

АНАЛИЗ ТРАФИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОДЕКА ТАКТИЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Е. С. Сапунова, С. С. Леонтьев, А. И. Выборнова*

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

*Адрес для переписки: a.vybornova@gmail.com

Аннотация—Статья посвящена актуальному направлению исследований в области телекоммуникаций – передаче по сетям связи тактильных ощущений в рамках концепции Тактильного Интернета (ТИ). Одной из задач в этой области является создание кодека тактильной информации, что и является **предметом исследования**. В процессе работы использовались следующие **методы** исследования: 1. сбор, анализ и классификация имеющихся исследований по теме, типов хапстик-взаимодействий и подходов к созданию тактильного кодека; 2. разработка параметрического кодека тактильной информации; 3. сбор и статистический анализ трафика созданного кодека. **Основными результатами** проведенной работы являются обобщенные данные о методах кодирования и декодирования тактильной информации, разработанный параметрический кодека, а также результаты анализа создаваемого им трафика, показывающие, что такой кодека создает достаточно интенсивный поток пакетов небольшого размера (500 байт в среднем). **Практическая значимость** работы состоит в возможности использовать созданный кодека для простых приложений ТИ, а также в возможности уточнения прогнозов роста трафика в сетях связи с учетом полученных результатов.

Ключевые слова—Тактильный интернет, хапстик-взаимодействия, тактильный кодека, тактильная обратная связь.

Информация о статье

УДК 004.71

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 13.05.20, принята к печати 15.06.20.

Ссылка для цитирования: Сапунова Е. С., Леонтьев С. С., Выборнова А. И. Анализ трафика параметрического кодека тактильной обратной связи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 2. С. 67–76. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-67-76.

TRAFFIC ANALYSIS FOR A PARAMETRIC TACTILE CODEC

E. Sapunova, S. Leontiev, A. Vybornova*

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

*Corresponding author: a.vybornova@gmail.com

Abstract—This article is devoted to the haptic communications types and methods. Haptic and tactile codecs were the **research subject**. As a **research method** authors engaged analysis of the current research results in the area, research and development of the parametric tactile codec, as well as statistical analysis of the obtained tactile traffic. **Core result**. In this article authors provide a classification of the haptic interactions and tactile codes approaches. The other result of the work is a simple parametric tactile codec. Also, authors have found out that such type of codec created quite intensive flow of the packets of moderate size (500 bytes). **Practical relevance** of the result consists in the creation of the tactile codec that may be used for simple Tactile Internet applications. Besides that, obtained information about tactile traffic characteristics may be used to update forecasts of the global telecom traffic growth.

Keywords—Tactile Internet, haptic interactions, tactile codec, tactile feedback.

Article info

Article in Russian.

Received 13.05.20, accepted 15.06.20.

For citation: Sapunova E., Leontiev S., Vybornova A.: Traffic analysis for a parametric tactile codec // Telecom IT. 2020. Vol. 8. Iss. 2. pp. 67–76 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-67-76.

Введение

Организация передачи тактильной информации по сетям связи является одной из перспективных задач, стоящих в настоящий момент перед исследователями в области телекоммуникаций. Несмотря на то, что серьезный интерес к этой теме появился уже более 5 лет назад¹ до сих пор остается множество практических вопросов, которые необходимо решить до массового внедрения технологии тактильного интернета в жизнь человечества.

Предыдущие работы по данной тематике можно разделить на несколько групп. В первой, включающей в себя ранние работы, рассматриваются вопросы перспективного применения приложений с передачей по сетям связи движений человека и тактильной обратной связи, а также в общих чертах описывается архитектура сетевого взаимодействия для таких приложений [1, 2, 3]. Вторая группа более поздних работ рассматривает аспекты передачи тактильных ощущений по сетям пятого поколения 5G [4, 5], в частности, как одно из основных приложений сверхнадежных сетей с ультрамалыми задержками (URLLC, *Ultra-Reliable and Low Latency Communications*) в рамках сетей 5G. Достаточно обширная

¹ The Tactile Internet. Technology Watch report. ITU-T, Geneva, 2014. 24 p.

