

ПОДХОДЫ К КОМПЕНСАЦИИ СЕТЕВОЙ ЗАДЕРЖКИ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ В СЕТЯХ СВЯЗИ 2030

Д. А. Галлямов^{*1}, В. С. Кисель¹, Р. В. Киричек¹,
А. С. Бородин², А. Е. Кучерявый¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
²ПАО «Ростелеком», Москва, 115172, Российская Федерация

*Адрес для переписки: gallyamovda@yandex.ru

Аннотация

Предмет исследования. Архитектура сетей связи 2030, механизмы компенсации задержки.
Цель работы. Рассмотреть архитектуру сетей связи с интеллектуальными граничными вычислениями, предложить механизмы компенсации сетевой задержки для приложений тактильного интернета на основе предиктивной аналитики. **Основные результаты.** Проанализированы научные публикации и спецификации из открытых источников по темам тактильного интернета, механизмам компенсации задержки и интеллектуальным граничным вычислениям. Предложены модель архитектуры сети 2030 и метод минимизации задержки на основе машинного обучения. **Основные выводы.** Модернизация сетевой архитектуры и программного комплекса позволит значительно увеличить эффективность сетей связи, реализовать новые модели и методы обработки данных, а также окажет существенное влияние на цифровую экономику.

Ключевые слова

Сети связи 2030, тактильный интернет, интеллектуальные граничные вычисления, предиктивная аналитика, компенсация задержки.

Информация о статье

УДК 004.7

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 28.11.19, принята к печати 30.12.19.

Ссылка для цитирования: Галлямов Д. А., Кисель В. С., Киричек Р. В., Бородин А. С., Кучерявый А. Е. Подходы к компенсации сетевой задержки для приложений в сетях связи 2030 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Том 7. № 2. С. 1–11. DOI 10.31854/2307-1303-2019-7-2-1-11.

NETWORK LATENCY COMPENSATION APPROACHES FOR APPLICATIONS IN 2030 COMMUNICATIONS NETWORKS

D. Gallyamov^{*1}, V. Kisel¹, R. Kirichek¹, A. Borodin², A. Koucheryavy¹

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation
PJSC "Rostelecom", Moscow, 115172, Russian Federation

Corresponding author: gallyamovda@yandex.ru

Abstract—Research subject. Communication network architecture 2030, delay compensation mechanisms. **Objective.** Consider the architecture of communication networks with intelligent edge computing, propose mechanisms for compensating network latency for tactile Internet applications based on predictive analytics. **Core results.** Scientific publications and specifications from open sources were analyzed, on tactile Internet topics, delay compensation mechanisms, intelligent boundary computing. A model of 2030 network architecture and a method of minimizing delay based on machine learning are proposed. **Main conclusions.** Modernization of the network architecture and software package will significantly increase the efficiency of communication networks, implement new models and methods of data processing, and will also have a significant impact on the digital economy.

Keywords—2030 communications networks, tactile Internet, intelligent edge computing, predictive analytics, delay compensation.

Article info

Article in Russian.

Received 28.11.19, accepted 30.12.19.

For citation: Gallyamov D., Kisel V., Kirichek R., Borodin A., Koucheryavy A.: Network latency compensation approaches for applications in 2030 communications networks // Telecom IT. 2019. Vol. 7. Iss. 2. pp. 1-11 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2019-7-2-1-11.

Введение

Исследования в области Интернета Вещей привели к появлению концепции Тактильного Интернета (ТИ), подразумевающей новый способ человеко-машинного взаимодействия с возможностью передавать управляющие команды для роботизированных платформ с задержками, незаметными для пользователя [1, 2, 3].

Фактически, несмотря на название тактильный интернет, в отчете МСЭ-Т к этой области отнесены все виды сетевых услуг и технологий, требующих круговую задержку не более 1 мс. При этом наиболее строгие требования предъявляются к задержке при передаче управляющих сигналов, тогда как сигналы тактильных ощущений могут передаваться с задержкой вплоть до 100 мс, что связано с особенностями восприятия тактильных ощущений человеком, также есть требования предъявляемые к максимальному расстоянию передачи данных, т. к. даже при использовании оптоволокна в качестве среды передачи, без учета обработки на промежуточных узлах и времени получения управляющих и тактильных данных от датчиков, максимально возможное расстояние работы

будет составлять 150 км. Например, системы автоматического управления промышленным оборудованием; технологии виртуальной и дополненной реальности, беспроводные сети VANET для связи движущихся автомобилей, решающие задачу управления дорожным движением, системы управления энергоснабжением, так называемые интеллектуальные энергосистемы (*Smart grid*), дистанционное управление БПЛА [4, 11, 12].

