

На правах рукописи



Пестин Максим Сергеевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ УЗЛОВ БЕСПРОВОДНЫХ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ
СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦИИ**

Специальность 2.3.5. Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель:

Новиков Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Гагарина Лариса Геннадьевна,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследователь-
ский институт «Московский институт элек-
тронной техники» (г. Зеленоград, Москва), Ин-
ститут системной и программной инженерии
и информационных технологий, директор

Ватугин Эдуард Игоревич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный
университет» (г. Курск), профессор

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. Уткина»
(г. Рязань)

Защита состоится «4» марта 2025 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.417.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92 (ауд. 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:
<https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-03/pestin-ms-24-2-417-03>

Автореферат разослан «10» января 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Маслова
Анна Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Беспроводные децентрализованные сети передачи данных (ДСПД) являются технологией, которая позволяет обеспечивать обмен данными между мобильными узлами в условиях недоступности централизованной инфраструктуры, например, когда сеть формируется в удалении от крупных населённых пунктов или инфраструктура повреждена в результате природных или техногенных катастроф. ДСПД имеют динамически изменяющуюся ячеистую топологию и строятся на основе мобильных узлов, которые осуществляют коммуникацию между собой посредством взаимодействия программного обеспечения при функционировании сети и в процессе передачи информации. При этом каждое абонентское устройство должно участвовать в построении маршрутов передачи трафика и формировании топологии сети, являясь как конечной точкой, так и маршрутизатором для других узлов.

Решение задач формирования структуры сегментов сетей, подключения новых узлов к ним, построения и поддержания в актуальном состоянии маршрутов передачи данных, комплексирования маршрутных метрик и балансировки потоков трафика обычно обеспечивается программным обеспечением сетевой маршрутизации (ПОСМ) абонентов ДСПД. С одной стороны, ПОСМ должно обеспечивать функционирование узлов как независимых абонентов, у которых имеются свои специфичные задачи и функции. С другой, используя механизмы межпрограммного взаимодействия, ПОСМ должно осуществлять контроль и управление функционированием сети как единого объекта. Это требует наличия эффективных механизмов взаимодействия между программным обеспечением сетевой маршрутизации отдельных узлов.

Анализ современных исследований показывает, что в настоящее время высокая эффективность передачи трафика обеспечивается лишь в сетях со статичной или квазистатичной топологией. При этом связь часто существенно ухудшается в случае высокой динамики изменения структуры сети. Одним из основных факторов, которые приводят к указанной проблеме, являются недостатки существующих методов взаимодействия ПОСМ. Проактивное взаимодействие, включающее запланированные периодические отправки оповещений и уведомлений, генерирует большие объёмы служебного трафика и сопровождается низкими темпами обновления маршрутной информации, что значительно снижает пропускную способность сетевых каналов, а также ведет к трудностям в обеспечении связности в ДСПД. В то же время, использование реактивных подходов, в которых взаимодействие инициируется в ответ на событие или запрос, приводит к возникновению существенных задержек при построении первичных маршрутов передачи трафика, а также к трудностям с их восстановлением в случае разрыва каналов. Таким образом, в настоящее время существует проблема повышения эффективности передачи данных в ДСПД, которая может быть решена за счет разработки более совершенных протоколов взаимодействия между программным обеспечением отдельных узлов сети.

В связи с вышеизложенным, разработка и исследование новых методов и алгоритмов взаимодействия программного обеспечения маршрутизации трафика в беспроводных децентрализованных сетях для организации передачи данных между мобильными узлами в условиях отсутствия централизованной инфраструктуры является актуальной **научной задачей**.

Степень разработанности темы исследования. Разработке подходов взаимодействия сетевого программного обеспечения при формировании и обслуживании маршрутов передачи данных в беспроводных децентрализованных сетях посвящены работы отечественных и зарубежных учёных Дугаева Д.А., Романова С.В., Кулакова М.С., Леонова А.В., Шаваша А., Soonki Jo, Tabatabaei S., Subramaniam. K., Singh J. Вопросами распределённой

балансировки трафика в ДСПД занимались Васильев Д.С., Кайсина И.А., Periyasamy P., Pal. A., Taha A., Alghamdi S.A., Er-rouidi M, Saleh A. и др. Исследования используемых в ДС маршрутных метрик отражены в работах Махрова С.С., Базенкова Н.И., Pandey, P., Xiaoxia Qi., Venatia S.E. и др.

Анализ известных исследований позволил наметить пути совершенствования методов взаимодействия сетевого программного обеспечения, сформировать объект, предмет, цель и задачи диссертационной работы.

Объектом исследования является программное обеспечение сетевой маршрутизации узлов в беспроводных децентрализованных сетях передачи данных.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы взаимодействия программного обеспечения узлов в децентрализованных сетях передачи данных при маршрутизации и балансировке потоков трафика.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности передачи данных в беспроводных децентрализованных сетях за счет создания новых методов и алгоритмов организации взаимодействия сетевого программного обеспечения отдельных узлов при решении задач маршрутизации в условиях наличия множества альтернативных путей доставки трафика.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

1. Разработка методов и алгоритмов взаимодействия программного обеспечения сетевой маршрутизации узлов ДСПД для обнаружения, восстановления маршрутов связи, обеспечивающих повышение эффективности передачи данных по сети, а также разработка метода балансировки потоков данных в ДСПД по квазипараллельным маршрутам, который позволит снизить сквозную задержку доставки сообщений.

2. Разработка метода оценки маршрутов, который будет использоваться при взаимодействии между программным обеспечением сетевой маршрутизации отдельных узлов, при формировании путей передачи информации и позволит снизить объемы служебного трафика между отдельными узлами.

3. Разработка программного средства для исследования взаимодействия программного обеспечения сетевой маршрутизации в ДСПД с высокой динамикой изменения топологии сети.

4. Разработка архитектуры программного обеспечения сетевой маршрутизации, обеспечивающей интеграцию предложенных методов и алгоритмов в рамках единого решения. Создание прототипа программного обеспечения сетевой маршрутизации на основе протокола связи с использованием программного средства.

5. Экспериментальная проверка и подтверждение эффективности разработанных методов и алгоритмов взаимодействия программного обеспечения сетевой маршрутизации трафика и их сравнение со стандартными технологиями на типовых сценариях функционирования ДСПД.

Исследование обладает следующей **научной новизной**:

1. Предложены методы и алгоритмы взаимодействия программного обеспечения сетевой маршрутизации при построении и восстановлении маршрутов связи в ДСПД, которые отличаются от существующих решений совмещением реактивной и проактивной схем обмена сообщениями, совместным использованием адресных и широковещательных информационно-ответных, что позволяет повысить значение коэффициента доставки сетевых пакетов и уменьшить сквозную задержку при их передаче по найденным маршрутам, а также обеспечивает возможность построения и поддержки квазипараллельных путей передачи трафика.

2. Предложен новый метод оценки маршрутов передачи данных, формируемых в процессе взаимодействия программного обеспечения сетевых узлов, отличающийся от стандартных решений возможностью динамической фильтрации и упорядочивания информационных сообщений на промежуточных узлах сети, что позволяет повысить эффективность функционирования ДСПД за счет снижения суммарного объема служебного трафика между программным обеспечением сетевой маршрутизации отдельных абонентов.

3. Предложен метод балансировки потоков данных в ДСПД, позволяющий снизить сквозную задержку доставки сообщений и отличающийся децентрализованным взаимодействием сетевых узлов при распределении пакетов трафика по квазипараллельным маршрутам с учётом значений их динамических метрик, собираемых при информационном обмене между программным обеспечением сетевой маршрутизации.

Практической значимостью обладают следующие результаты:

1. Реализовано программное средство, которое позволяет проводить моделирование процессов функционирования сети в различных сценариях работы и предоставляет возможность исследовать, отлаживать и выполнять оценку предложенных методов и алгоритмов взаимодействия сетевого программного обеспечения узлов ДСПД.

2. Предложена архитектура программного обеспечения сетевой маршрутизации отдельных узлов ДСПД, обеспечивающая интеграцию разработанных методов и алгоритмов взаимодействия ПО в рамках единого решения и их применение на практике.

3. Предложенные в диссертации методы и алгоритмы реализованы в виде протокола связи, на основе которого созданы программные модули для выполнения процедур сетевой маршрутизации, функционирующие в рамках разработанного программного средства.

4. Проведено экспериментальное исследование созданного протокола в различных сценариях функционирования ДСПД, которое подтвердило эффективность предложенных решений, что открывает возможность его применения на практике для быстрого развертывания сетей в условиях низкой пропускной способности и нестабильности каналов связи, вызванных высокой динамикой изменения топологии сети и потребностями в передаче большого объема информации.

Методы и инструменты решения. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались инструменты имитационного моделирования (OMNET++), градиентный бустинг деревьев принятия решений, фреймворк Qt, языки программирования C++, python3, библиотека CatBoost.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методы и алгоритмы взаимодействия программного обеспечения сетевой маршрутизации при построении и восстановлении маршрутов связи в ДСПД, которые отличаются от существующих решений совмещением реактивной и проактивной схем обмена сообщениями, совместным использованием адресных и широковещательных информационных ответов, что позволяет повысить значение коэффициента доставки сетевых пакетов и уменьшить сквозную задержку при их передаче по найденным маршрутам, а также обеспечивает возможность построения и поддержки квазипараллельных путей передачи трафика.

