

На правах рукописи

Горбачева Любовь Сергеевна

**Исследование характеристик трафика и качества обслуживания
для роботов-манипуляторов в сетях связи с ультрамалыми задержками**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре сетей связи и передачи данных.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

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

Степанов Михаил Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
Московский технический университет связи
и информатики, кафедра сетей связи и систем
коммутации, доцент кафедры

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

Защита состоится 29 ноября 2023 года в 11.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

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

Автореферат разослан 29 сентября 2023 года.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета 55.2.004.01,
д-р техн. наук, доцент

А.И. Парамонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Развитие сетей связи в настоящее время происходит в направлении создания сетей связи пятого и последующих поколений. В основе развития сетей лежат концепции Интернета Вещей и Тактильного Интернета, реализация которых уже привела к созданию сетей высокой и сверхвысокой плотности и сетей связи с ультрамалыми задержками. Для последних задержки должны составлять от 1 до 10 мс в зависимости от приложения. Такие значения задержек позволяют сети связи оказывать целый ряд новых услуг, которые предполагают дистанционный формат, что привело к появлению нового класса услуг, которые называются услугами телеприсутствия.

Особое внимание исследователей к услугам телеприсутствия усилилось вследствие произошедшей пандемии. При этом был определен первоочередной набор услуг телеприсутствия, в который вошли: телеконференции, голографические изображения с использованием вентиляторов, гибридных очков дополненной реальности и голографии, дополненная реальность для медицины, промышленности и образования, роботы-аватары на базе перчаток и роботизированных рук для выполнения хозяйственной деятельности человека в неблагоприятных условиях внешней среды и при дистанционном уходе за нуждающимися в этом людьми и животными, роботы-манипуляторы и их сообщества для дистанционного управления при выполнении различных задач в хозяйственной деятельности.

Каждая из вышеперечисленных услуг создает сетевой трафик, который должен быть обслужен с требуемыми характеристиками качества обслуживания. Эти характеристики до настоящего времени не были изучены. Поэтому одной из основных задач при внедрении услуг телеприсутствия является исследование характеристик трафика для таких услуг и качества обслуживания для них.

В диссертационной работе исследуются характеристики сетевого трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов и разрабатывается метод управления роботами-манипуляторами по сети связи с ультрамалыми задержками для оптимизации использования канала связи. Исследования проводятся с использованием нового научного инструментария – модельной сети, созданной для изучения характеристик сетей связи шестого поколения и услуг телеприсутствия. С учетом изложенного тема диссертационной работы представляется актуальной.

Степень разработанности темы. В области исследований трафика и качества обслуживания для сетей связи пятого и последующих поколений существует ряд работ отечественных и зарубежных ученых В.М. Вишневого, Б.С. Гольдштейна, В.Г. Карташевского, М.О. Колбанева, Р.В. Киричка, А.Е. Кучерявого, А.И. Парамонова, К.Е. Самуйлова, С.Н. Степанова, В.О. Тихвинского, А.В. Абилова, А.С. Бородина, Ю.В. Гайдамаки, Е.А. Кучерявого, М.А. Маколкиной, Д.А. Молчанова, А.Н. Волкова, А.С.А. Мутханна, А.А.А. Ateya, M. Dohler, G.P. Fettweis, Z. Li, M. Maier, P. Popovski, T. Taleb, M. Uusitalo и других.

Работы отмеченных выше авторов внесли весомый вклад в исследования характеристик сетевого трафика и качества обслуживания для сетей связи пятого и шестого поколений, в основном для услуг Интернета Вещей, передачи данных, видео, телеконференций и т.п. Однако до настоящего времени практически не уделялось внимания исследованию характеристик трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов и разработке методов управления роботами-манипуляторами по сети связи с ультрамалыми задержками для оптимизации использования канала связи. Это и определяет цель, задачи, объект и предмет диссертационной работы. При этом решается следующая научная задача: исследование характеристик трафика и качества обслуживания для роботов манипуляторов и оптимизация использования канала связи для управления ими.

Объект и предмет диссертации. *Объектом* исследования являются услуги телеприсутствия в сетях связи с ультрамалыми задержками, а *предметом* – характеристики трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов.

Цель и задачи диссертации. *Цель* диссертационной работы состоит в исследовании характеристик трафика и качества обслуживания для роботов манипуляторов и разработке метода управления роботами-манипуляторами по сети связи с ультрамалыми задержками для оптимизации использования канала связи.

Указанная цель достигается путем решения в диссертационной работе следующих *задач*:

– анализ перспектив развития сетей связи пятого и последующих поколений;

- анализ перспектив предоставления услуг телеприсутствия;
- анализ приложений, реализуемых роботами-манипуляторами на примере роботов семейства Dobot Magican;
- разработка фрагмента модельной сети для исследований сетей связи шестого поколения в части предоставления услуг телеприсутствия для роботов-манипуляторов;
- исследование предельных значений расстояний, на котором наблюдается устойчивое функционирование робота-манипулятора в сети связи общего пользования;
- исследование характеристик трафика (количество пакетов/с, средний размер пакета в байтах и скорость передачи данных в бит/с), поступающего на сеть связи общего пользования от роботов-манипуляторов для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при использовании существующего метода с накоплением команд в буфере клиента;
- разработка нового метода управления параметрами обмена данными, который для управления роботами по сети связи общего пользования использует передачу серии команд, число которых оптимизировано по критерию эффективности использования канала связи;
- разработка и апробация протокола прикладного уровня для роботов-манипуляторов, в котором реализуется указанный выше новый метод управления параметрами обмена данными.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- В отличие от известных требований стандартов международных организаций экспериментальным путем на модельной сети определено предельное значение расстояния в 115 км, на котором наблюдается устойчивое функционирование робота-манипулятора для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения в сети связи общего пользования.
- В отличие от известных результатов определены характеристики трафика (количество пакетов/с, средний размер пакета в байтах и скорость передачи данных в бит/с), поступающего на сеть связи общего пользования от роботов-манипуляторов для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при использовании существующего протокола с накоплением команд в буфере клиента.