Тактильный Интернет дает возможность для замены или дополнения услуг, для которых необходимо непосредственное присутствие человека, например, в сфере здравоохранения, образования или автоматизации. Так, станет возможным проведение удаленных операций, упростится обслуживание сложного технического оборудования, появятся новые способы обучения. При этом не стоит забывать о том, насколько большое влияние Тактильный Интернет может оказать на цифровую экономику. Таким образом, с внедрением инноваций и модернизацией существующих сервисов и услуг, уже в ближайшем будущем, мы получим огромное количество данных, сверхчувствительных в задержке, для корректной обработки и передачи которых потребуются значительные вычислительные мощности.

Параллельно с разработкой технологий, влияющих непосредственно на скорость передачи данных, более эффективное использование сетевой архитектуры и полосы частот, необходима также разработка методов, позволяющих увеличить максимально возможное расстояние передачи и компенсировать задержки, которые все же могут возникнуть при использовании систем Тактильного Интернета, не связанных с физическим улучшением характеристик сетевого оборудования.

Учитывая развитие области машинного обучения, существование большого количества дата-центров и возникновение тенденции к появлению «частных дата-центров», реализованных в офисах, квартирах и обладающих, сравнительно не большой вычислительной мощностью, но готовых предоставить свои ресурсы для облачно-распределенных вычислений, появляется возможность создания интеллектуальных систем для уменьшения задержки на основе предиктивной аналитики. Данный подход планируется использовать как один из базовых для реализации сетей связи 2030.

1 Типовая структура фрагмента сети с интеллектуальной системой компенсации задержки для приложений в Сетях связи 2030

Фрагмент сети, изображенный на рис. 1, можно разделить на составляющие:

1. Передающие и управляющие устройства, которые формируют сигналы, создаваемые оператором и принимают сигналы обратной связи.
2. Сеть передачи данных, любая сеть, которая удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сетям с ультрамалыми задержками.
3. Принимающие и управляемые устройства, которые принимают сигналы и формируют сигналы обратной связи.
4. Локальные дата-центры и резервные вычислительные мощности, в данной сети находятся под управлением ИЕС с ИСКЗ, это могут быть сторонние дата-центры, майнинг-фермы, рендеринг-фермы или просто мощные персональные компьютеры, готовые предложить свои свободные вычислительные мощности для резервирования.

5. Автономная система IEC (*Intelligent edge computing*, с англ. интеллектуальные граничные вычисления) с интеллектуальной системой компенсации задержки (ИСКЗ), которую, условно, можно разделить на две составляющие:

5.1 Дата-центр-координатор, который использует свои вычислительные мощности для обеспечения корректной работы сети передачи данных, а также привлекает и резервирует вычислительные мощности сторонних/локальных дата-центров в случае увеличения нагрузки и взаимодействует с основной сетью.

5.2 Программное обеспечение разработанное на основе методов машинного обучения, которое используется для «предсказания» данных.

