На правах рукописи

Блинников Михаил Андреевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ЯЧЕИСТЫХ СЕТЕЙ ИМЕНОВАННЫХ ДАННЫХ

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: кандидат технических наук,
Пирмагомедов Рустам Ярахмедович

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

Бородин Алексей Сергеевич,
кандидат технических наук,
Публичное акционерное общество «Ростелеком»,
представитель в Международном союзе электросвязи

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

Защита состоится 29 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 29 апреля 2022 года.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Нарушение работоспособности сети связи способно привести не только к финансовым потерям, связанным с приостановлением зависящих от наличия связи процессов, но и к ситуациям критическим для здоровья и жизни человека. В качестве примера таких условий можно представить разрушенную в следствие стихийного бедствия инфраструктуру населенного пункта, когда часть сетевых узлов оказалась недоступна: коммуникации между пунктами оказания помощи отсутствует, пострадавшие, имея при себе пользовательские терминалы (сотовые телефоны, компьютеры), не имеют возможности сообщить о своём состоянии в экстренные службы или связаться с родственниками, а банки и коммерческих организации не могут обмениваться данными и совершать удаленные операции. Однако, не только повышение надежности является одним из главных направлений развития инфокоммуникаций, но и территориальное расширение зон обслуживания сетей, поскольку наличие связи необходимо и в тех местах, где нет возможности строительства инфраструктурных элементов. Другими словами, второй главной тенденцией развития сетей является увеличение их доступности. Кроме того, не следует забывать о нарастающем темпе развития приложений Интернета Вещей и такого его перспективного направления, как Интернет Нановещей, областями применения которых являются: медицина, мониторинг ресурсов, системы «умного города» и другие.

Одним из возможных решений, повышающих доступность и устойчивость услуг связи, может быть применение беспроводных ячеистых сетей (WMN, от англ. Wireless Mesh Networks). Благодаря возможности быстрого развертывания, самоорганизации и масштабируемости, данный тип сетей, являются достаточно перспективным способом обеспечения связи в местах, где может быть затруднена организация инфраструктурных сетей доступа (отдаленные территории), или же требуется быстрое восстановление услуг связи, в случае если инфраструктура повреждена или разрушена.

Беспроводные ячеистые сети способны удовлетворять большинство современных требований приложений Интернета Вещей и Нановещей, однако одной из важнейших проблем практического использования ячеистых сетей в рамках сетевой модели IP, является индексация ресурсов и их сопоставление с сетевыми адресами. В частности, с отсутствием возможности поддерживать доступ к системе доменных имен (DNS) в динамичной распределенной сети, поиск и предоставление информации может быть затруднительными, поскольку пользователи, а также их устройства, могут не владеть знанием о том, на каком именно узле находятся нужные им данные и их наименование на этом узле, чтобы сделать нужный запрос. Данные проблемы в значительной степени ограничивают применимость ячеистых сетей на практике. Кроме того, как показано в предыдущих исследованиях, WMN, основанные на IP,

способны передавать данные с приемлемой скоростью и задержкой только в условиях статичной или изредка изменяющейся топологии, в условиях динамичной топологии из-за постоянного перестроения таблиц маршрутизации узлов и частых разрывов и восстановлений соединений задержка и потери в таких сетях будут расти.

Для предотвращения вышеперечисленных недостатков, в диссертационной работе предлагается использовать новую архитектуру сетей связи – Named Data Networking (NDN), или сети именованных данных, вместо традиционной сетевой архитектуры. Предполагается что, использование технологий NDN решит проблемы предоставления информации пользователям внутри одной изолированной ячеистой сети, а также улучшит качество оказания телекоммуникационных услуг. Однако, по причине того, что сети именованных данных являются новой технологией, возможно возникновение проблем при ее внедрении в существующую инфраструктуру, а именно в вопросе взаимодействия устройств новой архитектуры с элементами традиционных сетей. Именно поэтому одним из вопросов, рассматриваемых в настоящей работе, стала разработка алгоритма работы шлюза, позволяющего обмениваться данными устройствам двух разных сетевых архитектур.

Кроме того, данная работа также рассматривает вопрос более эффективного использования сетевых ресурсов при обслуживании значительных информационных потоков, генерируемых сенсорными устройствами Интернета Нановещей. Эта проблема, особенно актуальна в беспроводных ячеистых сетях, так как может замедлить или даже парализовать работу сети ввиду высокой интерференции.

Степень разработанности темы. Достаточно много работ зарубежных и отечественных исследователей посвящены теме беспроводных ячеистых сетей, среди которых следует выделить труды А.Е. Кучерявого, В.М. Вишневского, К.Е. Самуйлова, Ю.В. Гайдамаки, С.Н. Степанова, А.И. Парамонова, Е.А. Кучерявого, Д.А. Молчанова, Р.Я. Пирмагомедова, Р.В. Киричка, I.F. Akyildiz, A. Raniwala, X. Wang, R. Bruno. В исследованиях, касающихся сетей именованных данных, в данный момент участвуют в основном зарубежные представители, среди которых можно перечислить: L. Zhang, A. Afanasyev, V. Jacobson, D.K. Smetters, J.D. Thornton, M.F. Plass, N.H. Briggs, R.L. Braynard.

Работы отмеченных выше авторов позволили оценить возможности рассматриваемых сетей, особенности передачи данных по их каналам связи, а также найти новые подходы для построения беспроводных сетей. Кроме того, с помощью данных исследований были решены некоторые проблемы, обусловленные движением сетевых узлов, а также изменениями условий распространения электромагнитного сигнала. Вдобавок, исследователями NDN был предложен комплекс протоколов и алгоритмов, реализующих сетевое взаимодействие, ориентированное на содержание данных. Несмотря на разработанность и темпы исследований, рассматриваемых тем, до сих пор не было уделено достаточного внимания вопросу предоставления

информации в сетях, изолированных от глобальной сетевой инфраструктуры, в частности от системы доменных имен, а также качеству связи в сложившихся условиях.

Объект и предмет диссертации. Объектом исследования являются модели и методы передачи данных приложений Интернета вещей, а предметом исследования – беспроводные ячеистые сети именованных данных.

Цель работы и задачи исследования. *Целью* диссертационной работы является обеспечение функционирования услуг связи, включающих в себя приложения Интернета вещей, в условиях изолированности или ограниченной доступности сети Интернет путем усовершенствования технологии беспроводных ячеистых сетей, а также посредством разработки модельно-методического аппарата для обслуживания трафика.

Для достижения поставленной цели в диссертации последовательно решаются следующие *задачи*:

– исследование применения технологии сетей именованных данных для предоставления услуг Интернета вещей в условиях ограниченной доступности сети Интернет;

– разработка метода доступа к ресурсам в беспроводных ячеистых сетях именованных данных в условиях ограниченной доступности сети Интернет;

– разработка алгоритма работы шлюза, снижающего интенсивность нагрузки, создаваемой сенсорными сетями, на внешние сети, на примере приложений Интернета нановещей;

– исследование распространения данных в беспроводных ячеистых сетях именованных данных;

– разработка алгоритма работы шлюза, обеспечивающего совместимость IP и NDN сетей.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

– разработанный метод обеспечения доступа к ресурсам в условиях ограниченной доступности сети Интернет, основывается на использовании архитектуры именованных данных и отличается наличием нового сетевого элемента – агрегатора информации, позволяющего динамически индексировать ресурсы, имеющиеся в сети;

– разработанная модель распространения данных в беспроводной ячеистой сети именованных данных учитывает влияние популярности запрашиваемых данных, интенсивности передачи трафика в сети, размера внутреннего хранилища узла и плотности рассматриваемого участка сети;

– разработанный алгоритм работы шлюза, соединяющего сегменты приложений Интернета нановещей с внешними сетями, отличается от известных тем,

что обладает возможностью динамического управления компоновкой данных, представляющих собой сенсорные отчеты;

– предложенный в диссертации метод интеграции сетей именованных данных с традиционными хост-ориентированными сетями связи обеспечивает возможность конвертирования пакетов NDN в IP, и наоборот, не ограничивая при этом длину кодируемого имени.

