



ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ТРАФИКА

Б. О. Паньков*, М. А. Маколкина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

* Адрес для переписки: bogdan.usman48@yandex.ru

Аннотация—Одной из наиболее важных задач текущего десятилетия является массовое внедрение услуг телеприсутствия, включающих в себя использование голографических копий человека, роботизированных аватаров, устройств-манипуляторов, а также реализация и развертывание их совместных объединений в группы и сообщества. Безусловно, произойдет это не одномоментно, и поэтому необходимо уже сейчас начинать формирование представления о возможностях реализации данных услуг, а также осуществить выявление требований, предъявляемых в дальнейшем к параметрам сетей передачи данных. Актуальность темы исследования обусловлена стремительным развитием технологий голографической коммуникации и вытекающей из этого потребности в получении представления о требуемых сетевых характеристиках линий, производительности управляющих, маршрутизирующих, коммутирующих и пользовательских устройств для повсеместной реализации данных услуг. На первом этапе исследования изучены теоретические и экспериментальные работы, определяющие параметры сети для обеспечения необходимого уровня обслуживания. На втором этапе проведен сравнительный анализ параметров сети и QoS для передачи речи и видеопотока в реальном времени. На третьем этапе обозначены предполагаемые параметры сети и характеристики трафика голографических сетевых приложений. Следующим необходимым этапом является разработка модели передачи трафика голографических копий для экспериментальной проверки соответствия предложенных параметров.

Ключевые слова—телеприсутствие, передача трехмерных изображений, дополненная реальность, сети связи 2030, 6G, голография, роботы-аватары, RGB-D, 3D, НТС.

Информация о статье

УДК 621.391

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 07.12.2022, принята к печати 20.12.2022.

Для цитирования: Паньков Б. О., Маколкина М. А. Исследование сетевых характеристик голографического трафика // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 3. С. 20–31. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-3-20-31.



RESEARCH OF NETWORK CHARACTERISTICS OF HOLOGRAPHIC TRAFFIC

B. Pankov*, **M. Makolkina**,

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*Corresponding author: bogdan.usman48@yandex.ru

Abstract—One of the most important tasks of the current decade is the mass introduction of telepresence services, including the use of holographic copies of a person, robotic avatars, manipulator devices, as well as the implementation and deployment of their joint associations into groups and communities. Of course, this will not happen all at once, and therefore it is necessary now to start forming an idea of the possibilities for implementing these services, as well as to identify the requirements for the future parameters of data transmission networks. The relevance of the research topic is due to the rapid development of holographic communication technologies and the resulting need to obtain an idea of the required network characteristics of lines, the performance of control, routing, switching and user devices for the widespread implementation of these services. At the first stage of the study, theoretical and experimental works were studied that determine the network parameters to provide the required level of service (QoS). At the second stage, a comparative analysis of network parameters and QoS for real-time voice and video stream transmission was carried out. At the third stage, the expected network parameters and traffic characteristics of holographic network applications are indicated. The next necessary step is the development of a traffic transmission model for holographic copies to experimentally verify the compliance of the proposed parameters.

Keywords—telepresence, transmission of three-dimensional images, augmented reality, communication networks 2030, 6G, holography, robot avatars, RGB-D, 3D, HTC.

Article info

Article in Russia.

Received 07.12.2022, accepted 20.12.2022.

For citation: Pankov B., Makolkina M.: Research of Network Characteristics of Holographic Traffic // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 3. pp. 20–31. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-3-20-31.



