

На правах рукописи

Демидов Николай Александрович

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

Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре инфокоммуникационных систем.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Маколкина Мария Александровна

Официальные
оппоненты: **Колбанев Михаил Олегович**,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
экономический университет, кафедра
информационных систем и технологий,
профессор кафедры

Маркелов Олег Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра
радиотехнических систем,
и.о. заведующего кафедрой

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

Защита состоится 25 декабря 2024 года в 16.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

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

Автореферат разослан 25 октября 2024 года.

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

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 является 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 трафика 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 и 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.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы – 169 страниц, из них основного текста 137 страниц. Работа содержит 57 рисунков и 24 таблицы. Список литературы включает 181 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, перечислены основные научные результаты, указаны теоретическая значимость и практическая ценность полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, перечислены публикации по теме выполненного исследования.

В первой главе проведен анализ особенностей голографического типа коммуникаций, выделены основные этапы развития голографических технологий, проанализированы технические характеристики оборудования для голографической коммуникации, как записывающих, так и воспроизводящих устройств, в том числе проведен сравнительный анализ голографических проекторов и вентиляторов. Представлен анализ технических характеристик голографических 3D пирамид и голографических кубов. В работе НТС определяется как инновационная технология связи, которая реализует возможность создания эффекта присутствия посредством передачи голографических копий в режиме реального времени. Важно отметить, что технология голографической связи, состоящая из трех последовательных этапов – записи голографического контента, передачи и воспроизведения голографических копий, позволяет пользователям взаимодействовать, сохраняя эффект иммерсивности при общении.

Результаты анализа показывают актуальность исследования таких задач как разработка моделей трафика голографических услуг от различных источников, метода оценки качества предоставления услуг голографической конференцсвязи и его применения на практике. Решению этих задач и посвящены следующие главы диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты исследования трафика, обеспечивающего голографический тип коммуникаций. Для проведения исследования была создана модельная сеть, представленная на рисунке 1.

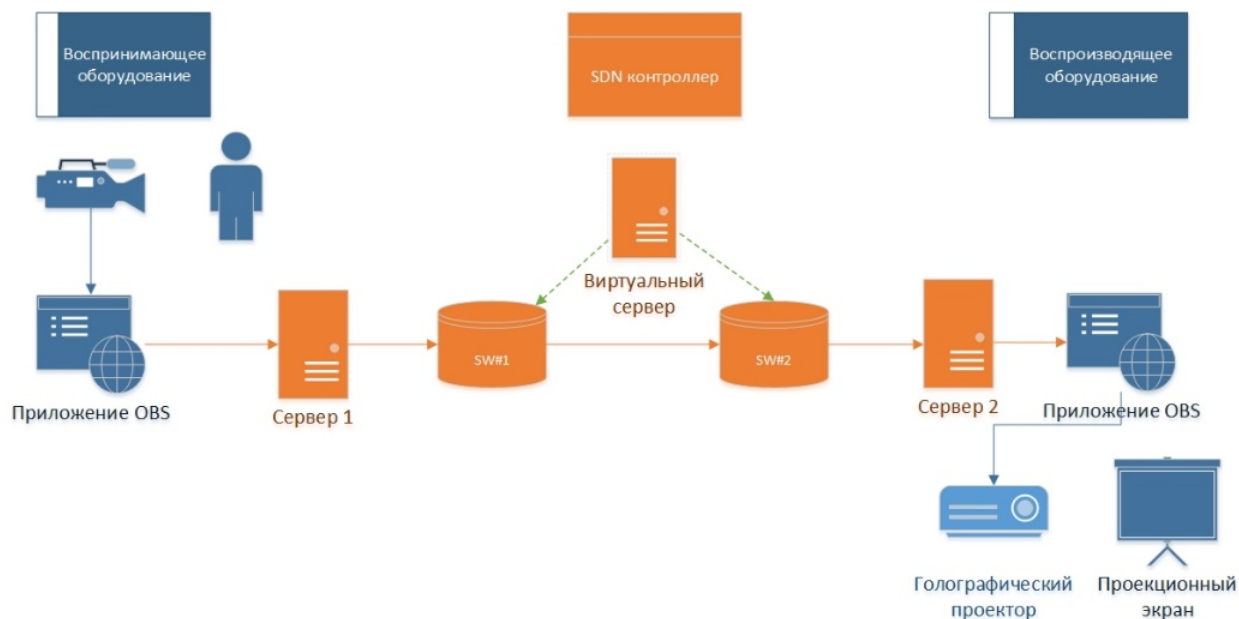


Рисунок 1 – Структура модельной сети для передачи голографического трафика

В структуру разработанной модельной сети входит следующее оборудование: одна камера с измерением глубины Microsoft Kinect, которая позволяет производить запись движущегося трехмерного изображения в реальном времени, формирование 3D-видеопотока реализовано с помощью специального программного инструмента – OBS Studio (Open Broadcaster Software). Данное приложение позволяет формировать видеопоток с камеры, транслируя готовое изображение с глубиной, что воспринимается пользователем как объемное изображение, в отличие от VLC и других видеопроигрывателей. Также в состав модельной сети входит два сервера, используемые в качестве источника и получателя трафика, два коммутатора Mikrotik (SW#1, SW#2) – для имитации работы сегмента сети SDN, которая является неотъемлемой частью сетей пятого и последующих поколений. На виртуальной машине реализован SDN контроллер, который управляет сетью и осуществляет мониторинг трафика.

На стороне получателя установлен голографический лазерный проектор LG CineBeam HF85LSR с поддержкой 3D для воспроизведения объемного изображения. Среда передачи данных между коммутаторами – оптоволокно, между коммутатором и сервером – кабель UTP cat.5e 3.0 м.

Для перехвата и анализа сетевого трафика использовалась программа Wireshark.

На рисунке 2 приведен график, показывающий интенсивность пакетов в течение сеанса наблюдения (350 с – общее время фиксации трафика). Трафик был получен при захвате 3D-камерой движений человека и передаче полученного видеоизображения через модельную сеть на лазерный голографический проектор для воспроизведения.

