

А.Н. Ивутин, А.С. Новиков, М.С. Пестин, А.Г. Волошко  
**ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ ПРОТОКОЛ ОРГАНИЗАЦИИ  
УСТОЙЧИВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АБОНЕНТОВ В СЕТЯХ  
С ВЫСОКОЙ ДИНАМИКОЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТОПОЛОГИИ**

*Ивутин А.Н., Новиков А.С., Пестин М.С., Волошко А.Г. Децентрализованный протокол организации устойчивого взаимодействия абонентов в сетях с высокой динамикой изменения топологии.*

**Аннотация.** Аварийным службам часто приходится проводить спасательные и ликвидационные работы в условиях отсутствия централизованной связи. Невозможность обеспечения стабильной коммуникации между членами спасательного подразделения существенно снижает качество проведения работ. При этом в современных реалиях под стабильной коммуникацией понимается не только голосовой обмен, который может быть обеспечен коротковолновыми радиопередатчиками, но и интенсивный обмен большими объемами трафика. Применение стандартных решений на основе типового сетевого оборудования (Wi-Fi, спутниковая связь и др.) и существующих алгоритмов обеспечения качества обслуживания в рассматриваемых условиях не позволяет быстро обеспечить информационный обмен между разнородными абонентами. Более того, работа в высокочастотных диапазонах может быть сильно затруднена при наличии препятствий, что снижает общую площадь покрытия и качество передачи данных. Мы предлагаем протокол маршрутизации сетевого уровня, предназначенный для организации децентрализованной связи в подразделении аварийной службы, где абоненты отличаются разной степенью мобильности и типом передаваемого трафика. Данный протокол включает алгоритмы подключения к сети, обнаружения оптимального и альтернативных маршрутов связи, передачи и балансировки трафика по найденным маршрутам. Оригинальный алгоритм поиска маршрутов анализирует производительность каналов связи и определяет все возможные пути передачи трафика между абонентами. С использованием функции оценки маршрутов, основанной на градиентном бустинге деревьев принятия решений, производится формирование оптимальных и альтернативных маршрутов связи, а при передаче данных, на основе полученной информации, выполняется балансировка трафика. Экспериментальное исследование предложенного протокола показало улучшение показателей скорости развертывания и качества обслуживания на сценариях с различной степенью мобильности абонентов.

**Ключевые слова:** беспроводная децентрализованная сеть, протокол маршрутизации, метрики маршрутизации, градиентный бустинг, коэффициент доставки пакетов, сквозная задержка, качество обслуживания.

**1. Введение.** Успех проведения операций по ликвидации чрезвычайных ситуаций зависит от наличия эффективной и надёжной связи между её участниками на территориях от десятков до сотен квадратных километров. Спектр участников весьма разнообразен (рисунок 1). Во-первых, это могут быть группы спасателей, экипажи специальной техники (автомобили общего назначения, мобильные лаборатории, авиатехника и другие), пункты управления операциями, где в качестве абонентов выступают люди. Во-вторых, ими являются

автономные и радиоуправляемые мобильные роботы (наземные, водные или летательные), стационарные системы мониторинга. Это обуславливает потребность в передачи разнородного трафика, в том числе аудио- и видеопотоков, телеметрии от датчиков и систем мониторинга, команд управления, текстовых сообщений.

Применение централизованных инфраструктурных сетей ограничено в условиях чрезвычайной ситуации. Во-первых, необходимая инфраструктура может отсутствовать в районе аварии или она может быть разрушена в результате стихийного бедствия, ставшего причиной ЧП (землетрясения, ураганы, пожары, наводнения). Развёртывание инфраструктурной сети, обеспечивающей связь на значительные расстояния – трудоёмкая задача, требующая высоких временных и материальных затрат. Это недопустимо в условиях проведения ликвидационных и спасательных работ.



Рис. 1. Узлы MANET в аварийно-спасательной службе

Беспроводная коротковолновая радиосвязь [1] способна обеспечивать покрытие на сотни километров в условиях сильнопересечённой местности. Однако, низкая скорость передачи данных (менее 6 килобит в секунду) существенно ограничивает возможности трансляции цифровых данных. Поэтому применение КВ-радиосвязи ограничивается, в основном, передачей голосовых сообщений.

Современная спутниковая связь [2, 3] может обеспечивать высокую скорость обмена данными на приём при существенно меньших значениях на передачу. При этом используемое оборудование имеет относительно большие габариты, высокий расход электроэнергии, и требует соблюдения направленности антенны на спутник [4]. Особенно остро эти проблемы проявляются, когда абоненты – подвижные узлы.

Одним из вариантов решения проблемы является развёртывание точки доступа Wi-Fi [5] на основе стандартов IEEE 802.11 [6]. Однако рабочий диапазон радиоволн (ELF и SLF [7]) не позволяет эффективно использовать технологию на сильно пересеченной местности на больших расстояниях.

Альтернативным подходом является построение мобильных беспроводных ad-hoc сетей (mobile ad-hoc network, MANET), использующих ячеистую топологию (mesh) [8, 9]. Каждый узел является оконечной точкой, и в то же время, ретранслятором для других узлов. Данные сети устойчивы к изменению топологии. Маршруты передачи данных формируются уже непосредственно во время работы сети и со временем корректируются или повторно определяются. Такие сети не требуют специализированного аппаратного обеспечения и могут быть построены с использованием стандартного оборудования, как УКВ-радио, Wi-Fi - передатчики и др.

Одной из ключевых технологий MANET являются специальные протоколы маршрутизации. Их задачами является построение маршрутов связи между удалёнными абонентами, поддержание маршрутов связи в актуальном состоянии, исправление неисправностей в маршрутах, обеспечение ретрансляции данных. Протоколы маршрутизации разделяются на проактивные, реактивные, гибридные и географические.

Проактивными (или табличными) называются такие протоколы маршрутизации, в которых сетевые узлы производят периодический обмен служебных сообщений с информацией об известных связях между абонентами, на основании чего производится формирования таблиц маршрутизации. Наиболее распространёнными протоколами текущей категории являются DSDV, OLSR и решения на их основе [10]. Однако постоянный служебный трафик, требуемый для поддержания таблиц маршрутизации, снижению пропускной способности даже в условиях простаивания сети, когда полезные данные передаются в малом объёме. Эти ограничивает применение табличных протоколов маршрутизации в высокодинамических сетях передачи данных.

Реактивные (или «по запросу») протоколы маршрутизации производят поиск маршрута к целевому узлу только при необходимости. В режиме простоя сети или при отсутствии необходимости передачи данных между абонентами обнаружение маршрутов производиться не будет. Классические протоколами маршрутизации «по запросу» – AODV, DYMO, DSR, TORA [11]. Реактивные протоколы маршрутизации лучше проактивных адаптированы под функционирование высокодинамичных ad-hoc сетей, однако они обладают сопутствующими недостатками (высокой задержкой на обнаружение маршрутов, возникновение «всплесков» служебного трафика во время поиска маршрутов, высокие накладные расходы на восстановление маршрутов). Кроме того, имеются временные затраты на повторный поиск маршрутов связи.

Существующие гибридные протоколы маршрутизации (ZRP, FSR, LANMAR [12]) сочетают в себя свойства реактивных и проактивных протоколов маршрутизации. Их особенностью является использование проактивной маршрутизации к ближайшим абонентам, а к более дальним – реактивной. Однако эффективность такой схемы существенно снижается в условиях различия в мобильности абонентов.

Также улучшением стандартных подходов являются схемы маршрутизации с позиционированием на основе глобальных навигационных систем (GPS, Глонасс), где при построении маршрутов учитывается взаимное положение абонентов в пространстве (протоколы GAF, GPSR, LAR [13]). Потребность в специальном оборудовании, потребность во взаимном оповещении абонентов сети об изменении своего местоположения, отсутствие учёта препятствий и помех делает подход узкоспециализированным.

Таким образом, имеющиеся решения эффективно функционируют в сетях со стабильной или квазистабильной топологией. Существующие подходы не обеспечивают эффективного функционирования в сетях с высокой динамикой изменения топологии (из-за высокой мобильности узлов, наличия множества помех). При использовании одного канала связи между абонентами пропускная способность ограничивается из-за перегрузок. Это требует обнаружения и использования нескольких каналов связи между абонентами. Большинство классических подходов маршрутизации трафика в MANET не предполагают механизмов балансировки трафика. При этом балансировка трафика возможна в том случае, если поисковые алгоритмы способны строить несколько маршрутов к узлу

назначения, при этом маршруты должны быть, по большей части, непересекающимися.

Одним из подходов к повышению производительности MANET является использование протоколов многопутевой маршрутизации. Они имеют ряд преимуществ, таких как возможность резервирования части маршрутов на случай недоступности основного канала и обеспечения параллельной передачи трафика по нескольким маршрутам одновременно.

Таким образом, предлагается решение, предоставляющее возможность организации устойчивой связи в условиях нестабильной топологии сети и низкой пропускной способности каналов связи за счёт обеспечения параллельных потоков передачи данных и применение оригинальных методов балансировки трафика для отдельных абонентов. Предлагаемое решение обеспечивает развёртывание распределённой системы связи за минимальное время, что особенно актуально для работы поисково-спасательных подразделений при чрезвычайных ситуациях, когда стандартные технологии организации связи не функционируют.

В разделе 2 мы описываем предыдущее и связанные работы по проблемам многопутевой маршрутизации данных и балансировки трафика по сети. В разделе 3 мы представляем протокол маршрутизации. Здесь рассматриваются общая структура протокола маршрутизации, используемые им структуры данных, описание и оценка маршрутов связи, основные алгоритмы функционирования протокола. В разделе 4 мы производим экспериментальное исследование, в ходе которого сравниваем показатели производительности разработанного протокола со стандартным AOMDV. В заключении мы подводим итоги нашей работы.

