



ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ И МЕТОДОВ УМЕНЬШЕНИЯ ОБЪЕМА ТРАФИКА ТЕХНОЛОГИИ HOLOGRAPHIC TYPE COMMUNICATION

М. А. Харламов*, **М. А. Маколкина**

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

*Адрес для переписки: hma99@mail.ru

Аннотация—Предмет исследования. Статья представляет анализ требований к сети передачи данных и методов уменьшения объема трафика со стороны технологии Holographic Type Communication. **Метод.** Произведено сравнение голографического трафика с существующими фото/видео форматами. Произведен анализ доступной литературы на предмет наличия доступных методов уменьшения объема голографического трафика. **Основные результаты.** Сделаны выводы о требованиях к сети, представляемых технологией Holographic Type Communication, и о качестве доступных методов уменьшения объема передаваемого голографического трафика. **Практическая значимость.** Статья предлагает описание дальнейших направлений для исследования и стандартизации технологии Holographic Type Communication.

Ключевые слова—Holographic Type Communication, сети связи, задержка, пропускная способность, голографический трафик, программно-конфигурируемые сети, качество обслуживания, качество восприятия.

Информация о статье

УДК 621.391

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 28.04.2021, принята к печати 28.07.2021.

Ссылка для цитирования: Харламов М. А., Маколкина М. А. Исследование характеристик сети передачи данных и методов уменьшения объема трафика технологии Holographic Type Communication // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Том 9. № 2. С. 64–76. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-2-64-76.



RESEARCH OF DATA NETWORK CHARACTERISTICS AND TRAFFIC REDUCTION METHODS FOR HOLOGRAPHIC TYPE COMMUNICATION TECHNOLOGY

M. Harlamov*, **M. Makolkina**

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

*Corresponding author: hma99@mail.ru

Abstract—Research subject. The article presents an analysis of data network requirements and traffic reduction methods on the part of Holographic Type Communication technology. **Method.** Holographic traffic was compared with existing photo/video formats. The available literature was analyzed for available methods to reduce holographic traffic. **Core results.** Conclusions are made about the network requirements pre-sented by Holographic Type Communication technology and about the quality of available methods for reducing holographic traffic. **Practical relevance.** The article offers a description of further directions for the investigation and standardization of Holographic Type Communication technology.

Keywords—Holographic Type Communication, communication networks, latency, bandwidth, holographic traffic, software-configurable networks, quality of service, quality of experience.

Article info

Article in Russian.

Received 28.04.2021, accepted 28.07.2021.

For citation: Harlamov M., Makolkina M.: Research of data network characteristics and traffic reduction methods for Holographic Type Communication technology // Telecom IT. 2021. Vol. 9. Iss. 2. pp. 64–76 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-2-64-76.



Введение

Сфера телекоммуникаций стремительно развивается вперёд¹ [1, 2, 3]. Ежегодно появляются новые услуги и приложения, предъявляющие новые повышенные требования к сетям передачи данных [4, 5]. На сегодняшний день функционирует достаточно большое количество организаций по стандартизации в различных областях телекоммуникаций, которые учитывают развитие и внедрение новых технологий в своих стандартах^{2,3}. Однако, когда технология еще только начинает использоваться и нет четкого понимания о её возможностях и перспективах развития, т. е. она пока находится на уровне идеи или концепции, рано для неё выпускать стандарты.

Тем не менее следует учитывать, что даже на начальном этапе развития технологии необходимо описание её концепции, функциональной модели, архитектуры. Необходимость создания подобных документов диктуется быстрорастущим рынком телекоммуникаций, предъявляющим все новые требования к характеристикам функционирования сетей связи. Таким образом, операторы, разработчики и производители оборудования будут готовы к внедрению новых тенденции в существующие сети связи. Например, технология Голографической коммуникации (НТС, *Holographic Type Communication*) в настоящий момент времени является предметом активного исследования в различных лабораториях по всему миру [6].