Теоретическая и практическая значимость диссертации.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит, прежде всего, в обосновании целесообразности применения сетей именованных данных, в наглядном отображении преимуществ новой сетевой архитектуры над существующей. Также разработки, проведенные в настоящей работе, расширяют класс моделей трафика Интернета вещей моделью, описывающей работу приложения в соответствии с алгоритмом динамического управления компоновкой данных, а также класс моделей распространения данных сетей именованных данных моделью, учитывающей влияние популярности запрашиваемых данных.

Практическая ценность работы: предлагаемый метод предоставления услуг связи на территории с ограниченной доступностью сети Интернет может быть использован для организации связи на территории с поврежденной либо отсутствующей инфраструктурой. Кроме того, разработанные метод организации беспроводной сети именованных данных, а также метод их взаимодействия с существующими сетями являются рекомендациями по планированию будущих сетей связи, основанных на NDN, а также к возможному проведению модернизации сети. Разработанный алгоритм для приложений Интернета нановещей уже в настоящий момент может быть использован для уменьшения нагрузки, исходящей от современных сенсорных сетей, на сети связи, при этом сохраняя полноту и достоверность передаваемой информации.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в деятельности ООО «СДН» для частичного резервирования внутренней сети компании и снижения нагрузки, создаваемой трафиком систем мониторинга. Также результаты использованы в учебной деятельности кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ, в частности, при чтении лекции и проведении практических занятий по курсам «Интернет Вещей», «Введение в наносети» и «Современные проблемы науки в области инфокоммуникаций».

Методология и методы исследования. Для достижения цели, поставленной в рамках данной диссертационной работы, использовались методы теории телетрафика, теории массового обслуживания, теории вероятности, математической статистики и компьютерного имитационного моделирования. Имитационное моделирование выполнялось с помощью сетевых симуляторов NS-3 и ndnSIM.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод обеспечения доступа к ресурсам в беспроводных ячеистых сетях в условиях ограниченной доступности сети Интернет, позволяющий пользователю производить взаимодействие с сетью на основе поиска по ключевым словам.

2. Модель распространения данных в беспроводных ячеистых сетях именованных данных, учитывающая влияние популярности запрашиваемой информации, позволяющая определить вероятность присутствия данных с конкретным именем на наиболее близком к потребителю сетевом узле.

3. Алгоритм работы шлюза, соединяющего сегменты Интернета нановещей с внешними сетями, позволяющий уменьшить объем передаваемой информации в 5 раз.

4. Метод обеспечения взаимодействия между элементами IP и NDN сетей на основе алгоритма работы шлюза, позволяющий увеличить доступность между узлами в 2 раза.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования с использованием сетевых симуляторов NS-3 и ndnSIM, обсуждением результатов диссертационной работы на конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 17th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN, Санкт-Петербург, 2017), 18th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN, Санкт-Петербург, 2018), 16th IFIP WG 6.2 International Conference (WWIC, Бостон, 2018),), 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT, Чхунчхон, 2018), Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» СПбГУТ (Санкт-Петербург, 2017), на 77-й научно-технической конференции СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио (Санкт-Петербург, 2022), а также на семинарах кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ (2019–2021).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них: 4 публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 5 в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 6 в других изданиях и материалах конференций.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам 2, 3 и 12 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Основные 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, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и 3-х приложений. Общий объём работы – 162 страниц машинописного текста, из них основного текста 137 страниц. Работа содержит 43 рисунка и 1 таблицу. Список литературы включает 107 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, проанализировано состояние исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные научные результаты диссертации, определена научная новизна и практическая ценность результатов, рассмотрена область их применения, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме работы.

В первой главе на основе международных исследований был проведен анализ проникновения и тенденций развития телекоммуникаций и их технологий в сферы человеческой жизнедеятельности. В результате анализа было выяснено, что в настоящее время, количество устройств, находящихся в сети, уже превышает количество самих абонентов, и в ближайшем будущем произойдет глобальное увеличение количества устройств, взаимодействующих по принципу Device-to-Device и подключающихся к сети Интернет опосредованно. Также были проанализированы возможности современных технологий беспроводной связи и проблемы, которые способны возникнуть в ближайшем будущем в связи с появлением таких прогрессивных технологий, как, например, наносети.

Данная глава служит доказательством возникновения и будущего роста зависимости практически любой сферы деятельности человека от работоспособности и доступности телекоммуникационных структур, что подтверждает актуальность исследования настоящей работы.

Вторая глава диссертации посвящена анализу и поиску возможности предоставления услуг связи на территории с ограниченной доступностью телекоммуникационной инфраструктуры посредством применения беспроводных ячеистых сетей. Проанализированы проблемы, вызываемые отсутствием телекоммуникационной структуры и использованием беспроводных ячеистых сетей, а также способы их разрешения. Рассмотрены два способа построения беспроводных ячеистых сетей именованных данных – с многоранговой и одноранговой топологией. Предложен и описан принцип работы автономных беспроводных ячеистых сетей именованных данных обеих топологий, а также введена характеристика «агрегатора

информации» – сетевого элемента, выполняющего функции поиска и маршрутизации трафика в многоранговых ячеистых беспроводных сетях именованных данных. Также в настоящей главе описан вариант механизма определения ближайшего агрегатора информации (Рисунок 2.1).

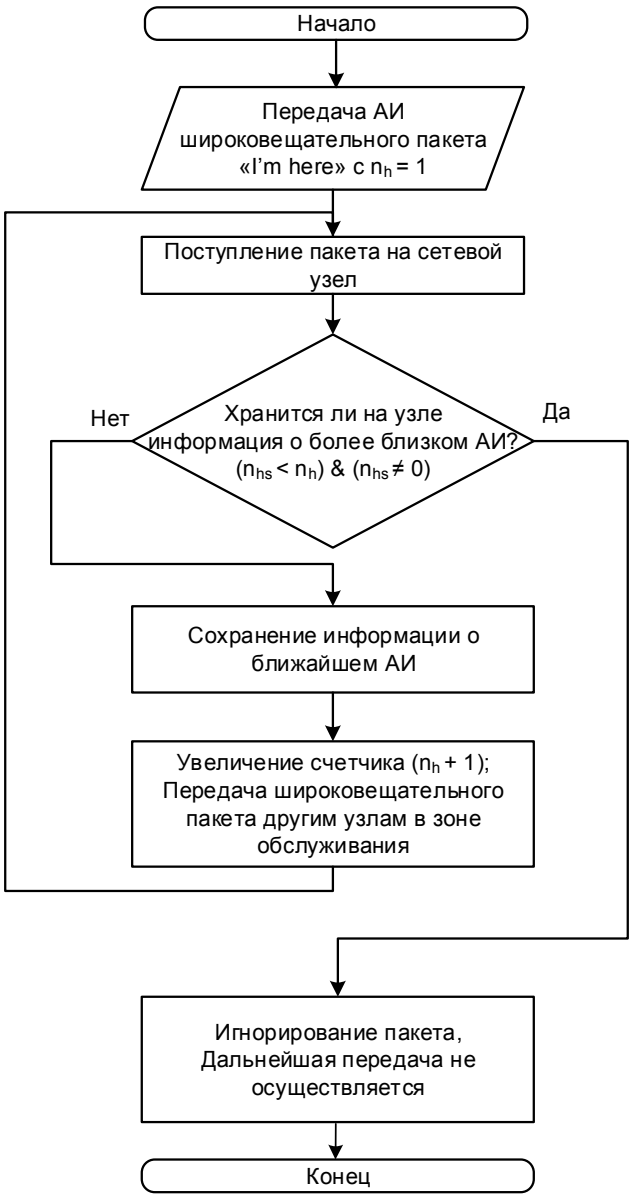


Рисунок 2.1 – Алгоритм определения ближайшего агрегатора информации

Кроме того, многоранговая топология в ячеистых сетях именованных данных позволяет реализовать функцию поиска информации по ключевым словам. Когда пользователь и его терминал не знают точного имени данных, в сторону АИ может быть направлен запрос, содержащий ключевые слова, по которым АИ осуществляет поиск имен во всех кластерах, после чего полученный список может быть отправлен запрашивающему узлу. Приняв список имен по соответствующим ключевым словам, пользователь или его терминал могут выбрать то, что необходимо запросить, и инициировать новый запрос уже с точным именем данных, который будет удовлетворяться в соответствии с нижеописанным алгоритмом (Рисунок 2.2).

