

На правах рукописи

Захаров Максим Валерьевич

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ
УСЛУГИ МОЛЕКУЛЯРНОГО АНАЛИЗА НА БАЗЕ
СЕТИ СВЯЗИ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

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, доцент,
Киричек Руслан Валентинович

Официальные
оппоненты: **Колбанев Михаил Олегович**,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра
информационных систем, профессор кафедры

Никульский Игорь Евгеньевич,
доктор технических наук, с.н.с.,
ПАО «Центральное научно-производственное
объединение «Ленинец»», главный специалист,
заместитель Главного конструктора

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»,
г. Самара

Защита состоится 15 июня 2022 года в 14.00 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 15 апреля 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
д-р техн. наук, доцент

М.А. Маколкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Одними из наиболее востребованных телекоммуникационных услуг в ближайшем будущем могут стать услуги электронного здоровья (e-Health) и мобильного электронного здоровья (m-Health). Интерес к этим услугам среди широких масс населения как развитых, так и развивающихся стран постоянно растет. Это связано, с одной стороны, с коренными изменениями в области здравоохранения, которые предполагают для повышения качества и эффективности предоставления медицинских услуг повсеместное внедрение информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), активное применение носимой медицинской электроники, цифровой формат хранения и обмена медицинской информацией, использование мобильных приложений в повседневной медицинской практике. А с другой стороны – со сформировавшимся запросом граждан на повышение продолжительности и качества жизни, а также желанием получать доступ к необходимым медицинским услугам в режиме реального времени. Не следует также забывать и о глобальных вызовах, которые встали перед мировой системой здравоохранения в конце второго десятилетия XXI века.

В связи с этим возникает целый ряд научно-технических задач, решение которых лежит на стыке телекоммуникационных технологий, вычислительной техники и медицины. С точки зрения телекоммуникаций, в данный круг задач попадают: обеспечение интеграции современных ИКТ в систему общественного здравоохранения, техническое сопровождение внедрения и предоставления медицинских сервисов, обеспечение заданных параметров качества обслуживания, разработка и внедрение новых сетевых архитектур для предоставления услуг e-Health и m-Health широким слоям населения.

Особый интерес вызывают услуги m-Health, связанные с проведением дистанционных измерений или обследований. Эти услуги базируются как на использовании стандартных датчиков, которые входят в состав широко распространенных цифровых коммуникационных устройств (смартфонов, планшетов, умных часов и т.д.), так и на использовании различных специализированных персональных носимых медицинских электронных устройств, возможности которых значительно выше.

Одной из таких услуг m-Health является услуга молекулярного анализа. Миниатюризация устройств m-Health, а также снижение их стоимости в настоящий момент позволяют создавать персональные портативные решения, которые способны проводить анализ продуктов питания или лекарственных средств практически в режиме реального времени. Часто во время работы такие устройства взаимодействуют со смартфоном или планшетом (терминалом) пользователя для обеспечения функций управления, отображения результатов в удобном для

пользователя виде, а также используют терминал как шлюз для доступа в сеть связи общего пользования (ССОП) с целью передачи данных, полученных в результате анализа, на удаленные высокопроизводительные облачные сервера для последующей обработки.

В контексте предоставления данной услуги m-Health в настоящий момент времени особый интерес вызывают задачи изучения характеристик генерируемого сетевого трафика, разработка моделей и методов предоставления таких услуг с использованием ресурсов ССОП, определение типовой архитектуры сети для предоставления подобного рода услуг, а также повышение качества обслуживания при предоставлении таких услуг за счет использования граничных и облачных вычислений.

Степень разработанности темы. В последнее время появляется большое количество научных работ как российских, так и зарубежных авторов, посвященных исследованию e-Health и m-Health. В подобных работах часто рассматриваются прототипы устройств или систем e-Health / m-Health, организация взаимодействия с медицинскими службами, вопросы информационной безопасности m-Health. Кроме того, следует отметить, что значительное внимание отечественных и зарубежных ученых уделяется исследованию характеристик сетевого трафика, разработке моделей и методов предоставления новых сервисов и услуг, созданию новых сетевых архитектур.

Среди работ отечественных и зарубежных авторов можно отметить работы А. Е. Кучерявого, А. И. Парамонова, Р. В. Киричка, Е. А. Кучерявого, К. Е. Самуйлова, С. Н. Степанова, А. В. Рослякова, О. И. Шелухина, С. В. Поршнева, Р. Я. Пирмагомедова, I. F. Akyildiz, A. J. Das, J. H. Lee, S. Adibi и многих других. Их работы позволили обосновать необходимость разработки новых телекоммуникационных услуг (в т.ч. услуг m-Health) в рамках концепции Интернета вещей, а также концепции построения сетей 2030, оценить возможности существующих сетей связи и сетевых архитектур по предоставлению новых типов услуг с соблюдением рекомендованных параметров качества обслуживания. Благодаря научной деятельности этих и многих других исследователей, в настоящее время удалось существенно продвинуться в изучении свойств сетевого трафика, разработать модели и методы предоставления новых перспективных услуг на основе существующей инфраструктуры ССОП.

Объект исследования — сети Интернета вещей и услуги мобильного электронного здоровья.

Предмет исследования — модели и методы предоставления услуги молекулярного анализа на базе сети связи общего пользования.

Цель работы и задачи исследования — повышение эффективности использования ресурсов сети и качества предоставления услуги молекулярного анализа.