В данной статье целью является исследование характеристик сетей передачи данных, способных реализовать технологию НТС, и методов уменьшения объема голографического трафика. Кроме того, задачами являются: анализ особенностей технологии НТС, способов создания и воспроизведения голограмм, а также анализ требований к сетям передачи данных и методов уменьшения объема трафика технологии НТС, предъявляемых различными приложениями.

Holographic Type Communication

НТС – это технология общения между конечными пользователями, которая основывается на особом методе регистрации и воспроизведении 3D-объектов – голографии.

В первую очередь для осуществления данного типа коммуникаций необходимо осуществить сканирование объекта для последующей его передачи по сети. 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;

¹ Telecommunications Industry Roundup / Forest Interactive. Kuala Lumpur, Malaysia, 2020. 41 с.

² Recommendation J.302 Amendment 1 / System specifications of augmented reality smart television service. ITU-T, 01/2019. 30 с.

³ Recommendation M.2083-0 / IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. ITU-R, 09/2015. 21 с.



• цифровой, для создания голограмм в котором используются 3D-сканеры, базирующиеся на различных технологиях⁴:

- Structured Light;
- Time of Flight;
- Depth from Stereo;
- Light Field;
- Lidar.

Способы воспроизведения, в свою очередь, можно разделить на две группы. В первой используются очки смешанной или дополненной реальности, на стекла которых происходит проекция изображения, а во второй – голографические проекторы, которые позволяют увидеть голограмму невооруженным взглядом [7].

Требования к характеристикам сетей передачи данных

Появляющиеся услуги и приложения формируют в сети новые виды трафика, а, следовательно, изменяются и требования к работе сетей связи. На сегодняшний день известно много работ, которые посвящены исследованию особенностей дополненной реальности, тактильного интернета, характеристик сетей с ультрамалыми задержками, сетей сверхвысокой плотности и т. д. [8, 9].

Для формирования требований технологии НТС к характеристикам сетей передачи данных, необходимо произвести сравнение существующих фото/видео форматов, а также их параметров, результаты которого представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнение параметров различных фото/видео форматов

Формат	Параметры
Фото	Разрешение изображения, цвет
Видео	Разрешение изображения, цвет, частота кадров
Видео в формате 3D	Разрешение и глубина изображения, цвет, частота кадров
Голограмма	Разрешение и глубина изображения, цвет, частота кадров, умноженное на количество углов обзора

Из таблицы можно заметить тенденцию сохранения параметров предыдущих фото/видео форматов, и в тоже время добавления новых, что свидетельствует о существенном влиянии, оказываемом новыми видами трафика на сети связи. Рассмотрим более подробно основные параметры сетей передачи данных.

Пропускная способность

Для того, чтобы оценить объем передаваемых данных, рассмотрим наиболее доступную на данный момент камеру-сенсор, дающую объемное изображение, – Microsoft Kinect Xbox. Данная камера в основном используется в игровых приставках и потому считается популярной.

⁴ Хабр: Камеры глубины – тихая революция (когда роботы будут видеть) Часть 1. 26.06.19. URL: <https://habr.com/ru/post/457524/>



Каждый её кадр имеет разрешение 1920×1080 пикселей с 4 байтами данных о цвете на каждом из них и обладает изображением глубины в формате Point Cloud с разрешением 512×424 пикселей с 2 байтами данных о расстоянии до объекта на каждом из них. Таким образом, это эквивалентно 70,4 Мбит данных на одно изображение. Соответственно, если необходимо передавать такой видеоконтент с частотой в 30 кадров, то минимальная пропускная способность сети должна будет составлять 2,06 Гбит/с.

Стоит отметить, что для создания полноценного голографического изображения используется несколько регистрирующих устройств, поэтому требования к пропускной способности будут расти пропорционально увеличению количества камер-датчиков, разрешения изображения и частоты кадров. Исходя из этого, например, контент LFV (*Light Field Video*) будет требовать пропускной способности в диапазоне от 100 Гбит/с до 2 Тбит/с. Увеличение требований к пропускной способности представлено на рис. 1 [10].