2. Новый метод оценки маршрутов передачи данных, формируемых в процессе взаимодействия программного обеспечения сетевых узлов, отличающийся от стандартных решений возможностью динамической фильтрации и упорядочивания информационных сообщений на промежуточных узлах сети, что позволяет повысить эффективность функционирования ДСПД за счет снижения суммарного объема служебного трафика между программным обеспечением сетевой маршрутизации отдельных абонентов.

3. Метод балансировки потоков данных в ДСПД, позволяющий снизить сквозную задержку доставки сообщений и отличающийся децентрализованным взаимодействием

сетевых узлов при распределении пакетов трафика по квазипараллельным маршрутам с учётом значений их динамических метрик, собираемых при информационном обмене между программным обеспечением сетевой маршрутизации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует требованиям специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей», а именно пункту 3 – Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, языки и программные инструменты организации взаимодействия программ и программных систем.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9th and 10th IEEE Mediterranean Conference of Embedded Computing (MECO) (Будва, Черногория, 2020, 2021, Scopus, WoS), 21th International scientific and technical conference «Automation-2022» (Сочи, 2022, Scopus), XVII и XVIII Международная научно-техническая конференция «Recognition-2023» (Курск, 2021, 2023), Международном конгрессе «Интеллектуальные системы и информационные технологии (IS&IT-2023)» (Дивноморское, 2023), Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные и информационные системы (Интеллект)» (Тула, 2019, 2021), научном семинаре, проводимом ТулГУ, ТГПУ и ОИЯИ (г. Тула, 2022), II-ой межрегиональной научной конференции «Промышленная революция 4.0: Взгляд молодёжи».

Результаты диссертационной работы были включены в отчёт по НИР «Разработка протокола верхнего уровня для организации связи в беспроводных децентрализованных сетях передачи данных», выполняемой в рамках гранта правительства Тульской области в сфере науки и техники (договор ДС/286 от 25.10.2021).

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объёма исследований при разработке методов и алгоритмов взаимодействия ПОСМ мобильных узлов для решения задач маршрутизации в ДСПД, создании программного обеспечения для исследования разработанных методов и алгоритмов и проведении их экспериментальной проверки.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационного исследования (4 – К1, 5 – К2), 3 публикации в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science, 9 публикаций в журналах и материалах конференций, индексируемых РИНЦ. На разработанное в рамках диссертационной работе программное обеспечение было получено 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 175 страницах печатного текста, списка использованной научной литературы, включающего 139 наименований научных трудов на русском и иностранных языках и 2 приложений, и содержит 67 рисунков, 13 таблиц и 33 формулы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении дана общая характеристика работы, рассмотрена ее актуальность, обоснованы цели, задачи, научная новизна, представлены основные практические и теоретические результаты работы, положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и публикации результатов, структура и объём диссертации.

В первой главе представлены результаты анализа современных методов, алгоритмов и протоколов взаимодействия сетевого программного обеспечения маршрутизации трафика, предназначенного для обнаружения и обслуживания маршрутов, их оценки и балансировки потоков данных по найденным путям.

По результатам проведенного анализа был сделан вывод, что за основу разрабатываемых методов и алгоритмов взаимодействия сетевого программного обеспечения маршрутизации трафика необходимо взять реактивный подход, поскольку он наиболее адаптирован под условия функционирования децентрализованных сетей передачи данных с высокой динамикой изменения топологии. При этом должны учитываться преимущества отдельных элементов проактивных методов, обеспечивающих снижение суммарных объемов служебного трафика.

В качестве обобщенного критерия эффективности передачи информации в ДСПД принято решение использовать метрику запаса времени сквозной задержки на передачу потока данных с учётом потерь пакетов $\text{Delay}_{\text{Reserve}}$, представляющую мультипликативную свёртку коэффициента доставки пакетов по сети (packet delivery ratio, PDR) и разницу между предельным $E2EDG_{\text{max}}$ и фактическим временем сквозной задержки доставки пакетов в потоке (end-to-end delay group, E2EDG):

$$\text{Delay}_{\text{Reserve}} = \text{PDR} * (E2EDG_{\text{max}} - E2EDG). \quad (1)$$

Полученные выводы являются основанием проведения дальнейшего исследования.

Во второй главе разработаны методы и алгоритмы взаимодействия между сетевым программным обеспечением отдельных узлов при решении задач маршрутизации, включая установление узлом соединения с сетью и его дальнейшее поддержание с формированием списка смежных абонентов, процедуры построения маршрутов связи между узлами, восстановления неисправных путей, метод оценки маршрутов передачи данных, формируемых в процессе взаимодействия ПОСМ, метод балансировки потоков трафика в ДСПД.

По результатам проведённого в первой главе анализа было установлено, что для достижения высоких показателей качества работы ДСПД требуется построение квазипараллельных маршрутов передачи данных и балансировка трафика между ними. Для решения этой задачи в диссертации предлагается использовать новые методы взаимодействия программного обеспечения маршрутизации сетевых узлов, которое обеспечивает информационный обмен о состоянии топологии сети, определение характеристик маршрутов связи на основе полученной информации и построение новых путей передачи данных. Для этого были предложены следующие методы:

- метод взаимодействия ПОСМ при установлении и дальнейшем поддержании соединения с сетью;
- метод взаимодействия ПОСМ при построении квазипараллельных маршрутов связи между целевыми узлами;
- метод взаимодействия ПОСМ при восстановлении маршрутов передачи данных;
- метод балансировки потоков данных по маршрутам в ДСПД на основе децентрализованного взаимодействия сетевых узлов при распределении пакетов трафика по квазипараллельным маршрутам.

Общая схема метода взаимодействия ПОСМ при установлении и дальнейшем поддержании соединения абонентов с сетью представлена на рис. 1. Он отличается от известных тем, что широковещательный запрос на установление соединения совмещается с предыдущими ответами на запросы других узлов в одном служебном сообщении, которое содержит информацию о ДХКС и ДХСУ известных смежных абонентов первого порядка, и обеспечивает формирование графа соседних узлов первого и второго порядков, а также сбор информации, необходимой для построения и восстановления маршрутов передачи данных.

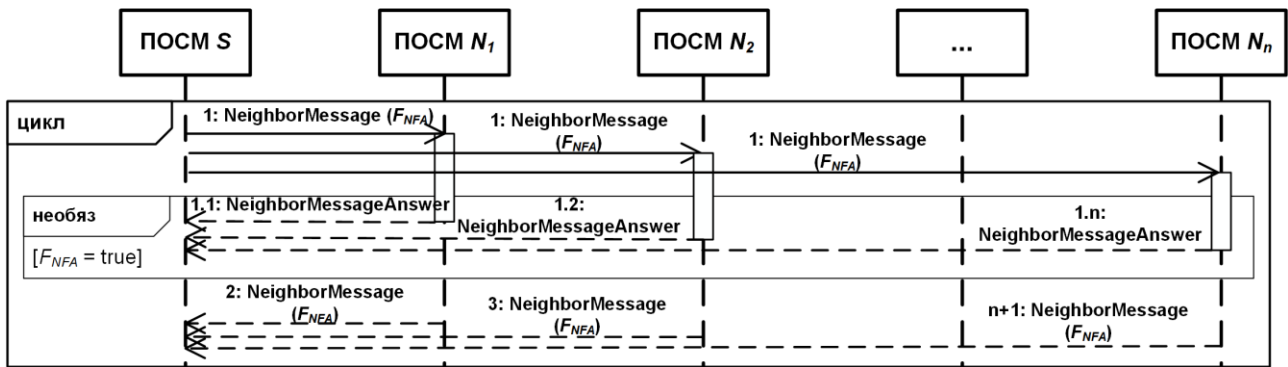


Рис. 1 – Схема метода взаимодействия ПОСМ при установлении соединения с сетью

Считается, что абонентское устройство установило соединение с сетью, если у него имеется хотя бы один актуальный соседний узел. Граф смежных абонентов (рис. 2) позволяет оперативно передать данные целевому соседнему абоненту напрямую без процедуры построения маршрута. Согласно методу, ПОСМ узла S периодически через равные промежутки времени посылает широковещательные сообщения *NeighborMessage* другим абонентам с информацией о соседних узлах первого порядка, с которыми установлено соединение, и его ДХСУ и ДХКС. При этом S может запросить подтверждение *NeighborMessageAnswer* от каждого узла-получателя, установив флаг F_{NFA} . Соединение с узлом S считается установленным, если от него в течение заданного периода времени поступали сообщения *NeighborMessage* или *NeighborMessageAnswer*.