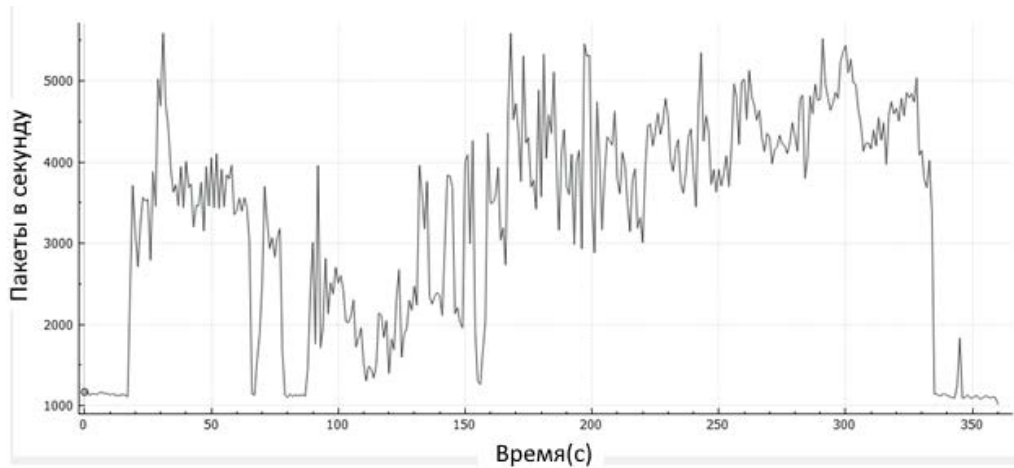


Рисунок 2 – Интенсивность передачи пакетов в течение сеанса наблюдений

Основные параметры исследуемого трафика приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Численные значения параметров голографического трафика

Параметр	Значение
Интенсивность пакетов, пакетов/с	$3290,7 \pm 113$
Интенсивность трафика, Мбит/с	$64,3 \pm 1,1$
Средний размер пакета, байт	1226 ± 1
Общее количество наблюдаемых пакетов, шт.	1151745
Продолжительность наблюдений, с	350
Общий объем трафика, Мбайт	1412,04

На рисунке 3 приведена гистограмма, иллюстрирующая распределение длин пакетов для голографического потока.

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.

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 (1):

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

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

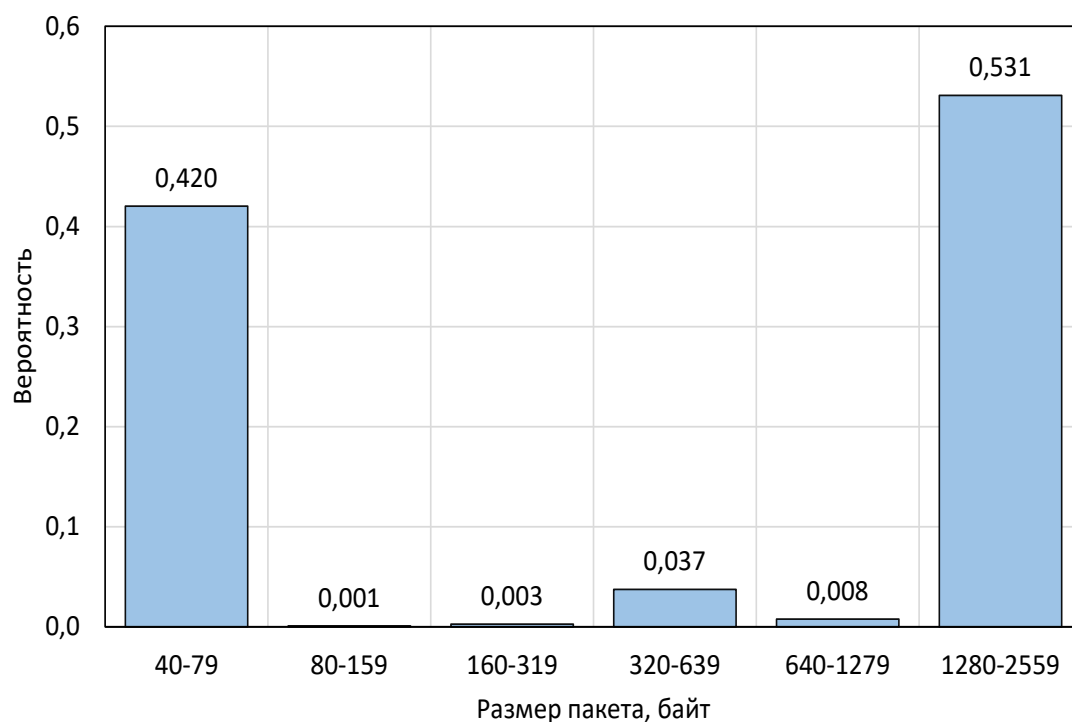


Рисунок 3 – Распределение длин пакетов для голографического потока

На рисунке 4 отображена автокорреляционная функция (АКФ) потока на интервале от 0 до 50 мс.

Как видно из рисунка 4, на данном интервале АКФ представляет собой функцию с выраженной периодичностью. Это позволяет предположить сходность процессов передачи пакетов для разных интервалов времени.

На рисунке 5 приведена АКФ для интервала времени от 0 до 30 с.