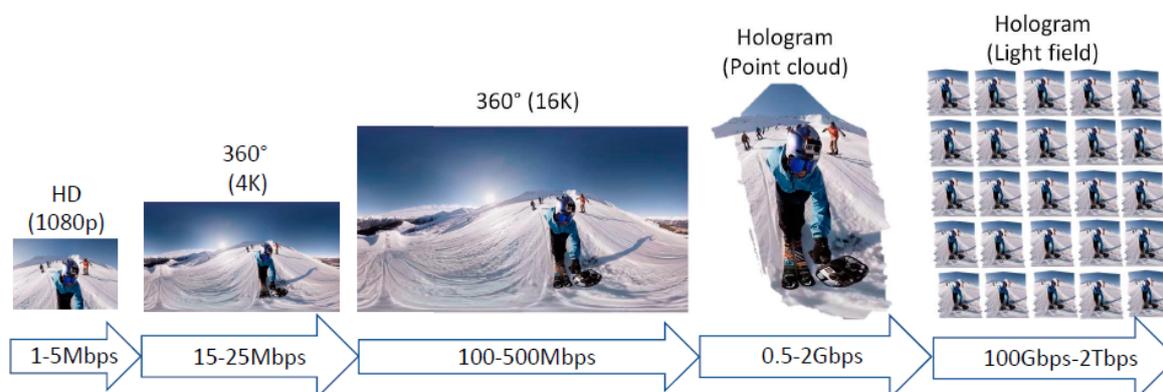


Рис. 1. Сравнение требований к пропускной способности сети для различных видеоформатов

Задержка

Чтобы понять, какое значение задержки доставки является приемлемым для услуг НТС, необходимо определить способ передачи данных, а именно, всего видеоматериала сразу или только той части, которую смотрящий видит в данный момент времени с определенного угла.

В первом случае требования к задержке приближаются к значениям устройств дополненной реальности, но увеличивается нагрузка на пропускную способность сети. Во втором случае возрастает требование к задержке, но снижается нагрузка на сеть. Поэтому вопрос величины задержки сигнала на данный момент остается открытым (табл. 2) [11].

Таблица 2.

Сравнение требований к задержке в сети для различных видеоформатов

Технология	4K/8K HD	VR/AR	Hologram
Задержка, мс	15–35	5–7	< 0,001–7



Синхронизация

Как известно, голографическая коммуникация подразумевает использование некоторого числа камер и датчиков, расположенных под разными углами к объекту. Каждое из этих устройств формирует множество различных аудио и видео потоков данных, которые в конечном итоге превращаются в единую 3D-модель. Поэтому для получения максимально идентичного оригиналу изображения необходима синхронизация всех потоков как показано в таблице 3 [10, 11].

Таблица 3.

Сравнение количества исходящих потоков данных для различных видеоформатов

Технология	4K/8K HD	VR/AR	Hologram
Потоки для синхронизации	Аудио/Видео (2)	3D-плитка (12)	Углы обзора (~ 1000)

Методы уменьшения объема голографического трафика через программные и аппаратные изменения в структуре сети

Структура сети для реализации НТС состоит из трех уровней, на которые могут быть размещены определенные аппаратные и программные решения с целью уменьшения объема голографического трафика как показано на рис. 2 [10]. Рассмотрим каждый из них подробнее.



Рис. 2. Аппаратные и программные решения на различных уровнях сети



Уровень конечного пользователя

Уровень «End-user» или конечный пользователь, на стороне которого регистрируются, либо воспроизводятся голограммы, является одним из важнейших сегментов, в котором возможно наиболее результативное уменьшения объема данных, передающихся в сеть. Уменьшение объема голографического трафика происходит путем использования следующих решений.

Предсказывание движений пользователя

В определенный момент времени смотрящий видит только часть 3D-объекта, поэтому передача голограммы целиком является нецелесообразным решением, так как очень сильно нагружает сеть передачи данных. Чтобы снизить требования к задержке при передаче частей голограммы, можно использовать предсказывание движений пользователя.