группа работ более подробно описывает архитектуру сети для Тактильного Интернета, а именно, использование программно-конфигурируемых сетей SDN [6], граничных мобильных вычислений MEC [7, 8], а также иерархической системы облачных вычислений в перспективных сетях связи [9, 10], а также вопросы функционирования ядра сети [11].

Наконец, последняя группа работ, которую следует выделить, касается создания кодека тактильной информации. Некоторые авторы [12, 13] предлагают создавать тактильные кодеки на основе аудиокодеков, в других работах [14, 15] предлагаются и альтернативные варианты. Также подходы к работе тактильными данными описываются в рамках подготовки стандарта IEEE P1918.1.1². Стоит отметить, что подготовка упомянутого стандарта, как и исследование [13] охватывают также подходы к оценке качества передачи тактильной информации.

В рамках данной работы авторы предлагают собственный подход к созданию кодека тактильной обратной связи на основе передачи параметров вибрации. В первой части статьи приводится классификация типов тактильной информации и подходы к их кодированию. Во второй части описывается созданный параметрический тактильный кодек. В третьей части статьи выполнен анализ трафика созданного тактильного кодека.

1. Виды тактильной информации и способы ее кодирования

При создании систем, передающих тактильные ощущения, следует учитывать некоторую двойственность их природы. Восприятие тактильных ощущений в большинстве случаев неотделимо от движений человека и особенно от движений его рук. В английском языке существует три понятия, связанные с этой областью, которые предлагается применять аналогично и в русском языке. Haptic (хаптик, гаптические) взаимодействия подразумевают весь комплекс взаимодействий человека с окружающим миром при помощи опорно-двигательного аппарата и рецепторов, расположенных в коже, мышцах, связках и т. д. Хаптик-взаимодействия ассоциированы с чувством прикосновения³ и могут быть разделены на две группы: кинестетические и тактильные. Кинестетические (*kinaesthetic*) взаимодействия подразумевают выполнение человеком движений и возникающие при этом ощущения в мышцах, связках и сухожилиях⁴. Тактильные (*tactile*) взаимодействия относятся к чувству прикосновения, фиксируемому рецепторами кожи⁵.

Кроме того, хаптик-взаимодействия можно разделить на активные, при которых осуществляется манипуляция предметами среды, и пассивные, при которых движения оператора направлены только на получение обратной связи (пассивное изучение среды), но не на манипуляции с предметами (рис. 1).

² IEEE P1918.1.1 – Haptic Codecs for the Tactile Internet.

³ Definition of Haptic by Merriam-Webster // Dictionary of Merriam-Webster. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/haptics> (дата обращения 28.04.2020).

⁴ Definition of Kinesthetic by Merriam-Webster // Dictionary of Merriam-Webster. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/kinesthetic> (дата обращения 28.04.2020).

⁵ Definition of Tactile by Merriam-Webster // Dictionary of Merriam-Webster. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/tactile> (дата обращения 28.04.2020).