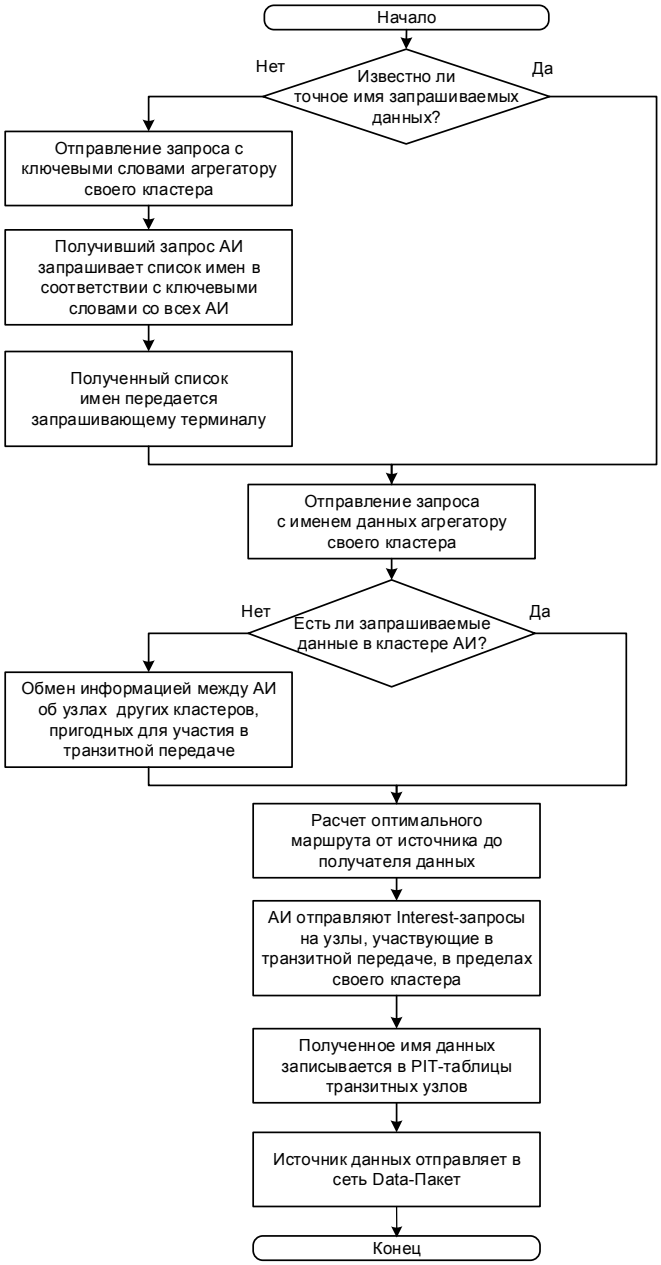


Рисунок 2.2 – Алгоритм передачи данных в сетях именованных данных с многоранговой топологией

Кроме того, в настоящей главе разработана имитационная модель на языке программирования Python, по алгоритму FOREL вычисляющая центры кластеров беспроводной ячеистой сети с многоранговой топологией. Решив задачу кластеризации, а также узнав количество элементов в каждом, можно определить вероятность связности для двухранговой сети, которой является предлагаемая топология, включающая в себя агрегаторы информации.

В третьей главе диссертационной работы проведен анализ особенностей приложений Интернета Вещей, свойств их трафика и характер вызываемых ими потенциальных проблем. Сделан анализ существующих режимов работы шлюзов, служащих для соединения сегментов сенсорных сетей приложений ИВ с сетью связи общего пользования, рассмотрены их преимущества и недостатки.

Объединив два режима работы шлюзов, с предварительной обработкой (с накоплением сенсорных отчетов для передачи их одном большим пакетом) и без неё, возможно реализовать такой алгоритм, при котором будет происходить своевременное переключение между режимами работы в зависимости от ситуации.

Рисунок 3.1 – Протокол динамического управления компоновкой данных

В случае, когда измеренные значения показателей далеки от экстремальных, шлюз работает в режиме с предварительной обработкой, тем самым уменьшая нагрузку на сеть. В момент возникновения критической ситуации устройство начинает передавать данные без предварительной обработки в режиме реального времени. При этом во время калибровки возможно установить, показания каких именно датчиков требуется отправлять без обработки, а какие следует продолжать накапливать для дальнейшей передачи одним большим пакетом. При поступлении сенсорных отчетов шлюз сравнивает значения параметров с критическими значениями и, если они выходят за границу установленной нормы, принимает решение транслировать их в режиме без предварительной обработки, устраняя излишнюю задержку на накопление отчетов.

Для наиболее наглядного представления достоинств разработанного протокола в сравнении с существующими режимами с помощью программного комплекса

AnyLogic была разработана имитационная модель приложения ИВ. С помощью разработанной модели была произведена оценка трафика приложения. Выставленные настройки модели отражали приложение, к которому подключена тысяча устройств, сорок из которых в определенный момент времени в течении 20 секунд начинают получать экстремальные или приближающиеся к ним значения показателей.

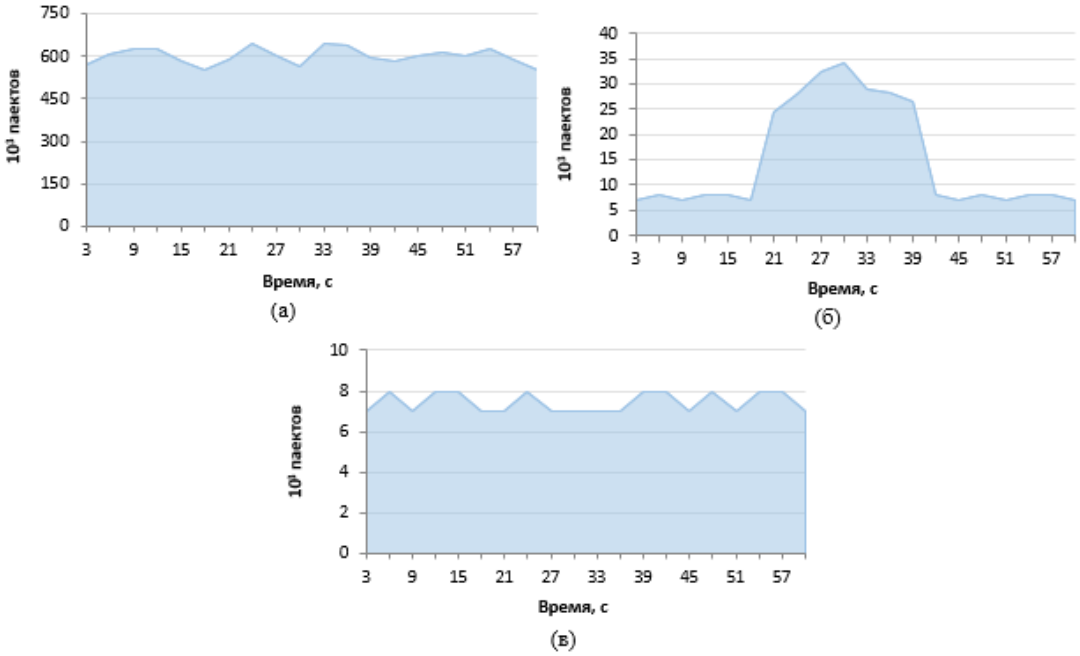


Рисунок 3.2 – Трафик приложения Интернета Вещей, работающего в режиме: а) без предварительной обработки; б) с динамическим управлением обработкой данных; в) с предварительной обработкой

Кроме того, возможно произвести оценку эффективного использования сетевых ресурсов, для этого в качестве критерия было выбрано процентное соотношение полезной информации к общему объему переданных данных. В ходе работы были получены уравнения расчета соотношения для всех трех режимов: без предварительной обработки (3.1); в соответствии с протоколом динамического управления компоновкой данных (3.2); с предварительной обработкой (3.3):

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{N_s v_s}{N_s(v_h + v_s)} = \frac{v_s}{v_h + v_s}, \tag{3.1}$$

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{N_b v_b + N_s v_s}{N_b(v_h + v_b) + N_s(v_h + v_s)}, \tag{3.2}$$

