on semantic information / Tonchev, K.; Neshov, N.; Petkova, R.; Manolova, A.; Poulkov, V. // In Proceedings of the 2022 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Sofia, Bulgaria, 6–9 June. - 2022. - P. 141–146.
52. Orts-Escolano, S. Holoportation: Virtual 3D teleportation in real-time / Orts-Escolano, S.; Rhemann, C.; Fanello, S.; Chang, W.; Kowdle, A.; Degtyarev, Y.; Kim, D.; Davidson, P.L.; Khamis, S.; Dou, M. // In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, Tokyo, Japan, 16–19 October. – 2016. – P. 741–754.

53. Kowalski, M. 3D: A fast and inexpensive 3D data acquisition system for multiple kinect v2 sensors / Kowalski, M. Naruniec, J., Daniluk, M. Livescan // In Proceedings of the 2015 International Conference on 3D Vision, Lyon, France, 19–22 October. – 2015. - P. 318–325.
54. Microsoft. Azure Kinect and Kinect Windows v2 Comparison. Available online: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/windows-comparison> (accessed on 12 September 2023).
55. He, Y. Recent advances in 3D data acquisition and processing by time-of-flight camera / Y. He, S. Chen // IEEE Access. – 2019. - № 7. - 12495–12510.
56. Tölgyessy, M.; Dekan, M.; Chovanec, L.; Hubinsk`y, P. Evaluation of the azure Kinect and its comparison to Kinect V1 and KinectV2. Sensors 2021, 21, 413. [CrossRef]
57. Hackernoon. 3 Common Types of 3D Sensors: Stereo, Structured Light, and ToF. Available online: <https://hackernoon.com/3-common-types-of-3D-sensors-stereo-structured-light-and-tof-194033f0> (accessed on 12 September 2023).
58. Sence, I.R. Compare Cameras. Available online: <https://www.intelrealsense.com/compare-depth-cameras/> (accessed on 12 September 2023).
59. Maimone, A., and Fuchs, H. Real-time volumetric 3D capture of room-sized scenes for telepresence. In 3DTV-Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON), 2012, IEEE (2012), 1–4.
60. Jones, B., Sodhi, R., Murdock, M., Mehra, R., Benko, H., Wilson, A., Ofek, E., MacIntyre, B., Raghuvanshi, N., and Shapira, L. Roomalive: Magical experiences enabled by scalable, adaptive projector-camera units. In Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM (2014), 637–644.
61. Molyneaux, D., Izadi, S., Kim, D., Hilliges, O., Hodges, S., Cao, X., Butler, A., and Gellersen, H. Interactive environment-aware handheld projectors for pervasive computing spaces. In Pervasive Computing. Springer, 2012, 197–215.

62. Pejsa, T., Kantor, J., Benko, H., Ofek, E., and Wilson, A. D. Room2room: Enabling life-size telepresence in a projected augmented reality environment. In CSCW 2016, San Francisco, CA, USA, February 27 - March 2, 2016, D. Gergle, M. R. Morris, P. Bjrn, and J. A. Konstan, Eds., ACM (2016), 1714–1723.
63. Dou, M., and Fuchs, H. Temporally enhanced 3D capture of room-sized dynamic scenes with commodity depth cameras. In Virtual Reality (VR), 2014 IEEE, IEEE (2014), 39–44.
64. Collet, A., Chuang, M., Sweeney, P., Gillett, D., Evseev, D., Calabrese, D., Hoppe, H., Kirk, A., and Sullivan, S. High-quality streamable free-viewpoint video. ACM TOG 34, 4 (2015), 69.
65. Chen, W.-C., Towles, H., Nyland, L., Welch, G., and Fuchs, H. Toward a compelling sensation of telepresence: Demonstrating a portal to a distant (static) office. In Proceedings of the conference on Visualization'00, IEEE Computer Society Press (2000), 327–333.
66. Beck, S., Kunert, A., Kulik, A., and Froehlich, B. Immersive group-to-group telepresence. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on 19, 4 (2013), 616–625.
67. Zhang, C., Cai, Q., Chou, P. A., Zhang, Z., and Martin-Brualla, R. Viewport: A distributed, immersive teleconferencing system with infrared dot pattern. IEEE Multimedia 20, 1 (2013), 17–27.
68. Gibbs, S. J., Arapis, C., and Breiteneder, C. J. Teleport—towards immersive copresence. Multimedia Systems 7, 3 (1999), 214–221.
69. J. van der Hooft, T. Wauters, F. De Turck, C. Timmerer, and H. Hellwagner “Towards 6dof http adaptive streaming through point cloud compression,” in Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia, MM '19, (New York, NY, USA), p. 2405–2413, Association for Computing Machinery, 2019.
70. A. Elmorshidy, “Holographic projection technology: the world is changing,” arXiv preprint arXiv:1006.0846, 2010.