Для достижения поставленной цели в работе последовательно решаются следующие задачи:

1. Анализ тенденций развития Интернета вещей, электронного здоровья и мобильного электронного здоровья.
2. Анализ решений, применяемых при предоставлении услуг мобильного электронного здоровья.
3. Разработка модельной сети для перехвата и оценки характеристик сетевого трафика, генерируемого при предоставлении услуги молекулярного анализа.
4. Оценка характеристик перехваченного сетевого трафика.
5. Разработка модели агрегированного потока сетевого трафика от нескольких устройств m-Health.
6. Разработка модели и метода предоставления услуги молекулярного анализа с использованием микроспектрометров.
7. Разработка метода построения сети с применением граничных вычислений для предоставления услуги молекулярного анализа.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Найденные характеристики сетевого трафика, генерируемого подключенными к ССОП портативными микроспектрометрами, позволяют использовать модель СМО (M/G/1) для расчета параметров СМО, что в свою очередь позволяет повысить точность оценки времени обслуживания на 12% по сравнению с моделью M/M/1.
2. Предложена новая модель и метод предоставления услуги, базирующейся на использовании портативных микроспектрометров, для предоставления пользователю дополнительных возможностей по получению информации о качестве продуктов питания и медикаментов. Разработанный в рамках модели алгоритм в среднем позволяет сократить время предоставления услуги на 13% и объем передаваемых данных на 23% по сравнению с существующими.
3. Разработан метод построения сети связи на основе граничных вычислений, отличающийся от известных тем, что граничные вычисления используются при предоставлении услуги молекулярного анализа.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая значимость работы состоит в получении неизвестных ранее характеристик сетевого трафика для новой услуги молекулярного анализа, что расширяет знания в области теории телетрафика и теории массового обслуживания. В результате выполнения работы расширен модельно-методический аппарат для

организации услуг связи, а также модельно-методический аппарат граничных вычислений.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные характеристики сетевого трафика могут быть использованы для планирования и проектирования сетей при внедрении услуги молекулярного анализа. Разработанные новая модель и метод позволяют повысить эффективность использования ресурсов сети и качество предоставления услуги молекулярного анализа. Разработанный метод построения сети с применением граничных вычислений позволяет сократить сетевую задержку передачи данных и повысить качество обслуживания при предоставлении услуги молекулярного анализа.

Результаты работы внедрены в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке «Рекомендаций по моделям трафика для планирования сетей связи пятого и последующих поколений (в части предоставления mHealth услуги молекулярного анализа)», а также при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам «Современные проблемы науки в области инфокоммуникаций», «Введение в наносети» в СПбГУТ.

Методология и методы исследования. Проводимые исследования базируются на теории массового обслуживания, математической статистике, методах моделирования и натурных экспериментах на базе разработанной модельной сети. Имитационное моделирование агрегированного потока сетевого трафика, а также метода предоставления услуги молекулярного анализа выполнено с использованием ПО AnyLogic, проверка алгоритма выбора точки расположения граничного вычислителя на графе сети – с использованием ПО Mathcad.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель агрегированного потока сетевого трафика, генерируемого микроспектрометрами при предоставлении услуги молекулярного анализа, использование которой позволяет повысить точность оценки времени обслуживания на 12%.

2. Модель и метод предоставления услуги молекулярного анализа, которые позволяют сократить время передачи данных при предоставлении услуги в среднем на 13%.

3. Метод построения сети с применением граничных вычислений для предоставления услуги молекулярного анализа, который позволяет сократить время передачи данных при предоставлении услуги на величину до 40%.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных автором научных и практических результатов подтверждается обоснованным выбором предмета и объекта исследований, исходных данных при постановке частных задач исследования, принятых допущений и

ограничений, а также соответствием результатов натуральных экспериментов и моделирования, проведенных лично автором, согласованностью с данными, полученными другими авторами и апробацией результатов на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 19-й международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN 2016)» (Москва, 2016); XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 (Москва, 2019); 22-й Международной конференции по передовым телекоммуникационным технологиям: Глобальная повестка дня в области цифровой безопасности для защиты общества (22nd International Conference on Advanced Communications Technology: Digital Security Global Agenda for Safe Society) (ICACT 2020) (Пхёнчхан, Республика Корея); IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020)» (Санкт-Петербург, 2020); 75-я конференция Санкт-Петербургского отделения Общероссийской общественной организации «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова (СПб НТОРЭС)» (Санкт-Петербург, 2020).

Исследование по теме диссертационной работы выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 19-37-90140 «Аспиранты».

Публикации по теме диссертации. По теме работы опубликовано 10 научных работ, из них: 3 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 2 в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 5 в других изданиях и материалах конференций.

Соответствие специальности. Работа соответствует пунктам 2, 12, 13 и 14 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемых источников и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 150 страниц, из них к основной части относится 139 страниц. Работа содержит 63 рисунка, 10 таблиц и список из 170 литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и определены её ключевые особенности, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные научные результаты, полученные в диссертации, указаны их теоретическая и практическая ценность, приведены сведения об апробации работы, перечислены публикации по теме выполненного исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе раскрыты понятия Интернета вещей, e-Health и m-Health. На основе анализа информации из открытых источников показано существенное увеличение спроса на услуги m-Health, и, следовательно, рост объемов рынка, а также увеличение числа сервисов m-Health в ближайшие годы.

Проведен обзор персональных портативных устройств m-Health, обеспечивающих предоставление услуги молекулярного анализа продуктов питания и лекарственных средств в повседневной жизни, а также некоторые примеры устройств, которые могут использоваться для прикладных научных исследований, в промышленности и сельском хозяйстве. Внешний вид некоторых из рассмотренных устройств mHealth показан на рис. 1. Описаны ключевые особенности, технические характеристики и порядок использования подобных устройств. Результаты проведенного обзора представлены в табл. 1.

Отмечено, что большинство из этих устройств не являются полностью автономными, поскольку не имеют необходимых функциональных возможностей для ввода команд управления, обработки данных и отображения результатов. Во время работы многие из устройств m-Health взаимодействуют со специальным мобильным приложением, установленным на терминале пользователя. Мобильное приложение реализует функции управления, отображения информации в удобном для пользователя виде. Часто полученные в результате исследования данные обрабатываются на удаленных облачных платформах с применением специализированных алгоритмов и технологий искусственного интеллекта (ИИ) на основе собранной разработчиками базы данных (БД).

Также в главе рассмотрены примеры мобильных приложений m-Health. Показано, что в состав многих приложений входят независимые программные модули, называемые также апплетами. Каждый апплет предназначен для проведения анализа определенного вещества (объекта) или группы веществ (объектов). В качестве примера рассмотрены апплеты для анализа фруктов и овощей, шоколада, лекарственных средств и т.д.