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{N_b v_b}{N_b(v_h + v_b)} = \frac{v_b}{v_h + v_b}, \tag{3.3}$$

где Q – объем переданной информации; Q_u – объем полезной информации; N_b, N_s – количество пакетов, передаваемых в режиме с предварительной обработкой и без неё, соответственно; v_b, v_s – количество полезной информации, которую содержит один пакет, передаваемый в режиме с предварительной обработкой и без неё, соответственно; v_h – объем информации, занимаемый заголовком;

$$N_b = \frac{ftn + ft_{\text{кр}}n(1-P)}{V_b} = \frac{fn}{V_b}\Big(t - t_{\text{кр}}(1-P)\Big), \tag{3.4}$$

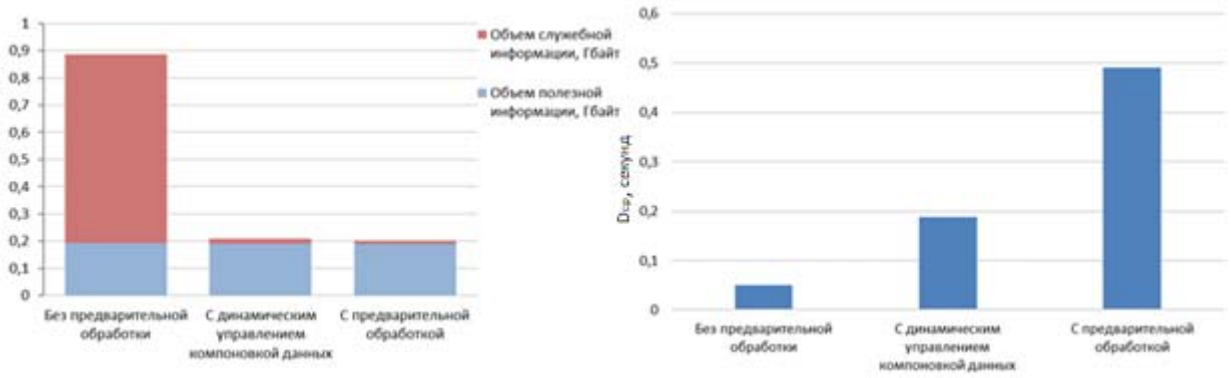
$$N_s = ft_{\text{кр}}nP, \tag{3.5}$$

где f – средняя частота поступления сенсорных отчетов на шлюз; t – общая длительность наблюдения; $t_{кр}$ – длительность критической ситуации; P – процент устройств, находящихся в критической ситуации; n – общее количество устройств в D2D-сети.

Таким образом, формула соотношения количества полезной и общей информации для приложения, основанного на разработанном протоколе, может быть уточнена в соответствии с (3.4 и 3.5):

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{\frac{fn}{V_b}(t - t_{\text{кр}}(1-P))v_b + ft_{\text{кр}}nPv_s}{\frac{fn}{V_b}(t - t_{\text{кр}}(1-P))(v_h + v_b) + ft_{\text{кр}}nP(v_h + v_s)}, \tag{3.6}$$

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{(t - t_{\text{кр}}(1-P))v_b + t_{\text{кр}}Pv_sV_b}{(t - t_{\text{кр}}(1-P))(v_h + v_b) + t_{\text{кр}}PV_b(v_h + v_s)}. \tag{3.7}$$



а) б)

Рисунок 3.3 – Результаты моделирования трафика приложения Интернета Нановещей для трёх режимов работы: а) объем переданной информации; б) средняя задержка

Из результатов моделирования видно, что режим работы, основанный на разработанном протоколе, не только уменьшает количество принимаемых удаленным сервером пакетов, но и снижает объем передаваемой информации (доведя объем служебной информации практически до уровня режима с предварительной обработкой), не нанося ущерб актуальности, полноте и достоверности передаваемых данных.

Кроме того, в данной главе диссертационной работы проведен анализ характера распространения данных в сетях именованных данных, в ходе которого был сделан вывод о его схожести с распространением болезней или компьютерных вирусов. Опираясь на существующую эпидемическую модель, была разработана собственная математическая модель, характеризующую зависимость вероятности присутствия в хранилище данных терминала информации с запрашиваемым именем от популярности

запрашиваемого имени, интенсивности передачи трафика в сети, размера самого хранилища данных и плотности рассматриваемого участка сети.

Вероятность наличия данных с запрашиваемым именем на том или ином узле в момент самого запроса будет зависеть от объема памяти Content Store, интенсивности передачи данных в сети, популярности запрашиваемых данных.

SIS-модель, или простая эпидемическая модель, позволяющая моделировать эпидемии, при которых инфицирование узлов возможно несколько раз. В данной модели узлы могут переходить из состояния «здоров» в состояние «инфицирован» (из свободного состояния в хранящее) и обратно:

В качестве начальных данных необходимо определить следующий ряд пунктов:

– сеть потенциальных контактов, определяемая симметричной матрицей смежности A с элементами A_{ij}, где i и j – номера строки и столбца, определяющие наличие возможности связи i-го и j-го терминалов, при этом $A_{ij} = 1$, когда j-й терминал находится в зоне обслуживания i-го терминала, в противном случае $A_{ij} = 0$;

– $S_i(t)$ – вероятность того, что i-й элемент не хранит запрашиваемые данные;

– $I_i(t)$ – вероятность того, что i-й элемент хранит запрашиваемые данные;

– β – скорость «заражения», скорость буферизации или скорость распространения информации, вероятность того, что данные будут переданы на соседнее устройство;

– γ – скорость «выздоровления», скорость освобождения узла или скорость переполнения буфера и удаления данных из CS.

Поскольку терминал может находится либо в одном, либо в другом состоянии следующее выражение является справедливым:

$$I_i(\mathrm{t}) + S_i(\mathrm{t}) = 1. \tag{3.8}$$

Вероятность того, что узел получил и сохранил запрашиваемые данные за некоторое время $(t+\Delta t)$ может определяться выражением:

$$I_i(t + \Delta t) = I_i(t) + \beta S_i(t) \sum_j A_{ij} I_j \Delta t - \gamma I_i\,(t). \tag{3.9}$$

При этом скорость буферизации можно охарактеризовать как количество сетевых узлов, получающих рассматриваемые данные от одного терминала за единицу времени. Данные события зависят от количества инициированных запросов с одним и тем же именем, что в данном случае можно назвать «популярностью информации». Популярность информации же вполне можно описать с помощью закона Ципфа:

$$\beta_i = \frac{\beta_1}{n}, \tag{3.10}$$

где n – ранг популярности, β_n – скорость буферизации имени n-го ранга популярности, β_1 – скорость буферизации имени 1-го ранга популярности.

Скорость освобождения узла – скорость очистки памяти терминала от тех или иных данных зависит, собственно, от объемов самого Content Store и скорости наполнения буфера. Скорость наполнения буфера же можно охарактеризовать частотой прибытия пакетов на узел. Таким образом, чем больше в сети передается трафика, тем выше скорость освобождения узла.

$$\gamma = \frac{\chi}{V}, \tag{3.11}$$

где χ – частота приема Data-пакетов терминалом, пакет/с; V – объем Content Store, пакетов.

Уравнение буферизации, то есть вероятность того, что элемент перейдет в состояние хранения за время Δt, для модели SIS выглядит следующим образом:

$$\frac{dI_i(t)}{dt} = \beta S_i(t) \sum_j A_{ij} I_j(t) - \gamma I_i(t). \tag{3.12}$$

В соответствии с (3.17), (3.19) и (3.20) преобразуем (3.21):

$$\frac{dI_i(t)}{dt} = \beta(1 - I_i(t)) \sum_j A_{ij} I_j(t) - \gamma I_i(t), \tag{3.13}$$

$$\frac{dI_i(t)}{dt} = \frac{\beta_1}{n}\big(1 - I_i(t)\big) \sum_j A_{ij} I_j(t) - \frac{\chi}{V} I_i(t). \tag{3.14}$$

Таким образом, получившееся выражение (3.14) описывает зависимость вероятности того, что терминал за время Δt сохранит в Content Store данные с запрашиваемым именем, от популярности данных, интенсивности передачи трафика в сети, размера CS и плотности рассматриваемого участка сети.