**2. Обзор литературы по теме исследования.** В данном разделе рассматриваются решения многопутевой маршрутизации, предназначенные для обеспечения высоких показателей качества обслуживания (quality of service, QoS) в MANET. Под QoS в MANET понимается способность сети обеспечить необходимый сервис заданному трафику в определенных технологических рамках [14].

Многопутевая версия протокола AODV носит название AOMDV (ad-hoc on-demand multipath distance vector routing) [15]. AOMDV позволяет обнаруживать несколько независимых маршрутов к узлу назначения. Альтернативные маршруты используются, когда основной маршрут становится неисправным. Оптимизированный AOMDV (optimized AOMDV, OAOMDV) решает проблему «отсечения маршрута» [16]. Предложенная схема предполагает следующее. Узел,

из которого выходит несколько восходящих маршрутов, возвращает ответы RREP АСК (подтверждение маршрута) всем нисходящим маршрутам. Недостатком схемы является то, что при большом количестве нисходящих маршрутов в сети образуется много пакетов RREP АСК. По грубым оценкам он может занимать до 20% служебного трафика.

В ряде работ для обеспечения высоких показателей качества функционирования беспроводной сети используются интеллектуальные подходы. В работе [17] для обеспечения многопутевой маршрутизации используются алгоритм выбора биологического аттрактора. Подход предназначен для повышения коэффициента доставки пакетов и средней пропускной способности. В статье [18] предлагается алгоритм маршрутизации, основанный на оптимизации методом кукушки (cuckoo optimization algorithm, COA). Протокол прогнозируемой энергоэффективной и надежной многоадресной маршрутизации (predictive energy efficient and reliable multicast routing in MANET, PEERMR) [19] использует алгоритм PSO для построения надежного, энергоэффективного многоадресного дерева маршрутов. Еще одной схемой обнаружения многоадресных маршрутов для MANET является стратегия выбора маршрута под названием «Энергоэффективная многоадресная рассылка с учетом всего срока службы» (energy-efficient lifetime aware multicast, EELAM) [20], которая основана на применении адаптивного генетического алгоритма. EELAM использует адаптивную эволюционную стратегию для построения древовидной топологии маршрутов в сети с минимальным потреблением энергии при передаче трафика. В статье [21] предложен механизм маршрутизации SynFAnt, основанный на нечёткой синхронизированной сети Петри (SynFPN) для моделирования функций маршрутизации и принятия решений, а также алгоритме муравьиной колонии для поиска решения проблемы событий неопределенности в ad-hoc сетях.

В статье [22] предлагается протокол маршрутизации LCMR (least common multiple based routing), который предполагает построение нескольких маршрутов связи и балансировку трафика между ними. Пакеты трафика распределяются обратно пропорционально времени, затраченного на обнаружения маршрута. Во всех вышеприведённых подходах программные службы не взаимодействуют между собой для корректировки весов маршрутов, поэтому подход применим исключительно для сетей со стабильными параметрами работы.

Ряд решений на основе AODMV предлагают использование альтернативных метрик для обеспечения QoS. Протокол QoS-AODMV использует маршрутную метрику на основе длины и остаточной энергии [23]. Другие решения на основе AODMV используют маршрутные метрики на основе остаточной энергии абонентов, а также входных мощностей сигналов [24 – 28].

Протокол LRMR (link reliable multipath routing) из работы [29] определяет несколько параллельных маршрутов на основе длины пути и оценки качества маршрута. При этом не учитывается загруженность абонентов и каналов связи, остаточная энергия сетевых узлов. В других работах также предлагается учитывать качество каналов связи. Авторы [30] предлагают в своём протоколе для измерения качества канала использовать время отклика соседнего узла на отправленное сообщение. Авторы работ [31, 32] в качестве метрики надёжности в алгоритме поиска маршрута предлагают использовать уровень входящего сигнала. Недостатками работ является невозможность оценки стабильности канала связи при высоком уровне мобильности абонентов. В статье С. Амхамди [33] рассматривается протокол маршрутизации с балансировкой трафика, целью которого распределение энергетической нагрузки на узлы сети. В качестве метрики рассматривается энергопотребления абонентами маршрутов. В работе [34] производится балансировка трафика по найденным маршрутам на основе показателей средней очереди на узлах маршрута.

Предложенные подходы могут обеспечивать QoS в частных случаях и по отдельным показателям, однако они не способны обеспечивать высокую производительность ввиду того, что учитываются лишь отдельные частные маршрутные метрики, но не их совокупность.

Рассмотренные методы многопутевой маршрутизации трафика имеют недостатки. Во многих подходах параллельные маршруты исключительно резервируются на будущее. Трафик по ним не передаётся, из-за чего они простаивают. В существующих методах балансировка применяется для обеспечения производительности сети не по интегральному, а по отдельному критерию, что не позволяет учесть всех особенностей высокодинамичной MANET сети. При этом принято использовать исключительно не пересекающиеся маршруты, что в реальных сетях достаточно трудно обеспечить ввиду проблем отсечения маршрута через узел или канал.

В соответствии с этим, разрабатываемый протокол должен соответствовать следующим требованиям:

- функционировать по реактивным алгоритмам обнаружения маршрута, использовать лучшие стороны протоколов маршрутизации по запросу;
- быть децентрализованным. Это означает, что узлы не должны иметь жестко закрепленных за собой функций, являясь одновременно оконечной точкой и маршрутизатором;
- обеспечивать минимальное количество потерь пакетов данных при передаче по маршрутам связи при сохранении приемлемых значений—других показателей качества обслуживания, в частности время доставки данных, пропускную способность сети;
- обеспечивать эффективную маршрутизацию трафика для абонентов с разной мобильностью. В качестве критериев эффективности могут выступать доля доставленного трафика по маршруту, время доставки пакетов данных;
- обеспечивать распределённую балансировку трафика при передаче данных для оптимизации показателей качества обслуживания, а также оперативно обновлять данные по маршрутам связи, действующим в балансировке трафика по сети.

### **3. Протокол организации связи и передачи данных.**

Протокол маршрутизации должен обеспечивать установление соединения с абонентами, допускающие непосредственную связь друг с другом без промежуточных ретрансляторов (соседние абоненты), обнаружение маршрутов, маршрутизацию трафика по найденным маршрутам. Технология MANET подразумевает отсутствие связи «каждый с каждым» в топологии сети. В результате полная связанность может быть достигнута через произвольное (достаточно большое) число промежуточных узлов-ретрансляторов (рисунок 6).

Разработанный протокол представляет совокупность нескольких алгоритмов, при помощи которых организуется связь между абонентами:

- установление абонентом соединения с сетью;
- поиск маршрутов связи к целевому абоненту;
- повторный поиск маршрутов связи при их отсутствии;
- передача данных и балансировка трафика.

Также протокол включает в себя структуры, при помощи которых производится хранение данных о соединениях с абонентами и маршрутами связи до них, функции оценки маршрутов связи.

**3.1. Хранение маршрутов связи.** Для хранения информации о сетевых агентах, наличия связи с соседними абонентами и маршрутов передачи трафика мы будем использовать ассоциативный массив AgentMap (рисунок 2). Ключом является адрес абонента A. Значение –

структура AgentInformation. AgentInformation содержит следующие поля:

- Direct – флаг наличия прямой связи с абонентом A;
- LastTime – время, когда в последний раз было получено NeighborMessage или NeighborMessageAnswer от абонента A;
- LastRouteID – последний использованный идентификатор поиска маршрута к абоненту A;
- NeighborList – список смежных абонентов для A (актуально, если Direct = True);
- RouteMap – ассоциативный массив, содержащий информацию о наличии маршрутов к A, пролегающих через своего абонента.

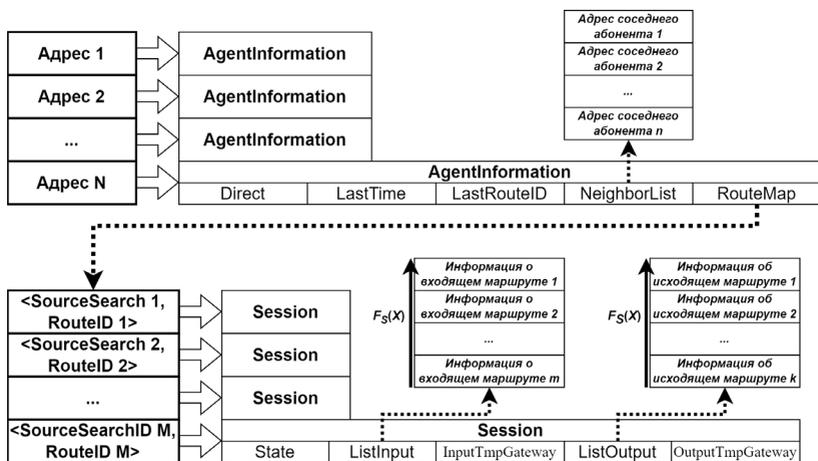


Рис. 2. Структура AgentMap

Ключом RouteMap является пара значений  $\langle \text{SourceSearch}, \text{RouteID} \rangle$ . SourceSearch – адрес абонента, который инициировал поиск к абоненту A. RouteID – идентификатор поиска маршрутов. Если SourceSearch = SelfA, то текущий абонент является инициатором поиска маршрута к A. Каждой паре  $\langle \text{SourceSearch}, \text{RouteID} \rangle$  соответствует сессия поиска маршрутов. Сессия представляет временной промежуток от начала поиска маршрутов к A до момента их устаревания. Структура Session имеет следующие поля:

- State – состояние сессии. Всего имеется 3 состояния: запущена процедура поиска маршрута, имеются актуальные маршруты, сессия устарела;

- ListInput – список входящих маршрутов к A;
- ListOutput – список исходящих маршрутов к A;
- InputTmpGateway – адрес абонента, который предшествует текущему абоненту во временном маршруте;
- OutputTmpGateway – адрес абонента, который следует за текущим абонентом во временном маршруте.