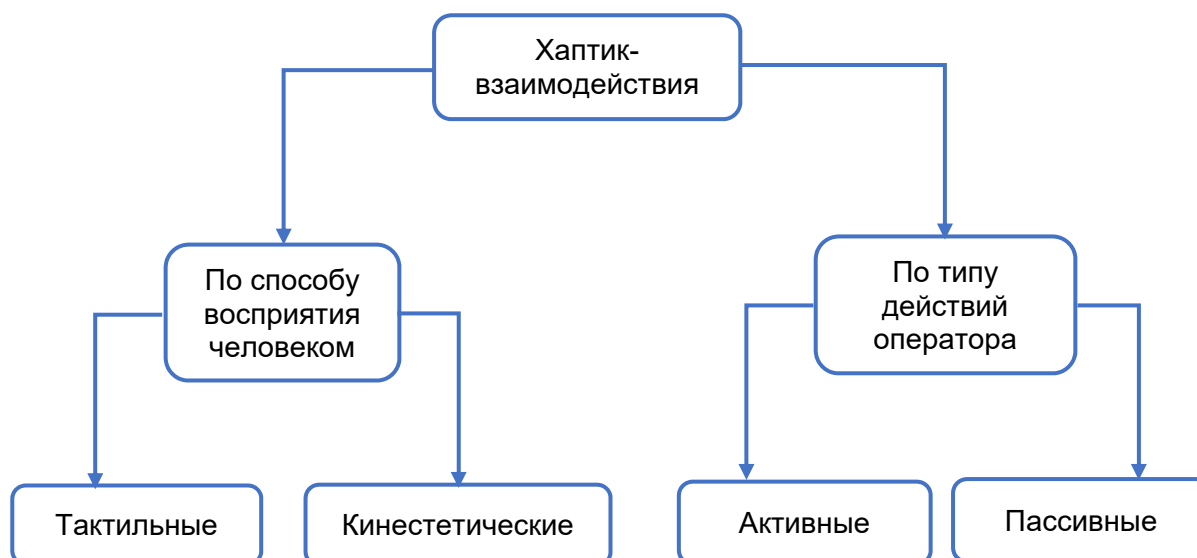


Рис. 1. Классификация хаптик-взаимодействий

В данной статье мы сосредоточимся на тактильных взаимодействиях и создании кодека тактильной информации. Для того, чтобы понять, как эффективнее кодировать такие данные, необходимо разобраться в их природе.

За тактильные ощущения человека отвечают несколько типов клеток: клетки Меркеля (ощущение давления, углы, точки), тельца Руффини (растяжение кожи, ощущение тепла), тельца Месснера (легкие прикосновения), тельца Пачини (вибрация) и колбы Краузе (ощущение холода). Максимальная частота, воспринимаемая рецепторами кожи, оценивается как 1 кГц (тельца Пачини) [12].

Исходя из этого, подходы к созданию кодека тактильной информации можно разделить на следующие группы:

1. Параметрические кодеки. В рамках данного подхода предлагается измерять и кодировать отдельные составляющие тактильного взаимодействия, например, показания термометра (температура и теплопроводность объекта), датчика давления (твердость объекта), датчика вибрации (текстура объекта). При этом частота измерения и кодирования зависит от двух факторов – приложения (сценариев работы чувствительности к задержкам) и природы измеряемого явления. Так, твердость объекта является относительно стабильной величиной, поэтому ее можно измерять «по запросу» – при нажатиях манипулятора на объект, поднятии объекта. Измерение температуры может проводиться также «по запросу», однако дополняться периодическими измерениями по графику (исходя из того, что температура объекта может меняться чаще, чем его твердость). Вибрацию же имеет смысл измерять периодически без связи с движениями манипулятора.

2. Кодеки на основе аудиокодеков. Данный подход строится на предположении, что вибрационная составляющая является основной в тактильных ощущениях, а также аналогии между тактильными ощущениями и звуком, которые имеют одинаковую (вибрационную) природу [12]. При этом исходя из теоремы Котельникова и приведенных выше данных о максимальной тактильно воспринимаемой человеком частоте вибрации, вибрационная составляющая тактильного взаимодействия должна дискретизироваться с частотой 2 кГц.

3. Гибридный кодек, в котором вибрационная составляющая тактильного взаимодействия кодируется при помощи модифицированного аудиокодека, а остальные составляющие – параметрически.

Следует отметить, что создание кодека тактильной информации сопряжено с рядом проблем:

1. Тактильная информация, в отличие от звуковой, имеет мультимодальную природу (температура, давление, вибрация и т. д.), поэтому использование только модифицированного аудиокодека может быть сопряжено с сильным искажением тактильных данных при передаче.

2. Передача по сетям связи тактильной информации подразумевает строгие требования к задержке передачи данных⁶, что приводит к необходимости уменьшать размер передаваемого кадра, а также невозможность применения технологий сжатия данных. С другой стороны, объем тактильной информации относительно мал, поэтому сжатие данных, вероятно, может не быть актуальным.

3. Важно обеспечить синхронизацию тактильной информации с аудио- и видеоинформацией⁷ для обеспечения приемлемого качества восприятия услуги. С учетом того, что требования по задержке передачи данных для этих видов информации различны, обеспечение синхронизации потоков разных типов информации в гетерогенных сетях может представлять нетривиальную исследовательскую задачу.

2. Создание параметрического кодека тактильной обратной связи

В рамках исследования способов формирования и кодирования тактильной обратной связи авторами был разработан простой параметрический кодек, позволяющий передавать вибрационную составляющую тактильной обратной связи, а также приложение его использующее.