– Разработан метод управления параметрами обмена и протокол прикладного уровня для роботов-манипуляторов, который в отличие от существующих методов и протоколов для управления роботами по сети связи общего пользования использует передачу серии команд, число которых оптимизировано по эффективности использования канала связи, что позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов (канала), например, при вероятности ошибки выполнения команды роботом 0,001 на величину более чем 74%. Величина выигрыша повышается с ростом ошибки выполнения команд.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит, прежде всего, в самом предмете исследования – характеристиках трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов в сетях связи с ультрамалыми задержками. Полученные характеристики трафика, поступающего на сеть связи общего пользования от роботов-манипуляторов для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при использовании существующего протокола с накоплением команд в буфере клиента и вновь разработанного метода с использованием передачи серии команд расширяют существующие знания в области теории телетрафика. Самостоятельную теоретическую значимость имеют результаты, полученные экспериментальным путем на модельной сети, в отношении предельного расстояния для устойчивого функционирования роботов-манипуляторов при взаимодействии с сетью связи общего пользования.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в возможности использования результатов работы для планирования сетей связи, разработки рекомендаций Сектора стандартизации телекоммуникаций Международного союза Электросвязи (МСЭ-Т), а также в процессе обучения студентов и аспирантов по профильным специальностям. Весомую практическую ценность имеет создание сегмента модельной сети для исследований, тестирования и обучения в лаборатории «Исследование сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного интеллекта для сетей 6G» (MEGANETLAB 6G) и соответствующей методики тестирования.

Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке «Методики планирования сетей связи при

внедрении роботов- манипуляторов», ФГБУ НИИР в рамках выполнения государственных контрактов по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций администрации связи Российской Федерации в части, касающейся международно-правовой защиты интересов Российской Федерации в области электросвязи и радиосвязи в виде предложений по вкладам от имени администрации связи Российской Федерации (Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации) в Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т), в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Тактильный Интернет и интернет навыков», «Сети связи с ультра малыми задержками» и «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», а также при выполнении Соглашения о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидий, выделяемого для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации от «06» июля 2022 г. № 075-15-2022-1137 по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации 20а – Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории вероятностей, математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Роботы-манипуляторы устойчиво функционируют на сети связи общего пользования для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при предельном значении расстояния в 115 км от передатчика команд управления по протоколу UDP, что уточняет требования стандартов международных организаций.

2. Определены характеристики трафика (количество пакетов/с, средний размер пакета в байтах и скорость передачи данных в бит/с), поступающего на сеть связи общего пользования от роботов-манипуляторов для приложений вакуумного захвата, механического захвата и черчения при использовании существующего протокола с накоплением команд в буфере клиента.

3. Метод управления параметрами обмена и протокол прикладного уровня для роботов-манипуляторов, которые для управления роботами по сети связи общего пользования используют передачу серии команд, число которых оптимизировано по эффективности использования канала связи, позволяют повысить эффективность использования сетевых ресурсов (канала), например, при вероятности ошибки выполнения команды роботом 0,001 на величину более чем 74%.

Степень достоверности основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами натурного моделирования на модельной сети, обсуждением результатов диссертационной работы на международных конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 25-ой международной конференции «International conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications DCCN» (Москва, 2022), на онлайн-семинаре по теме «Мобильные робототехнические системы в сельском хозяйстве» (2022), на заседании Исследовательской комиссии 11 «Требования к сигнализации, протоколы, спецификации испытаний и борьба с контрафактными устройствами электросвязи/ИКТ» МСЭ-Т (2023), на 78-й научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио СПбНТОРЭС (Санкт-Петербург, 2023), на семинарах кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

Публикации по теме диссертации. Всего по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 5 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, 1 статья в рецензируемых

изданиях, входящих в международные базы данных SCOPUS и WoS, 2 статьи в других изданиях, 1 отчет о НИР.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам 1, 7, 9 и 19 паспорта специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемых переменных, списка использованных источников и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 144 страницы. Работа содержит 58 рисунков, 13 таблиц. Список литературы содержит 83 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и определены её ключевые особенности, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, определена научная новизна результатов, указаны теоретическая и практическая ценность результатов, приведены сведения об апробации работы, перечислены публикации по теме выполненного исследования.

В первой главе произведен анализ перспектив развития сетей связи пятого и последующих поколений. Отмечается, что Тактильный Интернет является предпосылкой для создания сетей связи с ультрамалыми задержками в рамках сетей связи шестого поколения, поскольку с переходом к таким сетям изменятся характеристики круговой задержки.