Аналитическое решение дифференциальное уравнения (3.22) было найдено с помощью программного комплекса Wolfram Mathematica:

$$I_i(t) \to e^{\int_1^t (-\gamma - \beta \sum_j A_{ij} I_j(t) K_1) dK_1} (C_1 + \\ + \int_1^t (\beta\, e^{-\int_1^{K_2} (-\gamma - \beta \sum_j A_{ij} I_j(t) K_1) dK_1} \sum_j A_{ij} I_j(t) K_2 dK_2). \tag{3.15}$$

Для отслеживания зависимости вероятности присутствия данных на терминале от времени было проведено моделирование распространения данных в беспроводной ячеистой сети при условии, что скорость буферизации и скорость освобождения узла постоянны, и получены следующие результаты (Рисунок 3.4).

Как видно из рисунка 3.4(а), после возникновения востребованных данных в сети и сохранении их ранга популярности с течением времени вероятность того, что терминал сохранит данные, будет расти, а затем стабилизируется – это соответствует фазе «насыщения» эпидемий:

$$\boldsymbol{\beta} > \gamma;\ \boldsymbol{t} \to \infty;\ I_i(t) \to \text{const}, \tag{3.16}$$

$$I_i(t) = \frac{\sum_j A_{ij} I_j(t)}{\frac{n\chi}{V\beta_1} - \sum_j A_{ij} I_j(t)}. \quad (3.17)$$

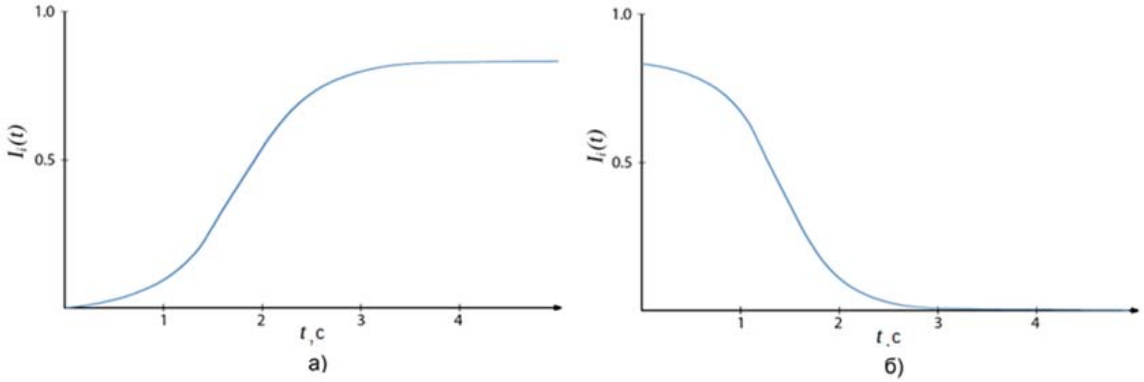


Рисунок 3.4 – Зависимость вероятности присутствия данных на терминале от времени при: а) $\beta > \gamma$; б) $\beta < \gamma$

Рисунок 3.4(б) показывает, что при недостаточной популярности или чрезмерной скорости освобождения узла вероятность того, что данные будут присутствовать на узле, с течением времени снижается и стремится к нулю.

В четвертой главе диссертации были проанализированы особенности будущего развития сетей на основе технологии именованных данных, а также основные этапы и возможные проблемы модернизации современных сетей при переходе к NDN-архитектуре. В сетевых симуляторах NS-3 и ndnSIM разработаны имитационные модели, позволяющие оценить характеристики беспроводной ячеистой сети, основанной как на IP, так и на NDN архитектуре.

Экспериментально исследована работа беспроводных ячеистых сетей, построенных в соответствии с двумя сетевыми архитектурами. Результаты симуляций работы сетей представлены следующими графиками (Рисунок 4.1–4.4).

По причине того, что расчет задержки зависит от общего количества принятых пакетов, а с изменением некоторых параметров в модели IP-сети получателя достигает чрезмерно малое их количество, и только в том случае, когда источник и получатель оказываются наиболее близко друг к другу, можно считать, что графики задержки не отражают действительных зависимостей и неинформативны, именно поэтому некоторые графики результатов симуляции IP-сети в настоящей работе не отображены.

В ходе анализа были подтверждены преимущества новой сетевой архитектуры над существующей, тем самым доказана целесообразность использования NDN, по крайней мере, в сетях доступа.

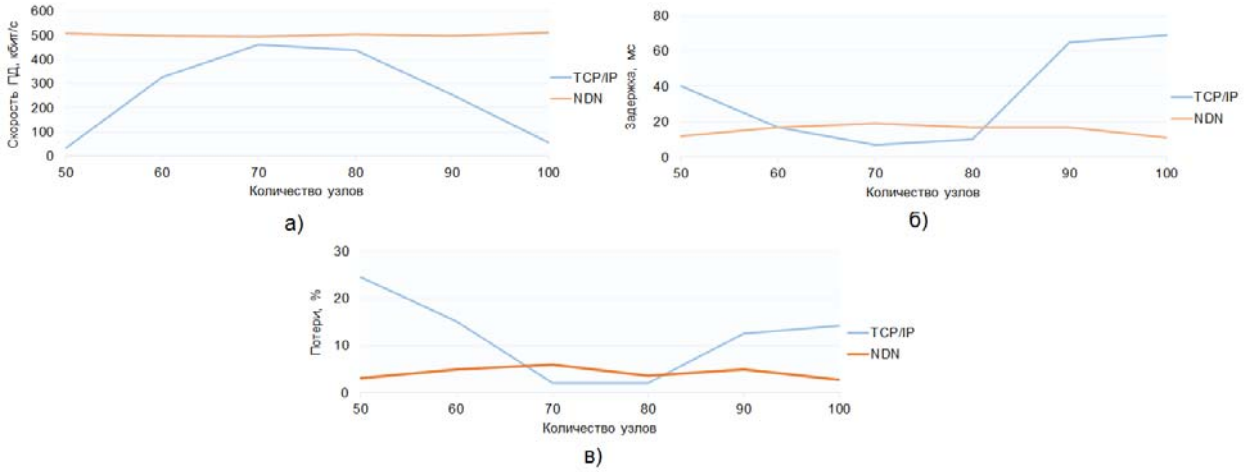


Рисунок 4.1 – Зависимость параметров сетей NDN и IP от количества узлов (v = 4 м/с; N_{rx} = 1 узел; N_{tr} = 1 узел): а) скорость передачи данных; б) задержка; в) потери

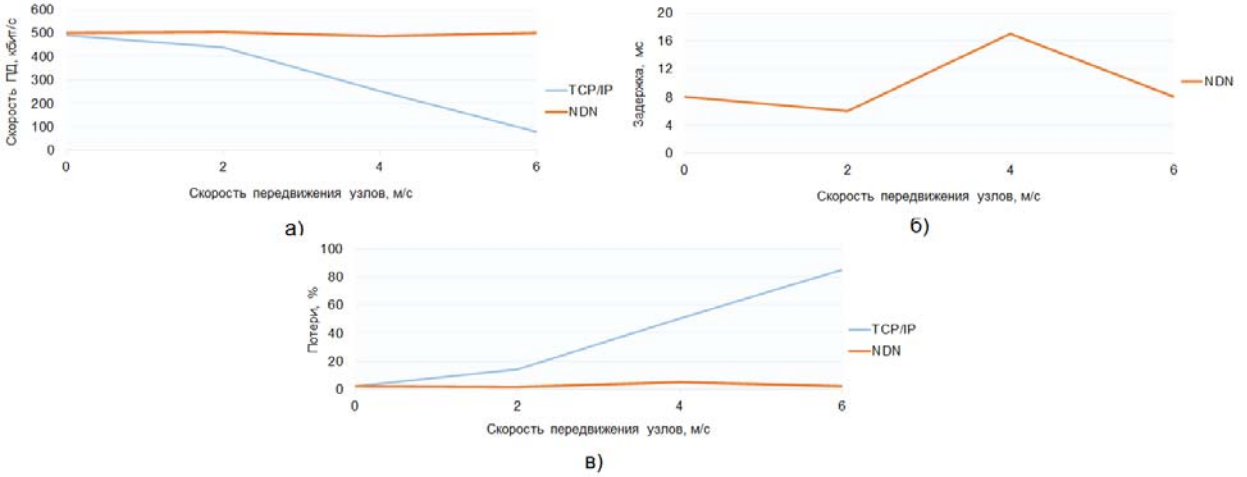


Рисунок 4.2 – Зависимость параметров сетей NDN и IP от скорости передвижения узлов (N = 90 узлов; N_{rx} = 1 узел; N_{tr} = 1 узел): а) скорость передачи данных; б) задержка; в) потери