Структура AgentMap формируется на этапах установления соединения с сетью и обнаружения маршрутов к абонентам. Полученная информация используется для выбора путей передачи трафика к целевому абоненту.

**3.2. Установление соединения с сетью.** Установить соединение с сетью в MANET – означает установить прямую связь с несколькими соседними абонентами. При этом имеются соседи первого и второго порядков. Соседи первого порядка – напрямую доступны для текущего абонента. Соседи второго порядка доступны транзитивно через соседей первого порядка.

Для обмена трафиком в рамках процедуры установления и поддержания соединения с сетью были разработаны пакеты NeighborMessage и NeighborMessageAnswer (рисунок 3). NeighborMessage используется для уведомления других абонентов о своём присутствии в сети. NeighborMessageAnswer используется для подтверждения получения NeighborMessage соседними абонентами первого порядка.

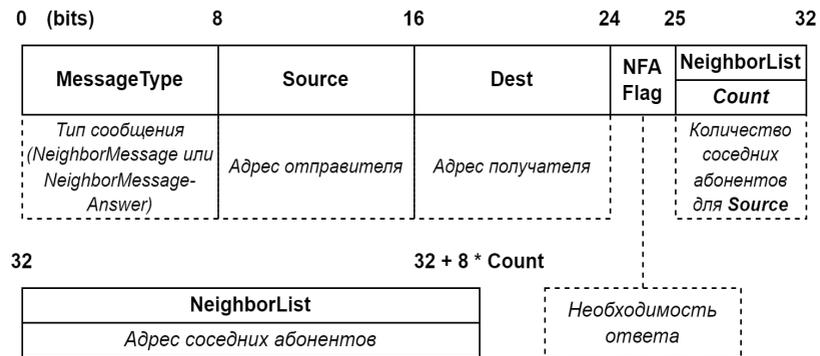


Рис. 3. Структура NeighborMessage и NeighborMessageAnswer

Каждый HelloInterval производится широковещательная рассылка пакета NeighborMessage. Он включает актуальный на момент отправки список соседних абонентов первого порядка. Опционально



и каналов связи между ними. Эффективность маршрутизации зависит от того, насколько каждый абонент или канал связи эффективно продвигают пакет в процессе передачи данных.

В качестве признаков описания маршрута использовались следующие:

- $N$  – длина маршрута;
- $V_{av}$ ,  $V_{max}$  – средняя и максимальная скорости перемещения абонентов внутри маршрута;
- $Dist_{av}$ ,  $Dist_{max}$  – среднее и максимальное расстояние между узлами внутри маршрута;
- $I_{all}$ ,  $I_{max}$  – общее и максимальное внутри узла количество пересечений маршрутов между другими узлами;
- $L_{av}$ ,  $L_{max}$  – средняя и максимальная загрузки каналов связи;
- $Q_{av}$ ,  $Q_{max}$  – средний и максимальный размеры очереди пакетов на транзитных абонентах;
- $Delay_{av}$ ,  $Delay_{max}$  – средняя и максимальная задержки пакета на узлах маршрута;
- $R_{ch}$  – доля данных, которые не теряются при прохождении пакетов через каналы беспроводной связи;
- $R_n$  – доля данных, которые не теряются при прохождении пакетов через абонентов сети.

Совокупность метрик эффективности функционирования маршрутов образует его признаковое описание  $X$ . Используя его, можно выдать оценку о степени его применимости для маршрутизации трафика. За счёт того, что при построении маршрутов учитываются показатели загрузки каналов и абонентов связи, количество пересекающихся актуальных маршрутов, пропускную способность сети, будет обеспечиваться высокое QoS при передаче данных на данном маршруте.

**3.4. Оценка маршрутов связи.** Для оценки маршрутов в предлагаемых нами алгоритмах связи введём функцию оценки  $F_S(X)$ .  $F_S(X)$  будет использовано для оценки пригодности частично или полностью сформированного маршрута для передачи трафика по сети. Основные показатели, которые характеризуют качество передачи данных по маршруту связи – его надёжность и оперативность доставки данных. Надёжность может быть выражена долей доставленных пакетов (packed delivered ratio, PDR). Оперативность – сквозной задержкой передачи данных (end-to-end delay, E2ED). Тогда  $F_S(X)$  будет представлять собой некоторую свёртку представленных показателей. Мы используем мультипликативную функцию [35]. Она базируется на принципе справедливой компенсации отдельных

критериев. Качество маршрута будет оцениваться при помощи метрики (1):

$$F_S(X) = \frac{(1000 * PDR)^{KS1}}{E2ED^{KS2}}, \quad (1)$$

где  $KS1$ ,  $KS2$  весовые коэффициенты соответствующих показателей. Чем больше значение  $PDR$  и чем меньше значение  $E2ED$ , тем качественнее маршрут связи. Для балансировки трафика используем функцию с аналогичной структурой, но с иными весовыми коэффициентами. Изменённые весовые коэффициенты позволят отдать приоритет другому показателю по уже отфильтрованным маршрутам:

$$F_B(X) = \frac{(1000 * PDR)^{KB1}}{E2ED^{KB2}}. \quad (2)$$

Весовые коэффициенты настраиваются исходя из приоритетов критериев эффективности маршрутов, задаваемых пользователями сети. Для более приоритетного критерия выставляется больший вес. Для исключения субъективности в выборе весовых коэффициентов приемлемо использование методик, описанных в [36].

Исходя из формулы (1), маршрут  $R_1$  предпочтительнее  $R_2$ , если  $F_S(X_{R1}) > F_S(X_{R2})$ . При этом маршрут  $R_1$  является пригодным для маршрутизации трафика, если  $F_S(X) > F_S'$ , где  $F_S'$  – некоторое пороговое значение. В нашем случае  $F_S(X)$  – фильтрующая функция. Для балансировки трафика введём функцию  $F_B(X)$  Используется для вычисления пропорций, в каком объёме будет распределён трафик по маршрутам  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . Соответственно, трафик будет распределён в пропорциях:

$$F_B(X_{R1}) : F_B(X_{R2}) : \dots : F_B(X_{Rn}). \quad (3)$$

Для оценки  $F_S$  и  $F_B$  мы используем алгоритм градиентного бустинга деревьев принятия решений [37]. Алгоритм представляет способ построения композиции решающих деревьев, где каждое последующее дерево стремится скомпенсировать ошибку уже построенных. Среди преимуществ градиентного бустинга можно выделить отсутствие необходимости нормирования разнородных признаков  $X$ , способность осуществлять работу с произвольными

функциями потерь в задачах регрессии, меньшая подверженность переобучению, достаточная точность восстановления искомым функций.

Рассмотрим процесс обучения градиентного бустинга для функции  $F_S(X)$  с коэффициентами  $KS1 = 0,7$ ,  $KS2 = 0,3$ . В работе [38] показано, что для данной задачи подходят именно данные значения коэффициентов. В ходе работы при помощи имитационной модели беспроводной самоорганизующейся сети был собран набор данных. Параметры моделирования представлены в таблице 1. Каждая запись в наборе представляет массив частных метрик  $X$  производительности маршрута связи, полученных в процессе его построения и является признаковым описанием маршрута. Каждая запись содержит значения  $F_S$ , рассчитанные по результатам функционирования маршрута связи.

Таблица 1. Параметры модели ad-hoc сети при сборе данных

Параметр	Значение
Максимальная длина маршрута	5, 6, 7, ..., 19, 20
Скорость передачи данных	8 Кб/с.
Трафик между абонентами	2 Кб/с.
Максимальная скорость движения абонентов	15 м/с.
Модель движения абонентов	Модель случайных перемещений на основе случайных точек
Радиус радиопередачи	400 м.
Размер карты	1500 x 1500 м <sup>2</sup>
Ограничение по виртуальному времени моделирования	1200 с.

Для оценки возможности построить качественные модели машинного обучения был произведён корреляционный анализ между признаковым описанием маршрута связи и  $F_S$ . Результаты представлены на рисунке 5.  $F_S$  имеет выраженную статистическую взаимосвязь с  $I_{all}$ ,  $L_{av}$ ,  $Q_{av}$ ,  $Delay_{av}$ ,  $R_{ch}$ ,  $R_n$ . Результаты корреляционного анализа демонстрируют возможность построения качественной модели для оценки  $F_S$ .

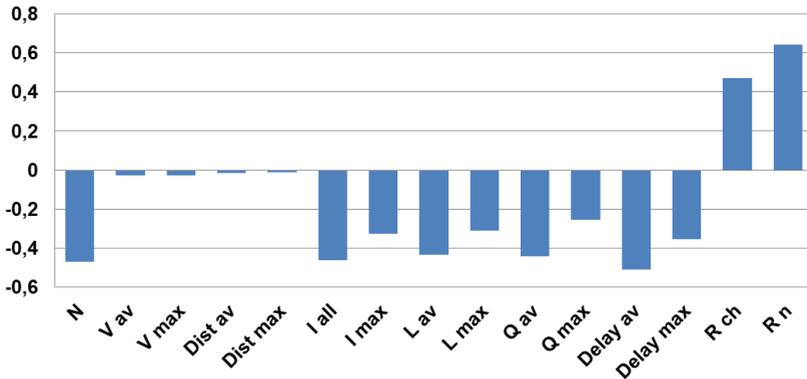


Рис. 5. Корреляционный анализ между признаками  $F_S$

Обучение модели производилось при помощи функционала библиотеки CatBoost [39]. Для проверки эффективности алгоритмов градиентного бустинга набор данных был разделён на обучающуюся ( $X_{train}$ ,  $PDR_{train}$ ,  $E2ED_{train}$ ) и тестовую ( $X_{test}$ ,  $PDR_{test}$ ,  $E2ED_{test}$ ) выборки в пропорции 4:1.