Введение

На сегодняшний день развитие сферы ИТ протекает с огромной скоростью, что, безусловно, влечет за собой появление новых высокоперспективных систем и технологий, выставляющих иные, гораздо более значимые и существенные требования к сетям передачи данных по отношению к существующим на сегодняшний момент [1]. Организации, занимающиеся разработкой рекомендаций для новых технологий и изобретений, активно следят за тенденциями развития сферы телекоммуникаций и в своих работах оперируют исследовательскими данными, наработками и результатами. Из чего можно сделать вывод, что на начальном этапе возникновения технологии, она никогда не сопровождается стандартизацией, вследствие малой изученности и концептуальных недоработок. Кроме всего прочего, на стадии зарождения для любой технологии должен существовать первоначальный список минимальных требований, функциональных возможностей и задач, позволяющий разработчикам телекоммуникационных сетей получить представление дальнейшего направления развития. Примером такой технологии, находящейся в стадии концепта, является Связь Голографического Типа (НТС – *Holographic Type Communication*). Голографический объект должен одновременно содержать в себе информацию об окружающем пространстве, включая координаты позиции, параметры точки наблюдения, а также порядка 43 различных перспектив для каждого пикселя кадра [2]. Исходя из этого можно предположить, что объем данных, требующихся для реализации полноценной коммуникации с применением технологии НТС, многократно возрастет и повлечет за собой необходимость в резком увеличении пропускной способности линий связи, улучшении значений QoS (*Quality of Service*) и QoE (*Quality of Experience*), а также снижении значений RTT (*Round Trip Time*), джиттера и коэффициента потери пакетов.

В настоящее время активно ведутся исследования в данном направлении, однако все ещё не существует стандартов, точно характеризующих способ коммуникации, основанный на регистрации или создании 3D-объекта, и его последующем воспроизведении в удаленной локации с сохранением объема. В соответствии с этим, целью данной работы является исследование сетевых характеристик при передаче голографического трафика, а также разработка структуры лабораторного стенда, требуемого для проведения измерений. Исследования будут организованы на модельной сети кафедры ССиПД, которая включает в себя систему DWDM «Волга», коммутаторы 2 уровня Fast Ethernet, камеру RGB-D, а также проектор с поддержкой 3D. В дополнение к вышеперечисленному, задачами в данном проекте являются, во-первых, краткий обзор технологии НТС, а также способов создания и воспроизведения голограмм, во-вторых, анализ доступной литературы на предмет наличия требований к сети передачи данных и методов оптимизации трафика НТС.



1 Holographic Type Communication

Проведенный анализ современных научных трудов показал, что на сегодняшний день наблюдается тенденция в переосмыслении потенциалов и возможностей существующих стандартов связи [3]. Так определены направления и перспективы внедрения коммуникационных инноваций на базе технологии голографического взаимодействия.

НТС подразумевает организацию общения между конечными пользователями, опираясь на возможности методов регистрации и дальнейшего воспроизведения на удаленной стороне 3D-объектов – голографии [4]. В сочетании с развитой системой информированности об особенностях окружающей среды и/или производительным алгоритмом регистрации местоположения пользователя в пространстве, НТС способна свести практически до минимума различия между виртуальной и физической реальностями.

Голографическая коммуникация предполагает формирование голографической модели собеседника, или, другими словами, объемного изображения, предоставляющего возможность не только распознать образ человека, но и точно передать его жесты и эмоции¹. В действительности, голографический звонок можно характеризовать, как проецирование оцифрованных трехмерных образов коммуницирующих пользователей в дополненной реальности в режиме реального времени.

Для создания трёхмерного изображения необходимо преодолеть последовательность из нескольких обязательных этапов. В начале производится процесс формирования 3D-объекта: непрерывная съемка пользователя в 360° с использованием специального программного обеспечения и RGB-D (Red Green Blue-Depth) камеры, либо поочередное запечатление кадров со смещением в 15–30° с дальнейшей склейкой, совмещением и отладкой. Далее созданная образ-голограмма через сети связи поступает на экраны воспроизводящих устройств: MR-очки (*Mixed Reality*, охватывает дополненную и виртуальную реальности), проектор с поддержкой 3D или AR смартфон.

Сканирование 3D-образа для последующего формирования голограммы можно осуществить несколькими способами:

- аналоговый, с применением лазера;
- цифровой, для создания голограмм в котором применяется различное ПО для 3D-моделирования, к примеру, Blender, 3ds Max и CINEMA 4D;
- цифровой, с применением 3D-сканеров, основанных на таких технологиях², как:
 - Structured Light;
 - Time of Flight;
 - Depth from Stereo;
 - Light Field;
 - Lidar.