Трехмерная пространственная и объектная сегментация

Каждую голограмму можно представить, как группу, содержащую в себе множество кадров, состоящих из точек – вокселей. Каждую такую группу можно разделить по частям на кусочки – 3D-плитку, которую в зависимости от положения смотрящего, можно передавать с различным разрешением. Такой подход позволит сократить использование пропускной способности сети за счет уменьшения качества малозаметных или несущественных в данный момент времени объектов.

Многомерное сжатие

Использование новых алгоритмов сжатия, например, V-PCC (*Video-based point cloud compression*), регулируемый стандартом ISO/IEC FDIS 23090-5, который на данный момент находится в стадии разработки, позволит снизить требования к пропускной способности сети. Использование подобных технологий позволило компании Microsoft в проекте Holoportation снизить нагрузку на полосу пропускания на 97 %. По этой же причине им удалось сделать свой проект мобильным, реализовав технологию НТС в автомобиле⁵.

QoE

Очевидно, что изображение будет выглядеть лучше, если будет обладать большим разрешением или частотой кадров, что будет благоприятно отражаться на качестве восприятия. Но при этом оно будет предъявлять и более высокие требования к пропускной способности, что в свою очередь может сильно загружать сеть. Поэтому при реализации технологии НТС необходимо найти некий компромисс между параметрами QoE и характеристиками сети, который позволит без существенного увеличения объема голографического трафика в сетях связи обеспечить передачу изображения с надлежащим качеством.

⁵ Microsoft: Holoportation / 23.1.2016. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/holoportation-3/>



Уровень приложений и передачи данных

Другим сегментом сети является уровень приложений и передачи данных. В его задачи входит уменьшение нагрузки голографических приложений на сеть, используя различные технологии передачи данных.

OTT

Использование OTT (*Over the Top*) протоколов, осуществляющих доставку данных от сервера к пользователю по маршруту с наименьшим количеством доступных узлов⁶, приведет к минимизации задержки.

Интеллектуальная система передачи пакетов данных

Транспортный протокол TCP гарантирует повторную передачу пакета в случае его потери. В рамках НТС это может значительно увеличить задержку доставки. Поэтому в определенные критические моменты времени стоит пренебречь гарантированной доставкой некоторых пакетов данных, отдавая предпочтение более «важным».

Интеллектуальная система буферизации

В определенные моменты времени может потребоваться информация, которая не планировалась к передаче. Чтобы качество предоставления услуги не падало, разумно разработать систему, которая бы такие блоки данных ставила вперед очереди в буфере.

Интеллектуальная система рендеринга и декодирования

Одной из особенностей передачи голографических изображений является их большой объем. Рациональное их хранение и своевременное декодирование позволит сохранить место на жестком диске и уменьшить время на обработку со стороны клиента.

Следует отметить, что существует два варианта передачи голографических данных через сеть связи. В первом случае передаются, так называемые, «сырые» 3D-данные в реальном масштабе времени, во-втором, сгенерированное голографическое изображение (см. рис. 3).

⁶ Кабельщик: OTT TV. Матчасть / 20.06.2018. URL: <https://www.cableman.ru/article/ott-tv-matchast>