Значения задержки от 1 до 10 мс позволяют сети связи оказывать целый ряд услуг, которые предполагают дистанционный формат, что привело к появлению нового класса услуг, которые называются услугами телеприсутствия. Телеприсутствие позволяет пользователю с помощью специальных устройств получить впечатление того, что он находится и воздействует на место, отличное от его физического местоположения. Услуги телеприсутствия, в свою очередь, создают трафик, который должен быть обслужен с требуемыми характеристиками качества обслуживания.

Одной из главных основ дальнейшего технического прогресса являются роботы. Их использование широко распространено на сегодняшний день на производствах, в повседневной жизни человека, при проведении научных исследований, в медицине и т.д. Они необходимы для повышения производительности и эффективности процессов производства и для выполнения рутинной работы человека в быту. Важной задачей является их управление через сеть и использование в режиме реального времени.

Основываясь на аналитических данных из открытых источников, рост численности роботов за 10 лет (рисунок 1) позволяет предположить сохранение данной тенденции в будущем. Тем самым становится важной реализация таких услуг.

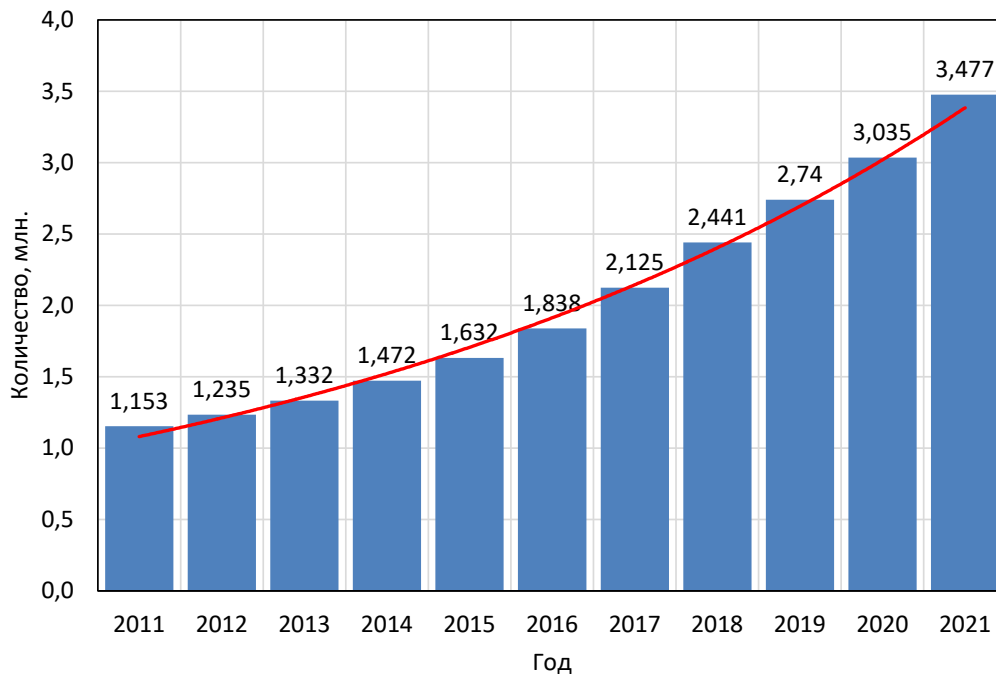


Рисунок 1 – Статистика роста численности промышленных роботов

В результате проведенного анализа международных стандартов определены требования к задержкам и вероятности безотказной работы для различных услуг телеприсутствия, а также требования к характеристикам качества обслуживания в сетях связи с ультрамалыми задержками. Задачи по определению характеристик трафика и параметров качества обслуживания для роботов-манипуляторов актуальны, в том числе и по причине недостаточно определенных параметров трафика и качества обслуживания в международных стандартизирующих организациях.

Во второй главе раскрывается понятие модельных сетей, рассмотрены области их применения, показана типовая структура различных типов модельных сетей, в том числе модельной сети для тестирования услуг Тактильного интернета. Определен первоочередной набор услуг телеприсутствия, тестирование которых можно провести на базе модельной сети нового поколения в области услуг телеприсутствия, созданной на кафедре сетей связи и передачи данных в СПб ГУТ.

Рассмотрены компоненты модельной сети, которые необходимы для проведения исследований с использованием роботов-манипуляторов. Для исследований был выбран многофункциональный робот-манипулятор «DOBOT Magician» (рисунок 2). Это портативный, многофункциональный роботизированный манипулятор со сменными инструментами, с помощью которого можно реализовать удаленное присутствие человека, и его взаимодействие с окружающей средой. В диссертационной работе подробно описаны его режимы работы и технические характеристики.



Рисунок 2 – Робот-манипулятор Dobot Magician

В качестве высокопроизводительного ядра модельной сети для услуг телеприсутствия была выбрана DWDM система на базе отечественной DWDM-платформы «Волга» производства компании Т8. Она необходима для построения высокоскоростных сетей и способна реализовать, в своем исполнении, до 40 каналов с пропускной способностью до 100 Гбит/с каждый.

Дополнительным узлом в DWDM системе может быть использован аттенюатор, обеспечивающий ослабление оптического сигнала на физическом уровне до необходимого уровня. Для соединения узлов в пределах одного или нескольких сегментов сети подходят коммутаторы уровня доступа с поддержкой технологии Ethernet/Wi-Fi/LTE.