Архитектура приложения с тактильной обратной связью является клиент-серверной, сервер и клиент находятся в одной сети и подключены к маршрутизатору, который выходит в глобальную сеть.

Сервер запущен локально на ПК с доступом других устройств из сети. Код написан на языке программирования Python. Для запуска сервера был использован сторонний фреймворк Flask. Также использовался сторонний фреймворк Flask-SocketIO, который предоставляет серверам на Flask доступ к WebSocket, то есть к двунаправленным коммуникациям с низкой задержкой между клиентами и сервером. Протокол WebSocket был выбран для организации связи, так как он позволяет инициировать канал между двумя хостами и далее пересылать сообщения в обоих направлениях, не закрывая этот канал, что позволяет снизить как количество служебной информации, так и время передачи данных.

Клиентом выступает мобильное устройство iPhone на котором запущено iOS приложение, написанное на языке программирования Swift. Приложение использует стандартные фреймворки системы:

- CoreLocation – используется для получения геолокации и скорости пользователя.

⁶ The Tactile Internet. Technology Watch report. ITU-T, Geneva, 2014. 24 p.

⁷ Там же.

- CoreHaptics – используется для добавления тактильной и звуковой обратной связи.

Для взаимодействия с сервером по WebSocket был использован сторонний фреймворк SocketIO.

Core Haptics – это фреймворк, разработанный Apple, для iOS 13.0+ Source Development Kit (SDK). Выпущен в сентябре 2019 года вместе с релизом iOS 13 и поддерживается, начиная с iPhone 8. Core Haptics позволяет добавлять тактильную и звуковую обратную связь для iOS приложений. С помощью этого можно привлечь пользователей физически, так как тактильная и звуковая обратная связь привлекает внимание к приложению, усиливает взаимодействие человека со смартфоном. Рассматриваемый фреймворк использует Taptic Engine и модуль динамиков.

Например, некоторые элементы интерфейса, предоставляемые системой, такие как пикеры, переключатели и ползунки, автоматически обеспечивают тактильную обратную связь, когда пользователи взаимодействуют с ними. С помощью Core Haptics (рис. 2) возможно расширить эту функциональность, составляя и комбинируя тактильные события за пределами шаблонов по умолчанию⁸.

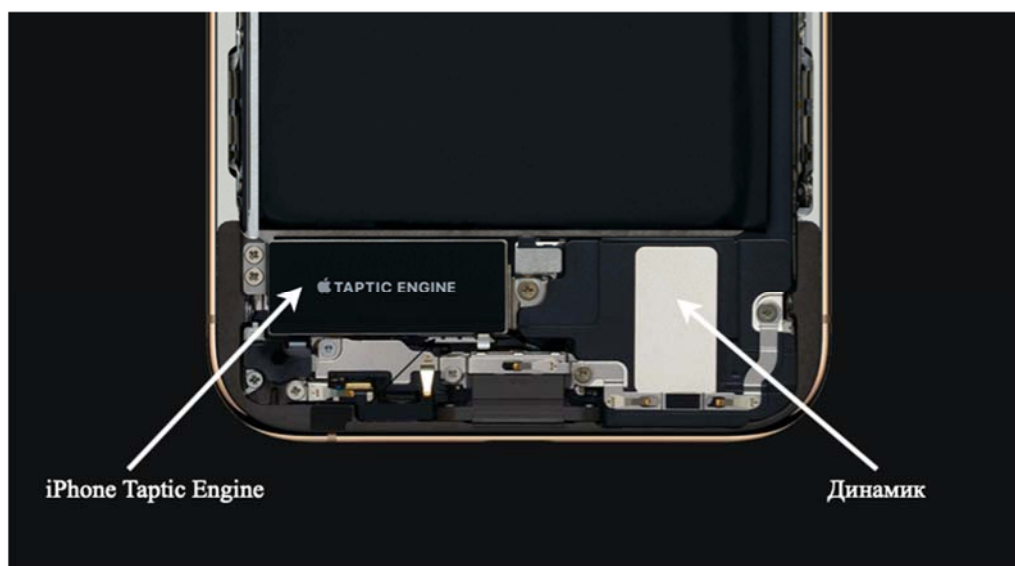


Рис. 2. iPhone Taptic Engine и динамик используются в Core Haptics⁹

Приложение может воспроизводить пользовательские тактильные шаблоны, созданные из базовых строительных блоков, называемых тактильными событиями. Можно построить свой тактильный шаблон из комбинаций этих строительных блоков.