Отмечено, что некоторые производители предлагают возможности своих облачных платформ сторонним разработчикам или другим заинтересованным лицам для обработки данных анализа на коммерческой основе.

a)



б)



в)



г)



д)



е)

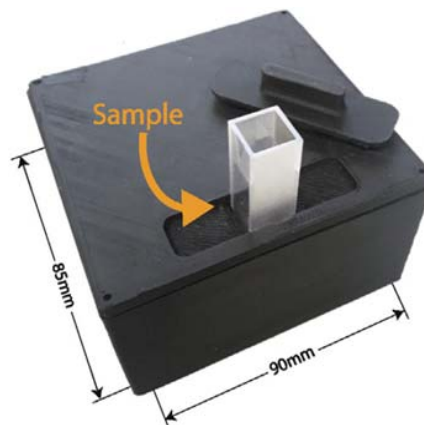


Рисунок 1 – Устройства mHealth, обеспечивающие предоставление услуги молекулярного анализа: а) устройство Nima и капсула для анализа; б) устройство Food Sniffer; в) микроспектрометр SCiO; г) микроспектрометр Link Square; д) микроспектрометр Tellspec; е) Open Source проект

На примерах из открытых источников показана возможность совмещения устройства m-Health с терминалом пользователя, что в значительной мере упрощает предоставление услуги молекулярного анализа в повседневной жизни.

Таблица 1 – Сравнение рассмотренных решений

№ п/п	Критерий	Устройство				
		Nima	Food Sniffer	SCiO	Link Square	TellSpec
1	Обработка данных, полученных в результате анализа с использованием облачных технологий (при условии наличия доступа в ССОП)	Нет	Нет	Да	Нет	Да
2	Необходимо взаимодействие с мобильным приложением на терминале пользователя при предоставлении услуги m-Health	Нет	Да	Да	Да	Да
3	Использование мобильного приложения для хранения результатов анализа, сбора статистики, доступа к справочной информации, получения технической поддержки	Да	Да	Да	Да	Да
4	Мобильное приложение выполнено по модульному принципу (основное приложение и апплеты)	Нет	Нет	Да	Да	Нет
5	Устройство позиционируется разработчиками как m-Health и прошло необходимую сертификацию	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
6	Разработчик имеет облачную платформу, ресурсы которой он готов предоставить для обработки данных молекулярного анализа на коммерческой основе сторонним организациям	Нет	Нет	Нет	Да	Да
7	Доступ к дополнительным возможностям по созданию собственных приложений (личный кабинет и специализированное ПО для разработчиков)	Нет	Нет	Да	Да	Да

Рассмотренные в главе ключевые особенности предоставления услуг e-Health / m-Health, а также существующие предпосылки позволяют сделать вывод о необходимости создания специализированных провайдеров для массового предоставления подобных услуг в будущем.

Во второй главе раскрывается понятие модельных сетей, а также описываются особенности их архитектуры. Рассмотрено применение модельных сетей для решения научно-исследовательских задач, а также при проведении тестирования телекоммуникационного оборудования, сетевых сервисов и т.д. Разработана и описана модельная сеть для перехвата сетевого IP-трафика, генерируемого при предоставлении услуги молекулярного анализа (в нескольких вариантах). Обобщенная структура модельной сети представлена на рис. 2.

В качестве исследуемого оборудования m-Health для проведения экспериментов на базе модельной сети на основании соотношения «функциональные возможности / стоимость» были выбраны микроспектрометр SCiO компании

Consumer Physics, микроспектрометр Link Square компании Stratio, Inc. Для каждого из устройств m-Health с целью проведения экспериментов были выбраны по несколько апплетов.

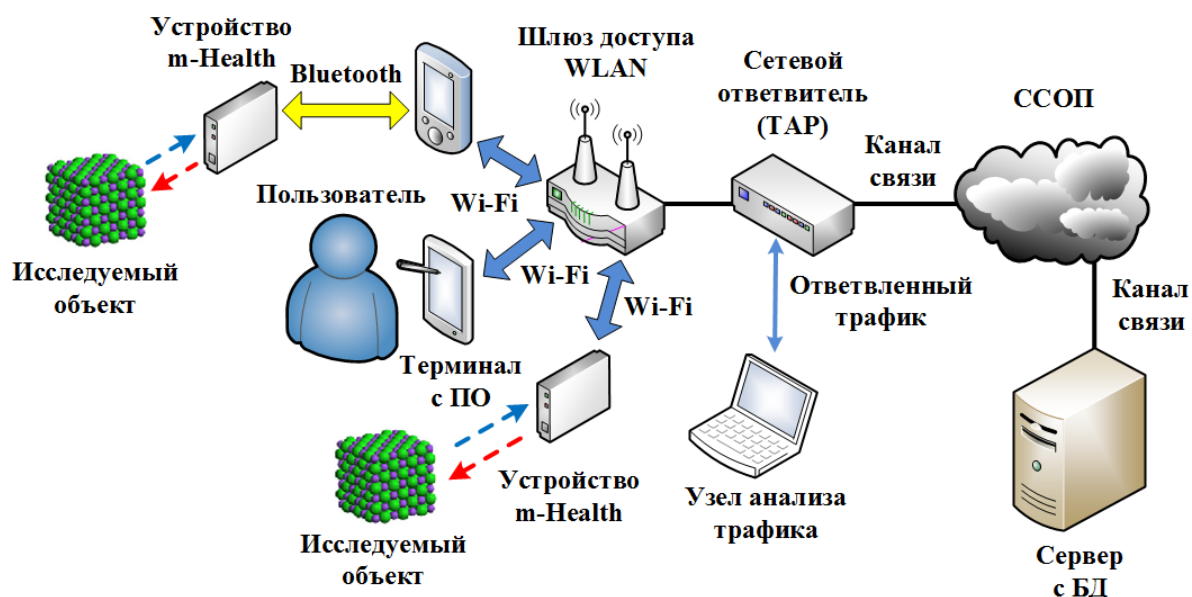


Рисунок 2 – Обобщенная структура модельной сети

В ходе экспериментов проведен перехват и определены основные характеристики сетевого трафика, генерируемого при предоставлении услуги молекулярного анализа. Результаты представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2 – Характеристики сетевого трафика, передаваемого на сервер