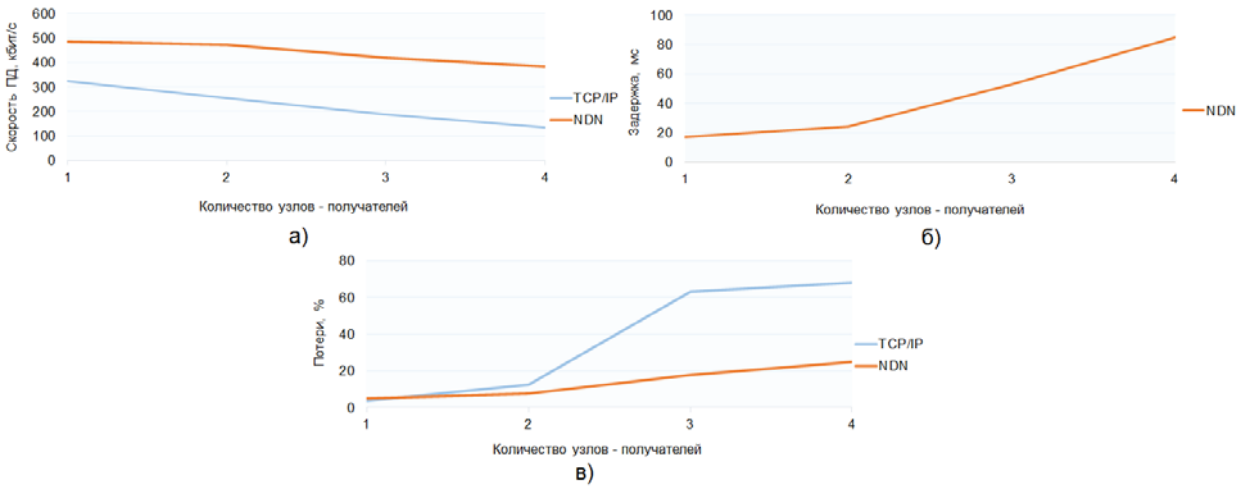


Рисунок 4.3 – Зависимость параметров сетей NDN и IP от количества узлов-потребителей (N = 90 узлов; v = 4 м/с; N_{tr} = 1 узел): а) скорость передачи данных; б) задержка; в) потери

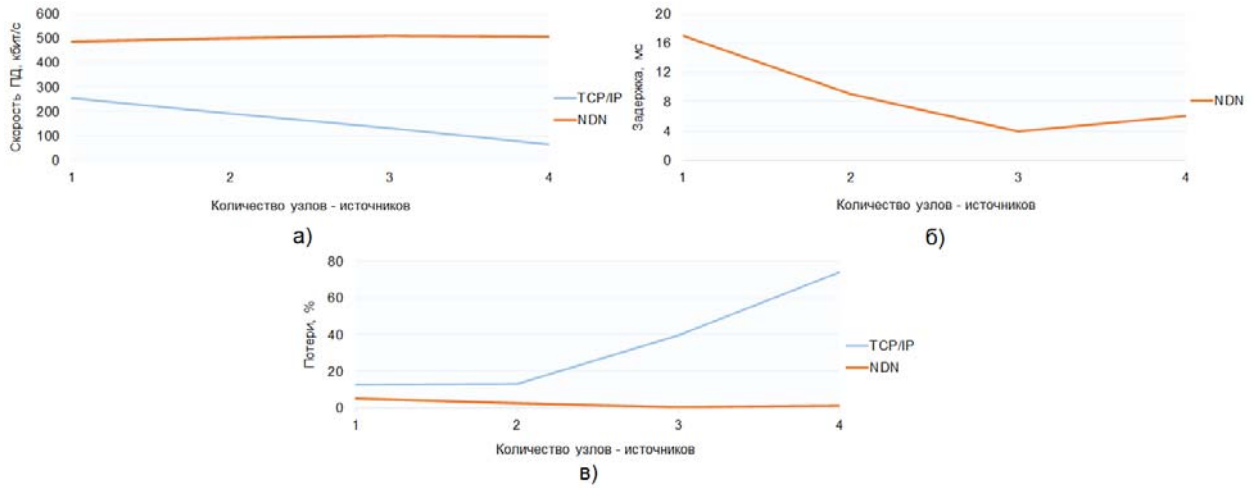


Рисунок 4.4 – Зависимость параметров сетей NDN и IP от количества узлов-источников (N = 90 узлов; v = 4 м/с; N_{tr} = 1 узел):
а) скорость передачи данных; б) потери

Кроме того, в работе проведен анализ необходимости создания шлюза между устройствами, работающими в соответствии с двумя разными сетевыми архитектурами. Разработан алгоритм работы нового шлюза, обеспечивающего совместную работоспособность элементов двух сетевых архитектур, тем самым обеспечивая возможность плавной модернизации современных сетей связи.

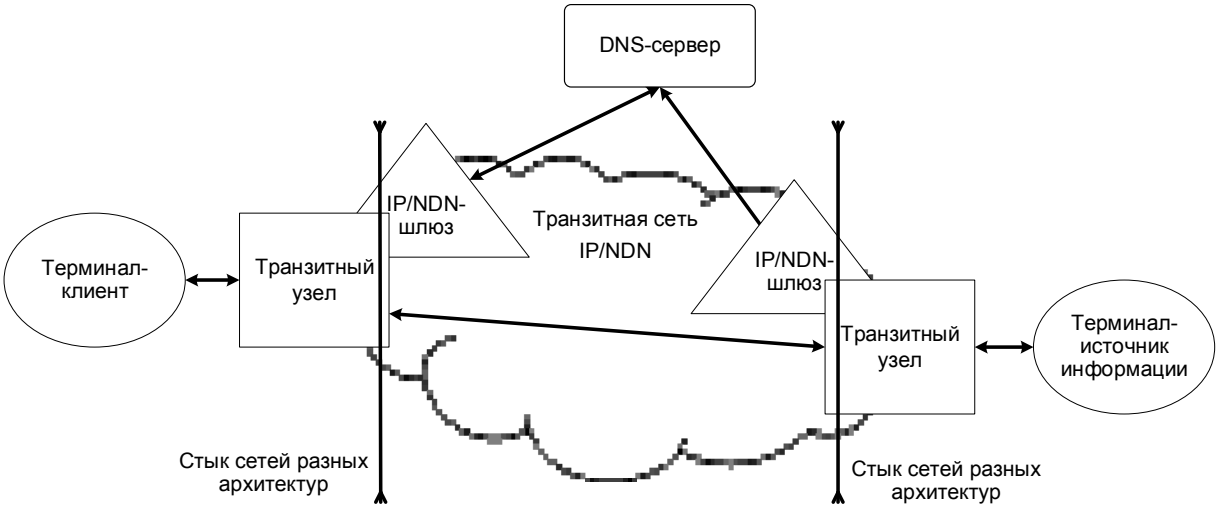


Рисунок 4.5 – Структурная схема функционирования сети IP/NDN

Для корректной работы, в частности для формирования префиксов имен, предлагаемому IP/NDN-шлюзу необходимо наличие соединения с системой доменных имен, поскольку его основной принцип работы основан на обращении к DNS-серверу и добавлении заголовка сетевого уровня в полученный пакет (Рисунок 4.6).