Для перехвата и анализа сетевого трафика использовалось программное обеспечение Wireshark. Оно позволяет просматривать захваченные данные с помощью графического интерфейса, работает с большим количеством сетевых протоколов, сохраненные данные можно экспортировать в различные форматы, что позволяет использовать перехваченный сетевой трафик в дальнейшем при проведении имитационного моделирования.

На стороне передатчика, где находится сервер, и на стороне приемника, где подключен робот-манипулятор, установлены персональные компьютеры (ПК), на которых запускается свой программный код.

Таким образом, была разработана обобщенная структура модельной сети, которая использовалась при исследованиях функционирования роботоманипуляторов (рисунок 3).

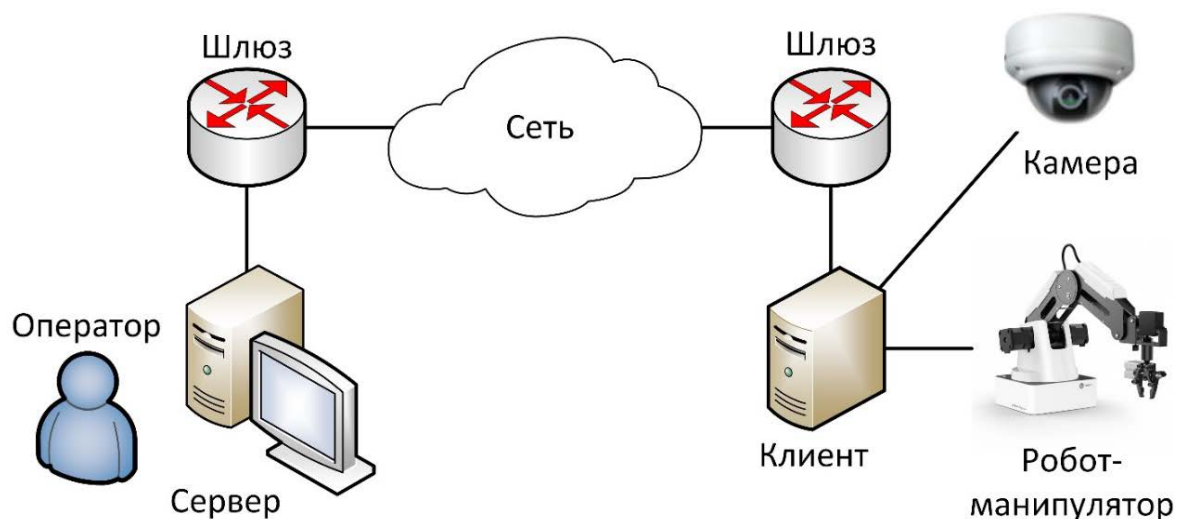


Рисунок 31 – Структура модельной сети сегмента роботоманипуляторов

Оператор следит за работой Сервера и Клиента, управляет настройкой оборудования Сети и оценивает параметры её работы, следит за состоянием и выполнением входящих команд роботоманипулятором визуально или с помощью камеры.

В рамках научно-исследовательской работы «Исследование новых принципов построения сетей связи 6G и предоставления перспективных услуг

телеприсутствия» для проведения исследований на базе описанной выше модельной сети была разработана программа и методика испытаний услуг телеприсутствия, предоставляемых на основе роботов-манипуляторов и/или их сообществ для реализации возможности дистанционного управления при выполнении различных задач в быту и хозяйственной деятельности.

В третьей главе был описан сценарий исследования по передаче команд роботу-манипулятору через сеть с учетом вносимых задержек. Были рассмотрены два Приложения робота: перенос предмета и рисование кругов.

Из эксперимента было выявлено, что при значении затухания аттенюатора до 23 дБ, вероятность ошибки не увеличивается. И при значении затухания большем, чем 23,5 дБ, становится заметна задержка в выполнении задач манипулятором, перенос предмета является некорректным. При рисовании кругов также при затухании большего, чем 23 дБ, манипулятор не смог нарисовать целые круги.

Таким образом, получены результаты по определению предельного значения расстояния в 115 км, на котором наблюдается устойчивое функционирование робота-манипулятора в сети связи общего пользования. Результаты исследования необходимы для дальнейших разработок требований к параметрам качества обслуживания при предоставлении услуг телеприсутствия.

Далее были рассмотрены существующие протоколы, используемые для передачи данных для роботов. Реализацию данной передачи данных могут поддерживать следующие стандартные протоколы: HTTP, ICMP, SNMP. Также удаленное управление роботом может быть реализовано на базе протоколов XMPP, MQTT, RScomm, RBC. Данные протоколы позволяют управлять роботами, но они не учитывают возможность ошибки робота при функционировании.

В качестве характеристик для исследования сетевого трафика были выбраны следующие: количество пакетов в секунду, средний размер пакета, скорость передачи данных. Описаны четыре Приложения работы манипулятора: без модулей, с вакуумным и механическим захватами, черчение.

Представлен базовый сценарий обмена сообщениями при управлении роботом-манипулятором (рисунок 4). Важными особенностями является то, что в одном сетевом пакете передается одна команда, и то, что в то время пока робот выполняет команду, сервер продолжает передавать новые команды на сторону

клиента. На клиенте образуется очередь из команд, которая в случае ошибки робота удаляется. Каждая команда, которую необходимо выполнить манипулятору, постоянно контролируется, а приступить к выполнению следующей команды манипулятор может только после получения результатов контроля выполнения.