Название устройства	Название апплета	Размер выборки (пакетов), шт.	Количество пакетов за сеанс, шт.	Средняя длина пакета, байт	Интенсивность передачи пакетов, пакетов/с	Интенсивность передачи трафика, кбит/с
SCiO	Produce Selector	5342	$152,35 \pm 0,37$	$345,07 \pm 18,14$	$2,96 \pm 1,03$	$7,99 \pm 3,53$
	Fruit and Vegetables	5346	$150,41 \pm 0,28$	$344,98 \pm 18,17$	$3,90 \pm 1,31$	$10,52 \pm 4,56$
	Body Fat	5332	$154,10 \pm 0,66$	$345,89 \pm 18,14$	$3,15 \pm 1,08$	$8,51 \pm 3,78$
	Pain Relievers	5344	$152,10 \pm 0,44$	$343,42 \pm 18,12$	$3,76 \pm 1,23$	$10,09 \pm 4,42$
Link Square	Cocoa in Chocolate	5345	$34,33 \pm 0,58$	$1246,32 \pm 7,42$	$1,20 \pm 0,19$	$12,03 \pm 1,12$
	Apple	5300	$34,29 \pm 0,54$	$1260,44 \pm 8,02$	$1,34 \pm 0,18$	$11,88 \pm 1,16$
	Tablet Classification	5329	$34,34 \pm 0,53$	$1257,40 \pm 8,41$	$1,22 \pm 0,22$	$11,87 \pm 1,22$
	Palette	5311	$34,32 \pm 0,51$	$1248,71 \pm 7,65$	$1,23 \pm 0,20$	$10,97 \pm 1,14$

Таблица 3 – Характеристики трафика, полученного от сервера

Название устройства	Название апплета	Размер выборки (пакетов), шт.	Количество пакетов за сеанс, шт.	Средняя длина пакета, байт	Интенсивность передачи пакетов, пакетов/с	Интенсивность передачи трафика, кбит/с
SCiO	Produce Selector	5304	122,42 ± 0,58	589,85 ± 65,66	1,52 ± 0,42	7,01 ± 2,11
	Fruit and Vegetables	5300	118,40 ± 0,64	605,59 ± 66,97	1,93 ± 0,52	9,14 ± 2,96
	Body Fat	5296	120,42 ± 0,62	610,27 ± 67,28	1,56 ± 0,43	7,46 ± 2,31
	Pain Relievers	5314	120,39 ± 0,62	602,22 ± 66,77	1,91 ± 0,44	8,98 ± 2,51
Link Square	Cocoa in Chocolate	5316	29,06 ± 1,05	59,50 ± 0,44	1,22 ± 0,01	0,54 ± 0,14
	Apple	5342	29,06 ± 1,06	58,60 ± 0,41	1,23 ± 0,02	0,56 ± 0,21
	Tablet Classification	5328	29,05 ± 1,08	59,62 ± 0,58	1,23 ± 0,04	0,55 ± 0,22
	Palette	5333	29,07 ± 1,06	59,60 ± 0,22	1,22 ± 0,06	0,56 ± 0,08

В главе представлены вероятностные распределения, описывающие интенсивность поступления и интенсивность обслуживания пакетов данных, а также распределения длин пакетов.

Для перехваченного сетевого трафика был рассчитан коэффициент Хёрста несколькими различными методами с целью получения наиболее достоверных результатов. Результаты оценки коэффициент Хёрста представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Оценка коэффициента Хёрста

Название устройства	Название апплета	Метод нормированного размаха (R/S)	Метод периодограмм	Метод Витлла	Метод изменения дисперсии	Итого	
						Среднее значение	СКО
SCiO	Produce Selector	0,49	0,58	0,68	0,51	0,57	0,09
	Fruit and Vegetables	0,5	0,67	0,78	0,66	0,65	0,12
	Body Fat	0,45	0,52	0,59	0,50	0,52	0,06
	Pain Relievers	0,51	0,72	0,79	0,47	0,62	0,16

Название устройства	Название апплета	Метод нормированного размаха (R/S)	Метод периодограмм	Метод Витлла	Метод изменения дисперсии	Итого	
						Среднее значение	СКО
Link Square	Cocoa in Chocolate	0,46	0,73	0,61	0,49	0,57	0,12
	Apple	0,52	0,69	0,59	0,55	0,59	0,07
	Tablet Classification	0,51	0,63	0,62	0,53	0,57	0,06
	Palette	0,49	0,67	0,64	0,56	0,59	0,08

В результате оценки коэффициента Хёрста (H) установлено, что сетевой трафик апплетов рассмотренных микроспектрометров в основном имеет самоподобный характер.

В третьей главе описаны типовая последовательность действий и примерная продолжительность каждого действия в процессе предоставления услуги молекулярного анализа. Диаграмма представлена на рис. 3.



Рисунок 3 – Типовая последовательность действий

Рассмотрена модель ИК-микроспектрометра как «On-Off» источника сетевого трафика. На основе полученных ранее экспериментальных данных проведено имитационное моделирование (ИМ) агрегированного потока сетевого трафика от нескольких ИК-микроспектрометров с использованием ПО AnyLogic. Результаты ИМ представлены на рис. 4 и 5.

Распределение интервалов времени между поступлением пакетов в ССОП может быть описано показательным (экспоненциальным) распределением:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Распределение длин пакетов агрегированного потока сетевого трафика является дискретным.



Рисунок 4 – Распределение интервалов времени между поступлением IP-пакетов в сеть для агрегированного потока

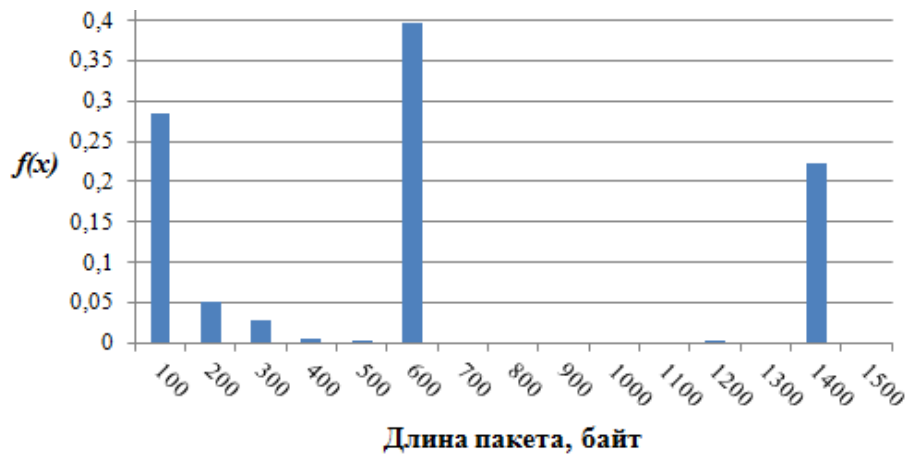


Рисунок 5 – Распределение длин пакетов агрегированного потока

Средняя длина пакета может быть определена как:

$$\bar{L} = \sum_{i=0}^n p_i L_i \quad (2)$$

где p_i – вероятность появления пакета длины L_i (байт).