Тактильные события могут иметь различную длительность, а также интенсивность и резкость. Интенсивность меняет амплитуду тактильного ощущения (вибрации). Резкость позволяет определить характер тактильного ощущения, например, при большом значении резкости формируется четкий, точный

⁸ Apple Developer Documentation: Core Haptics. URL: <https://developer.apple.com/documentation/corehaptics> (дата обращения 25.02.2020).

⁹ Everything you ever wanted to know about Core Haptics. URL: <https://lofelt.com/blog/everything-you-ever-wanted-to-know-about-core-haptics> (дата обращения: 25.02.2020).

и механический тактильный ответ, при низком – мягкий, округлый и органичный¹⁰. Таким образом, тактильная обратная связь кодируется тремя параметрами:

- Длительность.
- Интенсивность.
- Резкость.

Комбинируя эти параметры можно получить тактильную обратную связь, имитирующую различные реальные тактильные ощущения (рис. 3).

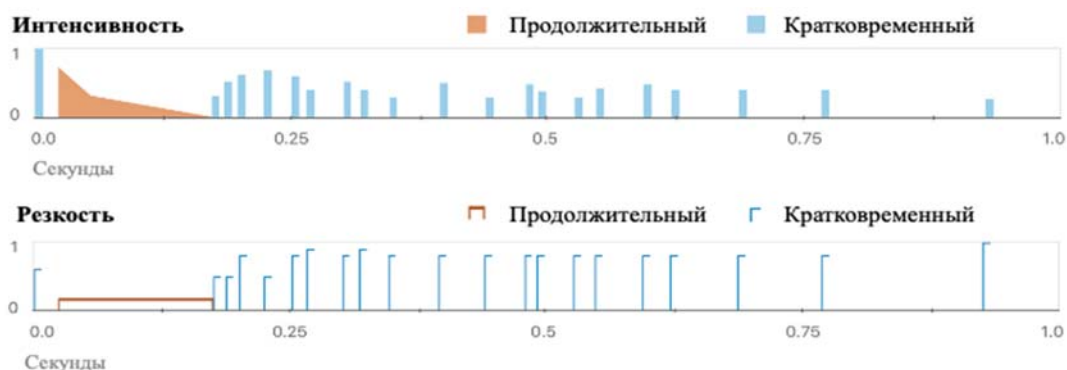


Рис. 3. Тактильные характеристики событий¹¹

Для передачи шаблонов по сети используются Apple Haptic and Audio Pattern (AHAP). AHAP – это JSON-подобный формат файла, который задает тактильный шаблон через пары ключ-значение¹² [24].

Суть работы приложения заключается в изменении тактильной обратной связи, формируемой мобильным устройством, в зависимости от скорости движения пользователя. Сценарий работы приложения показан на рис. 4.

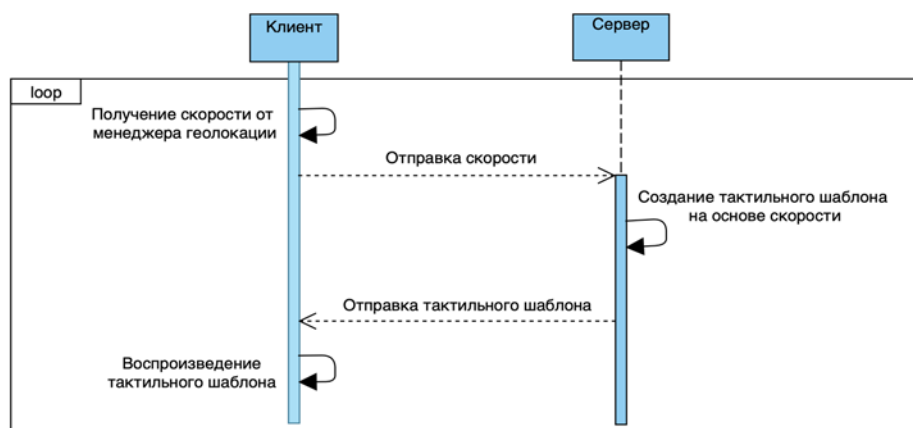


Рис. 4. Диаграмма взаимодействия клиент-сервер

¹⁰ Apple Developer Documentation: Core Haptics. URL: <https://developer.apple.com/documentation/corehaptics> (дата обращения 25.02.2020).