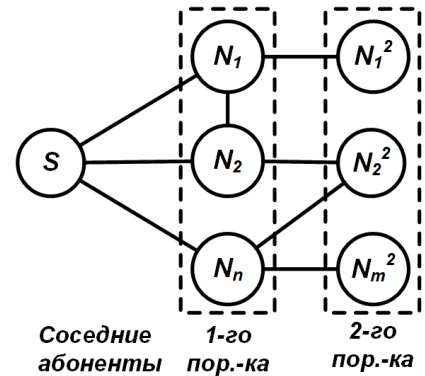


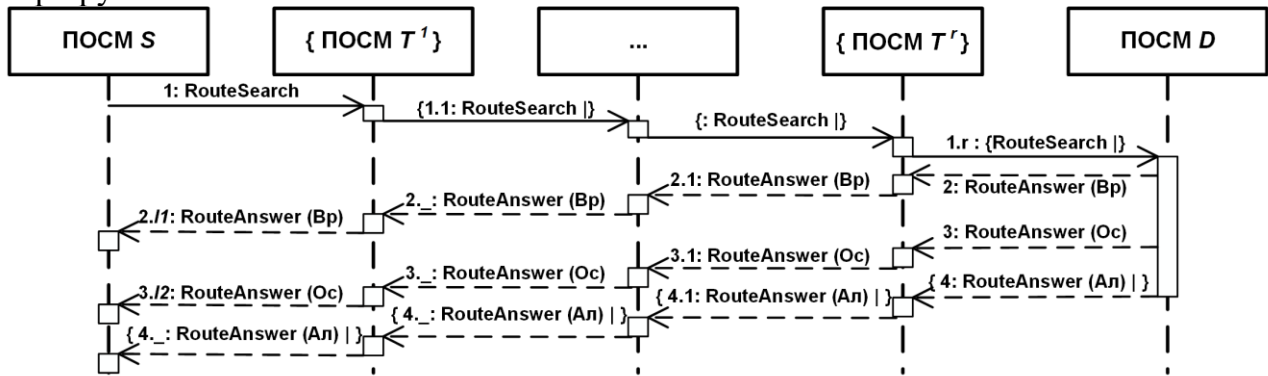
Рис. 2 – Граф смежных узлов

Для реализации предложенного метода на практике был разработан специальный алгоритм. На его вход поступает текущая информация о соседних узлах первого порядка. На выходе алгоритма формируется скорректированный граф соседних абонентов, который обеспечивает передачу данных смежных узлов без необходимости формирования путей передачи данных, предоставляет данные о динамических характеристиках узлов и ассоциированных с ними каналов для формирования частных маршрутных метрик.

Метод взаимодействия сетевого программного обеспечения при построении квазипараллельных маршрутов связи между целевыми абонентами представлен на рис. 3. Для квазипараллельных путей допустимо, но не обязательно наличие общих промежуточных узлов. Метод отличается от известных тем, что для накопления и передачи частных метрик формируемых путей выполняется единый реактивный запрос от узла-инициатора с последующей цепочкой информационных ответов от промежуточных узлов, используемых для обнаружения основного маршрута, которая совмещается с широковещательными рассылками, применяемыми для построения альтернативных путей передачи данных, что обеспечивает формирование квазипараллельных маршрутов, позволяет снизить сквозную задержку передачи данных и повысить значение коэффициента доставки пакетов.

ПОСМ узла-инициатора S построения маршрутов к узлу D производит рассылку запроса *RouteSearch* соседним абонентам. В пакете производится накопление адресов промежуточных узлов между S и D , которые образуют формируемый маршрут, также его частных метрик X . При получении запроса ПОСМ промежуточных абонентов добавляют в пакет собственный адрес в формируемый маршрут и обновляют его частные показатели. Каждый узел T , впервые принявший запрос, ретранслирует его соседним

абонентам. RouteSearch сохраняются в список запросов для пар $\langle S, D \rangle$ и сортируются по показателям, вычисляемых при помощи функции $F_S(X)$. $F_S(X)$ представляет функцию вычисления комплексной метрики оценки маршрута. Рассылка прекращается при достижении сообщением узла D , что завершает первый этап взаимодействия ПОСМ, в результате которого должен быть сформирован ациклический граф переходов от S к D . В итоге, каждый промежуточный абонент имеет несколько частично сформированных маршрутов связи к D .



$\{ \text{ПОСМ } T^1 \}$ - множество ПОСМ сетевой промежуточных абонентов между S и D , $|\{ \text{ПОСМ } T^i \} \{ \text{ПОСМ } T^j \}| \geq 0, i \neq j$
 $\{ \text{RouteMess} \}$ - множество сообщений типа RouteMess, пересылаемые между 2-я множествами узлов
 (Bp), (Oc), (An) - флаги временного, основного и альтернативных маршрутов

Рис. 3 – Схема метода взаимодействия ПОСМ при построении квазипараллельных маршрутов связи

На втором этапе производится обмен пакетами RouteAnswer для построения основного и альтернативных маршрутов связи в направлении от S к D . После получения первого пакета RouteSearch ПОСМ абонента D извлекает из него маршрут, помечает временным и отправляет его абоненту S . Временный маршрут может быть использован для передачи данных до того, как будут сформированы основной и альтернативные пути. Через заданный промежуток времени ПОСМ абонента D отправляет RouteAnswer узлу T' , с которого был принят лучший частично-сформированный маршрут по метрике, вычисленной при помощи функции $F_S(X)$. Сетевое программное обеспечение каждого из последующих абонентов T' повторяют процесс отправки, пока RouteAnswer не достигнет узла S . Через определённый интервал времени ПОСМ абонента D отправляет широковещательные пакеты RouteAnswer узлу S , при достижении которых оказываются сформированными альтернативные маршруты, которые могут частично пересекаться с основным (рис. 4).

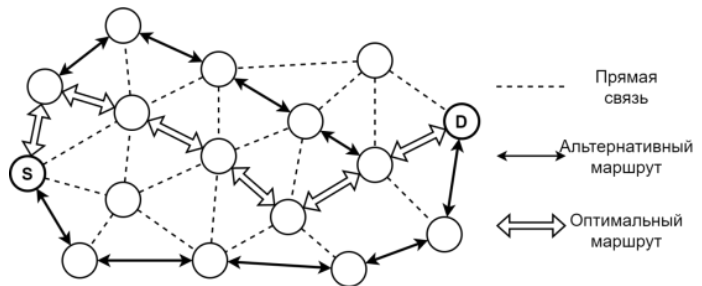


Рис. 4 – Пример маршрутов связи, построенных на втором этапе взаимодействия ПОСМ

Для практической реализации предложенного метода были разработаны алгоритмы взаимодействия ПО узлов при осуществлении запроса маршрута и возврата квазипараллельных путей абоненту-инициатору. Результатом первого алгоритма (рис. 5) является сформированный децентрализованный граф переходов между абонентами S и D . В ходе выполнения второго алгоритма (рис. 6) ПОСМ, взаимодействуя между собой, производят построение временного, основного и альтернативных маршрутов связи. При описании алгоритмов использовались следующие условные обозначения: RS_{ID} – идентификатор сессии поиска маршрута, T – промежуточный узел, $\{T\}$ – множество промежуточных узлов, образующих маршрут, INPUT и OUTPUT – множества

входящих запросов RouteSearch и исходящих RouteAnswer. Итогом взаимодействия ПО узлов по описанной схеме является основной маршрут, обеспечивающий повышение надёжности передачи данных, а также набор квазипараллельных маршрутов, которые могут быть использованы для балансировки потоков трафика, передаваемого между узлами сети, что позволяет снизить сквозную задержку их доставки.

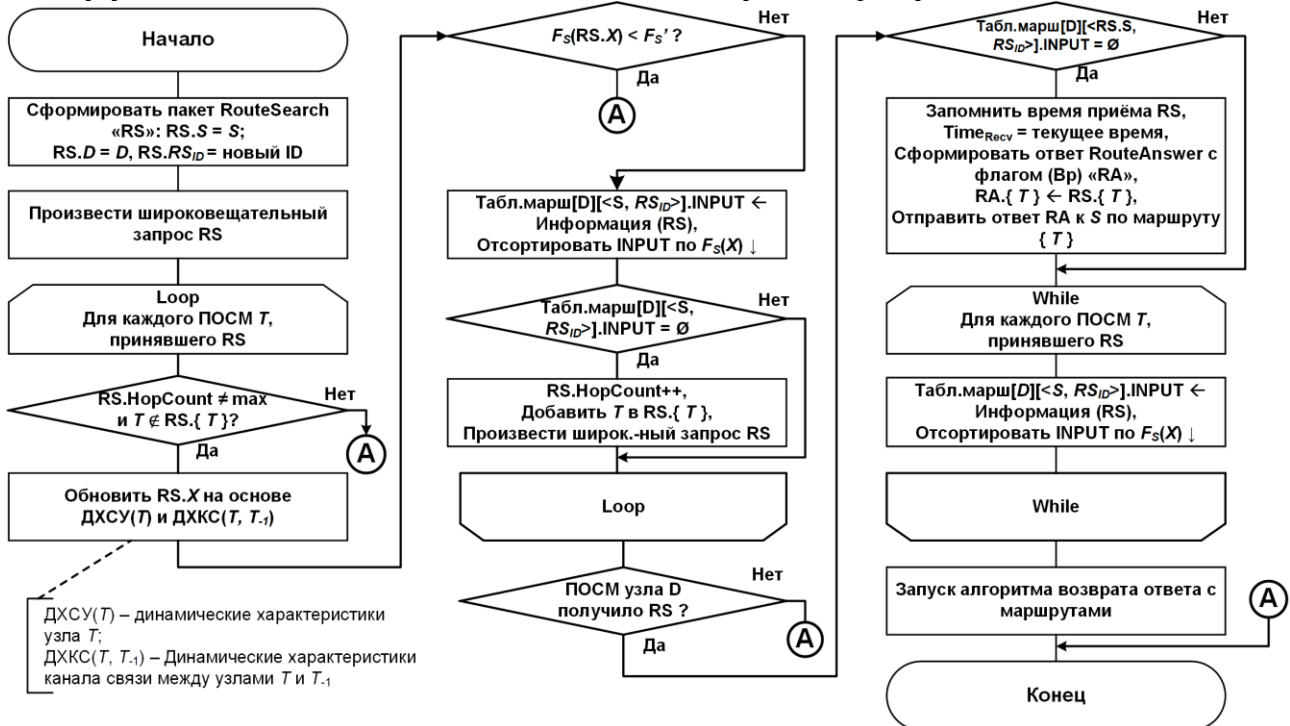


Рис. 5 – Алгоритм взаимодействия ПОСМ при запросе маршрута

В процессе взаимодействия сетевого программного обеспечения требовалось производить динамическую фильтрацию и упорядочивания информационных сообщений, содержащих формируемые маршруты. Для этого был предложен новый метод оценки маршрутов передачи данных, формируемых в процессе взаимодействия ПОСМ, на основе частных путевых метрик X , позволяющий снизить суммарный объем служебных сообщений при формировании маршрутов, и таким образом, повысить эффективность передачи данных. Метод включает последовательное выполнение следующих этапов:

1. При обработке информационных сообщений (RouteSearch, RouteAnswer) производится обновление содержащихся в них частных маршрутных метрик X на основе ДХСУ принявшего их абонента и ДХКС ассоциированного канала. Среди используемых частных критериев можно выделить среднюю и максимальную загрузки каналов связи, средний и максимальный размеры очереди пакетов на транзитных абонентах, среднюю и максимальную задержки пакета при прохождении через узел маршрута, коэффициент доставки пакетов на каналах связи.