Согласно классификации Кендалла-Башарина, с учетом характеристик агрегированного потока модель обслуживания потока в сети связи может быть описана как модель M/G/1, что позволяет использовать соответствующие формулы при расчете параметров СМО. Так, например, среднее время нахождения пакета в очереди на обслуживание может быть рассчитано по формуле Полячека-Хинчина:

$$\bar{w}_{M|G|1} = \frac{\rho \bar{t}}{2(1 - \rho)} \left(1 + \left(\frac{\delta}{\bar{t}} \right)^2 \right), \quad (3)$$

где ρ – это интенсивность нагрузки, \bar{t} – это среднее время обслуживания одного пакета, δ – среднеквадратическое отклонение времени обслуживания.

Использование данной модели позволяет повысить точность определения длительности времени нахождения пакета в очереди на обслуживание по сравнению с

моделью M/M/1, которую принято использовать для расчетов при отсутствии данных о свойствах потока трафика и/или системы обслуживания:

$$\bar{w}_{M|M|1} = \frac{\rho \bar{t}}{1 - \rho}. \quad (4)$$

Для описанного выше агрегированного потока сетевого трафика выигрыш в точности расчета составляет:

$$\frac{|\bar{w}_{M|M|1} - \bar{w}_{M|G|1}|}{\bar{w}_{M|M|1}} * 100 = 12\%. \quad (5)$$

При предоставлении услуги молекулярного анализа в реальном времени на базе ССОП следует учитывать некоторые особенности. Например, возможность ложного срабатывания устройства m-Health. Для этого был разработан соответствующий улучшенный алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 6.

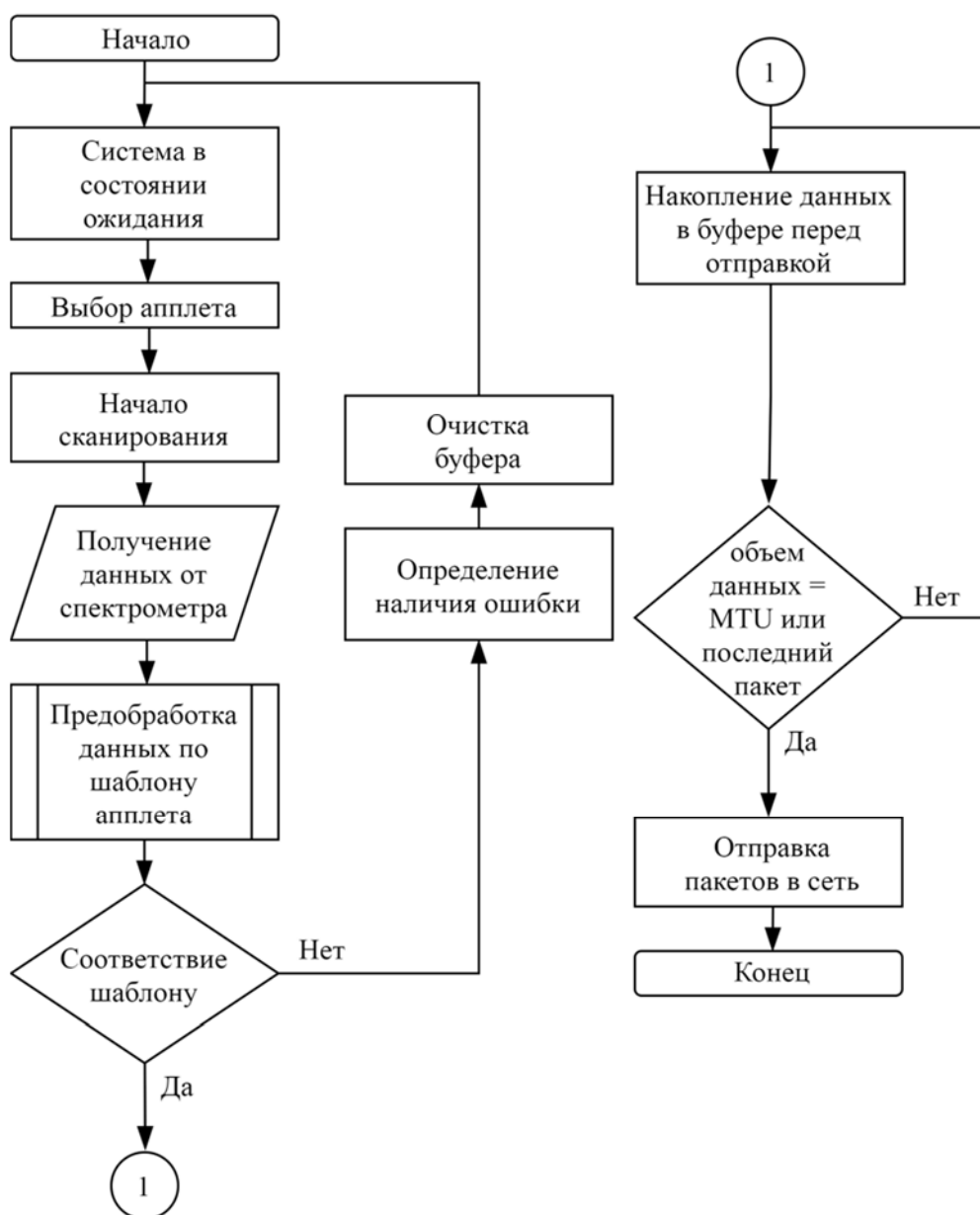


Рисунок 6 – Предлагаемый улучшенный алгоритм

Отличительными особенностями (внесенными улучшениями) данного алгоритма являются:

1. Предварительная обработка данных, поступающих от микроспектрометра на терминал, для быстрого сравнения их с шаблоном соответствующего апплета, выбранного пользователем до начала анализа.