¹ Когда голограммы войдут в повседневную жизнь // VC.ru. URL: <https://vc.ru/future/26828-kogda-gologrammy-voydut-v-povsednevnuyu-zhizn> (дата обращения: 12.11.2022).

² Хабр: Камеры глубины – тихая революция (когда роботы будут видеть) Часть 1. URL: <https://habr.com/ru/post/457524/> (дата обращения: 16.11.2022).



Рассматривая способы воспроизведения голограмм, можно выделить две основные группы:

1) требующие привлечения дополнительных устройств, преобразующих восприятие человеком пространства, к примеру, очки смешанной реальности, проекция изображения в которых осуществляется на специальные стекла;

2) голографические системы и проекторы, формирующие голограммы, которые могут быть восприняты невооруженным взглядом [5].

Исходя из результатов многих исследований, видно, что трафик голографических сетевых приложений чрезвычайно чувствителен к задержкам передачи данных, что, как следствие, накладывает жесткие требования к границам полосы пропускания и значению круговой задержки, максимальная величина которой не должна превышать 5 мс.

2 Структура лабораторного стенда

В рамках проводимого исследования необходимо перехватить и проанализировать трафик услуг голографической коммуникации, выявить пороговые значения параметров, напрямую влияющих на показатели качества обслуживания (QoS), качества восприятия (QoE), или, другими словами, на итоговую субъективную оценку, которая, в масштабах пользователя, выходит на первое место.

Для этого, на базе модельной сети лаборатории «Исследования сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного интеллекта для сетей 6G» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, было организовано сетевое соединение между RGB-D камерой Kinect v2 for Xbox One и проектором с поддержкой 3D – LG CineBeam HF85LSR.

Структура лабораторного стенда (рис. 1, см. ниже) включает в себя систему плотного спектрального уплотнения, в которой мультиплексор DWDM V6 объединяет выходные данные нескольких оптических передатчиков для передачи по одному оптическому волокну, а на приемном конце другое устройство DWDM V10 (демультиплексор) разделяет объединенные оптические сигналы и передает каждый канал в оптический приемник.

Для создания условий, максимально приближенным к реальным, в магистральную оптическую линию установлен аттенюатор Grandway FHA2S01, поддерживающего широкий диапазон затухания сигнала 0~80 дБ с возможностью выбора шагов: 1 дБ, 0.05 дБ, что позволяет имитировать различную протяженность оптоволоконной линии.

Также модельная сеть содержит два управляемых стекируемых коммутатора D-Link xStack DES-3526, используемых для тестирования влияния ограничения полосы пропускания портов 100Base-TX на качество восприятия голографического потока.

ПК-отправитель и ПК получатель подключаются, соответственно, к одному из портов коммутатора, принадлежащего к стороне отправителя, и к коммутатору, относящемуся к стороне получателя, при помощи сетевых кабелей патч-кордов UTP / RJ45, Cat. 5e.