2. В качестве оцениваемой маршрутной метрики выбрана взвешенная мультипликативная свёртка значений коэффициента доставки данных (packed delivered ratio, PDR) и сквозной задержки передачи пакета (end-to-end delay, E2ED), делённой на нормировочный коэффициент $E2ED_{norm}$, представляющий оценочное значение максимального времени доставки пакета:

$$F_S = \frac{PDR^{K_{S1}}}{\left(\frac{E2ED}{E2ED_{norm}} \right)^{K_{S2}}}, \quad (2)$$

где K_{S1} и K_{S2} – значения весовых коэффициентов, устанавливаемых на этапе сбора выборки для обучения моделей в зависимости от того, какой приоритет оператор сети отдаёт показателям PDR и E2ED. Ввиду невозможности непосредственного измерения значений PDR и E2ED производится оценка значения F_S при помощи функции $F_S(X)$ на основе алгоритма градиентного бустинга (ГБ) деревьев принятия решений.

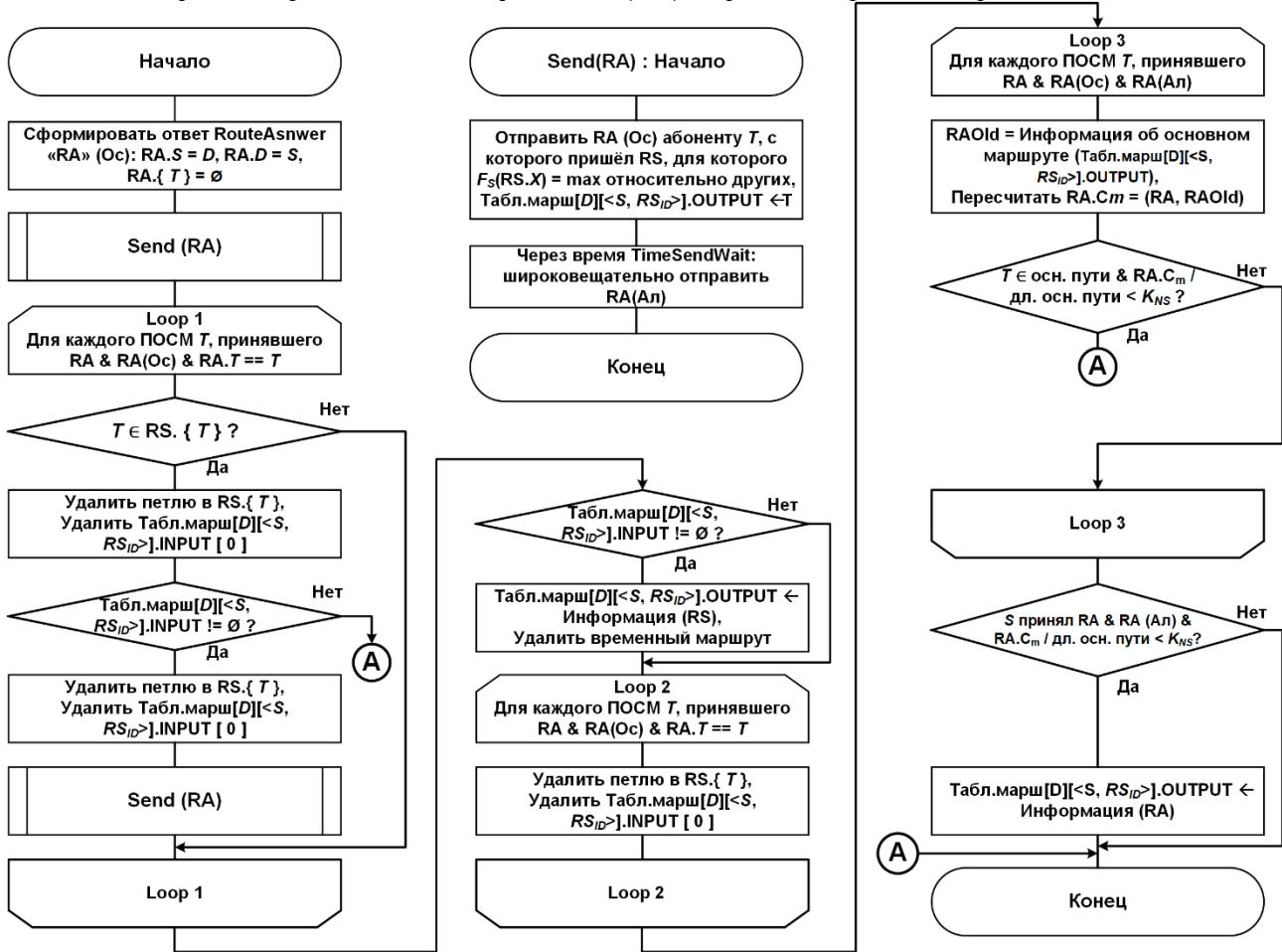


Рис. 6 – Алгоритм взаимодействия ПОСМ при возврате маршрутов связи

Для минимизации ошибки прогнозирования производится вычисление не отдельных составляющих свёртки, а её непосредственное значение F_S . Пусть имеется обучающий набор $\{X_i, y_i\}_{i=1}^n$, где X_i и y_i – вектор частных метрик и истинное значение прогнозируемой переменной соответственно, n – размер обучающей выборки. Для решения задачи прогнозирования вещественного значения производится построение композиции из k базовых функций $f_i(X)$ деревьев принятия решений:

$$F_k(X) = f_1(X) + f_2(X) + \dots + f_k(X). \quad (3)$$

где X – набор частных маршрутных метрик, $F_k(X)$ – композиция из k -функций деревьев принятия решений.

Каждая из последующих j -ых функций предназначена для компенсации ошибки $j-1$ предыдущих:

$$f_j(X) = \arg \min L(y, F_{j-1}(X)), \quad (4) \quad L(y, y') = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2, \quad (5)$$

$$F_{j-1}(X) = f_1(X) + f_2(X) + \dots + f_{j-1}(X), \quad (6)$$

где $L(y, y')$ – функция ошибки прогнозирования, y и y' – вектора истинных и спрогнозированных значений целевой переменной, $F_{j-1}(X)$ – композиция из $j-1$ функций. Тогда

функция оценки маршрута связи $F_S(X)$ является моделью $F_k(X)$ из k деревьев принятия решений.

3. Прерывание обработки сообщений производится в случае предельного значения обобщённой маршрутной метрики F_S' : $F_S < F_S'$. Значение F_S' определяется как свёртка предельно допустимых значений PDR (PDR') и E2ED (E2ED'):

$$F_S' = \frac{(\text{PDR}')^{K_{S1}}}{\left(\frac{\text{E2ED}'}{\text{E2ED}_{norm}}\right)^{K_{S2}}} \quad (7)$$

Предложенный в диссертации метод взаимодействия программного обеспечения узлов при восстановлении маршрутов связи предназначен для корректировки путей передачи трафика при возникновении разрывов на отдельных каналах связи между узлами (рис. 7). Он предполагает несколько вариантов восстановления маршрутов, среди которых имеются схемы с исключением, включением или заменой абонента в маршруте. Метод отличается от известных применением реактивного алгоритма взаимодействия узлов для восстановления маршрута в ближней зоне абонента-инициатора, что позволяет сократить время корректировки пути, сквозную задержку передачи данных, а также повысить коэффициент доставки пакетов данных.