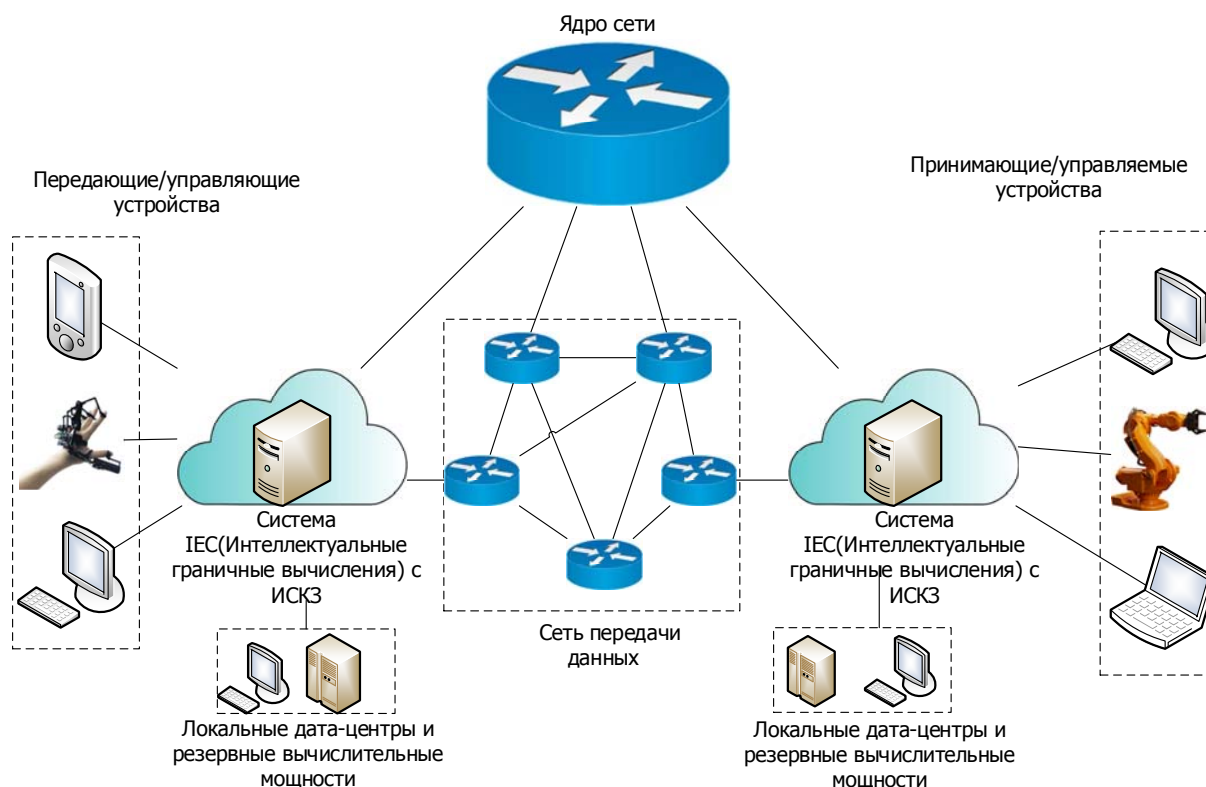


Рис. 1. Фрагмент сети с интеллектуальной системой компенсации задержки

Система IEC с ИСКЗ может выполнять широкий спектр задач, таких как:

1. Диспетчер распределения полосы пропускания для приложений. Исходя из расчетов выделяет и гарантирует требуемую полосу пропускания для сеансов связи.

2. Кэширование, сжатие и аналитика трафика.

3. Сбор, анализ и хранение данных IoT.

4. Граничные вычисления, требующие высокой производительности системы с последующей выгрузкой результатов для устройств, обладающих низкой производительностью (пользовательское оборудование, «слабые» узлы СПД).

5. Интеллектуальная обработка и фильтрация данных для оператора или сторонних поставщиков, на основе предварительного анализа данных с целью выделения значимой информации и последующей отправкой на центральный сервер.

6. Интеллектуальные системы мониторинга в реальном времени, с использованием методов машинного обучения.

7. Интеллектуальные системы компенсации задержки на основе предиктивной аналитики для сетей с ультрамалыми задержками, которую рассмотрим далее.

2 Принцип действия системы компенсации задержки в сетях тактильно интернета

Для более детального анализа рассмотрим сеть тактильного интернета, как наиболее чувствительную к задержкам. Рассмотрим фрагмент сети (рис. 2), на базе которого реализовано управление роботизированной рукой с помощью перчатки, оснащенной сенсорными датчиками, считывающими движение кисти руки и воспроизводящими тактильные ощущения [5].

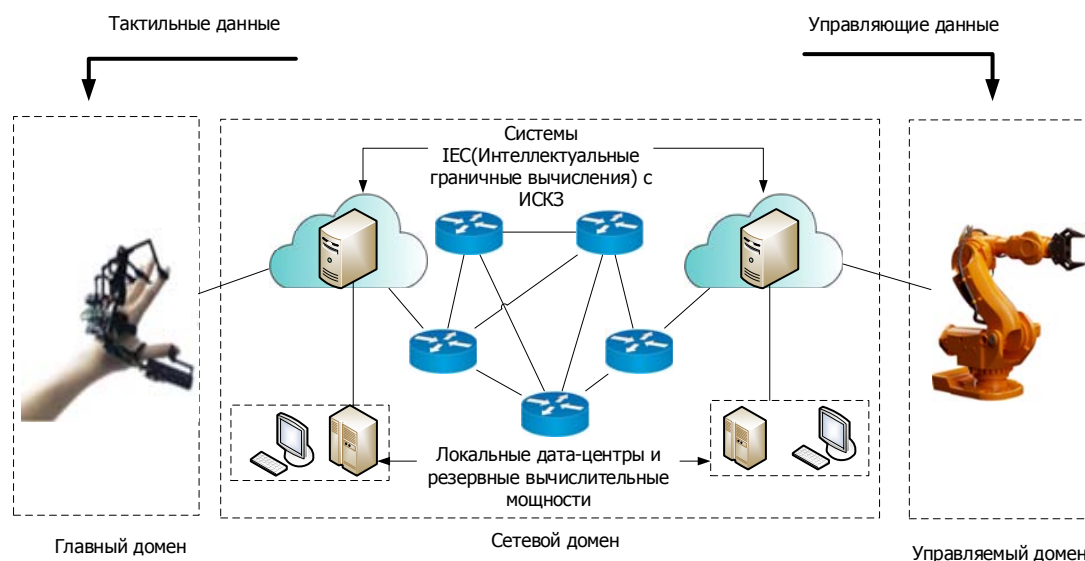


Рис. 2. Архитектура сети тактильного интернета с ИЕС и ИСКЗ

Сеть Тактильного Интернета, как показано на рис. 2, можно разделить на три составляющие:

1. Главный домен, который формирует сигналы управления, создаваемые оператором системы с помощью команд контроллера и принимает сигналы обратной связи.