Рисунок 4 – Базовый сценарий обмена сообщениями

В ходе эксперимента был перехвачен сетевой трафик, который рассматривался в двух направлениях: от клиента и от сервера (таблица 1).

По полученным характеристикам видно, что сетевой трафик, поступающий от клиента, имеет фиксированную длину пакетов, обусловленную дополнительной отправкой подтверждений о выполнении команд. А для сетевого трафика, который поступает от сервера, длина пакетов изменяется в соответствии с Приложением. Скорость передачи данных также зависит от сложности Приложения.

Таблица 1 – Трафик, поступающий от клиента / от сервера

Приложение / Характеристика	Без модулей	Вак. захват	Мех. захват	Черчение
Количество пакетов в секунду, п/с	2/2	2,8/2,8	3,1/3,1	12,7/12,7
Средний размер пакета, байт	55/96	55/96	55/94	55/85
Скорость передачи данных, бит/с	895/1565	1228/2118	1363/2354	5620/8625

По построенным гистограммам распределения длин пакетов данных для сетевого трафика, генерируемого сервером и клиентом во время дистанционного управления роботом-манипулятором, было выявлено, что сервером передаются пакеты небольшой длины, так как в них находится только одна команда, а небольшая длина пакетов, переданных клиентом, характеризуется наличием служебной информации. Также были построены распределения величин интервалов времени между отправкой пакетов в сеть для трафика.

Данный подход требует значительных вычислительных затрат по контролю команд, и затрат сетевых ресурсов на обмен данными, что в совокупности приводит к вынужденным задержкам между выполнениями отдельных операций.

В четвертой главе предложена модель взаимодействия между системой управления и роботом-манипулятором с условием серийной передачи команд и разработан метод повышения эффективности использования ресурсов сети связи для организации их взаимодействия.

Метод позволяет поддерживать параметры взаимодействия при изменении вероятностей ошибок выполнения команд в течение всего времени функционирования робота-манипулятора таким образом, что использование сетевых ресурсов будет оптимальным.

Эффективность использования канала, можно вычислить как

$$e(b) = \frac{bS_{DC} \prod_{i=1}^b (1 - p_i^{(er)})}{bS_{DC} + L}. \quad (1)$$

где $p_i^{(er)}$ вероятность ошибки при выполнении команды из серии, L – количество данных в служебных сообщениях, b – количество команд в серии, S_{DC} – размер команды управления.

На рисунке 5 представлен график зависимости эффективности использования канала от количества команд в серии.

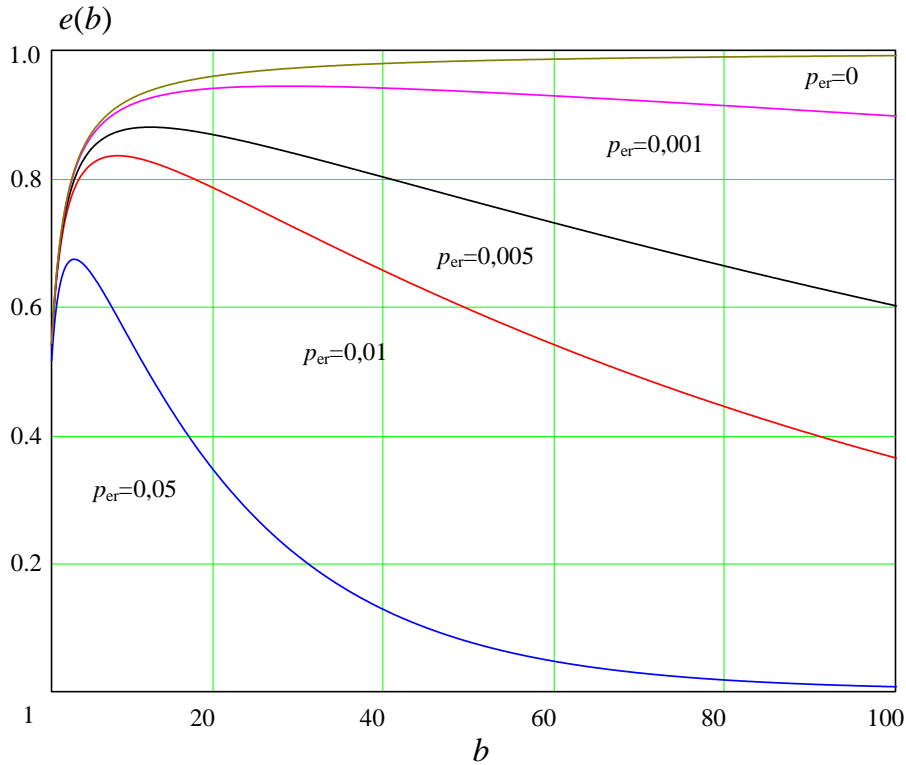


Рисунок 5 – Зависимость эффективности использования канала от количества команд в серии