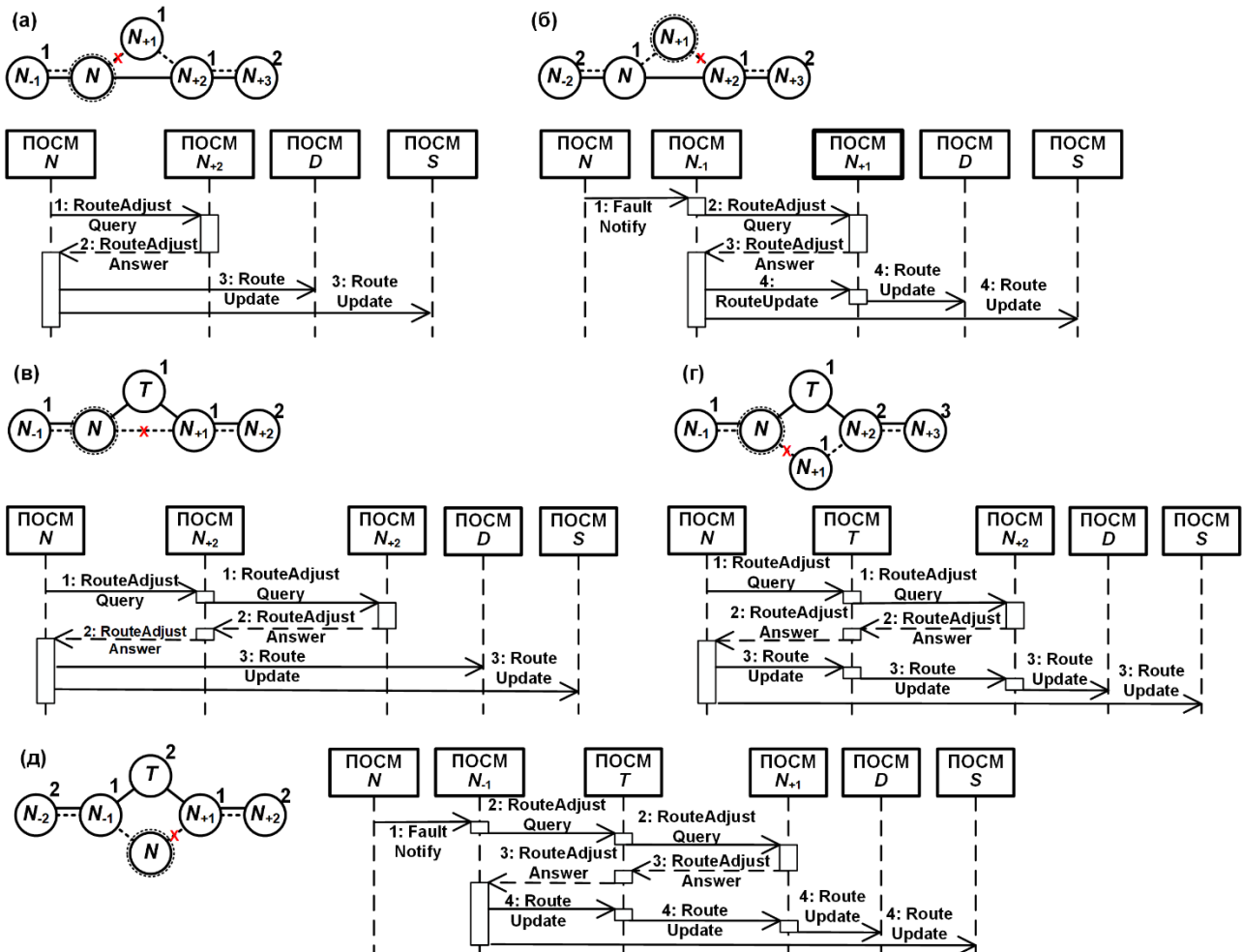


Рис. 7 – Схема метода взаимодействия ПОСМ при восстановлении маршрутов

Алгоритм, при помощи которого реализуется предложенный метод, представлен на рис. 8. За счёт того, что сетевое ПО хранит данные о ДХСУ соседних абонентов и ДХКС ассоциированных с ними каналов, которые накапливались в результате проактивного взаимодействия между ПОСМ на этапе поддержания соединения сетью, информационный обмен между узлами осуществляется исключительно в

непосредственной окрестности узла-инициатора восстановления маршрута (не более двух промежуточных звеньев). Это позволяет сократить время корректировки маршрута, и как следствие снизить сквозную задержку передачи пакетов данных, вызванную ожиданием восстановления пути.

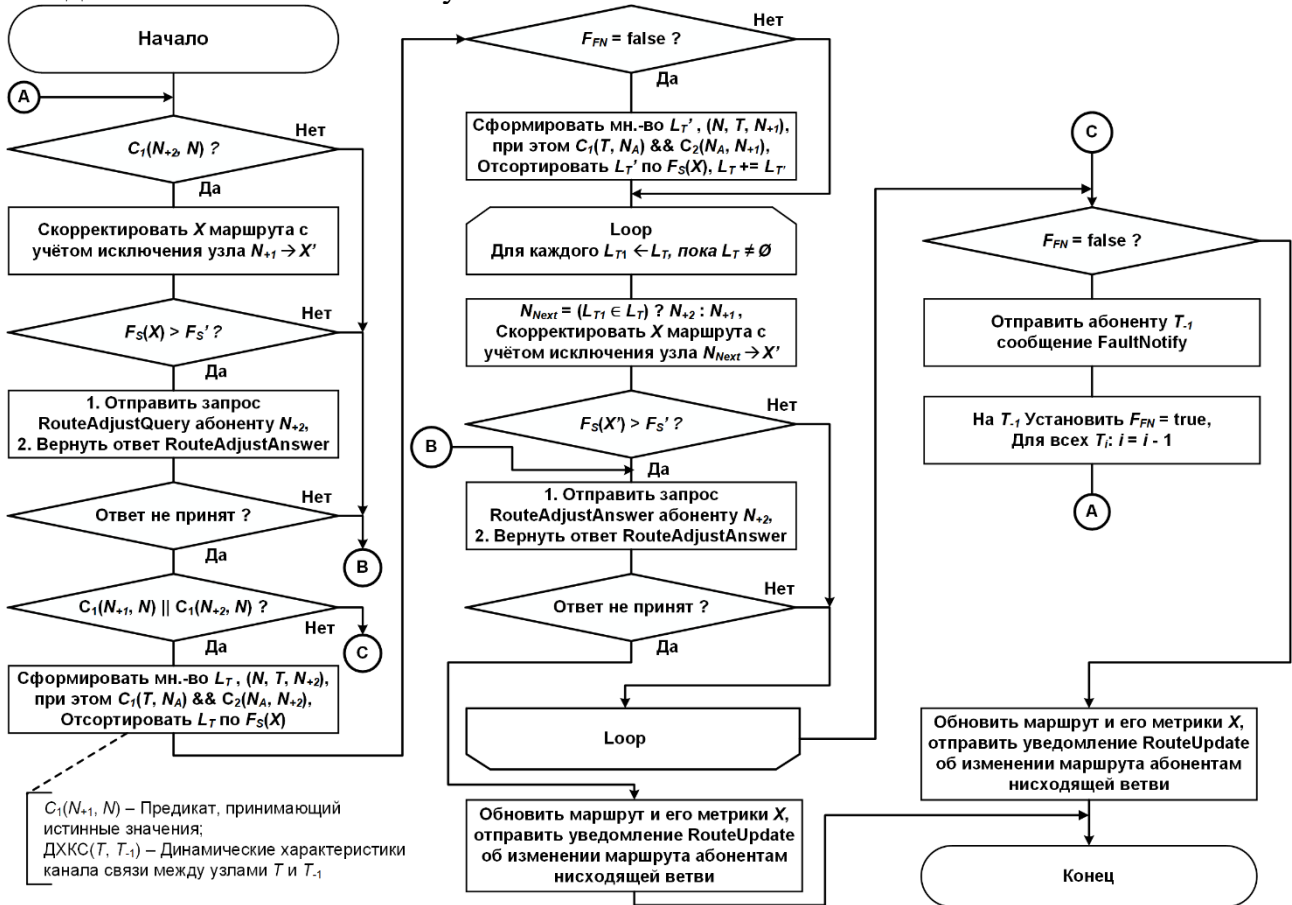


Рис. 8 – Алгоритм взаимодействия ПОСМ при восстановлении маршрутов связи

Для равномерного распределения нагрузки между сформированными квазипараллельными маршрутами предложен метод балансировки потоков данных в ДСПД, позволяющий снизить сквозную задержку доставки сообщений в случаях, когда стандартные подходы не обеспечивают построение параллельных путей. Он отличается от известных децентрализованным взаимодействием сетевых узлов при распределении пакетов трафика по квазипараллельным маршрутам с учётом значений их динамических метрик, собираемых при информационном обмене между программным обеспечением сетевой маршрутизации.

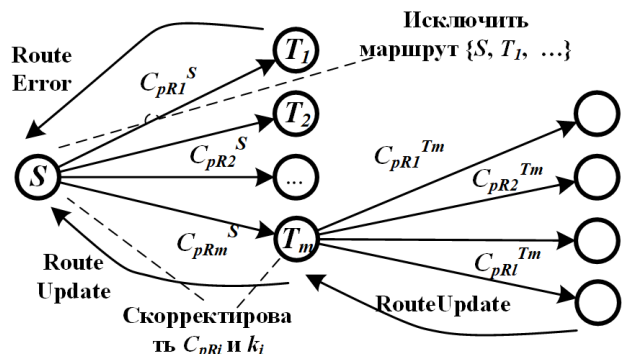


Рис. 9 – Схема метода балансировки

Метод (рис. 9) заключается в определении весов маршрутов на основе частных метрик, собранных на этапе взаимодействия ПОСМ при формировании путей, расчёте пропорций, в которых трафик будет распределён по квазипараллельным маршрутам, и в корректировке частных метрик при получении информационных уведомлений о восстановлении маршрута связи. При этом процесс балансировки выполняется программным обеспечением децентрализованно на каждом из узлов сети, у которых имеется две и более исходящие маршрутные ветви.