2. Сетевой домен, любая сеть передачи данных, которая удовлетворяет требования тактильного интернета и система ИЕС с ИСКЗ.

3. Управляемый домен, который принимает сигналы управления, передает их на манипулятор, считывает тактильные сигналы с датчиков, расположенных на манипуляторе, формирует сигнал обратной связи.

Главный домен посылает управляющие команды управляемому домену через сетевой домен, а тот в свою очередь возвращает реакцию на произошедшее действие в виде тактильных данных.

ИСКЗ выполняет задачу увеличения максимального расстояния передачи данных, с допустимой величиной задержки, либо исправления ошибок при передаче на короткие дистанции и помещаются в граничные облака ИЕС, что умень-

шит время задержки при передаче данных, обеспечит эффективный способ разгрузки данных, передаваемых в основную сеть и высокую пропускную способность.

Принцип действия компенсирующих систем заключается в получении будущих значений управляющих или тактильных данных на основе некоторого промежутка предыдущих значений и их использовании вместо действительных значений, когда сигнал не был получен в нужный момент времени из-за длительности распространения, потери, искажения, либо был дублирован. Такие системы возможно использовать при любой частоте передачи команд, но они ограничены вычислительной мощностью оборудования, удаленностью исполнителя и требуемой точностью.

При использовании системы компенсации для увеличения максимального расстояния необходимо расположить её таким образом, чтобы суммарное время передачи данных от контроллера к системе и от системы к исполнителю, а также в обратную сторону, соответствовало ранее описанным требованиям к задержке (рис. 3). Причем чем ближе к исполнителю будет находиться система, тем точнее окажутся предсказанные данные, поскольку увеличение предсказательного горизонта в том числе увеличивает ошибку [12]. Наиболее эффективным в такой ситуации оказывается использование многоуровневой облачной архитектуры [13].

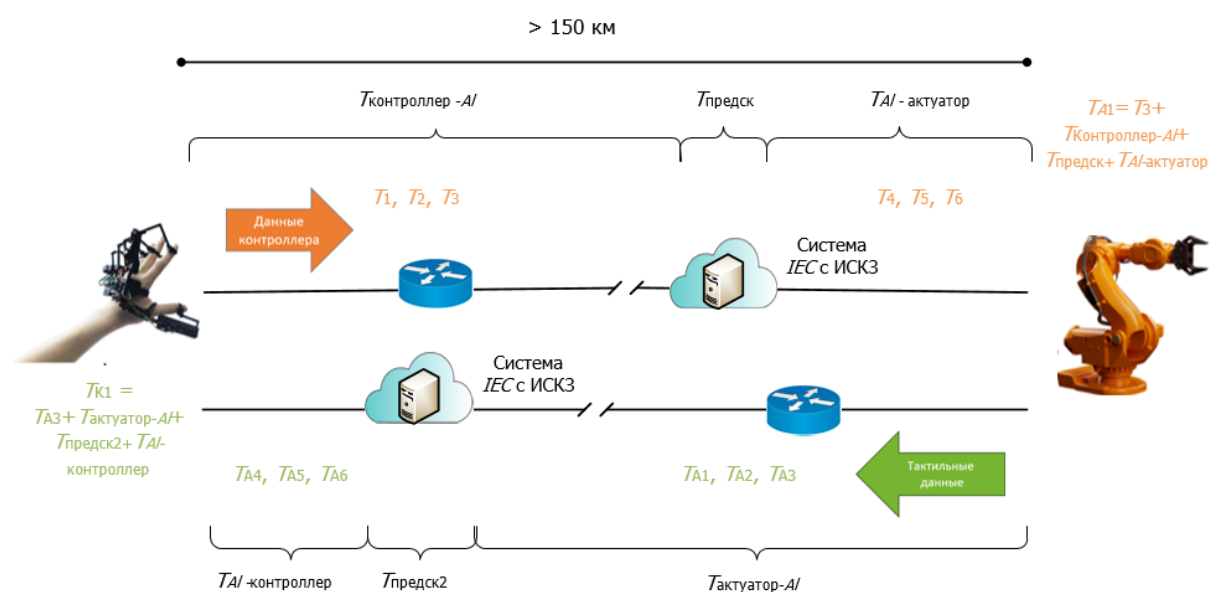


Рис. 3. Пример работы компенсирующей системы для увеличения максимального расстояния передачи

Кроме того, необходимо контролировать своевременную передачу данных ощущений, что дает повод задуматься о способе их отправки: в потоковом режиме, без привязки к получаемым от пользователя командам, или как отдельной реакции на каждую управляющую команду, что уменьшит количество передаваемых данных, но, увеличит время получения каждого отдельного состояния системы.