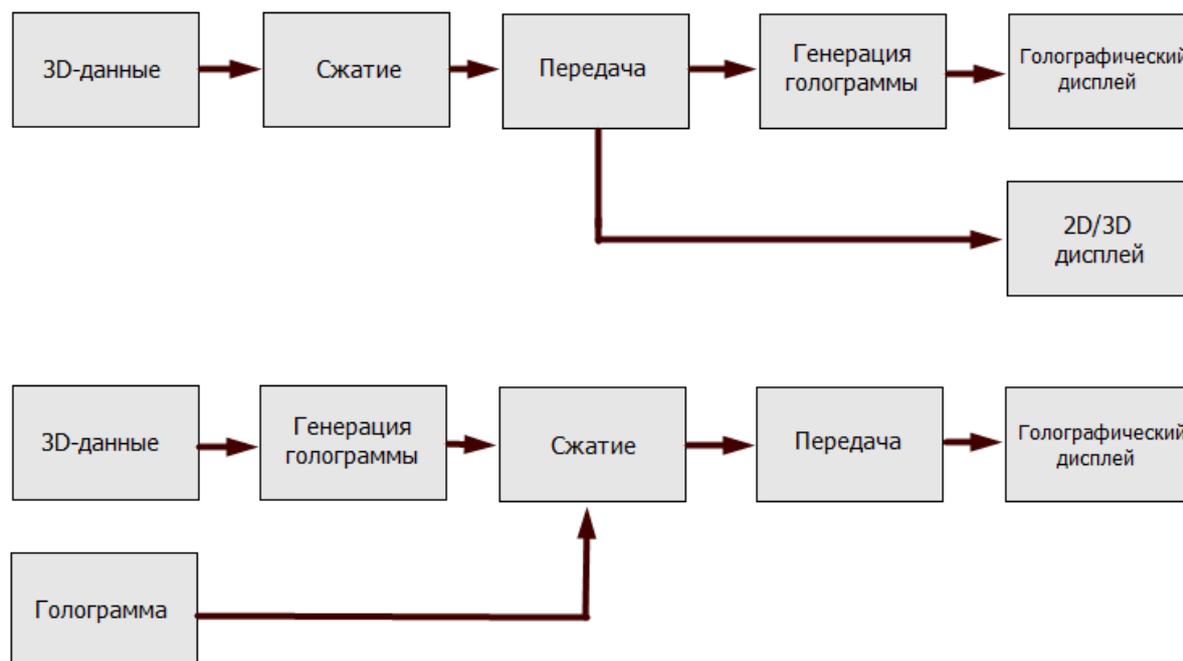


Рис. 3. Варианта передачи голографических данных в сеть:
«сырые» 3D-данные (вверху), сгенерированное голографическое изображение (внизу)

Ученые из Научно-исследовательского института электроники и телекоммуникаций в Корее провели исследование и выяснили, что при передаче «сырых» 3D-данных, при почти равном коэффициенте восстановления изображения SSIM (*Structure Similarity*), требуется значительно меньшая пропускная способность канала как представлено в таблице 4 [12].

Таблица 4.

Сравнение требований к пропускной способности и качества восстановления изображения для различных вариантов передачи голографических данных в сети

Передача не обработанных 3D-данных		Передача обработанных 3D-данных	
Скорость потока, Кбит	SSIM	Скорость потока, Кбит	SSIM
3,82	0,85	27,60	0,85
4,01	0,90	31,23	0,91
4,77	0,95	36,85	0,95
6,26	0,98	48,15	0,98

Но при таком способе передачи данных будет требоваться генерация голографического изображения на стороне клиента в реальном времени, что является сложной технической задачей, которую предстоит решить [13].

Уровень управления сетью

Описанные выше компоненты и методы требуют централизованного управления. На сегодняшний день перспективной технологией, способной удовлетво-



ритель предъявляемым требованиям, является технология программно-конфигурируемых сетей (SDN, *Software-Defined Networking*). Кроме подходов, описанных ранее, SDN будет включать в себя следующие функции:

- распределенное управление, под которым понимается выделение определенного класса маршрутизаторов, которым руководит отдельный контроллер;
- динамическое создание участков сети, обеспечивающих гарантированные параметры QoS, для разных классов обслуживания;
- расстановка приоритетов передачи различных по типу и востребованности блоков данных.

С учетом сказанного выше архитектура сети для технологии HTC будет иметь следующий вид (рис. 4).