Для оценки эффективности полученной модели использовались метрики  $RMSE$  и  $R^2$ , рассчитанные на тестовой выборке. Были получены значения 4,63 и 0,96 соответственно. Лучшие результаты были получены при количестве деревьев в 100 единиц и глубине деревьев – 5. Близость  $R^2$  к 1,0 и относительно низкое значение  $RMSE$  свидетельствует о высокой эффективности полученной модели.

**3.5. Алгоритм обнаружения маршрутов.** Предлагаемый нами алгоритм построения маршрутов связи между абонентами S и D состоит из двух этапов. На первом этапе (прямой ход) производится широковещательная рассылка пакетов RouteSearch к узлу D для анализа состояния абонентов и каналов связи. На втором этапе (обратный ход) производится построение маршрутов связи от S к D на основе информации, полученной на первом этапе.

Алгоритм поиска маршрута запускается, когда отсутствует актуальный исправный маршрут к абоненту D. На первом этапе производится накопление актуальной информации о производительности сети, а также формируется децентрализованный граф пересылок между абонентами S и D. В процессе поиска используется пакет RouteSearch (рисунок 6).

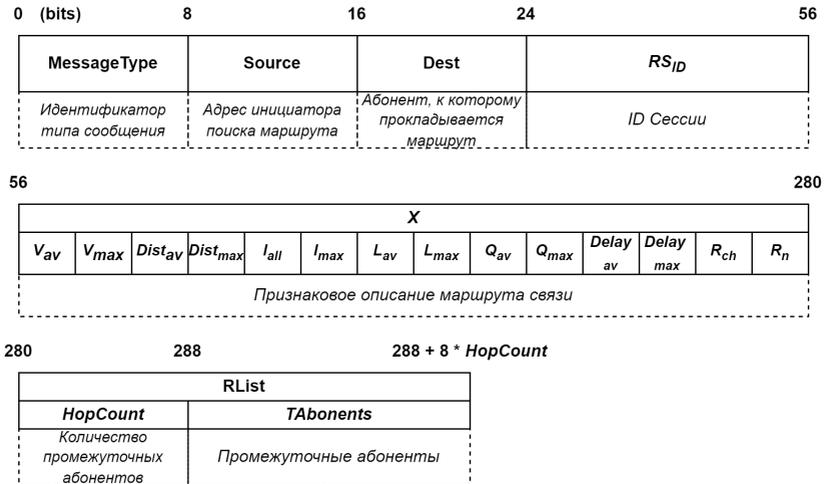


Рис. 6. Структура пакета RouteSearch

Этап прямого хода предназначен для определения возможных направлений маршрутизации трафика между абонентами, а также анализа производительности узлов и каналов связи, которые могут быть включены в маршруты. Функционирование первого этапа производится по алгоритму, представленному на рисунке 7.

Если абоненту S требуется маршрут к абоненту D, он производит широковещательную рассылку пакета RouteSearch. При приёме пакета транзитным абонентом T производится обновление маршрутных метрик X в пакете. Если T обнаруживает в RouteSearch петли, превышение максимально допустимого количества переходов  $HopCount > MaxHopCount$ , совершённых пакетом в сети, пакет уничтожается.

Затем T сохраняет информацию о поступившем пакете в RouteItem абонента D. Если пакет с текущими RS<sub>ID</sub> и S был получен впервые, абонент T производит его ретрансляцию на другие узлы. При этом перед передачей в RouteSearch увеличиваются значение HopCount на 1, а в поле RList добавляется собственный адрес.

Если абонент D принял пакет с текущими RS<sub>ID</sub> и адресом S впервые, то он формирует ответ RouteAnswer с временным маршрутом и возвращает его абоненту S. Временный маршрут используется при передаче данных от S к D до момента, пока не будут сформированы оптимальный и альтернативные маршруты. В течение периода TimeRecvWait абонент D принимает другие пакеты RouteSearch

с аналогичными значениями полей  $RS_{ID}$  и  $S$ . После истечения периода завершается этап прямого хода и запускается процедура обратного хода. Все поступающее после этого пакеты RouteSearch отбрасываются.

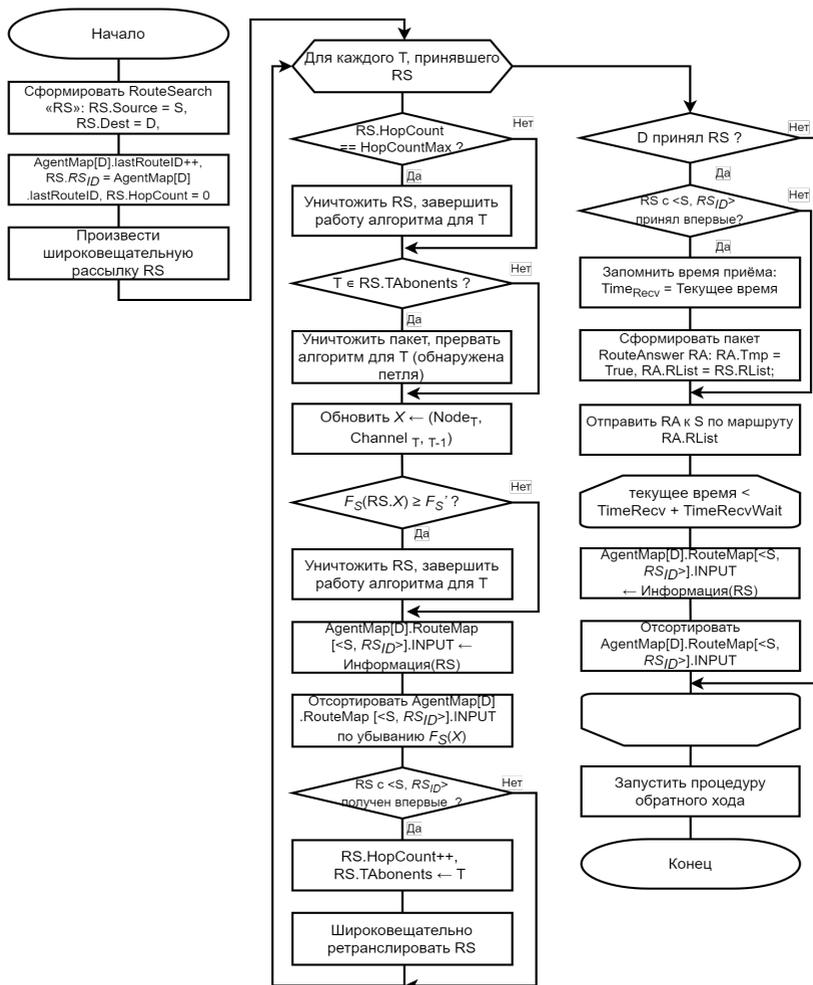


Рис. 7. Алгоритм прямого хода поиска маршрута связи

В результате работы алгоритма каждый транзитный абонент хранит несколько промежуточных маршрутов от  $S$  до себя. Маршруты

отсортированы в порядке убывания  $F_S(X)$ . RouteAnswer с флагом `tmp` содержит временный маршрут связи. Он может быть использован для передачи данных между S и D, пока не будут сформированы постоянные маршруты.

Второй этап инициализируется после завершения процедуры прямого хода. Обратный ход предназначен для формирования оптимального (основного) и альтернативных маршрутов связи. Альтернативные маршруты уступают оптимальному по критерию  $F_S(X)$ , могут частично с ним пересекаться. При этом альтернативные пути приемлемы для маршрутизации трафика (рисунок 8).

В построении маршрутов на этапе обратного хода используется ответный сетевой пакет RouteAnswer (рисунок 9). Он может быть передан в адресном или широковещательном режимах. Адресная передача используется при построении оптимального пути между абонентами S и D. Широковещательная рассылка применяется при определении альтернативных маршрутов.

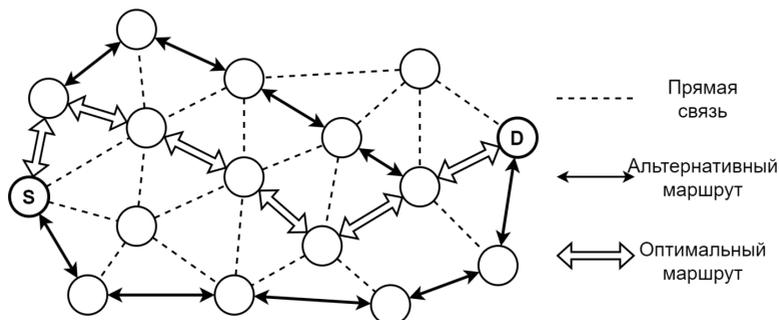


Рис. 8. Пример маршрутов связи, построенных на этапе обратного хода

В процессе обратного хода производится отправка адресного пакета RouteAnswer к абоненту S. В качестве транзитных абонентов выбираются те, с которых поступили лучшие по метрике  $F_S(X)$  частично сформированные маршруты. Транзитные абоненты, через которые прошёл адресный пакет RouteAnswer, добавляются в оптимальный маршрут. Через время `TimeSendWait` после отправки адресного RouteAnswer производится широковещательная рассылка пакета с целью построения альтернативных маршрутов связи. Альтернативный маршрут считается сформированным, если достигает узла S или узла основного маршрута.