В результате управляющие данные, полученные актуатором в момент времени T , будут соответствовать предсказанным данным с временной меткой:

$$T_A = T + T_{\text{контроллер-AI}} + T_{\text{предсказания}} + T_{\text{AI-актуатор}}$$

Определение $T_{\text{контроллер-AI}}$, $T_{\text{предсказания}}$, $T_{\text{AI-актуатор}}$ в таком случае потребует либо точной синхронизации контроллера, предсказательной системы и исполнителя для вычисления задержек через системное время, либо постоянной проверки задержки между двумя последними блоками данных, полученных исполнителем, что, учитывая возможную сложность сетевой архитектуры и вариацию времени предсказания, внесет дополнительную погрешность, однако, время предсказаний можно варьировать за счет увеличения/уменьшения вычислительных мощностей, привлекаемых от сторонних дата-центров, что позволит рационально использовать вычислительные мощности и оставаться в рамках условий, необходимых для корректной обработки и передачи данных в сетях Тактильного Интернета.

Использование системы компенсации задержки может быть полезно и в случае, когда расстояние между главным и управляемым доменом вносит круговую задержку в пределах 1 мс. При передаче с гарантией доставки возможны перепросы, нарушающие своевременность получения команд, а при передаче без обеспечения надежности данные могут быть утеряны, либо прийти с нарушением порядка. В таком случае вычисление времени распространения без использования системного времени синхронизированного оборудования даст меньшую погрешность и может представлять собой проверку наличия новых данных через определенные промежутки времени. Интервал проверки относится к вычисляемым параметрам, поэтому использование периодической проверки возможно только в фиксированной сетевой архитектуре с закрепленными маршрутами, но при его использовании могут быть выравнены промежутки между измерениями.

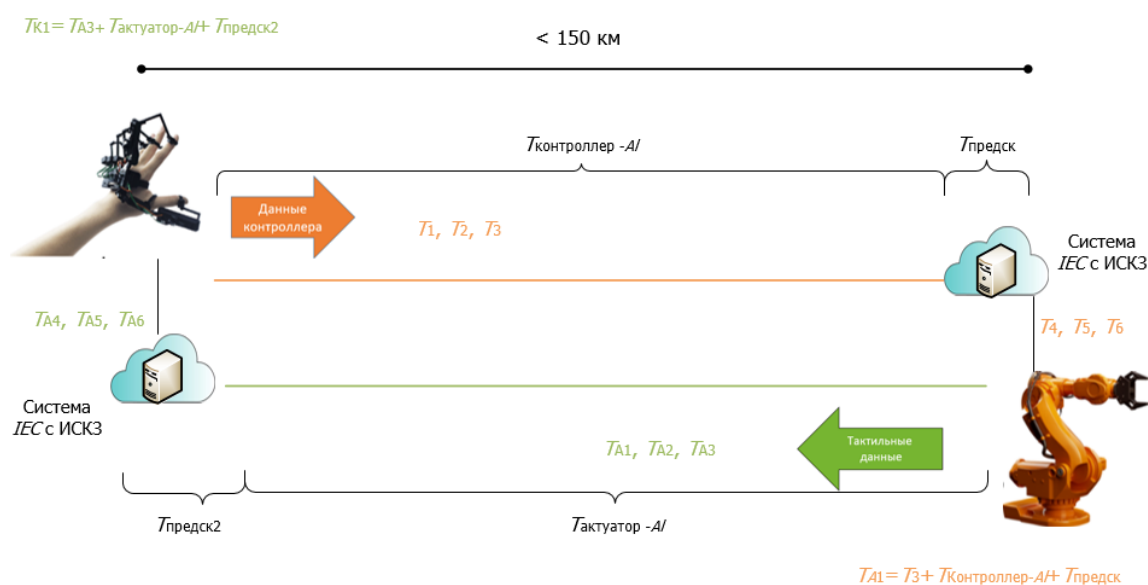


Рис. 1. Пример работы компенсирующей системы для исправления ошибок

Поскольку системы тактильной поддержки находятся непосредственно перед контроллером и актуатором, время $T_{AI-актуатор}$ и $T_{AI-контроллер}$ перестает значительно влиять на общую задержку, поэтому временные метки в таком случае могут быть вычислены как:

$$T_A = T + T_{\text{контроллер-AI}} + T_{\text{предсказания1}}$$

$$T_K = T_A + T_{\text{актуатор-AI}} + T_{\text{предсказания2}}$$

Одновременно с этим уменьшится и горизонт предсказаний, что даст более точные результаты.

На временных диаграммах на рис. 5 и 6 представлен процесс работы приложения Тактильного Интернета со встроенными предсказательными системами для случая без образования очередей и для случая с очередями в предсказательной системе, появляющимися при предсказании большого количества данных или недостаточной производительности оборудования.