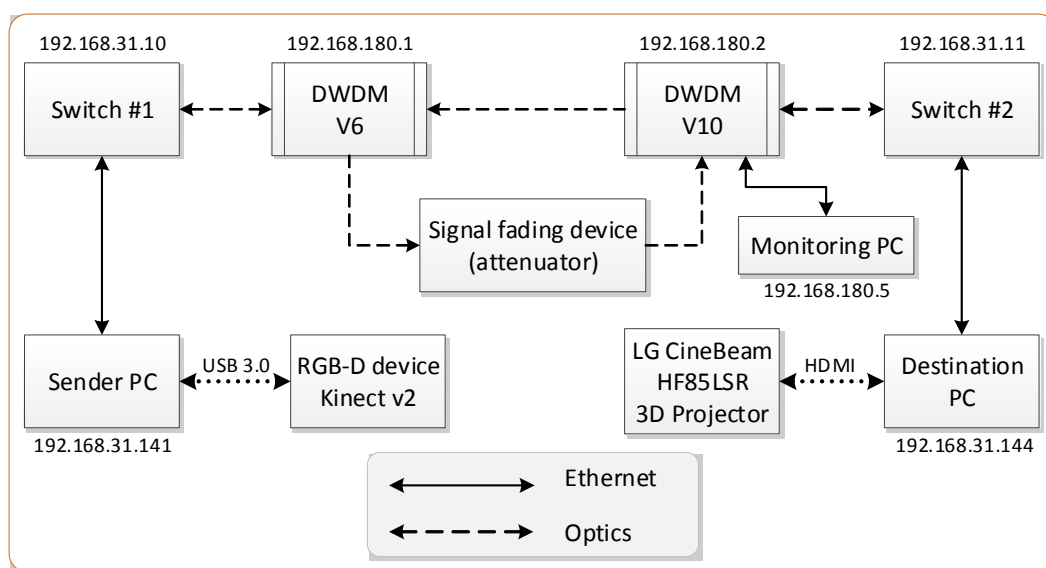


Рис. 1. Схема модельной сети обмена голографическими данными

Потоковое вещание голографического трафика организовано на базе инструмента OBS Studio (*Open Broadcaster Software*) версии 27.2.3 и плагина NDI (*Network Device Interface* – стандарт программного обеспечения для передачи и получения видео высокой четкости по компьютерной локальной сети в высоком качестве и низкой латентностью в реальном времени). К преимуществам OBS относятся возможность захвата видео с внешней RGB-D камеры, поддержка большого количества фильтров для источников видео, в том числе цветовой коррекции и идентификации хромакея, а также высокая скорость обработки данных, обеспечиваемая производительными алгоритмами сжатия пакетов, с целью снижения потребления трафика. Ускорение передачи изображения также достигается благодаря возможностям разделения голографического кадра на несколько частей: движущиеся и остающиеся статически неподвижными. Вследствие этого, при потоковой трансляции, OBS Studio в режиме реального времени обновляет только те участки изображения, на которых были распознаны изменения.

Захват и анализ трафика будет производиться с помощью программного инструмента Wireshark.

3 Анализ влияния затухания и пропускной способности канала связи на характеристики голографического трафика

Первым этапом было осуществлено тестирование влияния затухания сигнала (dB) в оптическом кабеле на частоту битовых ошибок (BER – *Bit Error Rate*) и качество воспроизводимого голографического видеоизображения. Для этого на устройстве ослабления уровня сигнала (аттенюаторе) последовательно были установлены различные значения затухания сигнала (табл. 1) в диапазоне от 0 до 27 дБ. Оценка воздействия затухания на характеристики трафика производилась с целью выявления предельного значения расстояния, на которое услуги голографической коммуникации могут быть предоставлены с выполнением требований по качеству обслуживания, качеству восприятия и без систем регенерации сигнала.



Таблица 1.

Влияние затухания сигнала на частоту битовых ошибок

Затухание сигнала (dB) в оптическом кабеле	Эквивалентная затуханию протяженность оптической линии (км)	Частота битовых ошибок BER – количество ошибок в битах в единицу времени	Время приёма-передачи RTT (мс)
0,0	< 1	0,0	0,095
2,0	10	0,0	0,154
4,0	20	0,0	0,121
6,0	30	0,0	0,215
8,0	40	0,0	0,232
10,0	50	0,0	0,398
12,0	60	0,0	0,403
14,0	70	0,0	0,389
16,0	80	0,0	0,467
18,0	90	0,0	0,455
20,0	100	$7,84 * 10^{-9}$	0,812
22,0	110	$4,71 * 10^{-6}$	0,765
24,0	120	$1,77 * 10^{-4}$	0,836
25,0	125	$7,12 * 10^{-4}$	1,112
26,0	130	$1,56 * 10^{-3}$	1,063
27,0	135	– (Превышено пороговое значение BER)	– (Соединение разорвано)

Мониторинг значения BER производился на ПК, подключенном к порту «ETH 1» DWDM V10, в Web-интерфейсе системы управления «Атлас». Из значений таблицы 1 видно, что число битовых ошибок не превышает нулевого значения до границы затухания в 18 дБ (рис. 2, см. ниже). Это обусловлено задействованием DWDM алгоритма аппаратной, прямой коррекции ошибок FEC (*Forward Error Correction*) [6].