В качестве абсолютных значений весов маршрутов используется обобщённый критерий F_B , который аналогично метрике F_S является взвешенным произведением частных показателей PDR и E2ED, но взятых с иными весовыми коэффициентами K_{B1} и K_{B2} :

$$F_B = \frac{\text{PDR}^{K_{B1}}}{\left(\frac{\text{E2ED}}{\text{E2ED}_{norm}} \right)^{K_{B2}}}. \quad (8)$$

Для оценки весов маршрутов F_B используется функция $F_B(X)$, значения которой определяются с помощью процедуры градиентного бустинга деревьев принятия решений. Количество пакетов, отправляемых по каждой исходящей ветви, равняется:

$$C_{pR1} = C_{all} * k_1, C_{pR2} = C_{all} * k_2, \dots, C_{pRm} = C_{all} * k_m, \quad (9)$$

$$k_1 = F_B(X_{R1}) / S, k_2 = F_B(X_{R2}) / S, \dots, k_m = F_B(X_{Rm}) / S, \quad (10)$$

$$S = F_B(X_{R1}) + F_B(X_{R2}) + \dots + F_B(X_{Rm}), \quad (11)$$

где C_{all} – общее количество пакетов, которые отправляет промежуточный абонент или узел-источник по нескольким исходящим маршрутам, C_{pRi} , k_i – количество и доля пакетов, отправляемых по i -му исходящему маршруту, X_{Ri} – метрики i -го исходящего маршрута.

Таким образом, разработанные методы охватывают весь спектр взаимодействия программного обеспечения сетевой маршрутизации мобильных узлов ДСПД при решении задач подключения и поддержания соединения с сетью, формирования маршрутов связи и их обслуживания. Сформированные в результате взаимодействия правила маршрутизации используются для балансировки трафика при передаче данных по квазипараллельным маршрутам.

В третьей главе разработано программное средство для моделирования процессов взаимодействия сетевого программного обеспечения в различных сценариях работы беспроводных ДСПД, предложены архитектура программного обеспечения сетевой маршрутизации отдельных узлов ДСПД и протокол связи на основе описанных методов и алгоритмов, созданы программные модули для выполнения процедур сетевой маршрутизации, функционирующие в рамках разработанного программного средства.

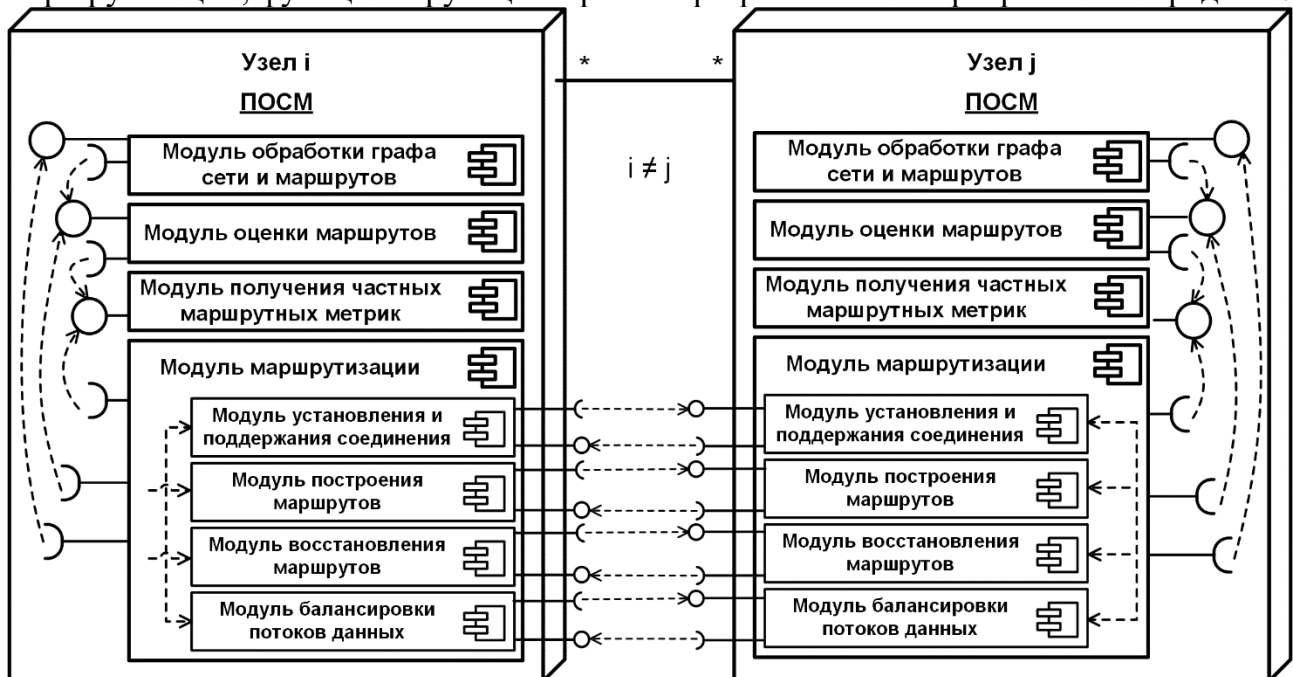


Рис. 10 – Архитектура программных модулей ПОСМ

Для интеграции предложенных методов и алгоритмов взаимодействия ПОСМ в рамках единого решения и их применения на практике была разработана архитектура программного обеспечения сетевой маршрутизации отдельных узлов ДСПД (рис. 10), включающая:

- модуль обработки графа сети и маршрутов хранит информацию о соседних абонентах, найденные маршруты и их частные метрики;
- модуль оценки маршрутов предназначен для вычисления значений функций $F_S(X)$ и $F_B(X)$;
- модуль получения маршрутных метрик реализует интерфейс, при помощи которого предоставляется информация о ДХКС и ДХСУ;
- модуль маршрутизации представляет собой программную реализацию разработанных в диссертации алгоритмов и методов взаимодействия ПОСМ маршрутизации.

На основе дискретно-событийного симулятора OMNET++ было разработано программное средство (рис. 11), позволяющее осуществлять моделирование взаимодействия сетевого программного обеспечения. Предложенные в диссертации методы и алгоритмы реализованы в виде протокола связи. Алгоритмы взаимодействия сетевого ПО объединены в отдельные процедуры. Разработаны форматы пакетов для взаимодействия между ПОСМ в рамках решения задач маршрутизации. На основе разработанных программного средства, протокола и архитектуры был создан прототип программного обеспечения сетевой маршрутизации.

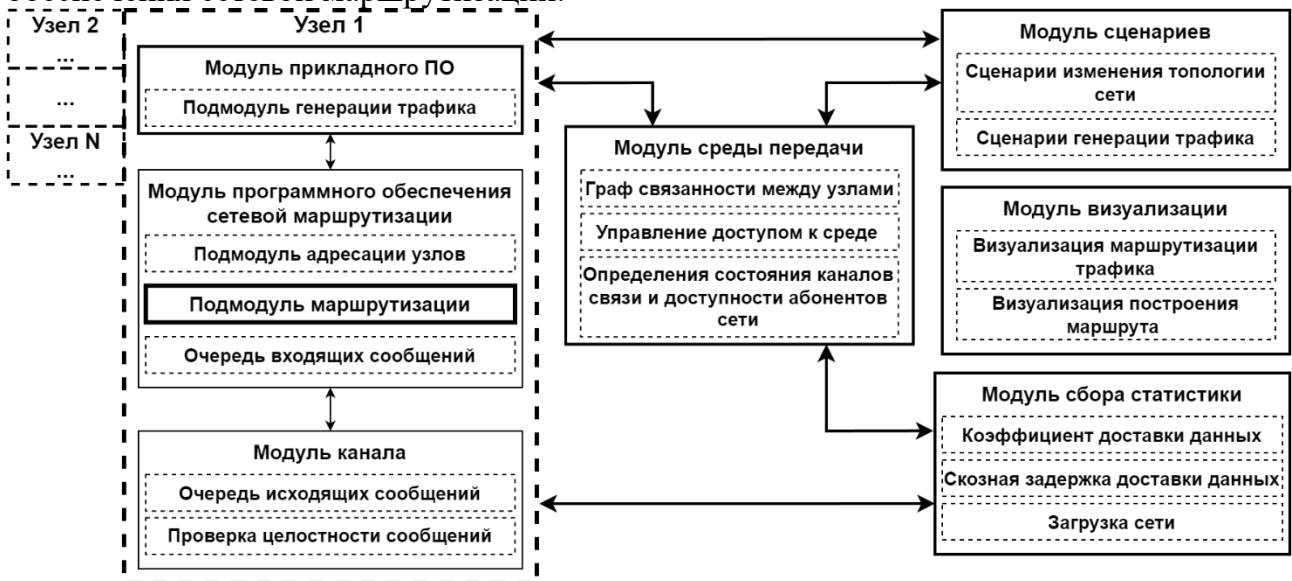


Рис. 11 – Структура программного средства

На разработанное в ходе выполнения диссертации программное обеспечение были получены четыре свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Четвёртая глава посвящена исследованию предложенных в работе методов и алгоритмов взаимодействия сетевого программного обеспечения и экспериментальному подтверждению, что их практическая реализация позволяет обеспечить улучшение эффективности передачи трафика в ДСПД в различных сценариях их функционирования.