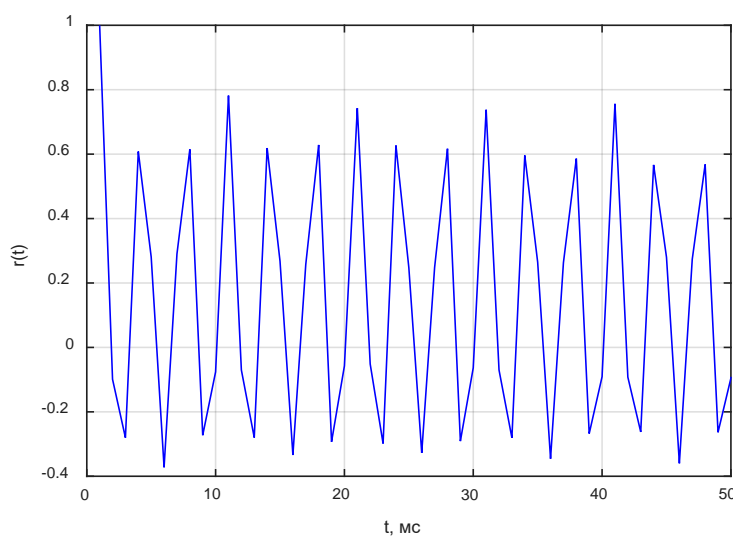


Рисунок 4 – АКФ потока на интервале от 0 до 50 мс

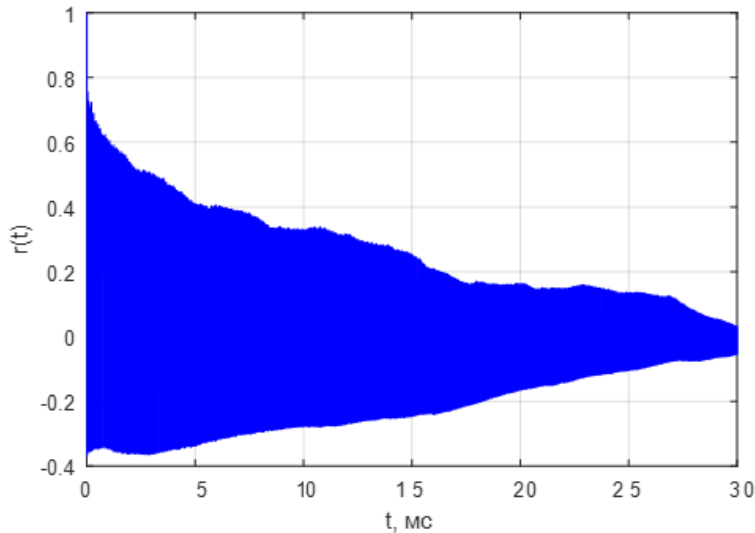


Рисунок 5 – АКФ потока на интервале от 0 до 30 с

Из графика на рисунке 5 видно, что значение АКФ медленно убывает в течении времени наблюдения, при этом функция сохраняет свойства периодичности на рисунке 5 на всем интервале наблюдений.

Для полученных результатов измерений, как временного ряда, была произведена оценка свойств самоподобия путем вычисления

параметра Хёрста, который характеризует поток и является мерой длительности долгосрочной зависимости процесса. 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. На рисунке 6 приведена зависимость логарифма нормированного размаха (R/S) от логарифма размера временного интервала.

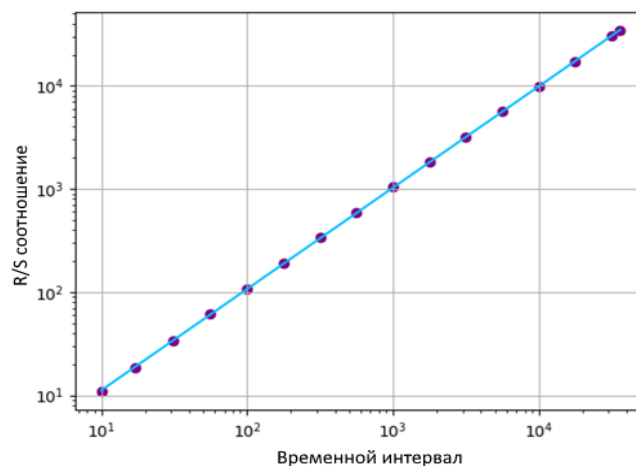


Рисунок 6 – Зависимость логарифма нормированного размаха (R/S) от логарифма размера временного интервала

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

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.

На рисунке 7 представлена гистограмма распределения интервалов времени между пакетами.

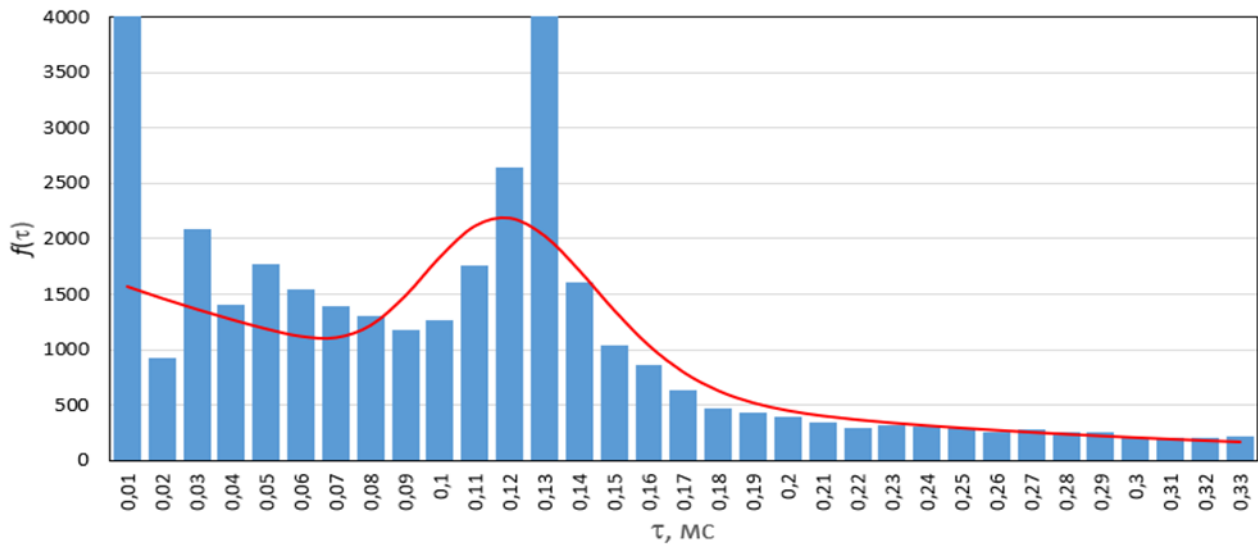


Рисунок 7 – Распределение интервалов времени между пакетами и их функция плотности вероятности

Из рисунка 7 видно, что распределение интервалов времени между пакетами 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 рисунке 7) $k = 2$; $f_1(x)$ 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 таблице 2.

Таблица 2 – 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

Таким образом, модель трафика голографических услуг представляет собой смесь экспоненциального и гамма-распределений, что позволяет обоснованно планировать сети связи пятого и последующих поколений.

Далее проведено исследование трафика мультимедиа услуг и трафика услуг Интернета вещей на обобщенной модельной сети, которая показана на рисунке 8.