71. A. D. Wilson, "Fast lossless depth image compression," in Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '17, (New York, NY, USA), p. 100–105, Association for Computing Machinery, 2017.
72. A. R. Fender and J. Muller, "Velt: A framework for multi rgb-d camera systems," Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, 2018.
73. ITU-T Technical Report, "Representative use cases and key network requirements for network 2030," January 2020. [online] Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/fg/T-FG-NET2030-2020-SUB.G1-PDF-E.pdf.
74. H. Liu, P. Yang, X. Wang, and W. Liu, "A qoe-fair synchronized transmission scheme for edge-assisted interactive virtual reality," in IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WK - SHPS), pp. 1–6, 2023.
75. Pece, F.; Kautz, J.; Weyrich, T. Adapting standard video codecs for depth streaming. In Proceedings of the EGVE/EuroVR, Nottingham, UK, 20–21 September 2011; pp. 59–66.
76. Jäger, F. Contour-based segmentation and coding for depth map compression. In Proceedings of the 2011 Visual Communications and Image Processing (VCIP), Tainan, Taiwan, 6–9 November 2011; pp. 1–4.
77. Kumar, S.H.; Ramakrishnan, K. Depth compression via planar segmentation. *Multimed. Tools Appl.* 2019, 78, 6529–6558. [CrossRef]
78. Duch, M.M.; Morros, J.R.; Ruiz-Hidalgo, J. Depth map compression via 3D region-based representation. *Multimed. Tools Appl.* 2017, 76, 13761–13784. [CrossRef]
79. Wilson, A.D. Fast lossless depth image compression. In Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, Brighton, UK, 17–20 October 2017; pp. 100–105.

80. Quach, M.; Pang, J.; Tian, D.; Valenzise, G.; Dufaux, F. Survey on deep learning-based point cloud compression. *Front. Signal Process.* 2022, 2, 846972. [CrossRef]
81. Cao, C.; Preda, M.; Zaharia, T. 3D point cloud compression: A survey. In *Proceedings of the 24th International Conference on 3D Web Technology*, Los Angeles, CA, USA, 26–28 July 2019; pp. 1–9.
82. Sonoda, T.; Grunnet-Jepsen, A. Depth Image Compression by Colorization for Intel RealSense Depth Cameras. *Intel Rev.* 1.0. 2021. Available online: <https://dev.intelrealsense.com/docs/depth-image-compression-by-colorization-for-intel-realsense-depth-cameras> (accessed on 26 April 2024).
83. Chen, M.; Zhang, P.; Chen, Z.; Zhang, Y.; Wang, X.; Kwong, S. End-to-end depth map compression framework via rgb-to-depth structure priors learning. In *Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Bordeaux, France, 16–19 October 2022; pp. 3206–3210.
84. Zanuttigh, P.; Cortelazzo, G.M. Compression of depth information for 3D rendering. In *Proceedings of the 2009 3DTV Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video*, Potsdam, Germany, 4–6 May 2009; pp. 1–4.
85. Krishnamurthy, R.; Chai, B.B.; Tao, H.; Sethuraman, S. Compression and transmission of depth maps for image-based rendering. In *Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No. 01CH37205)*, Thessaloniki, Greece, 7–10 October 2001; Volume 3, pp. 828–831.
86. Boopathiraja, S.; Punitha, V.; Kalavathi, P.; Prasath, V.S. Computational 2D and 3D medical image data compression models. *Arch. Comput. Methods Eng.* 2022, 29, 975–1007. [CrossRef] [PubMed]
87. T. Poggio, From associative memories to deep networks, Tech. rep., Center for Brains, Minds and Machines (CBMM) (2021).
88. E. Sahin, E. Stoykova, J. Mäkinen, A. Gotchev, Computer-generated holograms for 3D imaging: a survey, *ACM Computing Surveys (CSUR)*53 (2) (2020) 1–35.