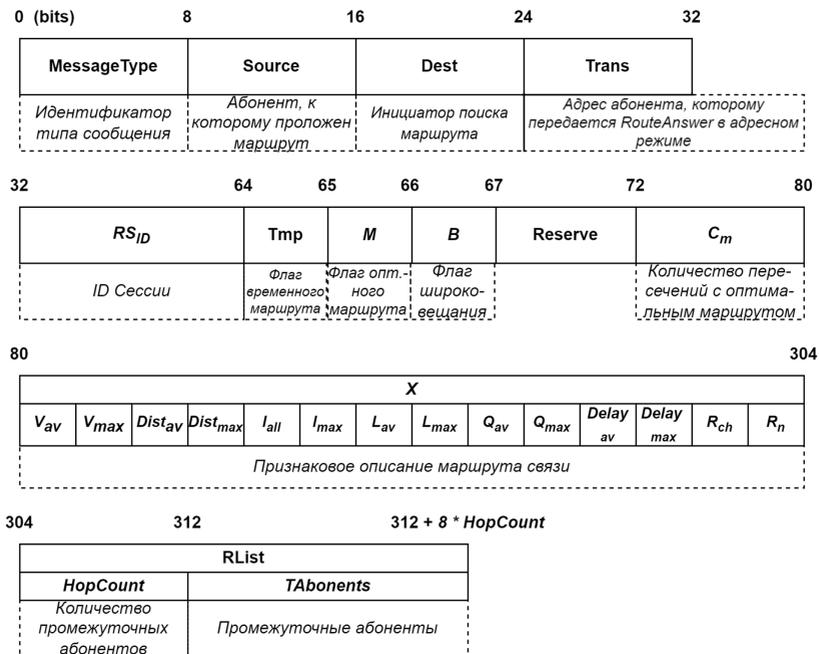


Рис. 9. Структура пакета RouteAnswer

Процедура обратного хода функционирует по алгоритму, представленному на рисунке 10. Также введём параметры *ActiveRouteTime* и *RouteSearchTime*. *ActiveRouteTime* – временной промежуток, в течении которого найденные маршруты считаются актуальными. *RouteSearchTime* – временной период, за который абонент-инициатор поиска маршрута должен получить ответный пакет *RouteAnswer*. В ином случае принимается, что маршрут к целевому абоненту отсутствует.

Если альтернативный маршрут окончательно сформирован на абоненте основного маршрута, то есть альтернативный маршрут имеет пересечение с оптимальным маршрутом, текущий абонент производится отправку пакета *RouteAnswer* по оптимальному маршруту. Маршруты, которые частично пересекаются, будем называть квазипараллельными.

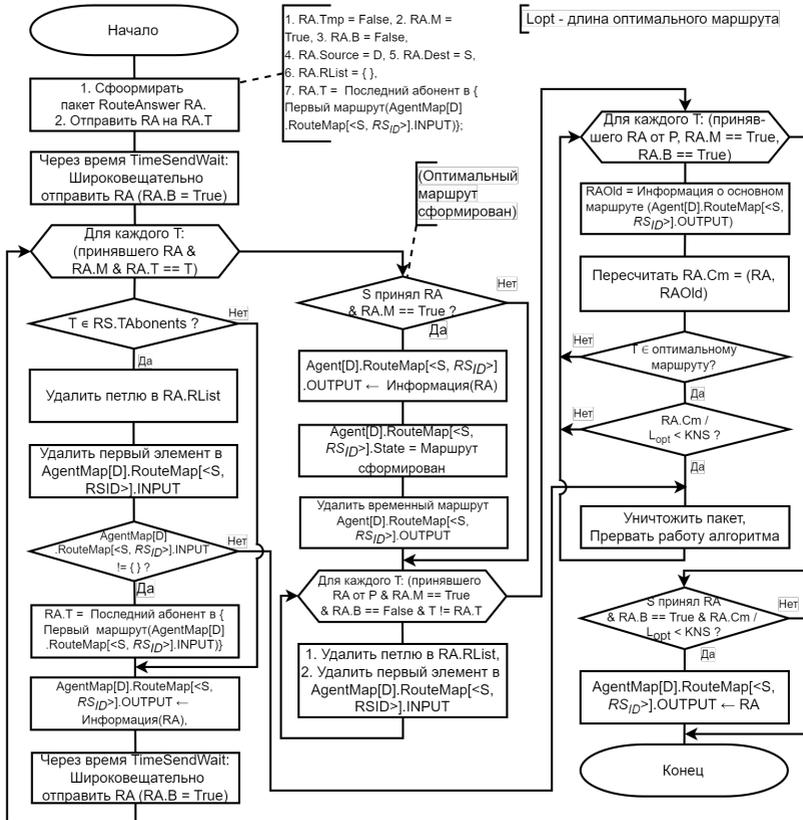


Рис. 10. Алгоритм обратного хода поиска маршрута связи

Результатом функционирования процедур прямого и обратного ходов является построение оптимального и нескольких альтернативных маршрутов между абонентами S и D. Для передачи уведомлений о доставке сообщений используется оптимальный маршрут.

**3.6. Маршрутизация трафика по распределённому маршруту.** Алгоритм доставки данных используется при маршрутизации трафика по найденным маршрутам связи. При передаче сообщений производится их распределение по нескольким актуальным маршрутам в соответствии с критерием  $F_B(X)$ . Критерий  $F_B(X)$  определяет пропорции, в которых трафик будет распределён по найденным маршрутам (рисунок 11). Таким образом, производится балансировка трафика в ad-hoc сети.

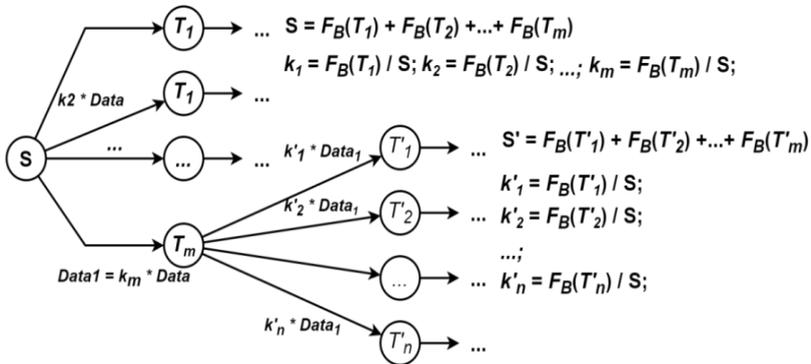


Рис. 11. Схема балансировки трафика

Передача данных производится при помощи сообщений DataRoute, структура которого описана в рисунке 12. Передача данных осуществляется по алгоритму, представленному на рисунке 13. Если целевой абонент D является соседним абонентом 1-го или 2-го порядка для текущего узла, запрос маршрута не требуется. В этом случае, а также при использовании временного маршрута балансировка трафика не производится. Если абонент содержит два и более восходящих маршрута связи, активируется алгоритм балансировки трафика.