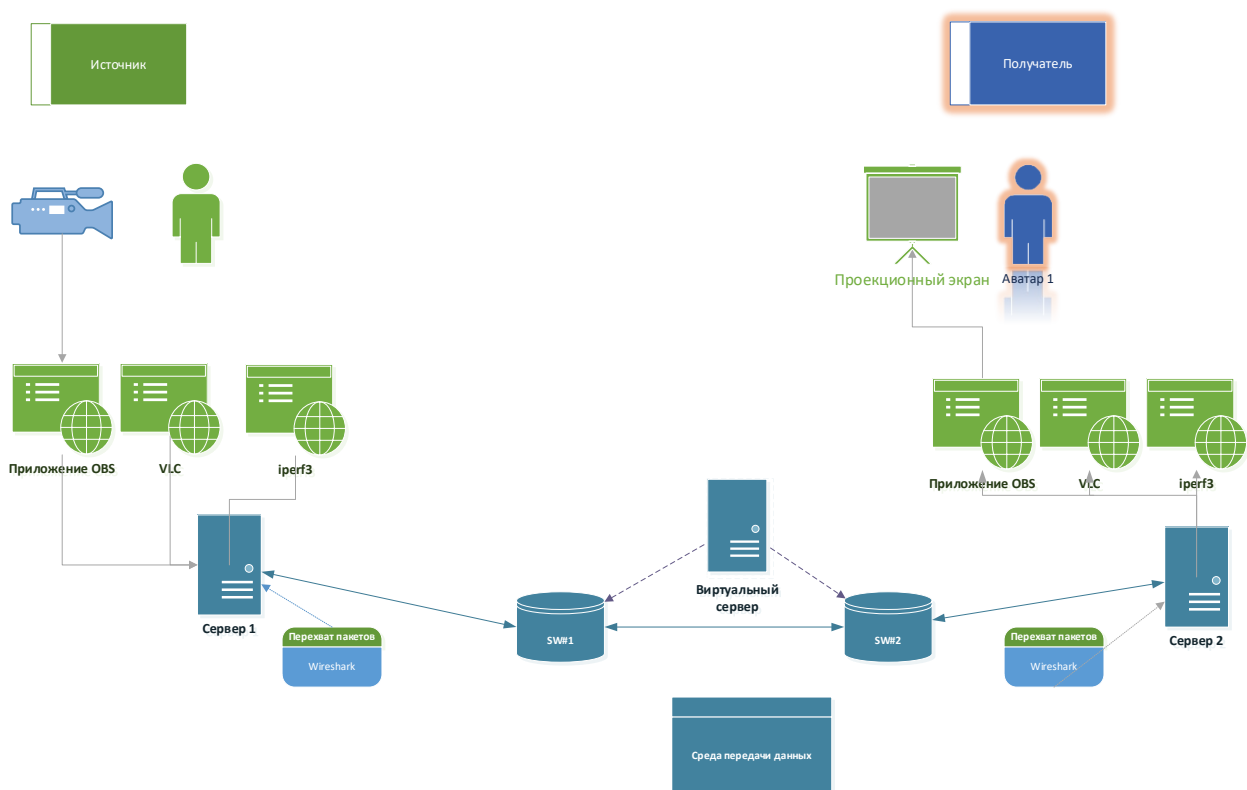


Рисунок 8 – Обобщенная структура модельной сети

Для проведения исследования трафика мультимедиа услуг была осуществлена трансляция видеопотока с применением программы VLC Media Player на сервере источника. Прием видеотрансляции, также осуществлялся с использованием программы VLC Media Player на сервере получателя. При генерации голографического трафика и видеотрансляции использовали камеру с поддержкой 3D.

На основе проведенного анализа размера пакетов, было установлено, что длина пакетов трафика мультимедиа преимущественно состоит 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%.

На рисунке 9 отображена плотность вероятности интервалов времени между пакетами для трафика мультимедиа.

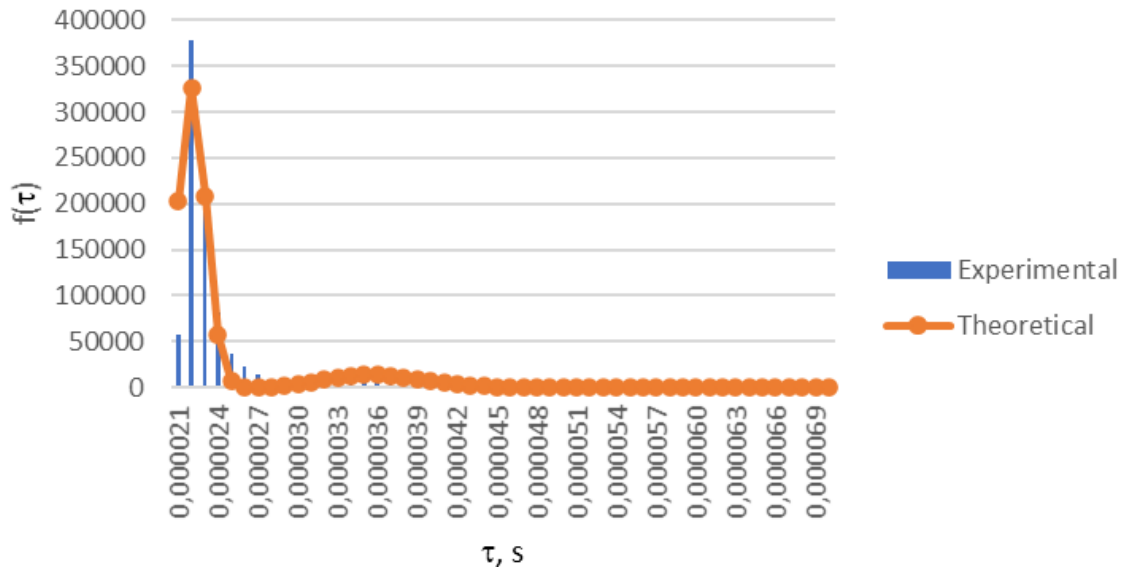


Рисунок 9 – Плотность вероятности интервалов времени между пакетами для трафика мультимедиа

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

$$f(t) = \eta_1 f_1(t_1) + \eta_2 f_2(t_2) + \eta_3 f_3(t_3) + \eta_4 f_4(t_4) \quad (3)$$

где $f_1(t_1) = \text{gamma}f(t)$, $f_2(t_2) = \text{gamma}f(t)$, $f_3(t_3) = \text{gamma}f(t)$, $f_4(t_4) = \text{gamma}f(t)$.