89. R. Corda, D. Giusto, A. Liotta, W. Song, C. Perra, Recent advances in the processing and rendering algorithms for computer-generated holography, *Electronics* 8 (5) (2019) 556.
90. Hauswiesner, S.; Straka, M.; Reitmayr, G. Coherent image-based rendering of real-world objects. In *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, San Francisco, CA, USA, 18–20 February 2011; pp. 183–190.
91. Alexiadis, D.S.; Zarpalas, D.; Daras, P. Real-time, realistic full-body 3D reconstruction and texture mapping from multiple Kinects. In *Proceedings of the IVMS 2013*, Seoul, Republic of Korea, 10–12 June 2013; pp. 1–4.
92. Nießner, M.; Zollhöfer, M.; Izadi, S.; Stamminger, M. Real-time 3D reconstruction at scale using voxel hashing. *ACM Trans. Graph.* 2013, 32, 1–11.
93. Shen, J.; Cashman, T.J.; Ye, Q.; Hutton, T.; Sharp, T.; Bogo, F.; Fitzgibbon, A.; Shotton, J. The phong surface: Efficient 3D model fitting using lifted optimization. In *Proceedings of the Computer Vision–ECCV 2020: 16th European Conference*, Glasgow, UK, 23–28 August 2020; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; Volume 16, pp. 687–703.
94. Petkova, R.; Manolova, A.; Tonchev, K.; Poulkov, V. 3D face reconstruction and verification using multi-view RGB-D data. In *Proceedings of the 2022 Global Conference on Wireless and Optical Technologies (GCWOT)*, Malaga, Spain, 14–16 February 2022; pp. 1–6.
95. M. K. Kim, “Full color natural light holographic camera,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 8, pp. 9636–9642, 2013.
96. Ishigaki, S.A.K.; Ismail, A.W. Real-time 3D reconstruction for mixed reality telepresence using multiple depth sensors. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Communication and Intelligent Systems*, Virtual, 20–21 October 2022; pp. 67–80.
97. Anmulwar, S.; Wang, N.; Pack, A.; Huynh, V.S.H.; Yang, J.; Tafazolli, R. Frame Synchronisation for Multi-Source Holographic Teleportation Applications-An Edge Computing Based Approach. In *Proceedings of the 2021 IEEE 32nd Annual*

- International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Helsinki, Finland, 13–16 September 2021; pp. 1–6.
98. Selinis, I.; Wang, N.; Da, B.; Yu, D.; Tafazolli, R. On the Internet-scale streaming of holographic-type content with assured user quality of experiences. In Proceedings of the 2020 IFIP Networking Conference (Networking), Paris, France, 22–25 June 2020; pp. 136–144.
99. X. Zhang, Y. Hu, and T. Huang, “A multiplayer mr application based on adaptive synchronization algorithm,” in 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), vol. 1, pp. 628–632, 2020.
100. Darlis, Denny. (2016). Holographic image transmission using blue LED visible light communications. 234.pdf
101. Akyildiz, I.F.; Guo, H. Holographic-type communication: A new challenge for the next decade. *ITU J. Future Evol. Technol.* 2022, 3, 421–442.
102. Strinati, E.C.; Barbarossa, S.; Gonzalez-Jimenez, J.L.; Ktenas, D.; Cassiau, N.; Maret, L.; Dehos, C. 6G: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2019, 14, 42–50. [CrossRef]
103. Petkova, R. Challenges in Implementing Low-Latency Holographic-Type Communication Systems / R. Petkova, V. Poulkov, A. Manolova, K. Tonchev // *Sensors*. – 2022. - № 22. Т. - 9617.
104. I. Selinis, N. Wang, B. Da, D. Yu, and R. Tafazolli, “On the internet-scale streaming of holographic-type content with assured user quality of experiences,” in 2020 IFIP Networking Conference (Networking), pp. 136–144, 2020.
105. A. E. Essaili, S. Thorson, J. Alvin, J. C. Ewert, N. Tyudina, H. Caltenco, L. Litwic, and B. Burman, “Holographic communication in 5g networks,” 2022. [online] Available: <https://www.ericsson.com/49a8b1/assets/local/reports-papers/ericsson-technology-review/docs/2022/holographic-communication-in-5g-networks.pdf>.