¹¹ Apple Developer Documentation: Playing a Custom Haptic Pattern from a File. URL: https://developer.apple.com/documentation/corehaptics/playing_a_custom_haptic_pattern_from_a_file (дата обращения 25.02.2020).

¹² Apple Developer Documentation: Representing Haptic Patterns in AHAP Files. URL: https://developer.apple.com/documentation/corehaptics/representing_haptic_patterns_in_ahap_files#3239083 (дата обращения 25.02.2020).

3. Анализ трафика тактильной обратной связи

После создания приложения с тактильной обратной связью и параметрического тактильного кодека был проведен анализ трафика, создаваемого компонентами приложения. Сбор трафика производился с помощью программы Wireshark.

Анализ показал, что средняя интенсивность отправки пакетов составляет 27.87 пакетов в секунду со среднеквадратическим отклонением 7.04 пакета. Средний размер пакета составил 500 байт.

График распределения числа пакетов в секунду показан на рис. 5 и позволяет предположить мультимодальную природу распределения. Пересылка непосредственно тактильной обратной связи осуществляется с интенсивностью 26–30 пакетов в секунду, периоды более интенсивной отправки трафика (52–58 пакетов в секунду) характеризуют моменты установления соединения между сервером и клиентом.

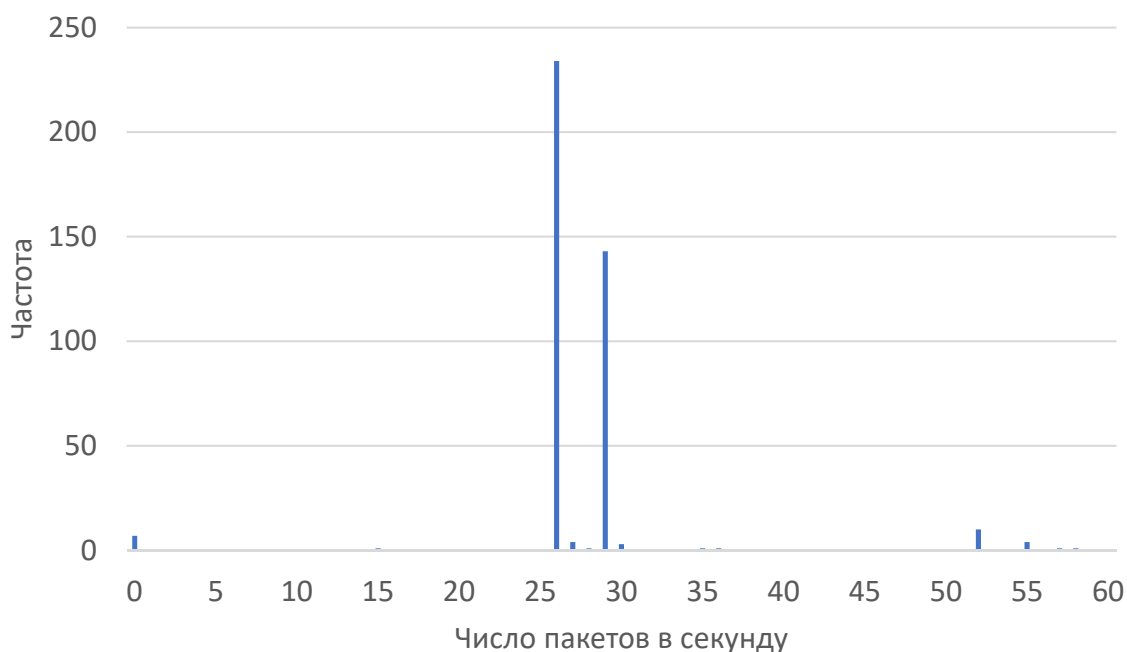


Рис. 5. График распределения числа пакетов в секунду

Заключение

В данной работе представлен параметрический кодек тактильной информации, осуществляющий кодирование и передачу трех параметров вибрации (длительность, интенсивность, резкость). Данный кодек может применяться для приложений, где не требуется большая точность передачи тактильной обратной связи, так как данный подход к кодированию, безусловно, не охватывает все многообразие характеристик тактильных ощущений. Таким образом, вопросы создания других типов тактильных кодеков и оценки качества восприятия тактильной обратной связи на данный момент остаются открытыми.

Анализ трафика, создаваемого таким кодеком, показал, что поток пакетов в случае использования данного кодека характеризуется относительно высокой

интенсивностью. При этом размер пакетов достаточно мал, что ожидаемо при использовании параметрического кодека. Можно также предположить, что в случае приложений, требующих более высокого качества восприятия услуги тактильной обратной связи, интенсивность пакетов, как и их размер, возрастет за счет использования более сложных, аудиоподобных или гибридных кодеков.

Литература

1. Кучерявый А. Е., Маколкина М. А., Киричек Р. В. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // *Электросвязь*. 2016. № 1. С. 44–46.
2. Dohler M., Mahmoodi T., Lema M., Condoluci M., Sardis F., Antonakoglou K., Aghvami A. Internet of skills, where robotics meets AI, 5G and the Tactile Internet // 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), 2017.