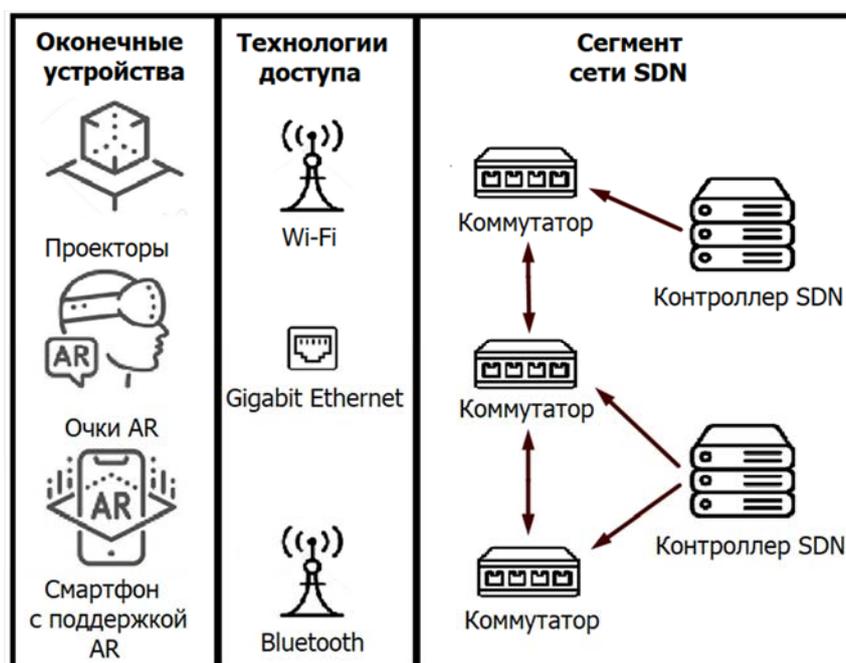


Рис. 4. Общий вид сети для технологии HTC

Более того, группа ученых провела исследование различных конфигураций сети SDN для технологии HTC [10].

В данном эксперименте использовалась технология адаптивной потоковой передачи MPEG-DASH посредством протокола HTTP/1.1. В эксперименте было сконфигурировано четыре различные архитектуры SDN, отличающиеся способом распределения узлов (рис. 5):

- централизованная (например, Floodlight),
- иерархически распределенная (например, Kandoo),
- плоско распределенная (например, ONOS),
- полностью распределенная (например, DAIM).



Рис. 5. Смоделированная сеть HTC вида SDN



В ходе исследования передавалось динамическое облако точек, длительностью 120 секунд с частотой 30 кадров/сек., сжатое двумя уровнями качества LQ (требует пропускной способности канала в 2,4 Мбит/с) и HQ (требует пропускной способности канала в 18 Мбит/с) по сегментам длительностью в 1 секунду. На стороне клиента был установлен буфер длиной в 4 секунды, а полоса пропускания сети была установлена на 20 Мбит/с [10].

Таблица 5.

Результаты эксперимента

Архитектура сети	Установка параметров передачи, мс	Задержка передачи первого сегмента, мс	Средняя задержка передачи сегментов, мс	HQ, %
Централизованная	53,8	258,5	925,1	98,3
Плоско распределенная	58,3	263,3	903,2	95,8
Иерархически распределенная	27,4	236,4	919,0	98,3
Полностью распределенная	15,1	224,8	918,2	98,3

Было произведено исследование следующих параметров (табл. 5):

- задержка установления соединения,
- задержка загрузки первого сегмента,
- средняя загрузка каждого сегмента,
- процент сегментов, загруженных с наивысшим качеством.

Как видно из таблицы 5, полностью распределенная структура SDN (DAIM) показывает наименьшую задержку установления соединения. В дальнейшем это приводит к улучшению производительности при передаче первого сегмента и хорошему среднему значению задержки передачи сегментов. При этом сохраняется и высокий процент загруженных сегментов в хорошем качестве.

Стоит отметить, что в данном случае использовалось сжатие данных с потерями, что приводило к незначительно измененным выходным данным. В противном случае, требовалась бы пропускная способность канала до 4 Гб/с. Кроме того, текущий кодер и декодер MPEG-DASH не может быть запущен в реальном времени на современном оборудовании, хотя позволяет производить значительное сжатие данных [14].