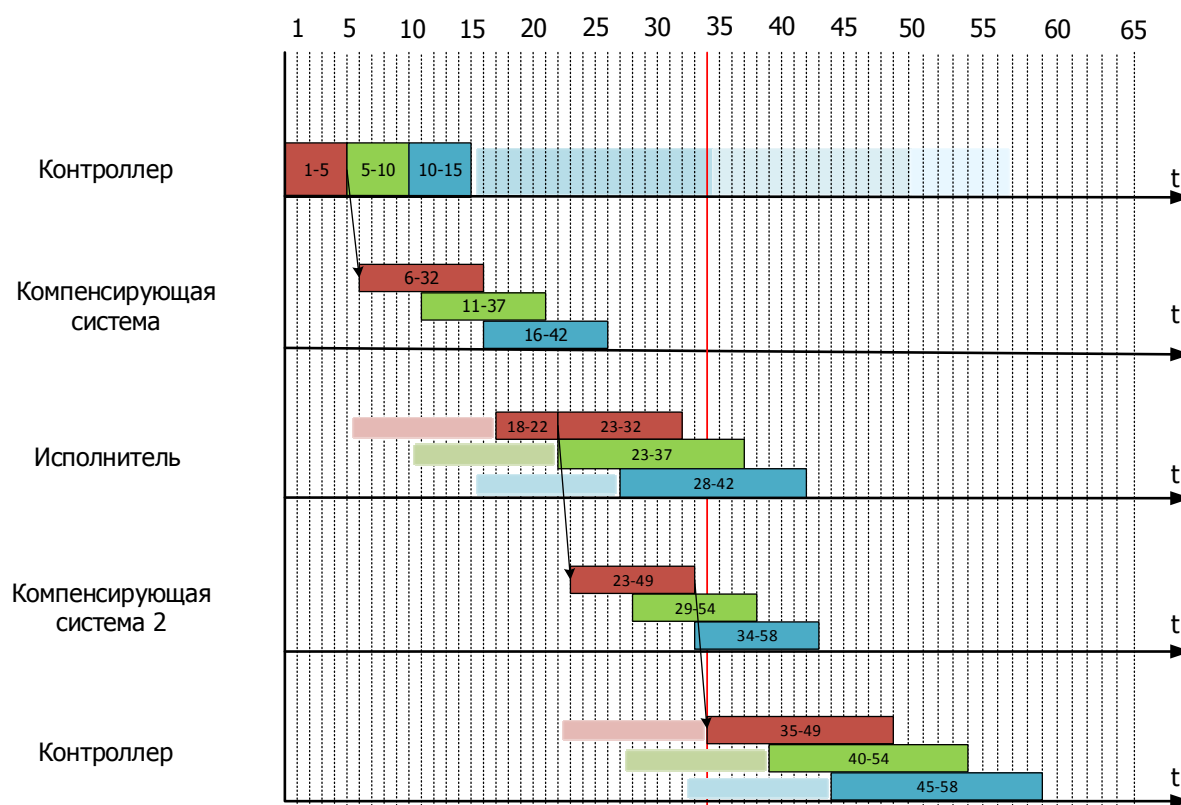


Рис. 5. Пример работы предсказательной системы без очередей

Можно заметить, что появление очередей может значительно увеличить ошибку предсказания, поскольку к моменту получения данных исполнителем большая их часть уже устаревает. В таком случае слишком долгое время работы предсказательной системы или слишком маленький горизонт предсказания может привести к разрывам в получаемых данных. Этого можно избежать, отслеживая состояние системы и в случае необходимости увеличивая вычислительный

ресурс сети за счет привлечения сторонних мощностей от локальных дата-центров.