Дальнейшее увеличение затухания приводит к исчерпанию возможностей коррекции, появлению битовых ошибок и эквивалентному снижению субъективной оценки качества.

В системах связи рост величины BER наблюдается вследствие воздействия шума в канале передачи, наличии помех, искажений, проблем в битовой синхронизации, затухания и замирания, обусловленного возникновением многолучевого распространения³.

Значение затухания в 27 дБ является критическим для модельной сети обмена голографическими данными, так как количество ошибок в битах в единицу

³ Прямая коррекция ошибок (FEC) при передаче данных // FS Community. URL: <https://community.fs.com/ru/blog/forward-error-correction-fec-in-100g-data-transmission.html> (дата обращения: 22.11.2022).



времени достигает порогового значения, и система DWDM переходит в аварийный режим (прекращается обмен трафиком).

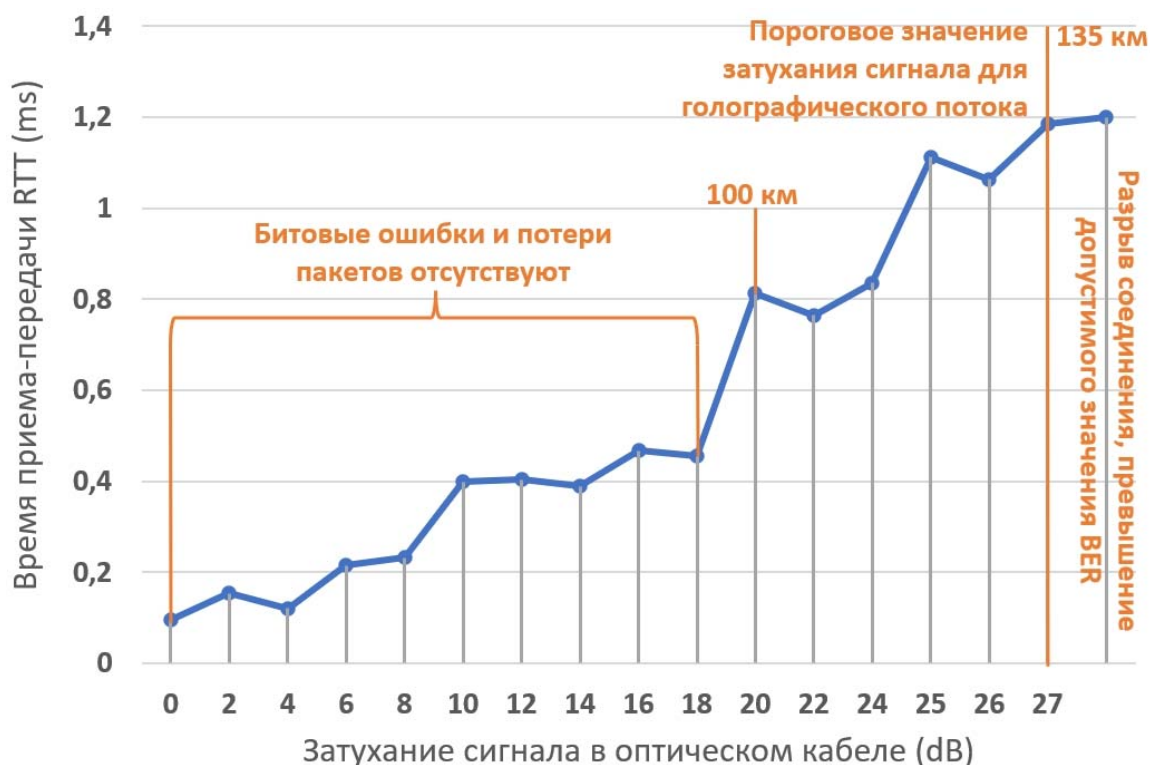


Рис. 2. Влияние затухания сигнала на значения RTT и BER

Значение BER в тестируемой модельной сети может быть улучшено путем наращивания мощности передатчика до предела, не вызывающего перекрестных помех. Как следствие, это позволит увеличить уровень принимаемого сигнала и повысить точность его детектирования. Также возможно применение технологии динамически адаптирующейся скорости передачи данных, выбора помехозащищенной, надежной схемы модуляции, использование производительных алгоритмов кодирования и методов прямой коррекции ошибок.

Метод цифровой обработки сигнала FEC способен предотвратить сбои и исправить ошибки при передаче данных путем введения в канал избыточной служебной информации, называемой кодом с исправлением ошибок, на базе которого может быть восстановлено первоначальное содержание пакета⁴. FEC позволяет приемнику исправлять ошибки локально, без задействования обратного канала и запросов о повторной передаче данных, что, безусловно, оказывает положительное влияние на снижение времени доставки пакетов. Таким образом, если количество ошибок при передаче соответствует пределам корректирующей способности метода FEC, то каналный декодер обнаружит и исправит ложные биты. Принцип работы аппаратной коррекции позволяет увеличить расстояние передачи сигнала без применения регенерации, что, согласно таблице 1, позволяет достичь функционирования модельной сети на предельной

⁴ Особенности измерения параметров каналов с цифровой модуляцией // Медиа Спутник. URL: <https://clck.ru/32qsbW> (дата обращения: 22.11.2022).