106. A. Clemm, M. T. Vega, H. K. Ravuri, T. Wauters, and F. D. Turck, "Toward truly immersive holographic-type communication: Challenges and solutions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 1, pp. 93–99, 2020
107. K. Takano, K. Sato, R. Wakabayashi, K. Muto, and K. Shimada, "Broadcasting technique for holographic 3D moving picture utilizing network streaming," *Proc. of SPIE*, vol. 5599, pp. 98-105, 2004.
108. L. Gharai, and C. Perkins, "Holographic and 3D teleconferencing and visualization: Implications for Terabit networked applications," *Proc. IEEE INFOCOM 2006*, vols. 1-7, pp. 3046-3050, 2006.
109. X.W. Xu, S. Solanki, X.A. Liang, Y.C. Pan, and T.C. Chong, "Full high-definition digital 3D holographic display and its enabling technologies," *Proc. of SPIE*, vol. 7730, pp. 77301C-1-10, 2010.
110. Murrioni, M.; Anedda, M.; Fadda, M.; Ruiu, P.; Popescu, V.; Zaharia, C.; Giusto, D. 6G—Enabling the New Smart City: A Survey. *Sensors* 2023, 23, 7528.
111. Stotko, P.; Krumpfen, S.; Hullin, M.B.; Weinmann, M.; Klein, R. SLAMCast: Large-scale, real-time 3D reconstruction and streaming for immersive multi-client live telepresence. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 2019, 25, 2102–2112.
112. Blanche, P.-A., Bablumian, A., Voorakaranam, R., Christenson, C., Lin, W., Gu, T., Flores, D., Wang, P., Hsieh, W.-Y., Kathaperumal, M., et al. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer. *Nature* 468, 7320 (2010), 80–83.
113. Gross, M., Wu'rmlin, S., Naef, M., Lamboray, E., Spagno, C., Kunz, A., Koller-Meier, E., Svoboda, T., Van Gool, L., Lang, S., et al. blue-c: a spatially immersive display and 3D video portal for telepresence. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 22, ACM (2003), 819–827.
114. Matusik, W., and Pfister, H. 3D tv: a scalable system for real-time acquisition, transmission, and autostereoscopic display of dynamic scenes. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 23, ACM (2004), 814–824.

115. Nagano, K., Jones, A., Liu, J., Busch, J., Yu, X., Bolas, M., and Debevec, P. An autostereoscopic projector array optimized for 3D facial display. In ACM SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies, ACM (2013), 3.
116. Kim, K., Bolton, J., Girouard, A., Cooperstock, J., and Vertegaal, R. Telehuman: effects of 3D perspective on gaze and pose estimation with a life-size cylindrical telepresence pod. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM (2012), 2531–2540.
117. Jones, A., Lang, M., Fyffe, G., Yu, X., Busch, J., McDowall, I., Bolas, M., and Debevec, P. Achieving eye contact in a one-to-many 3D video teleconferencing system. ACM Transactions on Graphics (TOG) 28, 3 (2009), 64.
118. Balogh, T., and Kovačs, P. T. Real-time 3D light field transmission. In SPIE Photonics Europe, International Society for Optics and Photonics (2010), 772406–772406.
119. Wang, P.; Bai, X.; Billingham, M.; Zhang, S.; Zhang, X.; Wang, S.; He, W.; Yan, Y.; Ji, H. AR/MR remote collaboration on physical tasks: A review. Robot. Comput.-Integr. Manuf. 2021, 72, 102071.
120. de Belen, R.A.J.; Nguyen, H.; Filonik, D.; Del Favero, D.; Bednarz, T. A systematic review of the current state of collaborative mixed reality technologies: 2013–2018. AIMS Electron. Electr. Eng. 2019, 3, 181–223.
121. Park, S.; Bokijonov, S.; Choi, Y. Review of microsoft hololens applications over the past five years. Appl. Sci. 2021, 11, 7259.
122. Паньков, Б. О. Обзор оборудования для съёмки 3D изображений с последующей передачей через сети связи / Б.О. Паньков, М.А. Маколкина // Информационные технологии и телекоммуникации. - 2021. - Том 9. - № 3. - С. 48–71. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-3-56-71.
123. Шойдин, С. А. Синтезированные на приёмном конце канала связи голограммы 3D-объекта в технологии Dot Matrix / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев, А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин // Компьютерная оптика. - 2022. - Т. 46, № 2. - С. 204-213. - DOI: 10.18287/24126179-CO-1037