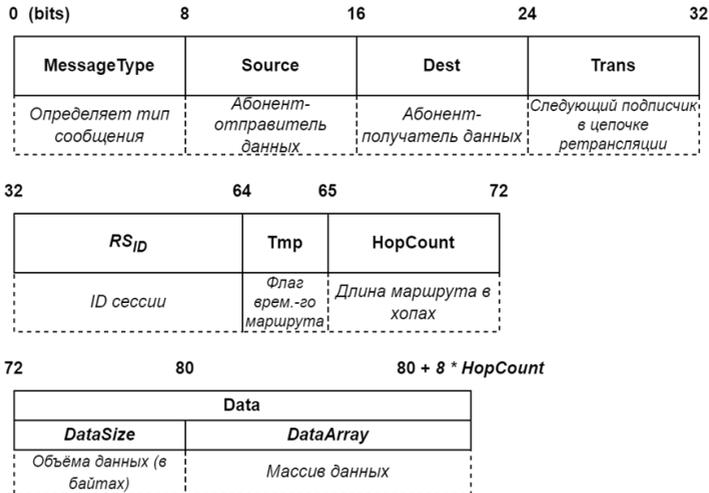


Рис. 12. Структура пакета DataRoute

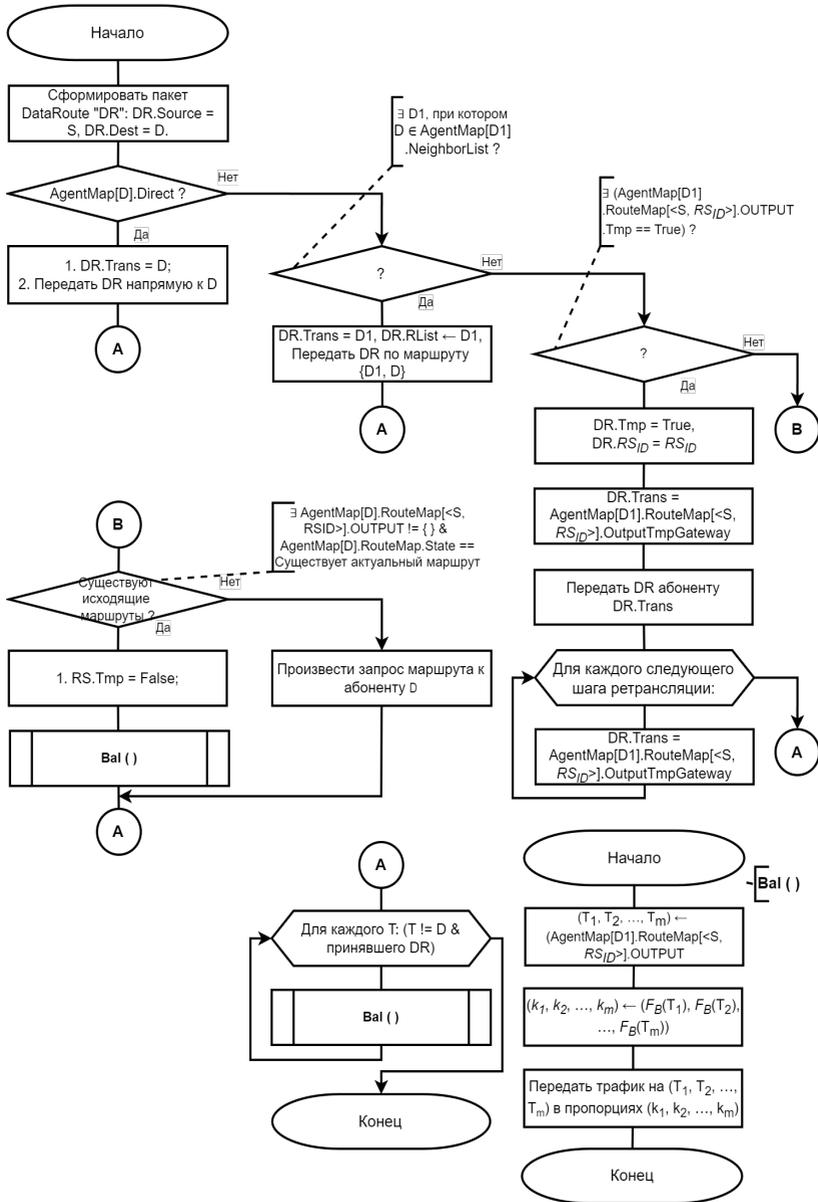


Рис. 13. Алгоритм маршрутизации и балансировки трафика по найденным маршрутам связи

Если по итогу работы поиска маршрутов было получено несколько квазипараллельных маршрутов, трафик распределяется по нескольким путям в соответствии с критерием  $F_B(X)$ . В соответствии с этим производится балансировка трафика по сети. Критерий  $F_B(X)$  определяет пропорции, в которых трафик будет распределяться по найденным маршрутам. При этом распределение трафика по нескольким исходящим каналам осуществляют абоненты, через которые пролегают несколько квазипараллельных маршрутов, и имеется несколько вариантов дальнейшей ретрансляции.

В работе сети возможны случаи, когда между двумя абонентами невозможно построить маршрут. Например, целевой узел D или подсеть, в которой он расположен, не связана с подсетью текущего абонента. Такая ситуация обнаруживается, когда абонент D не является смежным узлом 1-го или 2-го порядка, или когда истекло время RouteSearchTime, и маршрут не был получен. Тогда через время RepeatSearchTime инициируется повторный запрос маршрута связи. Если повторный поиск не принёс результатов, считается, что абонент D не доступен для передачи данных.

**4. Экспериментальное исследование протокола связи.** Для проведения экспериментального исследования была использована имитационная модель ad-hoc сети из [40]. В ходе экспериментального исследования была осуществлена проверка корректности функционирования предложенного в статье протокола связи. Производилось его сравнение с протоколом маршрутизации AOMDV. Несмотря на существование множества его модификаций, они лишь в частных сценариях обеспечивают высокие показатели QoS и в среднем по производительности не превосходят базовый протокол. Другие решения являются коммерческими и требуют специализированного оборудования от конкретных производителей, что снижает возможности по их использованию и исследованию.

В исследовании использовались 3 сценария моделирования, которые отличаются характером мобильности абонентов [41]. В первом сценарии использовалась топология, графически представляющая собой матрицу из абонентов (рисунок 14). У абонентов отсутствует мобильность. Значения надёжности каналов связи имеют случайное значение. Периодически производился разрыв отдельных каналов связи. Статистика рассчитывалась между абонентами S и D. Здесь моделируется взаимодействие между абонентами без мобильности (группы спасателей, стационарные лаборатории).

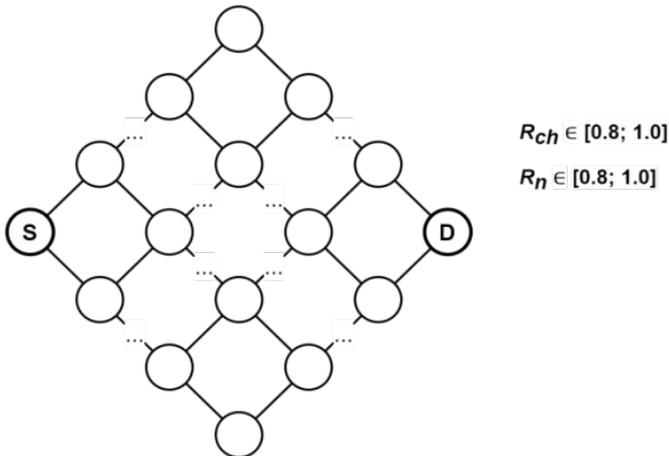


Рис. 14. Топология статичной сети

Следующие эксперименты посвящены проверке алгоритмов на сценариях с высокой динамикой изменения топологии (рисунок 15). Качество и наличие прямых связей между абонентами определяется расстоянием между узлами. Движение абонентов описывается моделью перемещений на основе случайных точек в заданной области. Абоненты отправитель и получатель задаются перед началом моделирования, им присваиваются координаты за пределами зоны пространственного перемещения абонентов. Трафик сети снижен, и передача данных, кроме выделенных узлов, ведётся только между соседними абонентами.

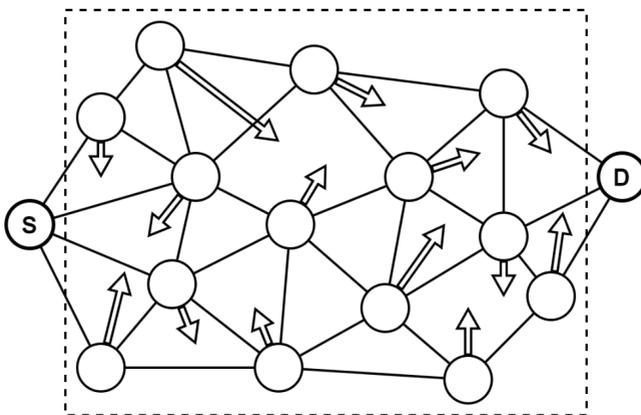


Рис. 15. Топология сети с моделью перемещения абонентов

Во втором эксперименте 80% являются мобильными – скорость их перемещения не превышает 6 м/с. Это могут быть перемещающиеся бригады спасателей, мобильные роботы. В третьем эксперименте 50% мобильных абонентов имеют высокую скорость перемещения. Скорость их перемещения – до 15 м/с. Это может быть спасательная техника в движении или дроны.

В качестве критериев, по которым производилось сравнение протоколов, использовались следующие:

- PDR (packet delivery ratio) – надёжность доставки пакетов данных. Значение критерия показывает долю пакетов, которые достигли целевого абонента;

- E2EDG (group E2ED) – общее время передачи по квазипараллельным маршрутам группы пакетов в составе фрейма.

**4.1. Подготовка к исследованию.** В текущем исследовании скорость передачи данных ровна 64 кбит/с. Прикладной трафик между смежными абонентами составил 8 пакетов секунду, каждый из которых имел объём 255 кб (16 кбит/с). В контрольной передаче данных между двумя абонентами использовались большие фреймы данных по 255 пакетов (фреймы, объёмом 65 025 байт). Другие параметры моделирования представлены в таблице 2. Уровень надёжности каналов связи и среднее время задержки пакетов при их обработке абонентами в одних случаях задавался статически перед началом функционирования сети, в других экспериментах определялся взаимным пространственным расположением абонентов.

В нашей текущей работе в качестве критерия  $F_S(X)$ , предсказываемого при помощи градиентного бустинга, является выражение (1), где  $KS1 = 0,7$ ,  $KS2 = 0,3$ . Аналогичным образом предсказывается метрика  $F_B$ . Всего было подготовлено 4 модели градиентного бустинга (таблица 3). Первая функция представляет собой предсказанное значение надёжности доставки данных по маршруту. Вторая функция равна используемой  $F_S(X)$ . В третьей критерии PDR и E2ED имеют равный приоритет. В четвёртой приоритет отдаётся критерию E2ED.