Трафик мультимедиа обладает средним значением промежутков между вызовами равными 5,47 мс.

Параметры распределений для трафика мультимедиа представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Численные значения параметров распределения интервалов времени между пакетами для трафика мультимедиа

№	Функция	Значение η_i	Численное значение параметров распределений	
			θ_i	β_i
1	Gamma	0,850	450	$4,9 \cdot 10^{-8}$
2	Gamma	0,125	100	$3,6 \cdot 10^{-7}$
3	Gamma	0,010	$2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^{-8}$
4	Gamma	0,015	$2 \cdot 10^7$	$1,17 \cdot 10^{-8}$

Таким образом, модель трафика мультимедиа услуг представляет собой смесь четырех гамма-распределений, что позволяет обосновано планировать сети связи пятого и последующих поколений.

Проведение исследования трафика услуг Интернета вещей осуществлялось на модельной сети, представленной на рисунке 8. Генерация данных от устройств интернета вещей осуществлялась с использованием программы iperf3. Передача данных проводилась от сервера отправителя к серверу получателя.

Результаты исследования трафика, имитирующего нагрузку от устройств Интернета вещей, представлены в таблице 5.

Таблица 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

На рисунке 10 отображена плотность вероятности интервалов времени между пакетами для трафика Интернета вещей.

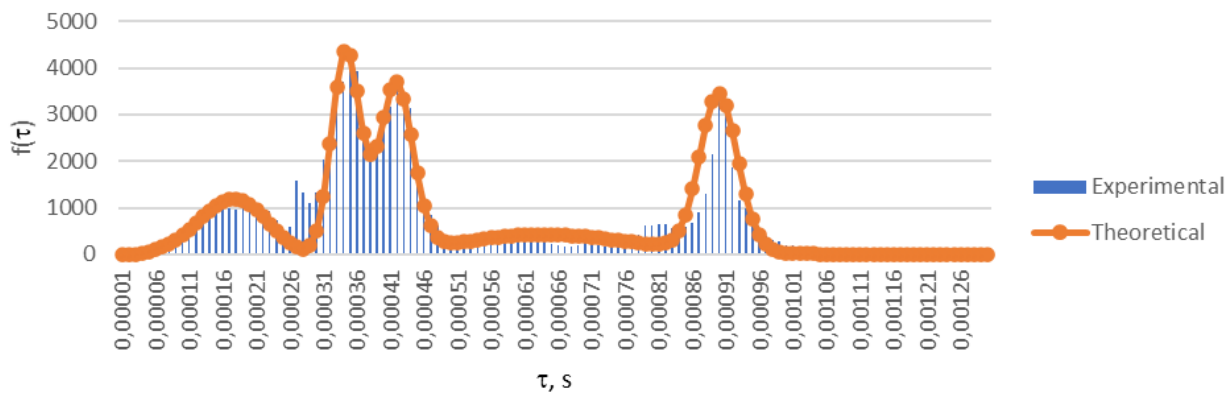


Рисунок 10 – Плотность вероятности интервалов времени между пакетами для трафика Интернета вещей

Функция плотности вероятности распределения промежутков между пакетами для трафика Интернета вещей, может быть представлена формулой:

$$f(t) = \eta_1 f_1(t_1) + \eta_2 f_2(t_2) + \eta_3 f_3(t_3) + \eta_4 f_4(t_4) + \eta_5 f_5(t_5) + \eta_6 f_6(t_6) \quad (4)$$

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).

Трафик, имитирующий нагрузку от устройств Интернета вещей, обладает средним значением промежутков между вызовами равными 1,089 мс.

Параметры распределений для трафика Интернета вещей представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Численные значения параметров распределения интервалов времени между пакетами для трафика Интернета вещей

Функция	Значение η_i	Численное значение параметров распределений	
		θ_i	β_i
Weibull	0,15	4	$0,19 \cdot 10^{-3}$
Gamma	0,24	250	$1,38 \cdot 10^{-6}$
Gamma	0,22	300	$0,14 \cdot 10^{-5}$
Gamma	0,14	25	$2,65 \cdot 10^{-5}$
Gamma	0,24	1000	$0,09 \cdot 10^{-5}$
Normal	0,01	0,071	0,015

Таким образом, модель трафика услуг Интернета вещей представляет собой смесь распределения Вейбулла, нормального распределения и четырех гамма-распределений, что позволяет обосновано планировать сети связи пятого и последующих поколений.

Основные параметры различных видов трафика, полученные в результате эксперимента представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Основные параметры исследуемого трафика

Вид трафика	Средний размер пакета данных, байт	Пропускная способность, пакеты/с	Пропускная способность, Мбиты/с	Среднее значение промежутков между вызовами, с
Мультимедиа	1301	182,9	1,9	$5,466 \cdot 10^{-3}$
Интернета Вещей	1392	918,1	10,2	$1,089 \cdot 10^{-3}$
Голографических копий	1226	3290,7	64,3	$0,148 \cdot 10^{-3}$

Приведенные выше результаты могут быть использованы для планирования и проектирования обслуживания 3D-видеотрафика, трафика мультимедиа услуг и услуг Интернета вещей в сетях связи пятого и последующих поколений. Результаты исследования распределения интервалов между пакетами и длин пакетов дают

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

Третья глава диссертации содержит результаты имитационного моделирования процессов обслуживания голографического трафика в сетях связи общего пользования, позволяющие оценить задержку при прохождении пакетов по сети.

На первом этапе исследования, был проведен эксперимент на модельной сети. Его результаты легли в основу разработки имитационной модели с помощью программного обеспечения Anylogic.

На рисунке 11 представлена разработанная имитационная модель. В данной модели приняты следующие обозначения.

Holo {i} – источники голографического трафика, аналогичные полученным в ходе эксперимента на модельной сети.

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.