Вывод

В данной статье был произведен краткий анализ технологии НТС, способов создания и воспроизведения голограмм, подходов к уменьшению объема голографического трафика при передаче через сети связи.

Требования к характеристикам сетей передачи данных зависят от технологии, выбранной для отображения контента НТС. Требования к пропускной способности, задержкам и синхронизации потоков варьируются в широком диапазоне в зависимости от используемых устройств. На данный момент не существует стандартов, описывающих данную технологию, поэтому все значения характеристик сети передачи данных являются приблизительными.



Аналогичная картина наблюдается в методах уменьшения объема голографического трафика. Как можно заметить из проведенного анализа, не один из примеров не предлагает конкретных решений, а лишь указывает на возможную технологию, которая могла бы применяться в определенном случае. Даже проведенные различными учеными исследования, которые предлагают конкретные решения, формулируют новые задачи.

Все это говорит о том, что требования к сетям передачи данных и методы уменьшения объема голографического трафика в данный момент времени находятся на начальной стадии. В данный момент сложно говорить о готовых решениях, однако, очевидность актуальности и необходимости дальнейших исследований и стандартизации технологии НТС не вызывает сомнений.

Исследование выполнено в рамках исполнения ПНИ по государственному заданию СПбГУТ на 2021 год.

Литература

1. Дотолев В. Г. Цифровое звуковое и мультимедийное радиовещание // Электросвязь. 2021. № 4. С. 8–13. doi: 10.34832/ELSV.2021.17.4.001.
2. Хакимов А. А., Мутханна А. С., Выборнова А. И. Разработка интеллектуальной системы для управления граничными вычислениями // Электросвязь. 2021. № 4. С. 37–42. doi: 10.34832/ELSV.2021.17.4.004.
3. Junko Kaji et al. Technology, Media, and Telecommunications Predictions 2021. Deloitte Insights, 2020. 119 p. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/au/Documents/technology-media-telecommunications/deloitte-au-tmt-predictions-2020-summary-170220.pdf>
4. Кучерявый А. Е., Маколкина М. А., Киричек Р. В. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержкам // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44–46.
5. Владимиров С. С., Кучерявый А. Е. Механизм компенсации задержек для приложений Тактильного Интернета // Электросвязь. 2018. № 3. С. 62–67.
6. Kiran Makhijani, Holographic Type Communication / Delivering the Promise of Future Media by 2030. 15 Oct 2019, Geneva. 24 p.
7. Da Bin, Carugi Marco Technical Report: "Representative use cases and key network requirements for Network 2030". ITU-T, 16.01.2020. pp. 3–4.
8. Чистова Н. А., Парамонов А. И., Выборнова А. И., Кучерявый А. Е. Метод выбора размеров цифровых кластеров сетей с ультрамалыми задержками // Электросвязь. 2021. № 4. С. 43–48. doi: 10.34832/ELSV.2021.17.4.005.
9. Маколкина М. А., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Характеристики сетей связи и приложения дополненной реальности // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТИТТ-2016. Первый научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» ЗТ-2016. 2016. С. 137–138.
10. Vega, Maria Torres; Wauters, Tim; Ravuri, Hemanth; De Turck, Filip. Toward Truly Immersive Holographic-Type Communication: Challenges and Solutions // IEEE Communications Magazine. 10.2019. pp. 2–6.
11. Li, Richard. Ph.D. Network 2030: A New Horizon to the Future Networks. ITU-T, 2019. 6 p.
12. Oh, Kwan-Jung; Choo, Hyon-Gon; Kim, Jinwoong. Analysis on Digital Holographic Data Representation and Compression // Electronics and Telecommunications Research Institute. Daejeon, Korea. 19.01.2017. pp. 3–4.
13. Xu, Xuewu; Pan, Yuechao; Lwin, Phyu Phyu Mar Yi; and Liang, Xinan. 3D Holographic Display and Its Data Transmission Requirement // Data Storage Institute (DSI), A*STAR, 05.01.2012. 4 p.
14. Hooft, J. van der.; Wauters, T.; De Turck, F.; Timmerer, C.; and Hellwagner, H. Towards 6DoF HTTP Adaptive Streaming Through Point Cloud Compression. ACM Multimedia 2019, Nice, France, 2019. 2412 p.