Таблица 2. Параметры моделирования

Параметр	Значение
<b>Общие параметры исследования</b>	
Скорость передачи данных	64 Кбит/с.
Трафик между абонентами	16 Кбит/с.
Максимально-допустимая задержка обработки пакетов на абонентах	10 с.
Радиус радиопередачи	400 м.
Ограничение по виртуальному времени моделирования	1200 с.
<b>Параметры первого эксперимента</b>	
Размер карты	1500 x 1500 м <sup>2</sup>
Максимальная длина маршрута	15, 20, 25, 30, 35, 40
Количество абонентов	25, 36, 49, 64, 81, 100
<b>Параметры второго эксперимента</b>	
Модель движения абонентов	Модель перемещений на основе случайных точек
Максимальная скорость движения абонентов с низкой мобильностью	6 м/с.
Размеры карты	1000 x 1000 м <sup>2</sup> , 1200 x 1000 м <sup>2</sup> , 1400 x 1000 м <sup>2</sup> , 1600 x 1000 м <sup>2</sup> , 1800 x 1000 м <sup>2</sup> , 2000 x 1000 м <sup>2</sup>
Максимальная длина маршрута	10, 12, 14, 16, 18, 20
Количество мобильных абонентов	8, 10, 11, 13, 14, 16
<b>Параметры третьего эксперимента</b>	
Модель движения абонентов	Аналогично эксперименту 2
Максимальная скорость движения абонентов с низкой мобильностью	6 м/с.
Максимальная скорость движения абонентов с высокой мобильностью	15 м/с.
Размер карты	Аналогично эксперименту 2
Максимальная длина маршрута	10, 12, 14, 16, 18, 20
Количество мобильных абонентов	8, 10, 11, 13, 14, 16
Количество абонентов с высокой мобильностью	4, 5, 5, 6, 7, 8

Таблица 3. Параметры функции  $F_B(X)$ 

Коэффициент	$F_{B1}(X)$	$F_{B2}(X)$	$F_{B3}(X)$	$F_{B4}(X)$
$KB1$	1	0,7	0,5	0,3
$KB2$	0	0,3	0,5	0,7

**4.2. Результаты экспериментального исследования.** Результаты имитационного моделирования для параметров первого эксперимента представлены на рисунке 16 и рисунке 17. Было получено, что наша реализация ( $F_{B1}$ - $F_{B4}$ ) позволяет существенно повысить надёжности доставки данных по сравнению со стандартным AOMDV. Кроме того, почти в 2 раза удалось сократить время доставки данных за счёт распределения трафика по параллельным маршрутам для всех  $F_B(X)$ .

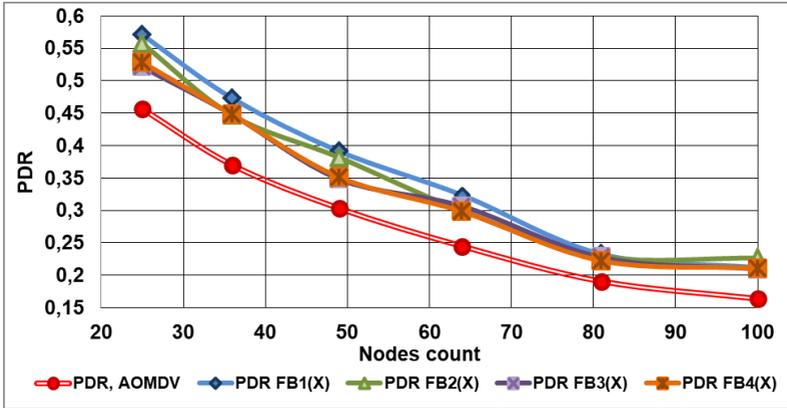


Рис. 16. Результаты экспериментального исследования над метрикой PDR над сценарием со статичной топологией

Результаты экспериментального исследования демонстрируют повышение надёжности доставки данных по сравнению с AOMDV в 1,1–1,4 раз. Повышение показателя PDR обусловлено тем, что в процессе построения маршрутов исключались ненадёжные каналы и перегруженные абоненты сети. За счёт распараллеливания передачи трафика по нескольким маршрутам удалось снизить значение E2EDG – в 2,0–2,2 раз.

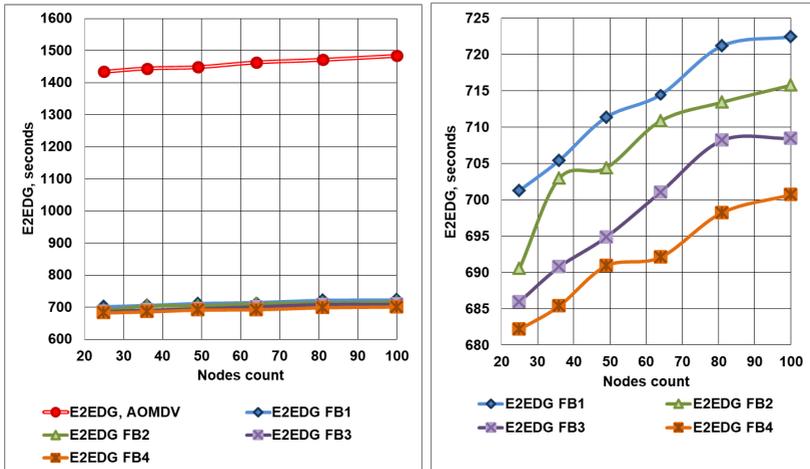


Рис. 17. Результаты экспериментального исследования над метрикой E2EDG над сценарием со статичной топологией

Экспериментальное исследование сети с низким уровнем изменения её динамики представлено на рисунках 18 и 19. Улучшения PDR и E2EDG в целом соответствуют аналогичным показателям в предыдущем эксперименте. PDR улучшен в 1,1-1,2 раза, E2EDG – в 2,0-2,3 раза.

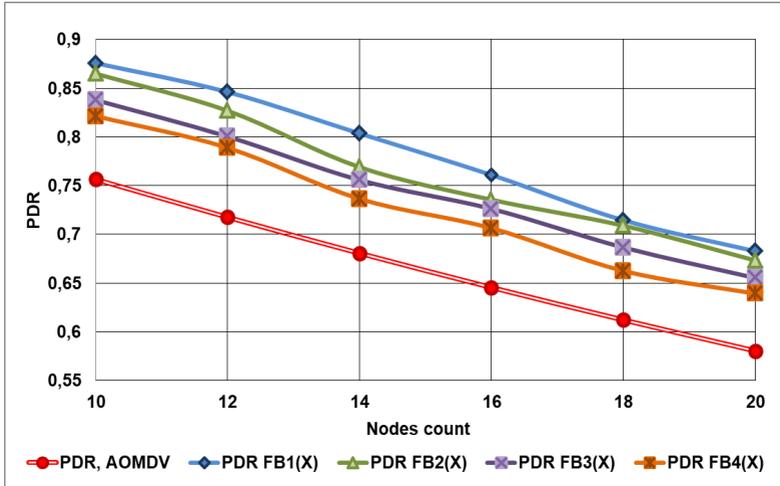


Рис. 18. Результаты экспериментального исследования над метрикой PDR над сценарием с низкодинамичной топологией

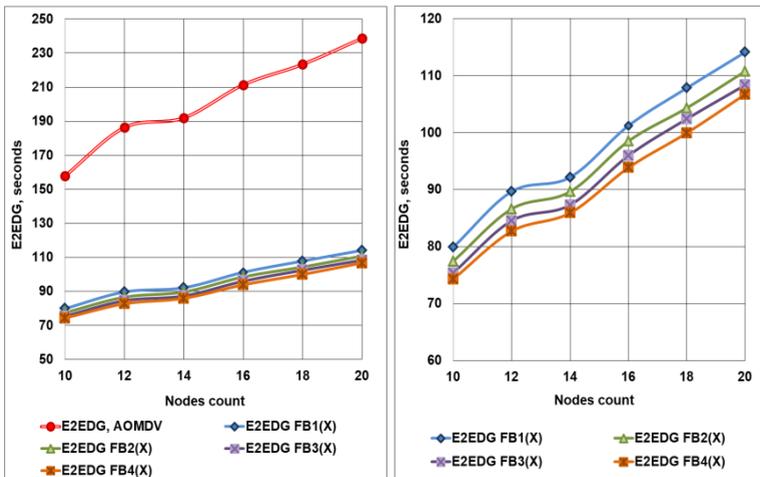


Рис. 19. Результаты экспериментального исследования над метрикой E2EDG над сценарием с низкодинамичной топологией

Результаты эксперимента с высоким уровнем изменения динамики топологии представлено на рисунках 20, 21. Предложенный в работе протокол маршрутизации существенно повышает производительность сети: в 1,2–1,4 для PDR и в 2,1–2,3 для E2EDG.

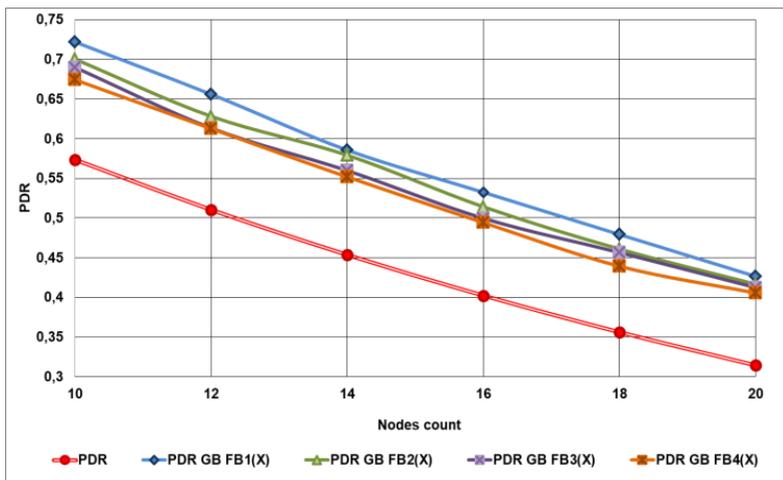


Рис. 20. Результаты экспериментального исследования над метрикой PDR над сценарием с высокодинамичной топологией

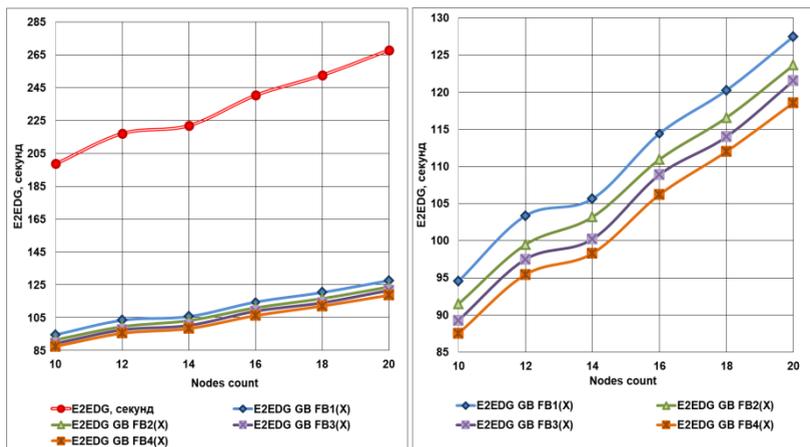


Рис. 21. Результаты экспериментального исследования над метрикой E2EDG над сценарием с высокодинамичной топологией

Результаты экспериментального исследования демонстрируют, что предложенные алгоритмы построения маршрутов и балансировки трафика эффективно работают как на сценариях с низкой динамикой изменения топологии, так и с высокой. При этом во всех случаях одновременно удалось повысить как значение PDR, так и E2EDG. Компромиссным решением, которое позволит в равной степени улучшить оба показателя, является использование функции  $F_{B2}(X)$ .