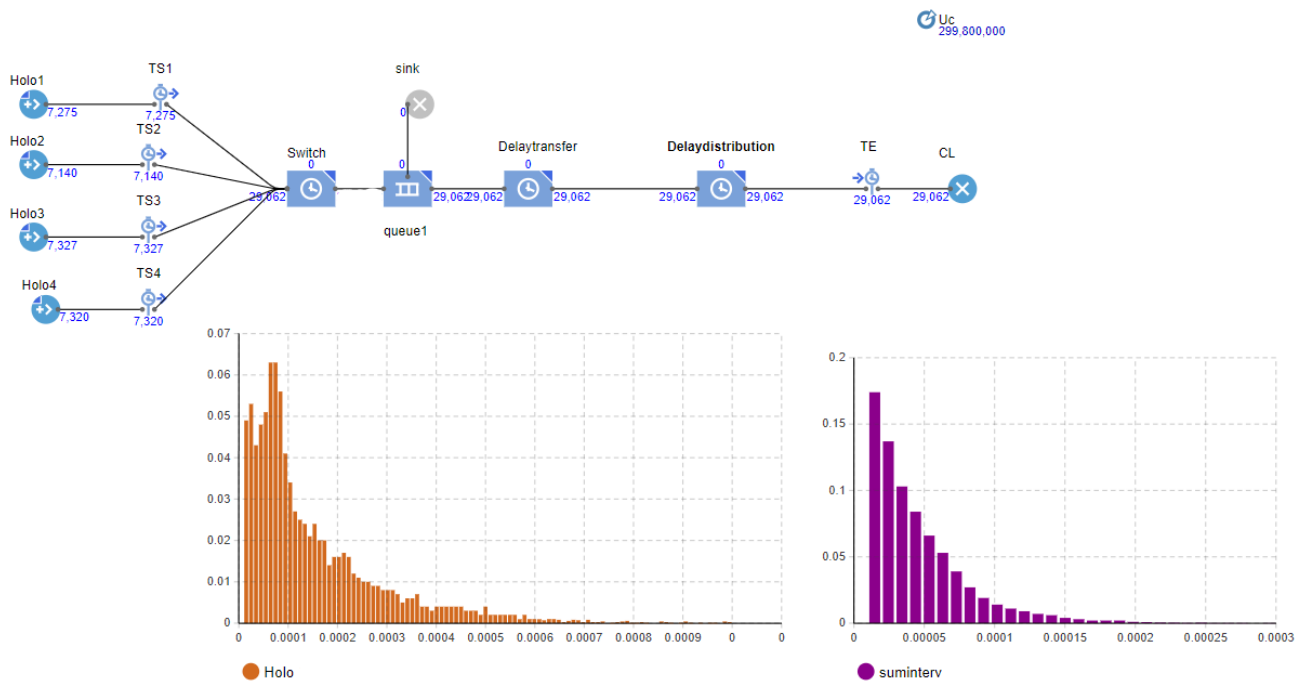


Рисунок 11 – Имитационная модель для передачи голографического трафика

Delaytransfer – задержка передачи:

$$D^{transfer} = \frac{V}{Cap}, \quad (5)$$

где Cap – пропускная способность сети, V –объем собираемых данных

$$V = u * T, \quad (6)$$

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

Delaydistribution – задержка распространения:

$$D^{distribution} = \frac{d}{kc}, \quad (7)$$

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 установить, что агрегированный поток, состоящий из нескольких голографических потоков, приобретает вид простейшего.

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 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.

Следовательно, если у нас есть множество одинаковых независимых потоков, каждый из которых имеет одинаковую интенсивность, то с увеличением числа таких потоков среднее время между интервалами в объединенном потоке будет стремиться к экспоненциальному распределению.

Таким образом, теорема Пальма-Хинчина предоставляет математическое обоснование того, что поток, полученный агрегированием множества потоков, имеет свойство простейшего потока.

На основании критерия Пирсона 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

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = \sum_{k=0}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (8)$$

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 выдвинутую 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.

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

В результате исследования подтверждено положение выдвинутой гипотезы о том, что при агрегации большого количества потоков голографического трафика, сформированный поток приобретает свойство простейшего потока. Для оценки задержки в разработанной модели, применяем формулу Полячека-Хинчина.

Так как, формула Полячека-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.

$$\bar{W} = \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} \left(1 + \left(\frac{\bar{t}}{\sigma_t} \right)^2 \right), \quad (9)$$

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

$$W = \bar{W} + D_{transfer} + D_{distribution}. \quad (10)$$

Разница между аналитическими данными и имитационной моделью не превышает 10%.

На рисунке 12 представлено графическое изображение сравнения аналитических данных и данных, полученных на имитационной модели.

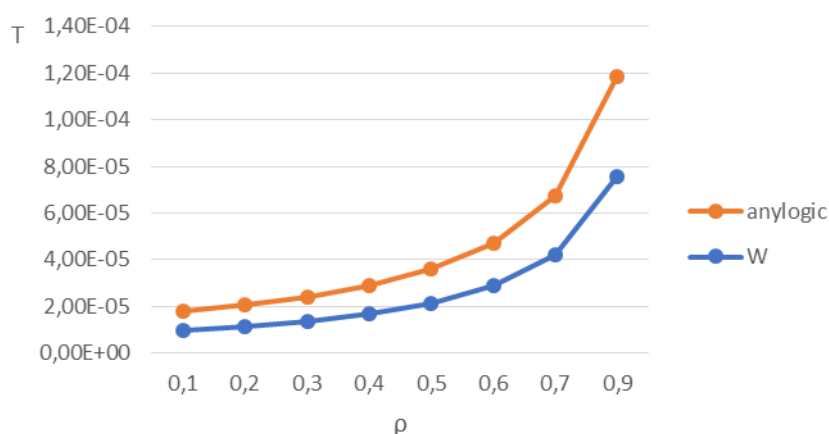


Рисунок 12 – Сравнение аналитических данных и данных, полученных на имитационной модели

Сравнение двух кривых позволяет оценить насколько приближены данные аналитической модели к данным, полученным при имитационном моделировании.

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

Глава 4 посвящена оценке качества восприятия услуги голографической конференцсвязи.

Более широкое внедрение голографических услуг в различные сферы жизни людей приводит к необходимости оценки качества предоставляемых услуг и, соответственно, разработке методов оценки. Далее представлена оценка качества восприятия голографической конференцсвязи субъективным методом оценки.