3. Maier M., Ebrahimzadeh A. and Chowdhury M. The Tactile Internet: Automation or Augmentation of the Human? // In *IEEE Access*, vol. 6. 2018. pp. 41607–41618. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2861768.
4. Simsek M., Aijaz A., Dohler M., Sachs J. and Fettweis G. 5G-Enabled Tactile Internet // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2016. Vol. 34. No. 3. pp. 460–473.
5. Aazam M., Harras K. A. and Zeadally S. Fog Computing for 5G Tactile Industrial Internet of Things: QoE-Aware Resource Allocation Model // In *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. May 2019. Vol. 15. No. 5. pp. 3085–3092. DOI: 10.1109/TII.2019.2902574.
6. Szabo D., Gulyas A., Fitzek F. H. P. and Lucani D. E. Towards the Tactile Internet: Decreasing Communication Latency with Network Coding and Software Defined Networking // *Proceedings of European Wireless 2015; 21th European Wireless Conference, Budapest, Hungary, 2015*. pp. 1–6.
7. Maier M., Ebrahimzadeh A. Towards immersive Tactile Internet experiences: Low-latency FiWi enhanced mobile networks with edge intelligence // *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2019. T. 11. № 4. pp. B10–B25.
8. Sukhmani S. et al.: Edge caching and computing in 5G for mobile AR/VR and tactile internet // *IEEE MultiMedia*. 2018. T. 26. № 1. pp. 21–30.
9. Ateya A. A., Vybornova A., Kirichek R., Koucheryavy A. Multilevel cloud based Tactile Internet system // 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2017. pp. 105–110.
10. Ateya A.A., Muthanna A., Vybornova A., Gudkova I., Gaidamaka Y., Abuarqoub A., Algarni A. D., Koucheryavy A. Model Mediation to Overcome Light Limitations—Toward a Secure Tactile Internet System // *J. Sens. Actuator Netw.* 2019. 8, 6.
11. Ateya A. A., Muthanna A., Gudkova I., Vybornova A., Koucheryavy A. Intelligent core network for Tactile Internet system // *Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems*. 2017. pp. 1–6.
12. Liu X., Dohler M., Mahmoodi T. and Liu H.: Challenges and opportunities for designing tactile codecs from audio codecs // *European Conference on Networks and Communications*. June 2017. pp. 1–5.
13. Steinbach E. et al.: Haptic Codecs for the Tactile Internet // *Proceedings of the IEEE*. Feb. 2019. Vol. 107. No. 2. pp. 447–470.
14. Kuchenbecker K. J., Romano J., McMahan W. (2011) Haptography: Capturing and Recreating the Rich Feel of Real Surfaces // In: Pradalier C., Siegwart R., Hirzinger G. (eds) *Robotics Research*. Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol. 70. Springer, Berlin, Heidelberg.
15. Выборнова А. И. Обзор подходов к созданию кодеков тактильной информации // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2019. Т. 7. № 1. С. 31–40.