Если вероятность ошибки равна нулю, то эффективность зависит только от доли служебных данных и стремится к единице при увеличении размера серии. При ненулевой вероятности ошибки эффективность использования канала связи изменяется при изменении размера серии команд, и эта зависимость имеет максимальное значение, которое может быть найдено как значение оптимального количества команд в серии:

$$b^* = \arg \max_b e(b); \quad b \geq 0 \quad (2)$$

Решение (2) получено классическим методом нахождения экстремума функции и дает в результате выражение для b^* :

$$b^* = -\frac{L}{2S_{DC}} - \frac{\sqrt{L^2 \ln(1-p_{er})^2 - 4LS_{DC} \ln(1-p_{er})}}{2S_{DC} \ln(1-p_{er})} \quad (3)$$

Из (3) видно, что оптимальное количество команд в серии b^* зависит от вероятности ошибки робота, количества передаваемых данных (размеров команд S_{DC}) и количества служебных данных L . Количество служебных данных определяется размером сообщений о подтверждении или перезапросе данных.

В процессе функционирования робота-манипулятора могут произойти изменения вероятностей ошибок выполнения операций, поэтому необходимо вести статистику ошибок и корректировать значения соответствующих вероятностей. Сбор статистики следует вести циклически и обновлять значения вероятности ошибки, когда достоверность статистической ее оценки достаточна, т.е. величина, определяемая (4) не превышает заданную величину допустимой погрешности $\delta \leq \delta_0$.

$$\delta = 100G_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{1 - p_{er}}{np_{er}}} \quad (4)$$

где $p_{er} = \frac{n_{er}}{n}$; n – общее количество наблюдений (выполнений операции); n_{er} – количество ошибок при выполнении операции; $G_{1-\alpha/2}$ – квантиль нормального распределения для доверительной вероятности $(1-\alpha/2)$.

Решение задачи (2) обеспечивает минимизацию времени доставки команд за счет сокращения доли непроизводительного трафика. Так как время доставки данных определяется их объемом и скоростью передачи, поэтому, при неизменной скорости передачи, уменьшение объема передаваемых данных ведет к уменьшению времени их доставки, и оценивается, как

$$t_D = \frac{N8S_{DC}}{r} (1 - e(b)) \quad , \text{ с}, \quad (5)$$

где N – количество передаваемых команд; r – скорость передачи данных (бит/с); $e(b)$ – эффективность согласно выражению (1).

Далее представлен алгоритм реализации метода управления обмена данными. Основываясь на данной модели и на предложенном новом алгоритме по реализации метода управления обмена данными, описан новый сценарий тестирования для его реализации на модельной сети (рисунок 6) и предложен новый сетевой протокол прикладного уровня SRMP (Simple Robot Management Protocol).

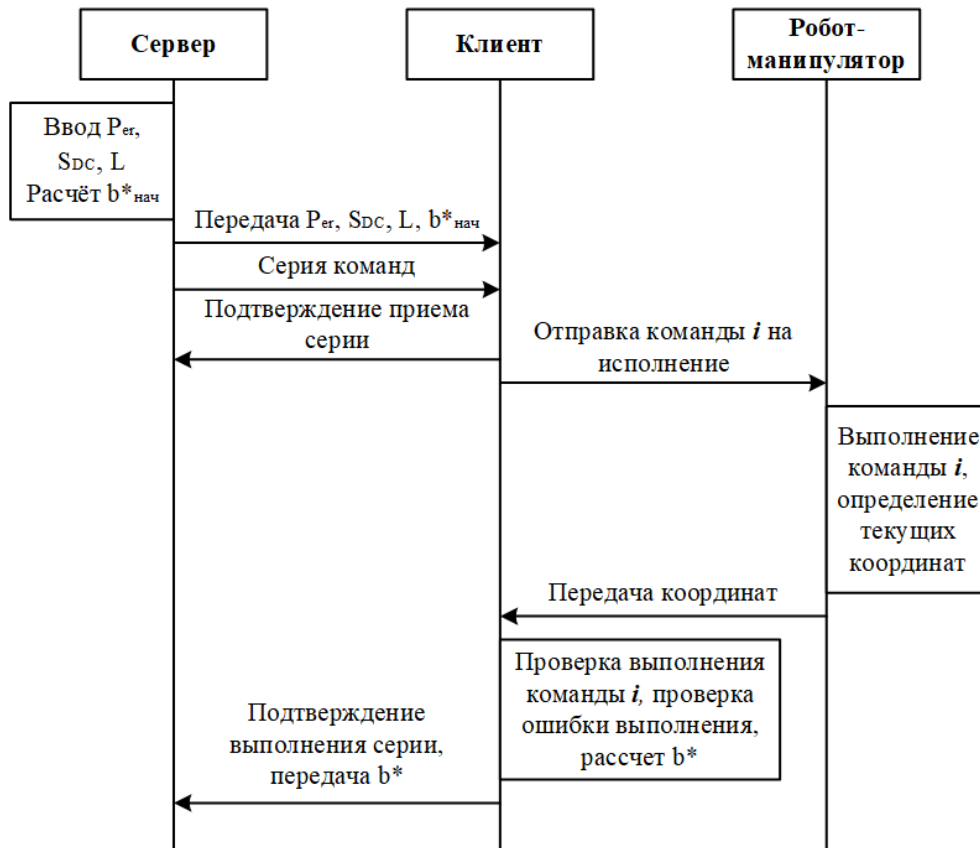


Рисунок 6 – Сценарий обмена сообщениями
(с реализацией предложенного алгоритма)

Основное отличие сценария по предложенному алгоритму от базового сценария заключается в том, что команды передаются в сериях по несколько штук. Серии команд имеют переменную длину, которая зависит от вероятности возникновения ошибки выполнения конкретной команды роботом, которая в свою очередь постоянно пересчитывается. Подтверждение получения команд и их выполнение при этом остается.