References

1. Dotolev V. G. Cifrovoe zvukovoe i mul'timedijnoe radioveshchanie // *Electrosvyaz*. 2021. No. 4. pp. 8–13 (in Russian). doi: 10.34832/ELSV.2021.17.4.001.
2. Khakimov A. A., Muthanna A. S., Vybornova A. I. Development of an intelligent system for managing edge computing // *Electrosvyaz*. 2021. No. 4. pp. 37–42 (in Russian). doi: 10.34832/ELSV.2021.17.4.004.
3. Junko Kaji at el. Technology, Media, and Telecommunications Predictions 2021. Deloitte Insights, 2020. 119 p. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/au/Documents/technology-media-telecommunications/deloitte-au-tmt-predictions-2020-summary-170220.pdf>
4. Koucheryavy A. E., Makolkina M. A., Kirichuk R. V. Tactile Internet. Ultra-low latency networks // *Electrosvyaz*. 2016. No. 1. pp. 44–46 (in Russian).
5. Vladimirov S. S., Koucheryavy A. E. Delay compensation mechanism for the Tactile Internet applications // *Electrosvyaz*. 2018. No. 3. pp. 62–67 (in Russian).
6. Kiran, Makhijani. Holographic Type Communication / *Delivering the Promise of Future Media by 2030*. 15 Oct 2019, Geneva. 24 p.
7. Da, Bin; Carugi, Marco. Technical Report: "Representative use cases and key network requirements for Network 2030". ITU-T, 16.01.2020. pp. 3–4.
8. Chistova N. A., Paramonov A. I., Vybornova A. I., Koucheryavy A. E. A method for sizing digital clusters of ultra-low latency networks // *Electrosvyaz*. 2021. No. 4. pp. 43–48 (in Russian). doi: 10.34832/ELSV.2021.17.4.005.
9. Makolkina M. A., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Charakteristiki setej svyazi i prilozheniya dopolnennoj real'nosti // *Problemy tekhniki i tekhnologij telekommunikacij PTiTT-2016. Pervyj nauchnyj forum "Telekommunikacii: teoriya i tekhnologii" 3T-2016*. 2016. S. 137–138 (in Russian).
10. Vega, Maria Torres; Wauters, Tim; Ravuri, Hemanth; De Turck, Filip. Toward Truly Immersive Holographic-Type Communication: Challenges and Solutions // *IEEE Communications Magazine*. 10.2019. pp. 2–6.
11. Li, Richard. Ph.D. Network 2030: A New Horizon to the Future Networks. ITU-T, 2019. 6 p.
12. Oh, Kwan-Jung; Choo, Hyon-Gon; Kim, Jinwoong. Analysis on Digital Holographic Data Representation and Compression // *Electronics and Telecommunications Research Institute*. Daejeon, Korea. 19.01.2017. pp. 3–4.
13. Xu, Xuewu; Pan, Yuechao; Lwin, Phyu Phyu Mar Yi; and Liang, Xinan. 3D Holographic Display and Its Data Transmission Requirement // *Data Storage Institute (DSI), A*STAR*, 05.01.2012. 4 p.
14. Hooft, J. van der.; Wauters, T.; De Turck, F.; Timmerer, C.; and Hellwagner, H. Towards 6DoF HTTP Adaptive Streaming Through Point Cloud Compression. *ACM Multimedia 2019, Nice, France, 2019*. 2412 p.

Харламов Максим Алексеевич

студент Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, hma99@mail.ru

Harlamov Maxim A.

Student, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, hma99@mail.ru

Маколкина Мария Александровна

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

Makolkina Maria A.

Doctor of engineering sciences, docent, associate professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, makolkina@list.ru