2. Наличие буфера-накопителя, который накапливает данные, пока их объем не приблизится к значению Maximum Transmission Unit (MTU) за вычетом заголовков IP и UDP (при передаче данных по протоколу UDP) или же за вычетом заголовков IP и TCP (при передаче данных по протоколу TCP), что соответствует Maximum Segment Size (MSS), после чего осуществляется отправка пакета.

Для проведения ИМ была разработана улучшенная модель генератора трафика, учитывающая особенности предложенного выше алгоритма (рис. 7).

Интенсивность поступления заявок от источника (спектрометра) на терминал пользователя обозначена как λ_1 . Интенсивность поступления заявок от обслуживающего устройства после проверки согласно шаблону обозначена как λ_2 . Интенсивность поступления заявок от терминала пользователя в ССОП обозначена как λ_3 . Вероятность ошибки, связанная с возможностью ложных срабатываний и ошибок анализа, обозначена как $P_{\text{ош } 1}$. Число IP-пакетов, генерируемых на одну заявку, обозначено как N .

Взаимосвязи между переменными могут быть описаны следующими формулами:

$$\lambda_2 = \lambda_1 N (1 - P_{\text{ош } 1}), \quad (7)$$

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_2}{k} \quad (8)$$

где k – коэффициент агрегации, связанный с буферизацией данных по описанному выше алгоритму.

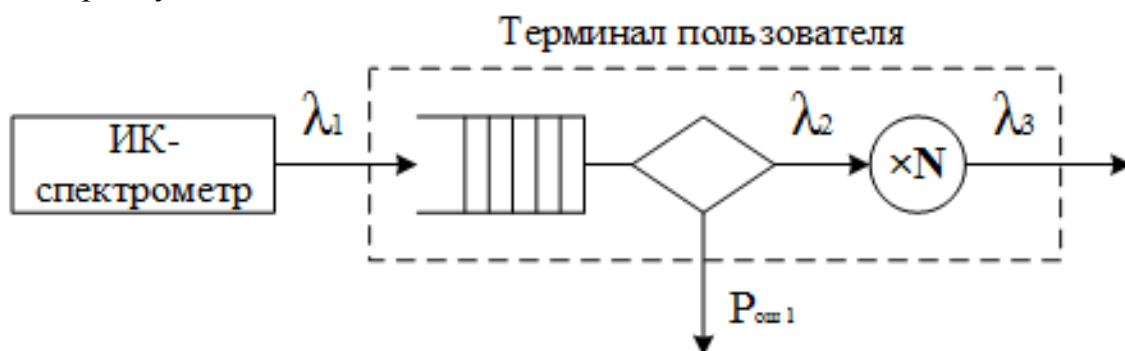


Рисунок 7 – Модель генератора трафика, учитывающая особенности предложенного алгоритма

Для проверки алгоритма была разработана модель сети массового обслуживания (СеМО), которая, помимо генератора трафика, включала элементы, имитирующие ССОП и сервер обработки данных. В рамках ИМ на основе

разработанной СеМО был реализован базовый сценарий, сценарий с предобработкой (контролем ошибок), сценарий с предобработкой (контролем ошибок) и буферизацией. На основе указанных сценариев проводилась оценка времени передачи данных при предоставлении услуги и объема передаваемых данных. Результаты ИМ представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Среднее время накопления, передачи и приема данных, объем данных

№	Тип сценария	Время, с	Объем данных, Мбайт (на 1000 сканирований)
1	Базовый сценарий	3,0±2,1	49,77±0,99
2	Сценарий с предобработкой (контролем ошибок)	2,6±0,7	43,68±0,87
3	Сценарий с предобработкой (контролем ошибок) и буферизацией	2,6±0,7	38,31±0,57

Из результатов проведенного ИМ можно сделать вывод о том, что использование предложенного улучшенного алгоритма позволяет сократить время передачи данных при предоставлении услуги на 13%, а общее количество передаваемых данных сократить на 23% (при передаче данных с инкапсуляцией TCP/IP/Ethernet, которые используются рассматриваемыми устройствами).

В четвертой главе раскрыто понятие граничных вычислений и мобильных граничных вычислений (Mobile Edge Computing, MEC). Описаны порядок и преимущества применения MEC для организации предоставления услуги молекулярного анализа на базе ССОП.

В случае обработки данных при предоставлении услуги одним централизованным сервером, согласно проведенным исследованиям, круговая задержка (Round Trip Time, RTT) между терминалом пользователя и облачным сервером составляет порядка 200-250 мс. При условии передачи 65-270 IP-пакетов при однократном предоставлении услуги общее время передачи данных оказывается крайне высоким. Суммарная односторонняя задержка передачи данных может быть описана формулой:

$$T_{\text{сумм.}} = \sum_{i=1}^n T_{\text{распр.}} + \sum_{i=1}^n T_{\text{ож.}} + \sum_{i=1}^n T_{\text{обр.}} + \sum_{i=1}^n T_{\text{пак.}} \quad (9)$$

где $T_{\text{распр.}}$ – задержка, обусловленная временем распространения сигнала в линии связи, $T_{\text{ож.}}$ – задержка, обусловленная временем ожидания пакета данных в очереди на

обработку узлом сети, $T_{обр.}$ – задержка обработки заголовков пакетов данных узлом сети, $T_{пак.}$ – задержка, связанная со временем передачи данных в линию связи.

При сокращении величины RTT до 10-20 мс время передачи данных при предоставлении услуги сокращается на величину до 40%, что подтверждается результатами ИМ. Для достижения указанной величины RTT целесообразно ограничить зону предоставления услуги, например, размерами крупного города. Пример ограничения зоны предоставления услуги показан на рис. 8.