Для оценки надёжности и задержек передачи данных в ДСПД предложенные методы и алгоритмы были реализованы в виде протокола маршрутизации прикладного уровня, характеристики функционирования которого сравнивались с соответствующими параметрами, полученными для стандартного протокола AOMDV. Выбор данной технологии обусловлен тем, что она является в настоящее время основной при построении и развертывании ДСПД в реальных режимах их работы. Известные модификации AOMDV существенных отличий от базовой версии протокола не имеют и

используются только в частных сценариях функционирования сетей. В качестве частных критериев эффективности передачи данных в ДСПД, по которым производилось сравнение протоколов, были выбраны показатели PDR и E2EDG. Они измерялись на основе имитационного моделирования средствами созданного программного средства:

- PDR (packet delivery ratio) – показатель надёжности сети передачи данных. Значение критерия показывает долю пакетов, которые достигли целевого абонента;
- E2EDG (E2ED group) – показатель производительности, представляет общее время передачи по квазипараллельным маршрутам группы пакетов в составе потока данных.

В проведённых экспериментах скорость передачи данных равна 64 кбит/с. Прикладной трафик между смежными абонентами составил 8 пакетов секунду, каждый из которых имел объём 255 кб. В контрольной передаче данных между двумя абонентами моделировались потоки данных по 255 пакетов. В качестве интегральной маршрутной метрики F_S , оцениваемой при помощи функции $F_S(X)$, использовано выражение (1). На основе функции $F_B(X)$ производилась оценка весов маршрутов согласно выражению (8). При этом весовые коэффициенты частных показателей эффективности передачи данных по текущему маршруту определялись исходя из приоритета повышения надёжности или снижения сквозной задержки доставки данных при функционировании сети.

Передача данных моделировалась от узла-источника к целевому узлу, между которыми при помощи промежуточных абонентов может быть построено несколько квазипараллельных маршрутов. Применение метода оценки маршрутов позволило сократить в среднем на 5,63% объём служебных сообщений при взаимодействии ПОСМ во время построения и восстановления маршрутов передачи данных. При этом вероятность построения альтернативных параллельных путей составляла от 3% до 9%, ввиду чего отсутствовала возможность произвести балансировку трафика стандартными методами. Первый сценарий с динамическим изменением топологии сети предполагал относительно низкую скорость её изменения. Результаты моделирования представлены на рис. 12 и в табл. 1. Было получено улучшение значений как частных, так и интегральных критериев эффективности передачи данных по сети на основе авторского решения относительно AOMDV. Таким образом, применение методов взаимодействия ПОСМ при построении и восстановлении квазипараллельных маршрутов позволяет повысить в среднем интегральный показатель эффективности $\text{Delay}_{\text{Reserve}}$ в 1,23 раз, PDR в 1,17 раз, E2EDG в 1,17 раз. В сценарии, где исключалась возможность построения параллельным путём, но обеспечивалось построение квазипараллельных маршрутов – $\text{Delay}_{\text{Reserve}}$ улучшен в 1,51 раз, PDR в 1,16 раз, E2EDG – в 2,36 раз.

Таблица 1 – Сравнение значений частных и интегральных критериев эффективности передачи данных в ДСПД при использовании авторского решения с протоколом AOMDV в сценариях с низкой динамикой изменения топологии

Применяемый метод	$\text{Delay}_{\text{Reserve}}^*$	PDR	E2EDG
Взаимодействия ПОСМ при построении квазипараллельных маршрутов	1,17	1,13	1,07
Взаимодействия ПОСМ при восстановлении маршрутов	1,05	1,04	1,09
Одновременное применение двух методов	1,23	1,17	1,17
Метод балансировка потоков данных	1,23	0,99	2,01
Одновременное применение трёх методов	1,51	1,16	2,36
* $\text{Delay}_{\text{Reserve}}$ – запас времени на передачу потока данных, PDR (packet delivery ratio – коэффициент доставки пакетов, E2EDG (end-to-end delay group – сквозная задержка)			

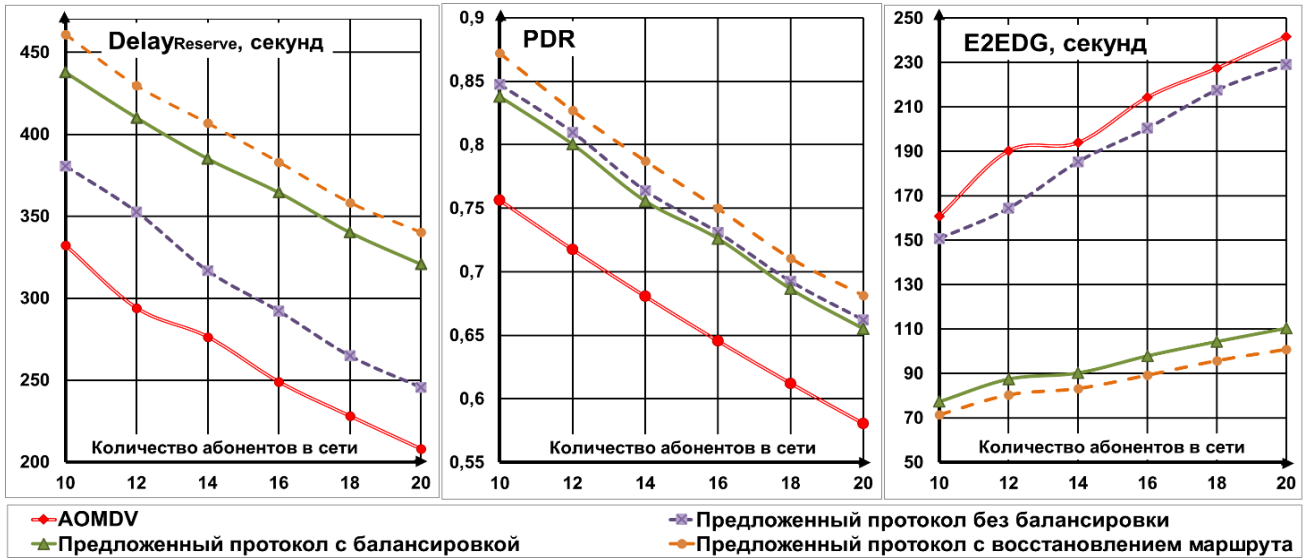


Рис. 12 – Результаты моделирования для сетей с низкой динамикой изменения топологии

Во втором сценарии ДСПД имеет высокую динамику изменения топологии вследствие задания более высокой скорости взаимного перемещения абонентов друг относительно друга. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 13 и в табл. 2. В данном исследовании было достигнуто более выраженное улучшение значений маршрутных метрик: Эффективность была повышена в 1,39 раз, PDR в 1,32 раз, а E2EDG снижена в 1,16 раз, причем дополнительное использование метода балансировки трафика позволило повысить эффективность в 1,8 раз, PDR в 1,31 раз, а E2EDG снизить – в 2,43 раз.

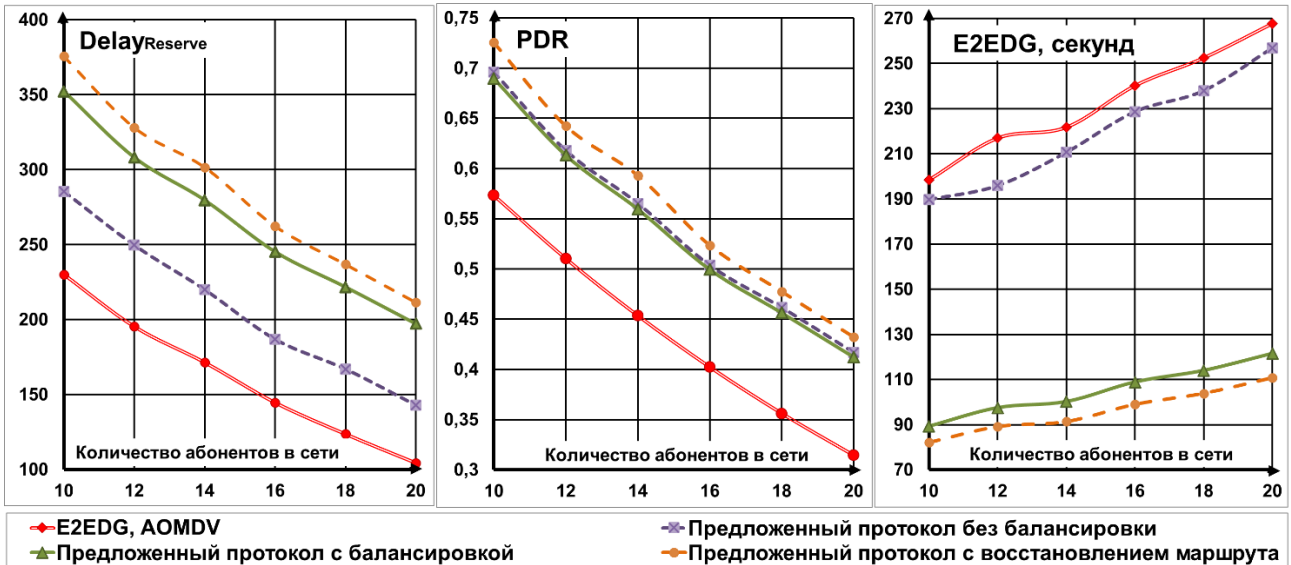


Рис. 13 – Результаты моделирования для сетей с высокой динамикой изменения топологии
Таблица 2 – Сравнение значений частных и интегрального критериев эффективности передачи данных в ДСПД при использовании авторского решения с протоколом AOMDV в сценариях с высокой динамикой изменения топологии

Применяемый метод	Delay _{Reserve}	PDR	E2EDG
Взаимодействия ПОСМ при построении квазипараллельных маршрутов	1,30	1,26	1,06
Взаимодействия ПОСМ при восстановлении маршрутов	1,07	1,05	1,10
Одновременное применение двух методов	1,39	1,32	1,16
Метод балансировка потоков данных	1,29	0,99	2,09
Одновременное применение трёх методов	1,80	1,31	2,43

Таким образом, предложенные методы и алгоритмы взаимодействия программного обеспечения сетевой маршрутизации позволяют повысить эффективность процесса обмена данными между абонентами в ДСПД, снизить сквозную задержку и повысить коэффициент доставки сетевых пакетов. Применяемая балансировка трафика способствует разгрузке каналов связи, что позволяет увеличить пропускную способность сети. Имитационное моделирование подтвердило, что разработанные методы и алгоритмы позволяют сократить сквозную задержку передачи данных. При маршрутизации не требуется перераспределять нагрузку между оставшимися доступными маршрутами, поскольку производится корректировка текущего пути. В итоге можно сделать вывод, что предложенные в работе методы и алгоритмы взаимодействия сетевого ПО позволяют обеспечить повышение эффективности передачи данных в децентрализованных сетях связи за счёт разработки новых методов организации взаимодействия программного обеспечения сетевой маршрутизации узлов при построении многопутевых маршрутов передачи данных.