Предполагается, что интерфейсы IP/NDN-шлюза способны работать в двух режимах, и при настройке интерфейса выбирается лишь один из них – NDN или IP. При поступлении пакета на интерфейс, шлюз обращается к своей таблице маршрутизации и узнает, на какой порт должен быть дальше передан пакет. Далее

шлюз сравнивает режимы, в которых находятся входной и выходной интерфейсы, и, если они одинаковы, просто продвигает пакет с порта в порт. В случае же, если сетевые архитектуры двух интерфейсов разные, могут возникнуть две ситуации:

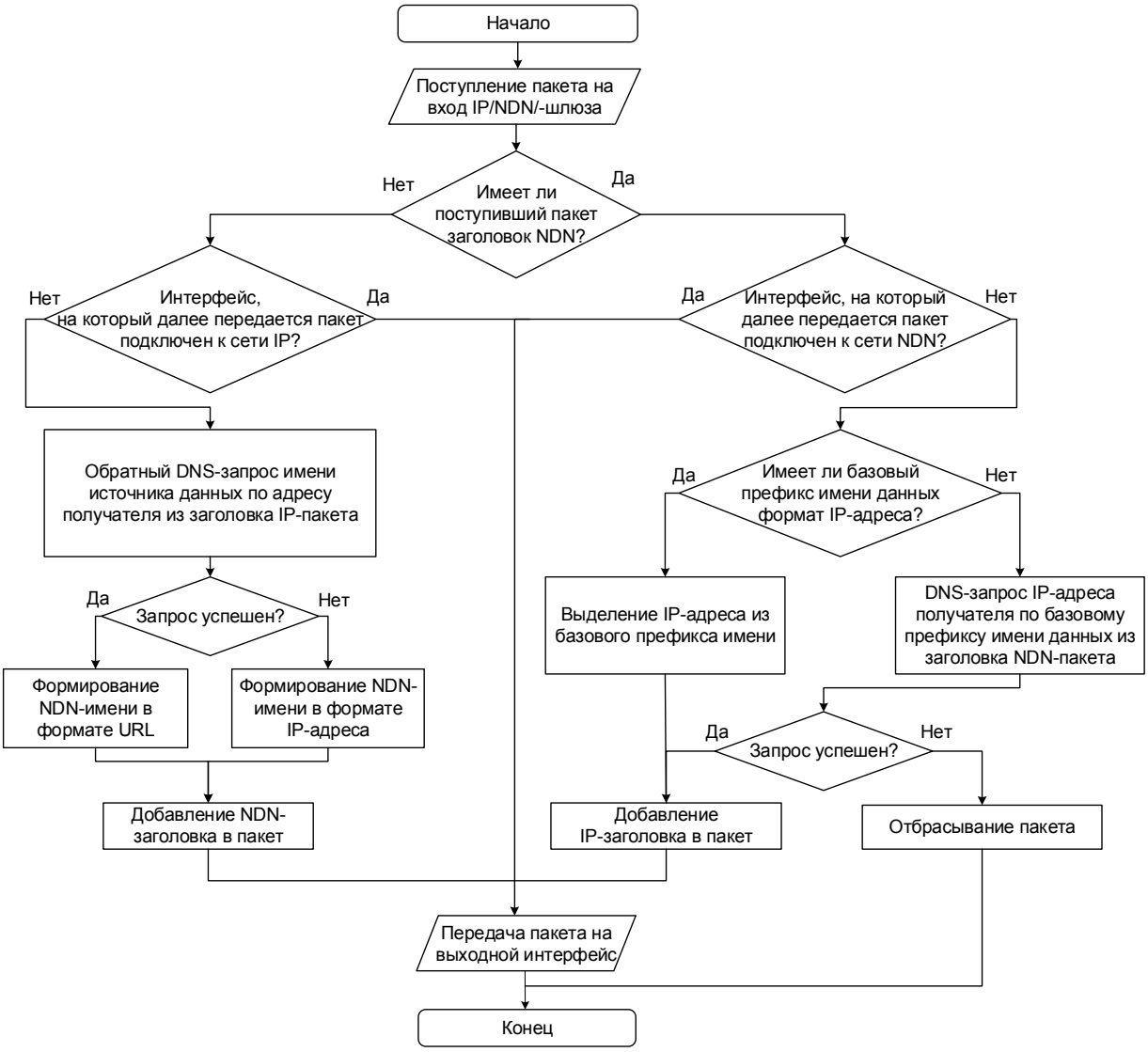


Рисунок 4.6 – Алгоритм работы IP/NDN-шлюза

1) *Входной интерфейс – IP, выходной – NDN.* Шлюз направляет обратный DNS-запрос DNS-серверу, в котором указывает IP-адрес получателя из заголовка пришедшего IP-пакета. После извлечения из запроса URL получателя шлюз добавляет в пакет перед IP-заголовком заголовок NDN, в котором в качестве имени данных содержится символьное обозначение запрашиваемых данных, после чего отправляет на выходной порт для передачи. Если же DNS-запрос не был успешен – информации об URL по IP-адресу получателя нет, то IP/NDN-шлюз формирует имя в формате IP-адреса, после чего, также, как и в первом случае, направляет пакет с добавленным NDN-заголовком на передающий интерфейс.

2) *Входной интерфейс – NDN, выходной – IP.* IP/NDN-шлюз, получая NDN-пакет, обращает внимание на то, в каком формате представлен базовый префикс имени данных. В случае, если префикс представлен в формате IP-адреса, шлюз выделяет IP-

адрес получателя, добавляет в пакет IP-заголовок перед заголовком NDN и отправляет на передающий порт. В обратном случае, когда интерфейсом принимается пакет с базовым префиксом имени в формате URL, шлюз направляет DNS-запрос, в ответе которого указывается IP-адрес получателя из заголовка пришедшего IP-пакета. Далее в NDN-пакет также добавляется заголовок IP с полученным адресом, и он передается на выходной интерфейс. В случае, если и из префикса имени NDN-пакета невозможно узнать IP-адрес, и отправленный DNS-запрос не дал результата, то пакет отбрасывается шлюзом, возвращая отправителю «нет маршрута».

Также следует отметить, что, IP/NDN-шлюзу, получившему NDN-пакет, для передачи его через IP-сеть в поле «отправитель» необходимо указать IP-адрес своего интерфейса. Данный механизм подобен механизму преобразования сетевых адресов (NAT), существующему в сетях IP.

Для симуляции работы гетерогенной беспроводной ячеистой сети использовалась модифицированная модель, разработанная в ndnSIM и описанная выше. Для отслеживания зависимости качества связи от присутствия в сети разработанного NDN/IP-шлюза был изменен ряд условий: каждому узлу сети случайным образом назначалась сетевая архитектура – NDN или IP, при этом соотношение узлов IP к NDN составляло 50 на 50 процентов. После передачи некоторого объема данных между одной парой оконечных узлов также случайным образом выбирались новые источник и получатель, при этом данные оконечные узлы могли иметь как одинаковые, так и разные сетевые архитектуры.

В ходе симуляции была исследована доступность узлов рассматриваемой сети относительно друг друга, то есть количество удовлетворенных запросов, при этом вводилось ограничение на задержку равное 80 мс – в случае, если время передачи пакета превышало установленное значение, пакет считался потерянным. Из результатов эксперимента (Рисунок 4.7) видно, что присутствие в гетерогенной сети разработанного IP/NDN-шлюза увеличивает доступность узлов практически в два раза. Кроме того, было исследовано влияние наличия шлюза на скорость передачи данных и задержку (Рисунок 4.8).

Из графиков видно, что средняя задержка в сети с NDN/IP-шлюзом больше, чем при передаче пакетов между отдельно взятыми IP и NDN узлами, это объясняется тем, что построение маршрута от источника до получателя состоит из двух отдельных процессов маршрутизации, также задержку вносит необходимость получения шлюзом ответов на DNS-запросы.

Результаты моделирования показали, что шлюз, работающий в соответствии с представленным алгоритмом, может быть рекомендован к использованию в сетях, узлы которых основаны на разных сетевых архитектурах. Применение данного алгоритма позволяет взаимодействовать узлам разных архитектур, что повышает процент удовлетворенных запросов.