Данный сценарий позволяет существенно сократить издержки, связанные с обменом данными и контролем выполнения операций. Однако в случае неуспеха какой-либо операции вся последовательность команд в буфере стирается, а система управления должна вновь сформировать и отправить эту последовательность.

Далее согласно представленному сценарию, был повторно произведен перехват и последующий анализ сетевого трафика для четырех Приложений. Результаты данных экспериментов представлены в таблице 2. Установлено уменьшение интенсивности поступления пакетов в сеть связи и используемой пропускной способности, а также увеличение среднего размера пакетов при условии использования предложенного алгоритма.

Таблица 2 – Трафик, поступающий от клиента / от сервера

Приложение / Характеристика	Без модулей	Вак. захват	Мех. захват	Черчение
Количество пакетов в секунду, п/с	0,1/0,1	0,1/0,2	0,1/0,2	0,4/0,5
Средний размер пакета, байт	56/423	56/468	56/450	56/449
Скорость передачи данных, бит/с	44/451	53/609	56/622	162/1874

Таким образом, после реализации предложенного алгоритма значительно сократилась нагрузка на сеть при дистанционном управлении роботоманипулятором. Так, например, средний размер пакета вырос на 384%, а скорость передачи данных от сервера к клиенту сократилась на 74%. Эти данные подтверждают теоретические расчеты предложенного метода по эффективному использованию сетевых ресурсов.

По полученным данным были также построены графики распределения длин IP-пакетов, генерируемых сервером и клиентом. Было отмечено, что сервером стали передаваться пакеты данных большой длины, т.к. содержат в себе серии команд, а клиентом также передаются пакеты данных небольшой длины, которые являются подтверждениями приема или выполнения серии команд.

Также были получены гистограммы распределения величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов, генерируемых сервером и клиентом, которые были аппроксимированы смешанным распределением.

В качестве распределений для аппроксимации выбраны:

– экспоненциальное распределение: $F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ где

λ – параметр интенсивности ($\lambda > 0$);

– двухпараметрическое Гамма-распределение:

$F(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$, где α – параметр формы ($\alpha > 0$),

β – параметр скорости ($\beta > 0$).

Проверка согласия полученных экспериментальных распределений и их аппроксимаций проводилась с использованием критерия согласия Колмогорова-Смирнова.

Для перехваченного сетевого трафика был рассчитан коэффициент самоподобия методом изменения дисперсии. Расчет производился на основе интервалов времени между отправкой пакетов от сервера на клиента (таблица 3).

Таблица 3 – Оценка самоподобия сетевого трафика

Приложение	Без модулей	Вак. Захват	Мех. Захват	Черчение	Среднее значение	СКО
Базовый сценарий	0,41	0,49	0,53	0,58	0,5	0,07
С предложенным алгоритмом	0,59	0,56	0,56	0,48	0,55	0,05

Из результатов оценки коэффициента самоподобия (H) следует, что трафик, генерируемый при дистанционном управлении роботом-манипулятором при работе всех приложений по предложенному алгоритму (протоколу) сетевого взаимодействия, в среднем имеет более самоподобный характер, чем в базовом сценарии.

В заключении диссертации перечислены основные результаты диссертационной работы, а именно:

1. Произведен анализ перспектив развития сетей связи пятого и последующих поколений. Представлен первоочередной набор услуг телеприсутствия с требованиями по задержкам и вероятности безотказной работы. Также приведены требования к характеристикам качества обслуживания в сетях связи с ультрамалыми задержками. Одной из важных частей технического прогресса являются роботы, которыми необходимо управлять дистанционно через сеть и в режиме реального времени с задержкой в 1 мс.

2. Представлена структура модельной сети для исследований в области услуг телеприсутствия и описаны необходимые компоненты для ее реализации. Разработана программа и методика испытаний услуг телеприсутствия, предоставляемых на основе роботов-манипуляторов и/или их сообществ для реализации возможности дистанционного управления при выполнении различных задач в быту и хозяйственной деятельности.

3. Описан порядок проведения исследования по определению степени влияния затухания в сигнале при передаче команд. Проведено исследование влияния затухания на передачу команд роботом-манипулятором на разработанной модельной сети. Определено предельное значение расстояния в 115 км, на котором наблюдается устойчивое функционирование робота-манипулятора в сетях связи общего пользования.

4. Определены характеристики сетевого трафика для исследований. Описаны четыре Приложения (задачи) работа-манипулятора. Представлен базовый сценарий обмена сообщениями при управлении роботом-манипулятором. На базе модельной сети перехвачен и исследован сетевой трафик. Базовый сценарий требует значительных вычислительных затрат по контролю команд, и затрат сетевых ресурсов на обмен данными, что в совокупности приводит к вынужденным задержкам между выполнениями отдельных операций.