В заключении представлены итоги выполненного исследования, приведены рекомендации, и описаны перспективы дальнейших исследований по теме диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе выполнения диссертационной работы удалось повысить эффективность передачи данных в беспроводных децентрализованных сетях за счет создания новых методов и алгоритмов организации взаимодействия сетевого программного обеспечения отдельных узлов при решении задач маршрутизации, и таким образом достигнуть цели исследования. В диссертации были получены следующие результаты:

1. Предложены методы и алгоритмы взаимодействия программного обеспечения сетевой маршрутизации при построении и восстановлении маршрутов связи в ДСПД, которые отличаются от существующих решений совмещением реактивной и проактивной схем обмена сообщениями, совместным использованием адресных и широковещательных информационных ответов, что позволяет повысить значение коэффициента доставки сетевых пакетов и уменьшить сквозную задержку при их передаче по найденным путям, а также обеспечивает возможность построения и поддержки квазипараллельных маршрутов передачи трафика.

2. Предложен новый метод оценки маршрутов передачи данных, формируемых в процессе взаимодействия программного обеспечения сетевых узлов и отличающийся от стандартных решений возможностью динамической фильтрации и упорядочивания информационных сообщений на промежуточных узлах сети, что позволяет повысить эффективность функционирования ДСПД за счет снижения суммарного объема служебного трафика между программным обеспечением сетевой маршрутизации отдельных абонентов.

3. Предложен метод балансировки потоков данных в ДСПД, позволяющий снизить сквозную задержку доставки сообщений и отличающийся децентрализованным взаимодействием сетевых узлов при распределении пакетов трафика по квазипараллельным маршрутам с учётом их динамических метрик, собираемых при информационном обмене между программным обеспечением сетевой маршрутизации.

4. Реализовано программное средство, которое позволяет проводить моделирование процессов функционирования сети в различных сценариях работы и предоставляет возможность исследовать, отлаживать и выполнять оценку предложенных методов и алгоритмов взаимодействия сетевого программного обеспечения узлов ДСПД.

5. Предложена архитектура программного обеспечения сетевой маршрутизации отдельных узлов ДСПД, обеспечивающая интеграцию разработанных методов и алгоритмов взаимодействия ПО в рамках единого решения и их применение на практике.

6. Предложенные в диссертации методы и алгоритмы реализованы в виде протокола связи, на основе которого созданы программные модули для выполнения процедур сетевой маршрутизации, функционирующие в рамках разработанного программного средства.

7. Проведено имитационное моделирование, которое показало, что применение на практике предложенных в диссертации методов и алгоритмов обеспечения взаимодействия программного обеспечения сетевой маршрутизации позволяет повысить коэффициент доставки пакетов в среднем в 1,24 раза, снизить сквозную задержку передачи данных в среднем в 1,17 раз относительно стандартных технологий организации ДСПД, и таким образом, повысить эффективность функционирования сети по критерию запаса времени на передачу пакетов трафика в составе потока в 1,31 раза. В тоже время, применение метода балансировки трафика по квазипараллельным маршрутам позволяет повысить коэффициент доставки пакетов в 1,37 раз, снизить сквозную задержку передачи контрольного потока данных в 2,4 раза и, таким образом, дополнительно повысить эффективность передачи потока данных в 1,7. При этом применения предложенных методов организации взаимодействия программного обеспечения узлов в ДСПД позволило сократить объем служебного трафика в среднем на 5,63% во время работы сети.

8. Результаты диссертационной работы были внедрены в деятельность ООО «Дипвью Групп», ООО «АДВЕРТ-ПРО», а также в учебный процесс кафедры «Вычислительная техника» ТулГУ при изучении дисциплин «Сетевое программирование», «Проектирование и тестирование программного обеспечения», «Сетевое программирование и протоколы передачи данных».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах Web of Science и Scopus

1. Novikov A.S., Ivutin A.N., Voloshko A.G., Pestin M.S. Method for optimizing ad-hoc networks communication protocol parameter values // 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Proceedings. – 8-11 June 2020, Budva, Montenegro – IEEE, 2020. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134154.

2. Pestin M.S., Novikov A.S., Ivutin A.N., Voloshko A.G. Multicriteria problem of optimization of data flows in heterogeneous information systems // 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), – IEEE, 2021, с. 234-237. DOI: 10.1109/MECO52532.2021.9460269.

3. Pestin M.S., Novikov A.S. Protocol for Multipath Routing of Traffic in Wireless Ad-Hoc Networks Based on the Status of Channels and Network Nodes // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Proceeding. 2022. С. 553-558. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896315.

В изданиях, включенных в перечень ВАК РФ по специальности диссертации

4. Хохлов Н.И., Ларин Д.В., Ларин А.В., Ивутин А.Н., Новиков А.С., Пестин М.С. Исследование протокола маршрутизации беспроводной децентрализованной самоорганизующейся сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки (К2). Вупуск 6. Изд-во: ТулГУ, Тула, 2019, с. 131-144.

5. Новиков А. С., Пестин М. С. Программное обеспечение для настройки протоколов верхнего уровня ad-hoc сетей // Прикладная информатика (К1). 2020. Т. 15. № 3. С. 60–74. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-3-60-74.

6. Новиков А.С., Пестин М.С. Распределённая маршрутизация трафика в беспроводных децентрализованных самоорганизующихся сетях связи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки (К2). 2021. № 5. С. 149-154.

7. Пестин М.С., Новиков А.С. Алгоритм многопутевой маршрутизации трафика в MANET сетях на основе анализа пропускной способности каналов связи // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета (К2). 2022. № 80. С. 84-93. DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-84-93.

8. Пестин М. С., Новиков А. С. Имитационная модель беспроводной ad-hoc сети для исследования алгоритмов маршрутизации трафика // Прикладная информатика (К1). 2022. Т. 17. № 4. С. 75–86. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-75-86.

9. Пестин М.С. Методы машинного обучения в задачах построения маршрутов связи в беспроводных ad-hoc- сетях передачи данных // Известия Тульского государственного университета. Технические науки (К2). 2022. № 8. С. 121-127. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-121-128.

10. Пестин М.С., Новиков А.С. Взаимодействие абонентов MANET при установлении и поддержании соединения абонентов с сетью // Известия Тульского государственного университета. Технические науки (К2). 2024. № 1. С. 164-170.

11. Ивутин А.Н., Новиков А.С., Пестин М.С., Волошко А.Г. Децентрализованные протокол организации связи в подразделениях аварийно-спасательных служб // Информатика и автоматизация (К1), Санкт-Петербург. 2024. Том. 23. №3. С. 727-765. DOI: 10.15622/ia.23.3.4.

12. Новиков А. С., Ивутин А. Н., Пестин М. С. Алгоритм маршрутизации для обеспечения быстрого восстановления связи при обрывах маршрутов в сетях MANET // Системы управления, связи и безопасности (К1). 2024. № 2. С. 14-42. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-014-042.

В прочих изданиях

13. Хохлов Н.И., Ивутин А.Н., Новиков А.С., Подчуфаров Ю.Б., Ларин Д.В., Пестин М.С. Протокол организации децентрализованной беспроводной сети связи для обеспечения взаимодействия группы интеллектуальных мобильных роботов // Изв. вузов. Приборостроение (К1). 2020. Т. 63, № 12. С. 1081—1093. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1081-1093.

Свидетельства об интеллектуальной собственности

14. Новиков А.С., Пестин М.С. Программа для определения оптимальных значений параметров протоколов верхнего уровня в ad-hoc сетях // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020663199 от 23.10.2020. Заявка № 2020662098 от 12.10.2020.

15. Новиков А.С., Пестин М.С. Программа для исследования характеристик протоколов маршрутизации в беспроводных децентрализованных сетях связи // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022612832 от 28.02.2022. Заявка № 2022611714 от 09.02.2022.

16. Пестин М. С., Новиков А. С. Программное обеспечение для моделирования взаимного пространственного перемещения отдельных узлов в беспроводных децентрализованных сетях связи // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022663501 от 15.07.2022. Заявка №2022662776 от 06.07.2022.

17. Пестин М.С., Новиков А. С. Программное обеспечение для маршрутизации трафика в беспроводных децентрализованных сетях связи // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022663502 от 15.07.2022. Заявка № 2022662775 от 06.07.2022.

Подписано в печать 25.12.2024

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага офсетная

Усл. печ. л. 1,7

Тираж 100 экз. Заказ 009а

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95