References

1. Koucheryavy A. E., Makolkina M. A., Kirichek R. V. Tactile Internet. Ultra-Low Latency Networks // *Elektrosvyaz*. 2016. No 1. pp. 44–46.
2. Dohler M., Mahmoodi T., Lema M., Condoluci M., Sardis F., Antonakoglou K., Aghvami A. Internet of skills, where robotics meets AI, 5G and the Tactile Internet // 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), 2017.

3. Maier M., Ebrahimzadeh A. and Chowdhury M. The Tactile Internet: Automation or Augmentation of the Human? // In IEEE Access, vol. 6. 2018. pp. 41607–41618. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2861768.
4. Simsek M., Aijaz A., Dohler M., Sachs J. and Fettweis G. 5G-Enabled Tactile Internet // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. Vol. 34. No. 3. pp. 460–473.
5. Aazam M., Harras K. A. and Zeadally S. Fog Computing for 5G Tactile Industrial Internet of Things: QoE-Aware Resource Allocation Model // In IEEE Transactions on Industrial Informatics. May 2019. Vol. 15. No. 5. pp. 3085–3092. DOI: 10.1109/TII.2019.2902574.
6. Szabo D., Gulyas A., Fitzek F. H. P. and Lucani D. E. Towards the Tactile Internet: Decreasing Communication Latency with Network Coding and Software Defined Networking // Proceedings of European Wireless 2015; 21th European Wireless Conference, Budapest, Hungary, 2015. pp. 1–6.
7. Maier M., Ebrahimzadeh A. Towards immersive Tactile Internet experiences: Low-latency FiWi enhanced mobile networks with edge intelligence // IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking. 2019. T. 11. № 4. pp. B10–B25.
8. Sukhmani S. et al.: Edge caching and computing in 5G for mobile AR/VR and tactile internet // IEEE MultiMedia. 2018. T. 26. № 1. pp. 21–30.
9. Ateya A. A., Vybornova A., Kirichek R., Koucheryavy A. Multilevel cloud based Tactile Internet system // 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2017. pp. 105–110.
10. Ateya A.A., Muthanna A., Vybornova A., Gudkova I., Gaidamaka Y., Abuarqoub A., Al-garni A. D., Koucheryavy A. Model Mediation to Overcome Light Limitations—Toward a Secure Tactile Internet System // J. Sens. Actuator Netw. 2019. 8, 6.
11. Ateya A. A., Muthanna A., Gudkova I., Vybornova A., Koucheryavy A. Intelligent core network for Tactile Internet system // Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems. 2017. pp. 1–6.
12. Liu X., Dohler M., Mahmoodi T. and Liu H.: Challenges and opportunities for designing tactile codecs from audio codecs // European Conference on Networks and Communications. June 2017. pp. 1–5.
13. Steinbach E. et al.: Haptic Codecs for the Tactile Internet // Proceedings of the IEEE. Feb. 2019. Vol. 107. No. 2. pp. 447–470.
14. Kuchenbecker K. J., Romano J., McMahan W. (2011) Haptography: Capturing and Recreating the Rich Feel of Real Surfaces // In: Pradalier C., Siegwart R., Hirzinger G. (eds) Robotics Research. Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol. 70. Springer, Berlin, Heidelberg.
15. Vybornova A.: A Survey on Haptic Codec Design Approaches // Telecom IT. 2019. Vol. 7. Iss. 1. pp. 31–40 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2019-7-1-31-40.

Сапунова Екатерина Сергеевна – студентка Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, katerinotchka-rinotchka2010@yandex.ru

Sapunova Ekaterina – student, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, katerinotchka-rinotchka2010@yandex.ru

Леонтьев Сергей Сергеевич – студент Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, serleo98@yandex.ru

Leontiev Sergey – student, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, serleo98@yandex.ru

Выборнова Анастасия Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, a.vybornova@gmail.com

Vybornova Anastasija – Candidate of Engineering Sciences, assistant professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, a.vybornova@gmail.com