для голографического трафика протяженности оптической линии в 135 км (соответствует максимально возможному для исправления количеству BER в канале связи).

В ходе исследования также были получены значения одной из важнейших метрик при анализе голографического трафика – показателя задержки (*delay, latency*), которая характеризуется как время, затраченное на прохождение сигнала, его обработку, преобразование и передачу между входящими и выходящими интерфейсами коммутирующих и маршрутизирующих устройств. Вычисляется рассматриваемый показатель следующим образом:

- 1) отправитель формирует запрос и посылает получателю;
- 2) получатель формирует ответ и посылает отправителю;
- 3) отправитель, замеряя время между запросом и полученным ответом, вычисляет время задержки.

Другими словами, это время приёма-передачи, которое требуется для отправки пакета данных в пункт назначения, плюс время, которое требуется для подтверждения того, что этот пакет был получен обратно⁵. Задержка, измеренная данным способом, называется круговой (RTT) и измеряется в миллисекундах (ms).

RTT влияет на оперативность голографической коммуникации: высокие значения RTT снижают быстродействие системы и, как следствие, воздействуют на степень комфортности использования данной услуги пользователями.

Из значений таблицы 1 следует, что величины RTT варьируются в пределах от 0,095 до 1,112 мс, что обуславливается суммой задержек, возникающих на физическом уровне, существующими ограничениями в быстродействии сетевого оборудования, характеристиками используемых проводников и возможностям программного обеспечения и протоколов, используемых для формирования и трансляции голографического потока.

Исходя из общепринятой скорости распространения света в вакууме и заданного коэффициента преломления сердечника оптоволокна, используемого в модельной сети, можно сделать вывод, что волоконный кабель в проводимом исследовании вносит задержку порядка 4,83–5 мкс на 1 км⁶.

Полученные показатели RTT можно обосновать сильным влиянием на сигнал дисперсии в оптоволокне, возникающей при достижении скорости в 10 Гбит/с и выше на используемом в тестировании DWDM оборудовании. Согласно технической документации⁷, в среднем, модули компенсации дисперсии вносят задержку равную 65 мкс на участке волокна протяженностью 100 км, при том, что в самом оптическом кабеле задержка на данном участке составит примерно 500 мкс.