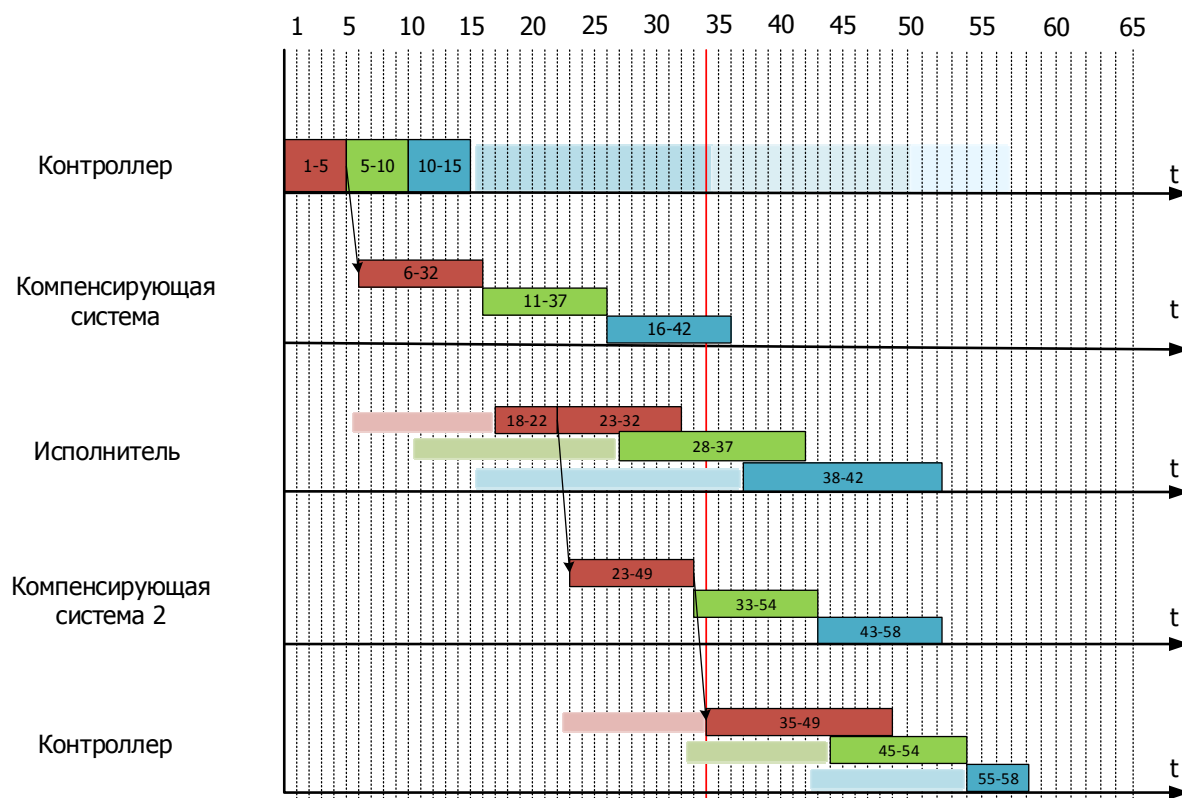


Рис. 6. Пример работы предсказательной системы с очередями

Заключение

Развитие сетей связи рано или поздно приведет к повсеместному распространению идей, описанных концепцией сетей 2030, в связи с чем потребуются более оптимальные подходы к использованию сетевого оборудования и развертыванию сетевой архитектуры. В данной статье был рассмотрен подход, к организации структуры сети связи позволяющий осуществлять интеллектуальные граничные вычисления, что позволит значительно эффективнее использовать имеющиеся ресурсы сети, создавать новые услуги и сервисы, а также привлекать сторонние, независимые узлы для участия в цифровой экономике, однако, такая модернизация сети потребует значительных материальных вложений и времени для адаптации.

Поэтому был рассмотрен подход, программной модернизации сети, с использованием машинного обучения, на фрагменте сети тактильного интернета, как наиболее чувствительной к задержкам. Данный метод позволил увеличить максимальное расстояние передачи данных, без улучшения параметров сети связи, а вместо этого использующий возможности развивающейся области искусственного интеллекта.

Таким образом, создание приложений и решений для сетей является сложной задачей, требующей активных исследований во многих областях телекоммуникационных и компьютерных наук.

Литература

1. Meryem S., Adnan A., Mischa D. The 5G-Enabled Tactile Internet: Applications, Requirements, and Architecture // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2016. Pp. 1–6.
2. Martin M., Mahfuzulhoq C., Bhaskar P., Dung P. The Tactile Internet: Vision, Recent Progress, and Open Challenges // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. Pp. 138–145.
3. Changyang S., Chenyang Y. Energy Efficient Design for Tactile Internet // IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). 2016. Pp. 1–6.
4. Владимиров С. С. Механизм компенсации задержек для приложений тактильного интернета // Электросвязь. 2018. № 3. С. 35–40.
5. Xiaochi G., Weize S., Yuanzhe B., Dao Z. Dexmo: An Inexpensive and Lightweight Mechanical Exoskeleton for Motion Capture and Force Feedback in VR // CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2016. Pp. 1991–1995.
6. Ali I., Seung-Chan K., Poupyrev I. Surround Haptics: Tactile Feedback for Immersive Gaming Experiences // CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2012. Pp. 1087–1090.
7. Soldani D. 5G Communications: Development and Prospects. URL: https://www.hs-osna-brueck.de/fileadmin/HSOS/Forschung/Recherche/Laboreinrichtungen_und_Versuchsbetriebe/Labor_fuer_Hochfrequenztechnik_und_Mobilkommunikation/Mobilkomtagung/2016/Vortraege/4_David_Soldani.
8. Kirichek R., Koucheryavy A. Internet of Things laboratory test bed // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2016. Vol. 348. Pp. 485–490, DOI: 10.1007/978-81-322-2580-5_44.
9. Кучерявый А. Е., Маколкина М. А., Киричек Р.В. Тактильный интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44–46.
10. Кучерявый А. Е., Выборнова А. И. Тактильный Интернет // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании АПИНО-2016. V Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. научных статей. СПб.: СПбГУТ, 2016. Т. 1. С. 6–11.
11. Маколкина М. А. Развитие услуг дополненной реальности в рамках концепции тактильного интернета // Электросвязь. 2017. № 2. С. 36–40.
12. Dohler M. An Internet of Skills: Where Robotics meets AI and the Tactile Internet // IEEE ICC 2016, Plenary Keynote, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016.
13. Ateya A. A., Vybornova A., Kirichek R., Koucheryavy A. Multilevel Cloud Based Tactile Internet System // Proc. of 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT) 2017. Pp. 105–110.