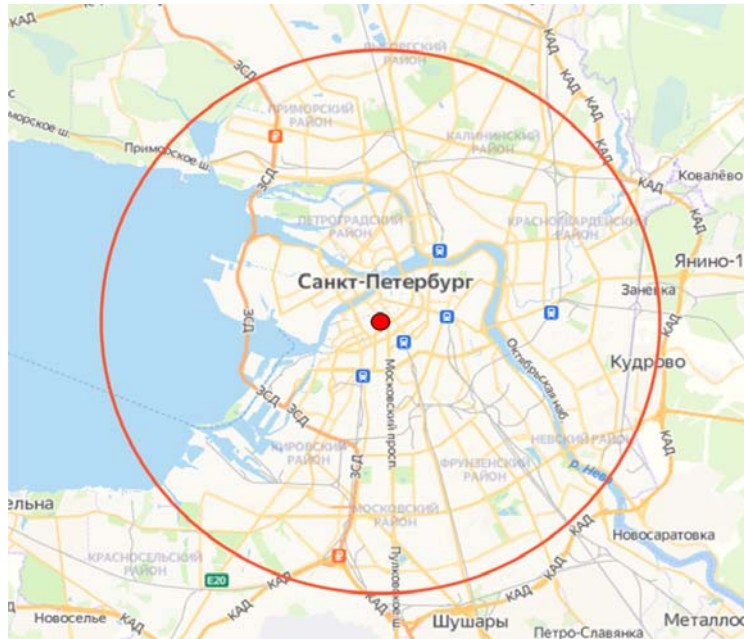


Рисунок 8 – Ограничение зоны предоставления услуги

Зону предоставления услуг можно описать кругом с радиусом, который определяется $T_{распр.}$ (фактически, расстоянием между условным центром и максимально удаленными от него точками), поскольку $T_{распр.}$ является доминирующей компонентой в (9).

В таком случае основной задачей организации граничных вычислений становится выбор точки подключения граничного вычислителя (сервера) к имеющейся сети. В реальных условиях высоконагруженной сети доступа может потребоваться один или несколько граничных серверов. В таком случае необходимо найти несколько точек, которые удовлетворяют заданному критерию (например, обеспечения минимальной задержки).

Если критерием выбора точки расположения граничного вычислителя является минимум задержки, то решением может быть определение центра графа, т.е. вершины, длины путей от которой до других вершин минимальны. В зависимости от количества размещаемых граничных вычислителей можно говорить об одном центре графа или о кратных p -центрах графа. Алгоритм поиска центра графа состоит в следующем:

1. Необходимо построить граф $G(X, A)$, где X – это множество вершин графа (x_1, x_2, \dots, x_n) , а A – это множество ребер графа (a_1, a_2, \dots, a_m) , на основании данных об архитектуре рассматриваемой сети связи. В качестве вершин графа принять узлы сети связи, в которых может быть расположен граничный вычислитель (сервер). В качестве ребер графа принять каналы связи, соединяющие рассматриваемые узлы сети. Вес ребер необходимо установить в зависимости от величины действующей сетевой задержки между соответствующими узлами связи. В таком случае граф может быть задан $n \times n$ матрицей весов (также называемой взвешенной матрицей смежности) \mathbf{W} :

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 0 & h_{12} & - & h_{1n} \\ h_{21} & 0 & h_{2j} & - \\ h_{i1} & h_{i2} & 0 & h_{in} \\ h_{n1} & h_{n2} & - & 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где h_{ij} – вес ребра между вершинами x_i и x_j , а запись «-» означает, что ребра между соответствующими вершинами нет.

2. Далее необходимо на основании матрицы весов \mathbf{W} построить матрицу кратчайших расстояний \mathbf{D} :

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & d_{1j} & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & d_{2j} & d_{2n} \\ d_{i1} & d_{i2} & 0 & d_{in} \\ d_{n1} & d_{n2} & d_{nj} & 0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где d_{ij} – кратчайшая длина пути между вершинами x_i и x_j .

Для этого могут быть использованы алгоритмы Дейкстры (Dijkstra's algorithm), Флойда-Уоршелла (Floyd-Warshall algorithm), Джонсона (Johnson's algorithm) и т.д. Чаще всего для поиска центра графа используется алгоритм Флойда-Уоршелла, поскольку по сравнению с остальными он обладает более низкой вычислительной сложностью.

Алгоритм Флойда-Уоршелла можно записать как:

for $i = 1, \dots, n$;

for $j = 1, \dots, n$;

for $k = 1, \dots, n$;

$$d[i,j] = \min \{ d[i,j]; (d[i,k] + d[k,j]) \}$$

3. Далее по матрице кратчайших расстояний необходимо найти центр графа – вершину, максимальное расстояние от которой до остальных вершин графа минимально. Центр графа находится в соответствии с:

$$i = \arg \min_i \left\{ \max_j d[i,j] \right\}, \quad (12)$$

где $i, j = 1, \dots, n$ – строки и столбцы матрицы \mathbf{D} .

Эту вершину и следует рассматривать как точку расположения граничного вычислителя.

Для проверки предложенного алгоритма было проведено моделирование с использованием ПО Mathcad, в рамках которого имитировался выбор точки расположения граничного вычислителя на сети Интернет-провайдера. В ходе моделирования предложенный алгоритм сравнивался с методом выбора геометрического центра графа, который часто применяется при решении подобных задач. Результаты представлены на рис. 9.

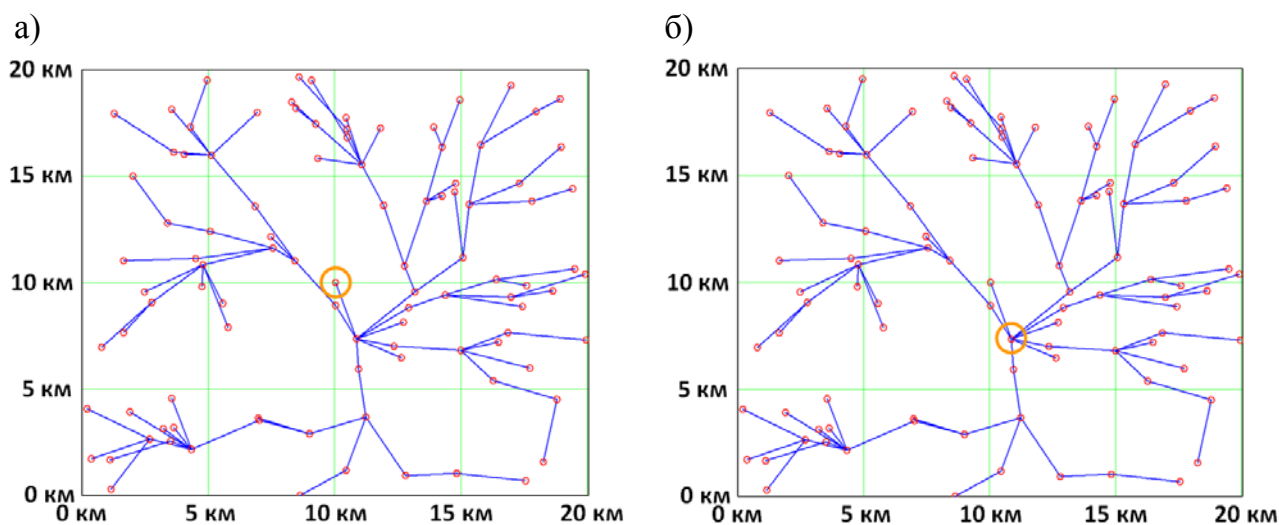


Рисунок 9 – Выбор точки расположения граничного вычислителя:

а) в геометрическом центре графа; б) по предложенному алгоритму

В результате проведенного ИМ установлено, что величина выигрыша зависит от конкретной структуры сети: количества вершин и ребер графа, их расположения и т.д. Так, при равномерном распределении узлов сети (при условии случайного их распределения на территории) и количестве 100 шт., данный выигрыш составляет в среднем до 15%. В итоге применение МЕС с учетом предложенного алгоритма позволяет сократить время передачи данных при предоставлении услуги на величину до 40%.

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

1. Проведен обзор ряда персональных портативных устройств m-Health, обеспечивающих предоставление услуги молекулярного анализа продуктов питания и лекарственных средств в повседневной жизни, рассмотрены их ключевые особенности и технические характеристики.

2. Описан порядок предоставления услуги m-Health. Учтены следующие особенности: взаимодействие устройств m-Health со специализированным мобильным приложением для ввода команд управления и отображения результатов

анализа, обработка первичных данных на удаленном облачном сервере, модульная структура мобильного приложения. Отмечена необходимость создания провайдера услуг e-Health / m-Health.

3. Разработана модельная сеть для перехвата сетевого трафика, генерируемого при предоставлении услуги молекулярного анализа. Описаны основные компоненты и их функциональное назначение, описана методика проведения испытаний устройств m-Health и перехвата сетевого трафика.

4. На основе модельной сети проведен перехват сетевого трафика, генерируемого при предоставлении услуги несколькими устройствами m-Health. Определены основные характеристики перехваченного трафика. Установлено, что генерируемый в процессе предоставления услуги сетевой трафик в основном имеет самоподобный характер.

5. Разработана модель агрегированного потока сетевого трафика от нескольких устройств m-Health. В результате имитационного моделирования установлено, что агрегированный поток сетевого трафика может быть описан моделью СМО (M/G/1), что в свою очередь позволяет повысить точность оценки времени обслуживания при расчете параметров СМО на 12%.

6. Разработаны улучшенные модель и метод предоставления услуги молекулярного анализа продуктов питания и лекарственных средств с использованием микроспектрометров, которые позволяют в среднем сократить время предоставления услуги на 13% и объем передаваемых данных на 23%.

7. Разработан метод построения сети для предоставления услуги молекулярного анализа на основе граничных вычислений, который позволяет организовать децентрализованную обработку данных при предоставлении услуги молекулярного анализа и уменьшить время передачи данных при предоставлении услуги на величину до 40%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Захаров, М.В. Молекулярные наносети. Сбор информации из наномира / М.В. Захаров, А.Е. Кучерявый, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2018. – № 10. – С. 46-50.
2. Захаров, М.В. Анализ трафика, генерируемого при предоставлении услуги молекулярного анализа на базе ССОП / М.В. Захаров, А.Е. Кучерявый, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2020. – № 9. – С. 58-63. – DOI 10.34832/ELSV.2020.10.9.007.
3. Захаров, М.В. Особенности молекулярного анализа как услуги ССОП в реальном времени / М.В. Захаров // Электросвязь. – 2021. – № 11. – С. 26-31. – DOI 10.34832/ELSV.2021.24.11.002.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования

4. Zakharov M. Real-time Molecular Analysis Methods Based on Cloud Computing / M. Zakharov, A. Muthanna, R. Kirichek, A. Koucheryavy // International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT : 22, Digital Security Global Agenda for Safe Society, Pyeongchang, 16–19 февраля 2020 года / 22nd International Conference on Advanced Communications Technology: Digital Security Global Agenda for Safe Society, ICACT 2020 - Proceeding. – Pyeongchang: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – pp. 620-623. – DOI 10.23919/ICACT48636.2020.9061274.
5. Zakharov M. Prototype Design and Experimental Evaluation e-Healthcare System based on Molecular Analysis Devices / M. Zakharov, A. Paramonov, A. Muthanna, R. Kirichek // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2021. – Vol. 12. – No 8. – pp. 52-59. – DOI 10.14569/IJACSA.2021.0120807.

Публикации в других изданиях и материалах конференций

6. Захаров, М.В. Применение методов инфракрасной микроспектроскопии для сбора и анализа данных в сетях связи общего пользования и молекулярных наносетях / М.В. Захаров, Р.И. Глушаков // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016) : материалы девятнадцатой международной научной конференции: в 3 томах, Москва, 21–25 ноября 2016 года / под общ. ред. В. М. Вишневого и К. Е. Самуйлова. – Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН), 2016. – С. 193-199.
7. Захаров, М.В. Предоставление услуги молекулярного анализа на базе ССОП в режиме реального времени / М.В. Захаров, А.Е. Кучерявый, Р.В. Киричек // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 : сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва, 17–20 июня 2019 года / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова

РАН. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 2915-2918. – DOI 10.25728/vspru.2019.2915.

8. Захаров, М.В. Анализ лекарственных средств на базе ССОП с применением методов инфракрасной микроспектроскопии / М.В. Захаров, Р.В. Киричек // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020). IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция : сб. науч. ст. в 4-х т., Санкт-Петербург, 26–27 февраля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2020. – Т. 1. – С. 478-481.

9. Захаров, М.В. Обзор текущих исследований в области mobile health / М.В. Захаров, Р.В. Киричек, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2020. – Т. 8. – № 3. – С. 63-70. – DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-3-63-70.

10. Захаров, М.В. Методы построения сверхплотной сети e-health с использованием граничных вычислений / М.В. Захаров, Р.В. Киричек // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК. – 2020. – № 1(75). – С. 145-147.