124. Соловьев Е. Ю., Жуковская Н. В., Гарифуллин Е. Н. Лазерные кинопроекторы / Ответственный редактор: Сукиасян АА, к. э. н., ст. преп. // Актуальные проблемы технических наук: сборник статей Международной научно-практической конференции (31 января 2015 г., г. Уфа). - Уфа: Аэтерна, 2015. - С. 60-62.
125. Чопорова Ю. Ю. Применение пучков монохроматического терагерцового излучения для исследования пространственных и спектральных характеристик конденсированных сред: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 01.04.01 / Чопорова Юлия Юрьевна; [Место защиты: Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН].- Новосибирск, 2015.- 153 с.
126. Yulong Liu, Shan Wu, Qi Xu, Hubin Liu, "Holographic Projection Technology in the Field of Digital Media Art", Wireless Communications and Mobile Computing , vol. 2021, Article ID 9997037, 12 pages, 2021.
127. Чопорова Ю. Ю. Применение пучков монохроматического терагерцового излучения для исследования пространственных и спектральных характеристик конденсированных сред: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 01.04.01 / Чопорова Юлия Юрьевна; [Место защиты: Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН].- Новосибирск, 2015.- 153 с
128. Рекомендация ИТУ-Т Q.3900 (09/2006). Требования к сигнализации и протоколы СПП – тестирование сетей СПП
129. Ибрагимов, Р.З. Расчет оптических параметров DWDM системы / Р.З. Ибрагимов, В.Г. Фокин // Электросвязь. - 2015. - №10. - С. 62-64.
130. Листвин, Владимир Николаевич. DWDM системы [Текст] : научное издание / В. Н. Листвин, В. Н. Трещиков. - Москва : Наука, 2013. - 267 с. : ил.; 24 см.; ISBN 978-5-9902333-6-2
131. Рекомендация ИТУ-Т G.698.2 (11/2018) «Amplified multichannel dense wavelength division multiplexing applications with single channel optical

- interfaces» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.1-200911-I18>
132. Bennett, G., Wu, K., Malik, A., Roy, S., & Awadalla, A. (2014). A review of high-speed coherent transmission technologies for long-haul DWDM transmission at 100g and beyond. *IEEE Communications Magazine*, 52(10), 102–110. doi:10.1109/mcom.2014.6917410
133. J. A. Arcao, V. Carl Cadag, V. Martinez, E. Roxas, K. J. Serrano and R. Tolentino, "Holographic Projection of 3D Realistic Avatar That Mimics Human Body Motion," 2019 1st International Conference on Innovations in Information and Communication Technology (ICICT), 2019, pp. 1-6.
134. R. Ratan, R. Rikard, C. Wanek, M. McKinley, L. Johnson and Y. J. Sah, "Introducing Avatarification: An Experimental Examination of How Avatars Influence Student Motivation," 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 2016, pp. 51-59.
135. Парамонов, А. И. Проблемы развития инфокоммуникационных услуг и их влияние на перераспределение трафика / А. И. Парамонов, Н. С. Сенькина // Информационные технологии и телекоммуникации. - 2016. - Том 4. - № 1. - С. 46–54.
136. OBS Studio. [Электронный ресурс] // OBS Studio : [сайт]. – 2021. – URL : <https://obsproject.com/>.
137. Wireshark. [Электронный ресурс] // Wireshark : [сайт]. – 2021. – URL : <https://www.wireshark.org/>.
138. Бельков, Д.В. Статистический анализ сетевого трафика / Д.В. Бельков, Е.Н. Едемская, Л.В. Незамова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2011. – №. 13. – С. 66-75.
139. Шелухин, О.И. Причины самоподобия телетрафика и методы оценки показателя Херста / О.И. Шелухин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2007. – Т. 3, № 1. – С. 5-14.

140. Едемская, Е.Н. Исследование сетевого трафика с помощью функции Херста / Е.Н. Едемская, Д.В. Бельков // Информатика и кибернетика. – 2015. – №. 2. – С. 39-46.
141. Молодниченко, Ю.А. Использование показателя Херста для анализа финансовых временных рядов [электронный ресурс] / Ю.А. Молодниченко / КиберЛенинка [сайт]. – <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-pokazatelya-hersta-dlya-analiza-finansovyh-vremennyh-ryadov> (дата обращения: 08.02.2024).
142. Mathcad. [Электронный ресурс] // Mathcad : [сайт]. – 2021. – URL : <https://www.mathcad.com/>.
143. Парамонов А. И. Разработка и исследование комплекса моделей трафика для сетей связи общего пользования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.12.13 / Парамонов Александр Иванович. СПб., 2014. 325 с
144. Маколкина М. А. Разработка и исследование комплекса моделей трафика и методов оценки качества для дополненной реальности: 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.- Санкт-Петербург, 2019. - 436 с.
145. Карташевский В. Г., Буранова М. А. Влияние механизмов управления QoS на показатели качества обслуживания мультимедийного трафика сети Internet // Т-Comm. 2013. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-mehanizmov-upravleniya-qos-na-pokazateli-kachestva-obsluzhivaniya-multimediynogo-trafika-seti-internet> (дата обращения: 28.04.2024).
146. Одоевский С. М., Бусыгин А. В. Аналитическая модель обслуживания мультимедийного трафика с распределением Парето на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2020. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskaya-model-obsluzhivaniya-multimediynogo-trafika-s-raspredeleniem-pareto-na-osnove-approksimatsii-rezultatov> (дата обращения: 28.04.2024).