References

1. Meryem, S., Adnan, A., Mischa, D. The 5G-Enabled Tactile Internet: Applications, Requirements, and Architecture // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2016. Pp. 1–6.
2. Martin, M., Mahfuzulhoq, C., Bhaskar, P., Dung, P. The Tactile Internet: Vision, Recent Progress, and Open Challenges // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. Iss. 5. Pp. 138–145.
3. Changyang, S., Chenyang, Y. Energy Efficient Design for Tactile Internet // IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). 2016. Pp. 1–6.
4. Vladimirov, S. Delay Compensation Mechanism for the Tactile Internet Applications // *El-ektrosvyaz'*. 2018. No. 3. Pp. 35–40.
5. Xiaochi, G., Weize, S., Yuanzhe, B., Dao, Z. Dexmo: An Inexpensive and Lightweight Mechanical Exoskeleton for Motion Capture and Force Feedback in VR // CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2016. Pp. 1991–1995.
6. Ali, I., Seung-Chan, K., Poupyrev, I. Surround Haptics: Tactile Feedback for Immersive Gaming Experiences // CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2012. Pp. 1087–1090.
7. Soldani, D. 5G Communications: Development and Prospects. URL: https://www.hs-osna-brueck.de/fileadmin/HSOS/Forschung/Recherche/Laboreinrichtungen_und_Versuchsbetriebe/Labor_fuer_Hochfrequenztechnik_und_Mobilkommunikation/Mobilkomtagung/2016/Vortraege/4_David_Soldani.pdf
8. Kirichek, R., Koucheryavy, A. Internet of Things Laboratory Test Bed // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2016. Vol. 348. Pp. 485–490.

9. Koucheryavy, A., Makolkina, M., Kirichek, R. Tactile Internet. Ultra-Low Latency Networks // *Elektrosvyaz*. 2016. No. 1. Pp. 44–46.
10. Koucheryavy, A., Vybornova, A. Tactile Internet // 5th International Conference on Advanced Infotelecommunication (ICAIT). 2016. Vol. 1. Pp. 6–11.
11. Makolkina, M. Development of Augmented Reality Services within Tactile Internet Concept // *Elektrosvyaz*. 2017. No. 2. Pp. 36–40.
12. Dohler, M. An Internet of Skills: Where Robotics Meets AI and the Tactile Internet // European Conference on Networks and Communications (EuCNC). 2017.
13. Ateya, A. A., Vybornova, A., Kirichek, R., Koucheryavy, A. Multilevel Cloud Based Tactile Internet System // 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT). 2017. Pp. 105–110.

***Галлямов
Денис Анифович***

– аспирант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232,
Российская Федерация, gallyamovda@yandex.ru

***Кисель
Виктор Сергеевич***

– магистрант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232,
Российская Федерация, kiselviktor2009@yandex.ru

***Киричек
Руслан Валентинович***

– доктор технических наук, профессор, СПбГУТ,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация,
kirichek.sut@mail.ru

***Бородин
Алексей Сергеевич***

– кандидат политических наук, представитель в Женеве,
Ростелеком, Москва, 115172, Российская Федерация,
borodin.msk@mail.ru

***Кучерявый
Андрей Евгеньевич***

– доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232,
Российская Федерация, akouch@mail.ru

Gallyamov Denis

– Postgraduate, SUT, St. Petersburg, 193232,
Russian Federation, gallyamovda@yandex.ru

Kisel Viktor

– Undergraduate student, SUT, St. Petersburg, 193232,
Russian Federation, kiselviktor2009@yandex.ru

Kirichek Ruslan

– Doctor of Engineering Sciences, Professor, SUT,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation,
kirichek.sut@mail.ru

Borodin Alexey

– Candidate of Political Sciences, Representative in Geneva,
Rostelecom, Moscow, 115172, Russian Federation,
borodin.msk@mail.ru

Koucheryavy Andrey

– Doctor of Engineering Sciences, Full Professor,
Head of the Department, SUT, St. Petersburg,
193232, Russian Federation, akouch@mail.ru