Оценка качества предоставления услуги голографической конференцсвязи проводилась в лаборатории MEGANETLAB6G кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ. Схема лабораторного стенда для проведения субъективной оценки представлена на рисунке 13.

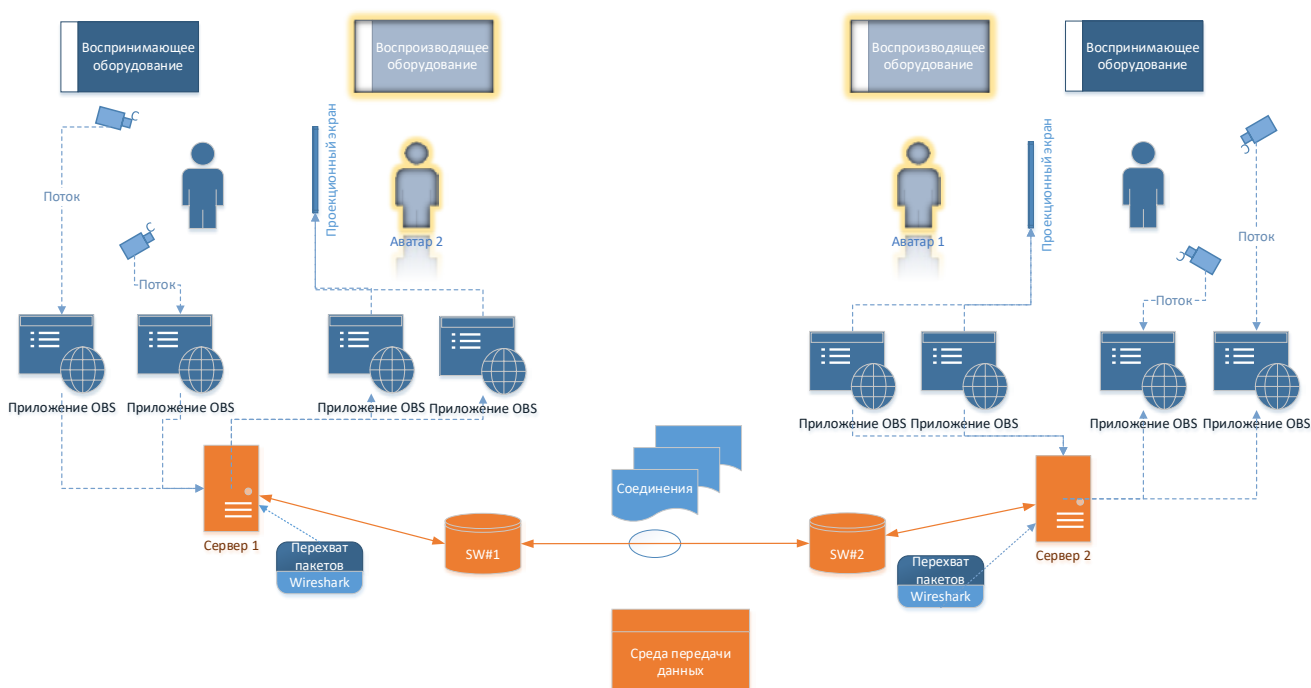


Рисунок 13 – Схема лабораторного стенда оценки качества восприятия голографической конференцсвязи

Голографическая конференцсвязь была реализована посредством двух сенсорных 3D-камер Microsoft Kinect, установленных на стороне источника, и двух таких же камер на стороне получателя, которые в реальном времени записывают движущийся объект передавая глубину, тем самым формируя объемное изображение, воспринимаемое пользователями и голографического куба для воспроизведения объемного изображения.

Полученный голографический поток был обработан с помощью специального программного инструмента – OBS Studio для последующей передачи по сети связи.

Для перехвата и анализа сетевого трафика использовалась программа Wireshark. Сегмент сети был реализован аналогично схеме, представленной на рисунке 1.

Для организации голографической конференцсвязи необходимо два оконечных терминала, на каждый из которых приходит 1 голографический поток и в обратную сторону идет также 1 голографический поток, таким образом в одном соединении передается 4 голографических потока.

Последовательно увеличивая количество соединений, отслеживалось изменение параметров сети и характеристики потоков и производилась субъективная оценка качества передаваемого голографического потока.

Для последовательного увеличения количества соединений, эти соединения создавались на одном и том же оборудовании и дублировались. В ходе экспериментального исследования по созданию голографической конференцсвязи придерживались параметров прогнозируемо возникающего узкого места – 1 Гбит в секунду на выгрузку и 1 Гбит в секунду на загрузку как принято для сетей 5G.

В данном исследовании проводилась субъективная оценка качества восприятия голографического потока экспертами. В качестве экспертов выступали сотрудники лаборатории, которые в соответствии с рекомендацией МСЭ-Р ВТ.500-14 прошли проверку остроты зрения и цветовосприятия, что позволило им оценить такие показатели, как эффект глубины, естественность изображения, визуальный комфорт, целостность, плавность движения.

При каждом увеличении количества соединений снимали характеристики агрегированного голографического потока 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 по формуле:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N r_i, \quad (11)$$

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

В ходе исследования было установлено количество соединений, являющиеся граничным уровнем, после которого качество голографического изображения значительно ухудшается и становится неудовлетворительным.

Результаты данного эксперимента представлены таблице 8.

Экспертная группа в 15 человек оценивала голографический контент в 5 баллов по 5-ти балльной шкале вплоть 8–9 соединений, что соответствовало 32 голографическим потокам. Приближаясь к числу десять и одиннадцать соединений, наблюдалось ухудшение качества отображения голографических аватаров. Резкое снижение качества восприятия было зафиксировано при 48 потоках (12–13 соединений) – эксперты показали оценку в 3 балла и ниже. Таким образом,

экспериментально установлены данные о предельном количестве соединений, при котором сохраняется высокая оценка качества восприятия пользователями.