147. Кучерявый, А. Е. Особенности видеотрафика для сетей связи следующего поколения / А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов, Д.В. Тарасов // Электросвязь. – 2010. - №2. – С. 37 – 43.
148. Демидов, Н. А. Исследование трафика 3D-видеопотока на имитационной модели / Н.А. Демидов // Электросвязь. - 2024. - №3. - С.44-48. DOI: 10.34832/ELSV.2024.52.3.008
149. AnyLogic Simulation Software – Make intelligent decisions // The AnyLogic Company : [сайт].– URL <https://www.anylogic.com> (дата обращения: 11.03.2023)
150. Кокотушкин, В. А. Одно обобщение теоремы Пальма–Хинчина: Теория вероятности и ее применение, 19:3 (1974), 622–625; Theory Probab. Appl., 19:3 (1975), 594–597
151. Гафарова, Л. М. Об особенностях применения критерия согласия Пирсона χ^2 / Л. М Гафарова, И. Г. Завьялова, Н. Н. Мустафин // ЭСГИ. - 2015. - №4 (8). URL:
152. Лихтциндер, Б. Я. Алгоритм определения средней длины очереди системы массового обслуживания через обобщенную формулу Хинчина – Поллячека / Б. Я. Лихтциндер, И. С. Макаров // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. - 2012. - №1.
153. Кудряшов Д. А. Комплексный подход при использовании современных экспертных технологий в ходе производства ситуационных баллистических экспертиз / Д.А. Кудряшов // Вестник экономической безопасности. - 2022. - №5.
154. Демидов, Н.А. Некоторые аспекты исследования передачи трафика 3D-видеоизображений / Н.А. Демидов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 4 т. / Под. ред. С. И. Макаренко; сост. В. С. Елагин, Е. А. Аникевич. СПб. : СПбГУТ, 2023. Т. 1. – С.389-394.

155. Маколкина, М.А. Распределение ресурсов при предоставлении услуги дополненной реальности / М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.А. Гоголь, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2018. – № 8. м С. 23-30.
156. TrueConf HoloLive [Электронный ресурс] // TADVISER : [сайт]. – 2021. – URL : https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:TrueConf_HoloLive
157. Cernigliaro G. et al. Extended Reality Multipoint Control Unit—XR-MCU Enabling Multi-user Holo-conferencing via Distributed Processing //International Broadcasting Convention IBC. – 2020. – С. 1-9.
158. Li N., Lefevre D. Holographic teaching presence: participant experiences of interactive synchronous seminars delivered via holographic videoconferencing //Research in learning technology. – 2020. – Т. 28.
159. Themelis C., Sime J. A. From video-conferencing to holoportation and haptics: How emerging technologies can enhance presence in online education? //Emerging technologies and pedagogies in the curriculum. – 2020. – С. 261-276.
160. Aman A. M., Shiratuddin N. Holographic Video Conferencing for Fostering Communication and Participation: Pre-Conceptualization of Focus Group of Female Learners in Arab Open University (KSA) //International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Т. 7. – №. 4.29. – С. 157-162.
161. Montagud M. et al. Social VR and multi-party holographic communications: Opportunities, Challenges and Impact in the Education and Training Sectors //arXiv preprint arXiv:2210.00330. – 2022.
162. Hjeij, Mohamad, Mario Montagud and David Rincón. “Multiuser Virtual Experiences powered by Holoportation Technologies and Multimodal Human-Computer Interaction (HCI).” Proceedings of the 15th ACM Multimedia Systems Conference (2024): n. pag
163. Fernández S. et al. Addressing Scalability for Real-time Multiuser Holoportation: Introducing and Assessing a Multipoint Control Unit (MCU) for Volumetric Video //Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia. – 2023. – С. 9243-9251.