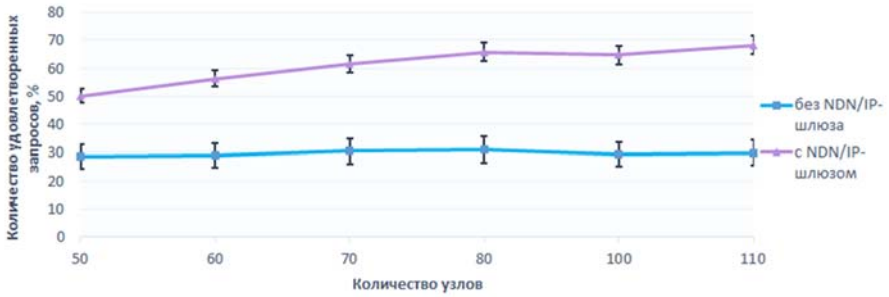
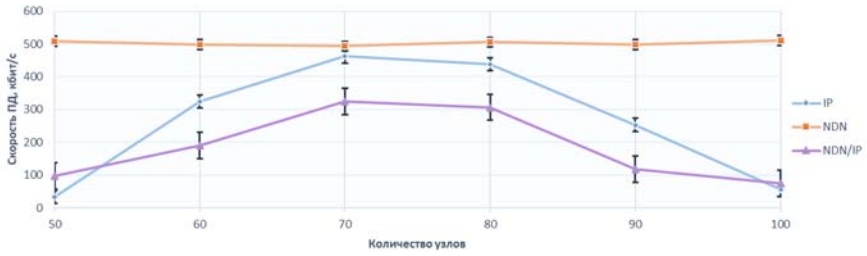
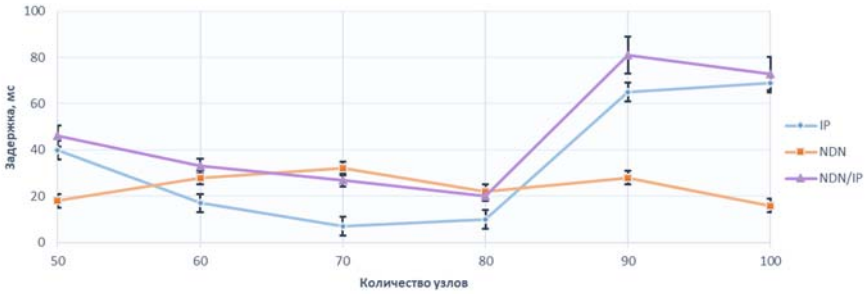


Рисунок 4.7 – Зависимость количества удовлетворенных запросов гетерогенной сети от количества узлов (v = 4 м/с; N_{rx} = 1 узел; N_{tr} = 1 узел, N_{IP}/N_{tr} = 1, t_l = 80 мс)



а)



б)

Рисунок 4.8 – Зависимость параметров гетерогенной сети с NDN/IP-шлюзом от количества узлов (v = 4 м/с; N_{rx} = 1 узел; N_{tr} = 1 узел, N_{IP}/N_{tr} = 1):
а) скорость передачи данных; б) задержка

В **заключении** приведены результаты диссертационной работы.

1. Проведен анализ проблем, вызываемых отсутствием телекоммуникационной инфраструктуры, в частности, отсутствием доступа к DNS-ресурсам, а также проблем, обусловленных постоянным передвижением элементов беспроводных ячеистых сетей.

2. Предложен метод организации сети связи для обеспечения инфокоммуникационными услугами территорий с ограниченной доступностью к телекоммуникационной инфраструктуре с помощью применения беспроводных ячеистых сетей именованных данных.

3. Выполнен анализ двух способов построения беспроводных ячеистых сетей именованных данных – с многоранговой и одноранговой топологией. Проанализированы их преимущества и недостатки, даны рекомендации по использованию каждой из них при определенных условиях. Кроме того, предложен принцип работы изолированных беспроводных ячеистых сетей именованных данных

обеих топологий, а также введена характеристика «агрегатора информации», обеспечивающих функции маршрутизации и поиска необходимых данных в многоранговых сетях.

4. Проанализированы режимы работы шлюзов, соединяющие сегменты сенсорных сетей приложений Интернета Вещей с сетью связи общего пользования, рассмотрены их преимущества и недостатки. Разработан новый протокол работы шлюза – протокол динамического управления компоновкой данных, обладающий достоинствами ранее разработанных режимов. Разработаны математическая и имитационная модель приложения Интернета Вещей со шлюзом, работающим в трех различных режимах.

5. Проанализирован процесс распространения трафика в сетях именованных данных, в ходе которого была выявлена схожесть с распространением болезней или компьютерных вирусов.

6. Разработана математическая модель распространения фрагментов информации в сетях именованных данных, основанная на существующей эпидемической модели, учитывающая зависимость вероятности присутствия в Content Store терминала информации с запрашиваемым именем от его популярности, интенсивности передачи трафика в сети, размера самого Content Store и плотности устройств в рассматриваемом сегменте сети.

7. Разработаны имитационные модели беспроводных ячеистых сетей, основанные на IP и на NDN архитектурах.

8. Выполнен анализ особенностей будущего развития сетей именованных данных и необходимости создания шлюза между устройствами, работающими в соответствии с двумя разными сетевыми архитектурами. Предложен алгоритм работы шлюза IP/NDN, обеспечивающего совместную работоспособность элементов двух сетевых архитектур.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Блинников М.А., Пирмагомедов Р.Я. Динамическое управление трафиком медицинских сенсорных сетей // Электросвязь. – 2019. – № 7. – С. 37-42.

2. Блинников М.А., Пирмагомедов Р.Я. Приложение IoT для прогнозирования землетрясений на основе мониторинга поведения животных // Информатизация и связь. – 2019. – № 2. – С. 16-20.

3. Блинников М.А., Пирмагомедов Р.Я., Молчанов Д.А., Кучерявый Е.А. Применение технологий именованных данных в беспроводных ячеистых сетях // Электросвязь. – 2019. – № 11. – С. 22-28.

4. Блинников М.А., Пирмагомедов Р.Я. Сетевой шлюз для сетей именованных данных // Электросвязь. – 2021. – № 5. – С. 22-30.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования

5. Blinnikov M., Pirmagomedov R. Wireless identifying system based on nano-tags // 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – IEEE, 2018. – P. 753-757.

6. Pirmagomedov, R., Blinnikov, M., Glushakov, R., Muthanna, A., Kirichek, R., Koucheryavy, A. Dynamic data packaging protocol for real-time medical applications of nanonetworks // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. – Springer, Cham, 2017. – P. 196-205.

7. Pirmagomedov, R., Blinnikov, M., Amelyanovich, A., Glushakov, R., Loskutov, S., Koucheryavy, A., Bobrikova, E. IoT based earthquake prediction technology // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. – Springer, Cham, 2018. – P. 535-546.

8. Pirmagomedov, R., Kirichek, R., Blinnikov, M., Koucheryavy, A. UAV-based gateways for wireless nanosensor networks deployed over large areas // Computer Communications. – 2019. – Т. 146. – P. 55-62.

9. Pirmagomedov, R., Blinnikov, M., Kirichek, R., & Koucheryavy, A. Wireless nanosensor network with flying gateway // International Conference on Wired/Wireless Internet Communication. – Springer, Cham, 2018. – P. 258-268.

Публикации в других изданиях и материалах конференций

10. Ахмед А.А., Блинников М.А., Пирмагомедов Р.Я., Глушаков Р.И. Кучерявый А.Е. Обзор современного состояния e-health // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 1.

11. Блинников М.А., Пирмагомедов Р.Я. Обзор приложений медицинских нательных сетей // Интернет вещей и 5G (INTHITEN 2017). – 2017. – С. 91-101.

12. Блинников М.А., Пирмагомедов Р.Я. Оптимизация нагрузки на сети связи общего пользования, вызванной трафиком медицинских несетевых приложений // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Т. 4. – № 3. – С. 22-30.

13. Блинников М.А., Пирмагомедов Р.Я., Мутханна А.С.А. Моделирование трафика медицинских сетей в режиме пониженной нагрузки на сети связи общего пользования // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Т. 5. – № 1. – С. 15-23.

14. Князев Е.В., Блинников М.А., Пирмагомедов Р.Я. Анализ основных способов передачи данных в электромагнитных наносетях // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6. – № 2. – С. 70-78.

15. Семанов А.О., Блинников М.А., Пирмагомедов Р.Я. Обзор технологий связи медицинских приложений Интернета Вещей // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6. – №. 1. – С. 63-71.

Подписано в печать 13.04.2022. Формат 60×84 1/16.
1,0 п.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО "НПО ПБ АС", 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149