Также показатели RTT из таблицы 1 обусловлены использованием активного оборудования – коммутаторов, обеспечивающих адресную передачу данных между узлами сети и выполняющих пересылку кадров с оптических SFP портов

⁵ Методы коррекции ошибок (ECC, EDC, FEC) // Студопедия. URL: <https://clck.ru/32qskc> (дата обращения: 25.11.2022).

⁶ Round Trip Time (RTT) // Глоссарий. URL: <https://clck.ru/32qsp2> (дата обращения: 26.11.22).

⁷ Задержка в оптическом волокне // DWDM.RU. URL: <https://www.dwdm.ru/wiki/52> (дата обращения: 26.11.2022).



в RJ45 интерфейсы. Задержка на коммутаторах возникает вследствие времени, требуемого для обработки и перераспределении пакетов данных перед их передачей к другому активному узлу, а также может увеличиваться в результате образования сетевых фреймовых очередей и переполнения буферной памяти устройства.

На величину задержки, безусловно, воздействуют сетевые функции и протоколы, повышающие безопасность передачи данных: брандмауэры, устройства обнаружения сетевых атак и системы шифрования. В качестве транспорта для голографического потока в исследовании выступал протокол TCP (*Transmission Control Protocol*), предназначенный для осуществления высокой надежности доставки: пакеты приходят целиком, без ошибок, в правильном порядке⁸. Для того чтобы обеспечить гарантию доставки данных, TCP использует подтверждение получения для каждого сегмента данных, что эквивалентно увеличивает показатель круговой задержки⁹.

Учитывая тот факт, что для технологии голографической коммуникации круговая задержка не должна превышать 5 мс, очень важно найти правильный баланс между безопасностью и производительностью сети обмена голографическими данными.

Вдобавок требования по задержке для рассматриваемой голографической системы взаимодействия пользователей накладывают ограничения по возможному расстоянию, на которое можно предоставлять услугу с надлежащими QoS и QoE.

В ходе эксперимента голографическая трансляция соответствовала допустимому значению качества восприятия до границы затухания сигнала в 18 дБ (эквивалентная протяженность оптической линии – 90 км). При этом наблюдалось хорошее качество голографического видеоизображения, насыщенная цветопередача, высокая частота кадров, плавное движение изображение, полная детализация, отсутствие запаздывания звукового потока и излишних шумов, практически незаметная задержка между движением объекта перед RGB-D камерой и его отображением с использованием 3D проектора на экране.

Однако при последующем увеличении значения затухания в линии связи, наблюдается появление различных артефактов и повреждений на голографическом видеоизображении, снижается детализация, насыщенность цвета, появляется длительная задержка между запуском видеотрансляции и отображением изображения на экране. Также экспоненциально сокращается частота кадров, становятся сильно заметны пробелы в последовательности кадров потока, при движении изображения наблюдаются прерывистость и отчетливые колебания, часто происходят замирания видео- и аудиопотока, возникают излишние шумы на изображении.

Для тестирования влияния полосы пропускания (Мбит/с) на качество воспроизводимого голографического видеоизображения, к одному из свободных RJ45 портов коммутатора #2 на стороне получателя трафика было произведено

⁸ Задержка передачи данных в современных сетях магистрального уровня // Технологии и средства связи. URL: <https://clck.ru/32qsvS> (дата обращения: 28.11.2022).

⁹ Транспортный протокол TCP // Sysadminium. URL: <https://sysadminium.ru/tcp/> (дата обращения: 28.11.2022).



подключение ПК, позволяющего производить настройку и отладку конфигурационных параметров устройства. В окне «Port Bandwidth» последовательно устанавливались различные значения максимальной скорости передачи и приема данных для выбранного интерфейса.