164. L. Luevano, E. Lopez de Lara, and H. Quintero, 'Professor Avatar Holographic Telepresence Model', Holographic Materials and Applications. IntechOpen, Sep. 25, 2019. doi: 10.5772/intechopen.85528
165. Ishii, H., Kobayashi, M., Grudin, J.: Integration of Interpersonal Space and Shared Workspace: ClearBoard Design and Experiments. ACM Transactions on Information Systems, 1993. Vol. 11(4): 349-375.
166. Siemonsma S., Bell T. Holokinect: Holographic 3D video conferencing //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 21. – С. 8118.
167. Google I/O 2021 [Электронный ресурс] // Google I/O : [сайт]. – 2021. – URL : <https://io.google/2021/?lng=en>
168. Integrated Systems Europe (ISE) 2023 [Электронный ресурс] // Integrated Systems Europe : [сайт]. – 2021. – URL : <https://www.iseurope.org/welcome>
169. CES 2024 [Электронный ресурс] // CES : [сайт]. – 2021. – URL : <https://www.ces.tech/discover/?type=Article&q=Holo>
170. Banitalebi-Dehkordi, A., Pourazad, M.T. & Nasiopoulos, P. An efficient human visual system based quality metric for 3D video. Multimed Tools Appl 75, 4187–4215 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11042-015-2466-z>
171. W. Chen, J. Fournier, M. Barkowsky, and P. Le Callet, "Quality of experience model for 3DTV," SPIE Conference on Stereoscopic Displays and Applications, San Francisco, USA, 2012
172. Гоголь, А.А. Эволюция телевизионных систем в контексте оценки качества видеоизображений / А.А. Гоголь., Е.И. Туманова // Труды учебных заведений связи. - 2018. - Т.4. - №1. - С. 32-39.
173. Демидов, Н.А. Моделирование процессов обслуживания голографического трафика в сети общего пользования / Н.А. Демидов // Электросвязь. – 2017. - № 8. – С. 32-37.
174. Демидов, Н.А. Голографическая коммуникация: исследование качества восприятия голографических копий / Н.А. Демидов // Труды учебных заведений связи. – 2024. - № 10.

175. Демидов, Н.А. Анализ особенностей голографических сетевых приложений / Н.А. Демидов // Сборник научных статей X Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». – 2021. – Т. 4. – С. 688-692.
176. Демидов, Н.А. Исследование трафика приложений виртуальных аватаров / Н.А. Демидов // Сборник «Технические науки: проблемы и решения» по материалам LXVII международной научно-практической конференции. – 2022. – С. 30-36.
177. Демидов, Н.А. Исследование передачи трафика 3D видеопотока с использованием технологии DWDM / Н.А. Демидов // В сборнике научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио. – 2023. – № 1 (78). – С. 178-181.
178. Демидов, Н.А. Воспроизведение голографических изображений – анализ основных тенденций и характеристика оборудования / Н.А. Демидов // Электронный научный журнал E-Scio. – 2023. - № 4. – С. 285-293. – URL: <http://e-scio.ru/wp-content/uploads/2023/04/Демидов-Н.А.pdf>.
179. Демидов, Н.А. Применение многоуровневой облачной архитектуры тес и cloudlet для хранения собранных данных / Н.А. Демидов, В.Н. Ковлаенко, А.С.А. Мутханна // В сборнике: Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023). Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей. - 2023. - С. 193-198.
180. Демидов, Н.А. Анализ алгоритма выбора облачного хранилища данных с использованием аналитической модели / Н.А. Демидов, В.Н. Коваленко // В сборнике научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио. – 2024. – № 1 (79). – С. 143-147.
181. Демидов, Н.А. Исследование характеристик голографического трафика в рамках прогнозирования нагрузки на вычислительную инфраструктуру / Н.А. Демидов // Сборник научных статей XIII Международной научно-

технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». – 2024. – Т. 4.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

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

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

Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159

<http://sut.ru>

E-mail: rector@sut.ru

ОКПО 01179934 ОГРН 1027809197635

ИНН 7808004760 КПП 784001001

ОКТМО 40909000

07.10.2024 № 08/54
на № _____ от _____

Утверждаю

И.о. проректора по научной работе
д-р. техн. наук., доцент



А.В. Рабин

Акт

о внедрении научных результатов, полученных

Демидовым Николаем Александровичем

в диссертационной работе «Разработка и исследование моделей трафика и метода
оценки качества предоставления голографических услуг»

Комиссия в составе Елагина В.С., и.о. декана факультета инфокоммуникационных сетей и систем, Кожанова Ю.Ф. доцента кафедры инфокоммуникационных систем и заведующей лабораторией кафедры инфокоммуникационных систем Лаюшки Н.А. составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Демидовым Николаем Александровичем, использованы:

При чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Сервисы конвергентных сетей» (Рабочая Программа № 23.05/103-Д, утверждена Первым проректором-проректором по учебной работе А.В. Абиловым 23.06.2023), разделы программы:

- Сети пятого поколения. Парадигма услуг.
- Основные принципы построения сетей 5G.

При чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Математические методы проектирования услуг мультисервисных систем» (Рабочая

Программа № 24.05/85-Д, утверждена Первым проректором-проректором по учебной работе А.В. Абиловым 02.04.2024), раздел Программы:

- Задачи оценки и прогнозирования QoS функционирования систем.
- Подходы планирования и проектирования инфокоммуникационных услуг.

А также при выполнении СЧ ПНИ на тему «Разработка методов построения сетей связи на основе технологии сетей связи 2030-DD-FOG (распределенной динамической вычислительной системы туманных вычислений для микросервисных услуг), в условиях полного или частичного отсутствия инфраструктуры на территориях различного ландшафта», регистрационный номер 124040300004-8.

В рамках выполнения СЧ ПНИ и в указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Демидовым Николаем Александровичем в диссертационной работе:

- Модели трафика мультимедиа, учитывающие голографический трафик и трафик Интернета вещей, отличающиеся от известных тем, что определено количество и тип распределений, что позволяет обоснованно планировать сети связи пятого и последующих поколений.

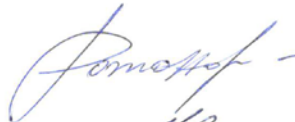
- Метод субъективной оценки качества восприятия голографической конференцсвязи, позволяющий установить, что при нагрузке на сеть в 32 голографических потока качество предоставления услуги начинает ухудшаться, а при 48 соответствует неудовлетворительной оценке по шкале MOS.

И.о. декана факультета ИКСС



В.С. Елагин

Доцент кафедры ИКС



Ю.Ф. Кожанов

Зав. лабораторией кафедры ИКС



Н.А. Лаюшка



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
СВЯЗНОЙ Альянс

192019, город Санкт-Петербург, улица Профессора Качалова, дом 7 литера А, офис 713
ИНН 7840517319, КПП 781101001, ОГРН 1147847427089
тел. +7 (812) 600-40-75, sviaznoyalliance.ru
р/сч 40702810206000098929 в Санкт-Петербургском филиале ПАО «ПРОМСВЯЗЬБАНК»
БИК 044030920, к/сч 30101810000000000920

Утверждаю
Генеральный директор
ООО «Связной Альянс»
Н.А. Солдаев
М.П.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Демидова Николая Александровича на тему «Разработка и исследование моделей трафика и метода оценки качества предоставления голографических услуг»

Настоящим актом подтверждаем, что научные результаты диссертационной работы Демидова Николая Александровича «Разработка и исследование моделей трафика и метода оценки качества предоставления голографических услуг» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в ООО «Связной Альянс» при проектировании ЦОД с возможностью предоставления голографических услуг.

При проектировании был использован следующий новый научный результат из диссертации Н.А. Демидова:

- Метод субъективной оценки качества восприятия голографической конференцсвязи, позволяющий установить, что при нагрузке на сеть в 32 голографических потока качество предоставления услуги начинает ухудшаться, а при 48 соответствует неудовлетворительной оценке по шкале MOS.

Председатель комиссии:

Генеральный директор

Н. А. Солдаев

Члены комиссии:

Технический директор

С. А. Апрелькин



Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-Технический Центр АРГУС»
Почтовый адрес: 197198, г. Санкт-Петербург,
ул. Красного Курсанта, д. 25, лит. Ж
Юридический адрес: 191028,
г. Санкт-Петербург, ул. Пестеля, д. 7
ИНН 7841364714
КПП 784101001
ОГРН 1077847466597
Тел.: +7-812-333-36-60
E-mail: office@argustelecom.ru
URL: www.argustelecom.ru



Утверждаю
Генеральный директор
ООО «НТЦ АРГУС»
А.Б. Тольдштейн

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Николая Александровича Демидова
на тему «Разработка и исследование моделей трафика и метода оценки качества
предоставления голографических услуг»

Комиссия в составе:

- руководителя направления – Петровского Н.О.
- руководителя направления Ковалева А.А.
- ведущего системного аналитика – Лихачева Д.А.

настоящим актом подтверждаем, что научные результаты диссертационной работы Николая Александровича Демидова на тему «Разработка и исследование моделей трафика и метода оценки качества предоставления голографических услуг», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, применены в ООО «НТЦ АРГУС» при проектировании систем принятия решений (DSS, Decision support system), что позволило расширить функциональные возможности системы при формировании оптимальной продуктовой линейки, отвечающей потребностям целевых клиентов, и при проведении многоуровневого автоматизированного анализа эффективности бизнеса оператора связи.

Члены комиссии:

Петровский Н.О.

Ковалев А.А.

Лихачев Д.А.