Таблица 8 – Результаты эксперимента по оценке QoE голографического потока

Количество соединений	Число потоков	Пакетов/с	Мбит/с	Оценка QoE
1	4	24000	282,62	5
3	12	72000	847,87	5
5	20	110000	1295,36	5
8	32	145000	1472,00	5
11	44	142000	1648,64	4
12	48	145000	1672,19	3
13	52	125000	1707,52	3
14	56	140000	1707,52	2
15	60	150000	1736,96	1
19	76	147500	1766,40	1

На рисунке 14 отображена зависимость оценки восприятия от количества соединений.

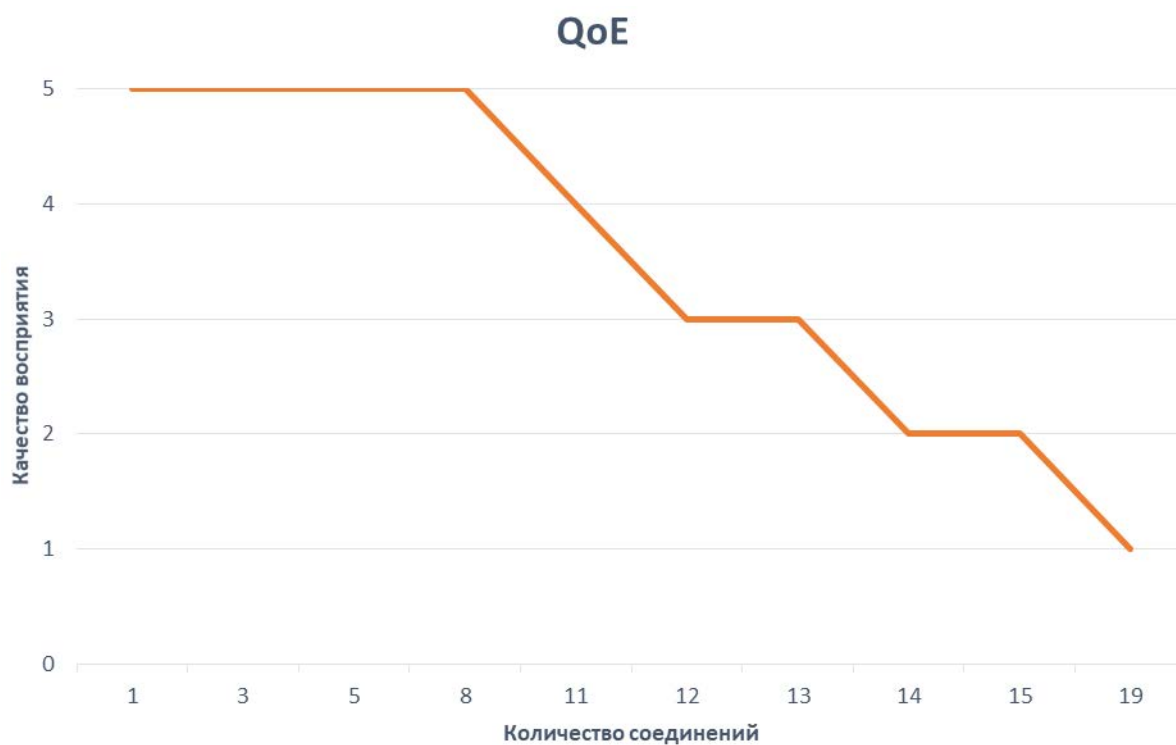


Рисунок 14 – График зависимости оценок восприятия от количества соединений

В ходе проведения субъективной оценки качества восприятия голографической конференцсвязи установлено, что при нагрузке в 32 голографических потока качество предоставления услуги начинает ухудшаться, а при 48 соответствует неудовлетворительной оценке по шкале MOS.

В заключении диссертации изложены основные результаты диссертационной работы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие научные результаты:

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.

Полученные в работе результаты обладают научной новизной и имеют практическую значимость при решении задач обоснованного планирования и проектирования сетей связи пятого и последующих поколений при предоставлении голографических услуг.

Данные исследования рекомендуется применять при внедрении голографических услуг.

Перспективы дальнейшего исследования – в практическом применении данных моделей и метода для планирования сетей пятого и последующих поколений и оценке качества предоставления голографических услуг.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Демидов Н.А. Исследование трафика 3D-видеопотока на имитационной модели // Электросвязь. – 2024. – № 3. – С.44-48. DOI: 10.34832/ELSV.2024.52.3.008.

2. Демидов Н.А. Моделирование процессов обслуживания голографического трафика в сети общего пользования // Электросвязь. – 2024. – № 8. – С. 32-37. – DOI 10.34832/ELSV.2024.57.8.005. – EDN QNDMWG.

3. Демидов Н.А. Голографическая коммуникация: исследование качества восприятия голографических копий / Н.А. Демидов, М.А. Маколкина // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10, № 5. – С. 15-22.

Публикации в других изданиях

4. Демидов, Н.А. Анализ особенностей голографических сетевых приложений / Н.А. Демидов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. X Юбилейная международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб науч. ст. в 4-х т. – СПб. : СПбГУТ, 2021. – Т. 4. – С. 688-692.

5. 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.

6. Демидов, Н.А. Исследование передачи трафика 3D видеопотока с использованием технологии DWDM / Н.А. Демидов // Сборник научно-технической

конференции Санкт-Петербургского НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио. – 2023. – № 1 (78). – С. 178-181.

7. 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>.

8. Демидов, Н.А. Применение многоуровневой облачной архитектуры тес и cloudlet для хранения собранных данных / Н.А. Демидов, В.Н. Ковлаенко, А.С.А. Мутханна // 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.

9. Демидов, Н.А. Анализ алгоритма выбора облачного хранилища данных с использованием аналитической модели / Н.А. Демидов, В.Н. Коваленко // Сборник научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио. – 2024. – № 1 (79). – С. 143-147.

10. Демидов, Н.А. Исследование характеристик голографического трафика в рамках прогнозирования нагрузки на вычислительную инфраструктуру / Н.А. Демидов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. – СПб.: СПбГУТ, 2024. – Т. 4. – С. 647-651.

11. 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. СПб.: СПбГУТ, 2023. – Т. 1. – С. 389-394.

12. Демидов Н.А. Некоторые аспекты исследования трафика голографических аватаров в режиме реального времени / Н.А. Демидов // SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH – 2022. V Международная научно-практическая конференция. – Петрозаводск, 2022. – С. 33-39.