В результате было выявлено, что пороговым значением пропускной способности, ниже которого частота кадров резко снижается, появляются высокие задержки между кадрами голографического видеопотока, а изображение начинает двигаться прерывисто и с колебаниями, многократно ухудшая качество восприятия, является показатель, равный 16 Мбит/с.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что для достижения требуемых для голографической коммуникации сетевых характеристик, необходимо задействовать усовершенствованные алгоритмы кодирования и обработки информации, использовать быстродействующие транспортные протоколы, а также модернизировать методы преобразований и сжатия голографических объемных копий.

Заключение

На базе модельной сети обмена голографическими данными было получено представление о требуемых сетевых характеристиках линий, производительности управляющих, маршрутизирующих, коммутирующих и пользовательских устройств для повсеместной реализации голографических услуг.

Осуществлен сравнительный анализ параметров, таких как затухание сигнала в оптическом кабеле, полоса пропускания канала связи, задержка при передаче пакетов, частота битовых ошибок BER, процент задействования аппаратной коррекции FEC, джиттер и потеря пакетов, которые прямо пропорционально влияют на итоговое качество обслуживания и восприятия голографического трафика.

Для успешного развития технологий голографической коммуникации необходимым условием является внедрение новых поколений сетей связи, обладающих значительной полосой пропускания и способных осуществить выполнение требований с минимальными значениями задержек. Благодаря развитию производительных стандартов связи в ближайшем будущем голографические звонки могут стать реальностью и получат повсеместное распространение.

Литература

1. 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. Новые перспективы научных исследований в области сетей связи на 2021–2024 годы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 3. С. 1–19. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-3-1-19.

2. Кучерявый А. Е., Бородин А. С., Киричек Р. В. Сети связи 2030 // Электросвязь. 2018. № 11. С. 52–55.

3. Галактионов М. А., Маколкина М. А., Киричек Р. В. Обзор протоколов сетей связи шестого поколения и сетей 2030 // 76-я научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2021. С. 183–186.

4. Kiran, Makhijani. Holographic Type Communication / Delivering the Promise of Future Media by 2030. 15 Oct 2019, Geneva. 24 p.



5. Хисматуллина В. Структурированный свет в Kinect. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strukturirovannyy-svet-v-kinect> (дата обращения: 20.11.2022).

6. Da Bin, Carugi Marco Technical Report: "Representative use cases and key network requirements for Network 2030". ITU-T, 16.01.2020. pp. 3–4.

References

1. Koucheryavy A., Kirichek R., Makolkina M., Paramonov A., Dunaytsev R., Pirmagomedov R., Borodin A., Vladyko A., Muthanna A., Vybornova A., Vladimirov S., Grishin I.: Novel Prospects of Scientific Research in the Field of Telecommunications Networks for the 2021–2024 Years // Telecom IT. 2020. Vol. 8. Iss. 3. pp. 1–19 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-3-1-19.

2. Koucheryavy A. Eu., Borodin A. S., Kirichek R. V. Network 2030 // Electrosvyaz. 2018. №11. pp. 52–55.

3. Galaktionov M.A., Makolkina M.A., Kirichek R.V. Overview of the protocols of the sixth generation communication networks or networks 2030 // 76-ya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya Sankt-Peterburgskogo NTO RES im. A.S. Popova, posvyashchennaya Dnyu radio: sb. dokladov. SPbGETU «LETI». Sankt-Peterburg. 2021. Pp. 183–186.

4. Kiran, Makhijani. Holographic Type Communication / Delivering the Promise of Future Media by 2030. 15 Oct 2019, Geneva. 24 p.

5. Hismatullina V. Strukturirovannyj svet v Kinect. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strukturirovannyy-svet-v-kinect> (20.11.2022).

6. Da Bin, Carugi Marco Technical Report: "Representative use cases and key network requirements for Network 2030". ITU-T, 16.01.2020. pp. 3–4.

Маколкина Мария Александровна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, makolkina@list.ru

Makolkina Mariya A.

Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor at the Department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, makolkina@list.ru

Паньков Богдан Олегович

магистрант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, boqdan.usman48@yandex.ru

Pankov Bogdan O.

Undergraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, boqdan.usman48@yandex.ru