5. Предложена модель взаимодействия между системой управления и роботом-манипулятором с условием серийной передачи команд и разработан метод повышения эффективности использования ресурсов сети связи для организации их взаимодействия. Описан реализованный и апробированный в ходе исследований новый алгоритм сетевого управления роботами-манипуляторами. Проведен перехват и анализ сетевого трафика по новому сценарию. Установлено снижение интенсивности поступления пакетов в сеть связи, снижение используемой пропускной способности и увеличение среднего размера пакетов при условии использования предложенного алгоритма.

6. Обмен данными для роботизированной системы в сетях связи пятого и последующих поколений зависит от ее назначения и в общем случае может включать в себя как передачу единичных команд и результатов их выполнения, так и серийную передачу команд. Серийная передача позволяет повысить скорость выполнения операций и возможности роботизированной системы.

7. Разработанный метод управления параметрами обмена позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов, например, при вероятности ошибки выполнения команды роботом 0,001 на величину более чем 74%. Величина выигрыша повышается с ростом ошибки выполнения команд.

8. Проведена оценка коэффициента самоподобия сетевого трафика (H). Показано, что после реализации предложенного алгоритма степень самоподобия сетевого трафика возросла.

9. Проводимые исследования основываются на теории телетрафика, методах моделирования, и экспериментах на базе разработанной модельной сети. Разработанные модели и методы позволят повысить эффективность использования ресурсов сети и качество предоставления услуги телеприсутствия.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Горбачева, Л.С. Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.И. Выборнова, А.С.А. Мутханна, А.Ю. Матюхин, Р.А. Дунайцев, С.С. Владимиров, О.И. Ворожейкина, М.В. Захаров, В.Д. Фам, А.В. Марочкина, Л.С. Горбачева, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов // *Электросвязь*. – 2022. – № 1. – С. 14-20. – DOI 10.34832/ELSV.2022.26.1.001.

2. Горбачева, Л.С. Исследование влияния характеристик сети на функционирование многофункционального робота-манипулятора / Л.С. Горбачева., В.Д. Фам, А.Ю. Матюхин, А.Е. Кучерявый // *Электросвязь*. – 2022. – № 2. – С. 37-41. – DOI 10.34832/ELSV.2022.27.2.005.

3. Горбачева, Л.С. Метод оптимального использования сетевых ресурсов для робота-манипулятора / Л.С. Горбачева // *Электросвязь*. – 2023. – № 5. – С. 21-26. – DOI 10.34832/ELSV.2023.42.5.003.

4. Горбачева, Л.С. Разработка модельной сети и анализ сетевого трафика управления роботом-манипулятором / Л.С. Горбачева // *Труды учебных заведений связи*. – 2023. – Т. 9, № 3. – С. 75-81. – DOI 10.31854/1813-324X-2023-9-3-75-81.

5. Горбачева, Л.С. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G Meganetlab СПбГУТ / Л.С. Горбачева, А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, А.И. Парамонов, С.С. Владимиров, Г.А. Фокин, Р.А. Дунайцев, М.В. Захаров, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов // *Электросвязь*. – 2023. – № 6. – С. 2-11. – DOI 10.34832/ELSV.2023.43.6.001.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования

6. Gorbacheva, L.S. A First-Priority Set of Telepresence Services and a Model Network for Research and Education / А.Е. Koucheryavy, М.А. Makolkina, А.И. Paramonov,

A.I. Vybornova, A.S.A. Muthanna, L.S. Gorbacheva, R.A. Dunaytsev, S.S. Vladimirov, O.I. Vorozheykina, A.V. Marochkina, B.O. Pankov, B.N. Anvarzhonov // Distributed Computer and Communication Networks, 25th International Conference, DCCN 2022 Moscow, Russia, September 26–29, 2022 Revised Selected Papers - DOI 10.1007/978-3-031-30648-8.

Публикации в других изданиях

7. Горбачева, Л.С. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети / А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов, М.А. Маколкина, А.С.А. Мутханна, Л.С. Горбачева, А.И. Выборнова, Р.А. Дунайцев, М.В. Захаров, З.Т. Чан, А.В. Марочкина // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2022. – Т. 10, № 3. – С. 1-12. – DOI 10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12. – EDN LHLYEM.

8. Горбачева, Л. С. Модели показателей качества обслуживания для трафика (роботов-манипуляторов) / Л.С. Горбачева, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2022. – Т. 10, № 3. – С. 13-19. – DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-3-13-19. – EDN VLDSQD.

9. Прикладные научные исследования в области создания сетей связи 2030, включая услуги телеприсутствия с сетевой поддержкой, и экспериментальная проверка решений при подготовке отраслевых кадров. Вторая очередь / Шестаков А.В., Громова Н.Н., Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Парамонов А.И., Выборнова А.И., Мутханна А.С.А., Матюхин А.Ю., Дунайцев Р.А., Владимиров С.С., Паньков Б.О., Есалов К.Э., Помогалова А.В., Швидкий А.А., Рогозинский Г.Г., Татаренков Д.А., Кирик Д.И., Глушанков Е.И., Коровин К.О., Симонина О.А., Егоров С.Г., Горобцов И.А., Бойко И.А., Андреев Р.А., Прасолов А.А., Федоров А.С., Мышьянов С.В., Мошков В.В., Татарникова И.М., Фролова К.А., Плетнев Я.А. // Отчет о НИР. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. 2022. № 122020100465-3. – СПб.: СПбГУТ, 2022. – 660 с.