Таким образом, предложенный протокол позволит ускорить процесс обмена данными между абонентами в сети MANET. Применяемая балансировка трафика позволит разгрузить каналы связи, за счёт чего увеличится пропускная способность сети и повысится QoS. В то же время, это позволит включать в сеть большее количество высокомобильных абонентов с меньшими потерями в QoS и надёжности сети.

Эксперименты подтверждают соответствие протокола требованиям, которые были представлены в начале работы. В частности, повышение надёжности (обеспечения минимального количество потерь пакетов) сопровождалось также и снижением времени доставки данных. Протокол обеспечивает эффективную маршрутизацию трафика для абонентов с различной степенью мобильности. За счёт того, что абоненты не имеют жестко закреплённых за собой функций и балансировка трафика осуществляется децентрализованно, обеспечивается гибкость в построении сети – в неё не требуется вводить специальных узлов маршрутизаторов. Это обеспечит эффективное функционирования сети подразделения аварийной службы.

**5. Заключение.** В работе предложен протокол маршрутизации сетевого уровня, предназначенный для организации децентрализованной связи в подразделениях аварийной службы, где абоненты отличаются разной степенью мобильности и типом передаваемого трафика, который может включать как данные, так и видео- и голосовые сообщения с предъявлением требований к оперативности доставки. Доказано, что для обеспечения высокой надёжности передачи данных в условиях описанных ограничений необходима комплексная оценка маршрута, а также обеспечение возможности одновременной передачи данных по нескольким параллельным маршрутам связи. Были предложены алгоритм обнаружения соседних абонентов, двухэтапный алгоритм построения квазипараллельных маршрутов связи между абонентами и алгоритм балансировки трафика по найденным маршрутам связи. Для оценки маршрутов связи обосновано использование модели градиентного

бустинга. Проведено экспериментальное исследование протокола и выполнено сравнение предложенных алгоритмов с применяющимися в настоящий момент решениями, показавшее, что предлагаемое решение позволит повысить надёжность и оперативность доставки данных, увеличить пропускную способность каналов связи за счет распараллеливания потоков передачи и обеспечить высокое QoS в сети с различной степенью мобильности абонентов. Предлагаемые решения защищены свидетельствами на регистрацию программ для ЭВМ [42, 43, 44].

### Литература

1. Xie Y., Min G., Bin H., Wang H., Ma S. Selection of Communication Frequency Points for Shortwave Radio Network Based on VOACAP // Proceedings of 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal (ICSP). 2021. pp. 488–491. DOI: 10.1109/ICSP51882.2021.9408644.
2. Yuxuan G., Yue L., Penghui S. Research Status of Typical Satellite Communication Systems // Proceedings of 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). 2021. pp. 1–3. DOI: 10.1109/ICOON53177.2021.9563909.
3. Duan T., Dinavahi V. Starlink Space Network-Enhanced Cyber-Physical Power System // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. vol. 12. no. 4. pp. 3673–3675. DOI: 10.1109/TSG.2021.3068046.
4. Li S., Zhao Y., He H., Li X., Wang W. The Design and Implementation of Data Link Terminal Based on Two Modes Satellite Communication // Proceedings of International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). 2022. pp. 1–5. DOI: 10.1109/ISNCC55209.2022.9851765.
5. Mohanti S., Bozkaya E., Naderi M.Y., Canberk B., Secinti G., Chowdhury K.R. WiFED Mobile: WiFi Friendly Energy Delivery with Mobile Distributed Beamforming // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2021. vol. 29. no. 3. pp. 1362–1375. DOI: 10.1109/TNET.2021.3061082.
6. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications // IEEE Std 802.11-2020. 2021. DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.
7. Han J., Geng J., Wu H., Wang K., Zhou H., Ren C., Hayat Q., Zhao X., Yang S., He C., Liang X., Jin R., Ma B., Shen J. The Ultra-Compact ELF Magneto-Mechanical Transmission Antenna with the Speed Modulated EM Signal Based on Three-Phase Induction Motor // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021. vol. 69. no. 9. pp. 5286–5296. DOI: 10.1109/TAP.2021.3060149.
8. Hopjan M. Mesh Network Application // Proceeding of International Conference on Military Technologies (ICMT). 2021. pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICMT52455.2021.9502829.
9. Wang W., Yang B., Shen S., Shi G., Liu Y. Message Delivery Probability of 3D MANETs Under Erasure Coding // Proceeding International Conference on Networking and Network Applications (NaNA). 2020. pp. 180–185. DOI: 10.1109/NaNA51271.2020.00039.
10. Shruthi S. Proactive routing protocols for a MANET – A review // Proceeding of International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC). 2017. pp. 821–827. DOI: 10.1109/I-SMAC.2017.8058294.

11. Ali A.K.S., Kulkarni U.V. Comparing and Analyzing Reactive Routing Protocols (AODV, DSR and TORA) in QoS of MANET // *Proceeding of IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)*. Hyderabad. India. 2017. pp. 345–348. DOI: 10.1109/IACC.2017.0081.
12. Chai Y., Shi W. Access-enhanced hybrid routing protocol for hybrid wireless mesh network // *IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*. Guangzhou. China. 2017. pp. 138–141. DOI: 10.1109/ICCSN.2017.8230094.
13. Ramaiah P., Narmadha R., Gurumoorthy S., Kokulavani K., Gowri V. Exploring Vanet Routing Using A Novel Geographic Routing Protocol // *Proceeding of International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)*. 2023. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICDCECE57866.2023.10150904.
14. El-Hadidi M.G., Azer M.A. Traffic Analysis for Real Time Applications and its Effect on QoS in MANETs // *Proceeding of International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC)*. 2021. pp. 155–160. DOI: 10.1109/MIUCC52538.2021.9447611.
15. Kiki M.J.M., Iddi I., Yunusa H. Improved AODMV Routing Protocol in Manet UAV Based on Virtual Hop // *Proceeding of 3rd International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI)*. 2021. pp. 146–151. DOI: 10.1109/ICCCI51764.2021.9486832.
16. Yuan Y.H., Chen H.M., Jia M. An Optimized Ad-hoc On-demand Multipath Distance Vector(AODMV) Routing Protocol // *Proceeding of Asia-Pacific Conference on Communications*. 2005. pp. 569–573. DOI: 10.1109/APCC.2005.1554125.
17. Lee R.H., Jeon D.A. Mobile Ad-hoc Network multi-path routing protocol based on biological attractor selection for disaster recovery communication // *ICT Express*. 2015. vol. 1. no. 2. pp. 86–89. DOI: 10.1016/j.ict.2015.10.001.
18. Tabatabaei S., Nahook H.N. A new routing protocol in MANET using cuckoo optimization algorithm // *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI)*. 2020. vol. 9. no. 1. pp. 75–82. DOI: 10.22061/JECEI.2020.7511.397.
19. Subramaniam K., Tamilselvan L. Predictive energy efficient and reliable multicast routing in MANET // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2015. vol. 9. pp. 706–714. DOI: 10.19026/rjaset.9.2615.
20. Papanna N., Reddy A.R.M., Seetha M. EELAM: Energy efficient lifetime aware multicast route selection for mobile ad hoc networks // *Applied Computing and Informatics*. 2019. vol. 15. pp. 120–128. DOI: 10.1016/j.aci.2017.12.003.
21. Kacem I., Sait B., Mekhilef S., Sabeur N. A New Routing Approach for Mobile Ad Hoc Systems Based on Fuzzy Petri Nets and Ant System // *IEEE Access*. 2018. vol. 6. pp. 65705–65720. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2878145.
22. Bhattacharya A., Sinha K. An efficient protocol for load-balanced multipath routing in mobile ad hoc networks // *Ad Hoc Networks*. 2017. vol. 63. pp. 104–114. DOI: 10.1016/j.adhoc.2017.05.008.
23. Chen J., Li Z., Liu J., Kuo Y. QoS multipath routing protocol based on cross layer design for ad hoc networks // *Proceeding International Conference on Internet Computing and Information Services*. 2011. pp. 261–264. DOI: 10.1109/ICICIS.2011.168.
24. Pandey P., Singh R. Efficient Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing Protocol Based on Route Stability in MANETs // *International Journal of Wireless Information Networks*. 2022. vol. 29. no. 3. pp. 393–404. DOI: 10.1007/s10776-022-00570-x.
25. Xiaoxia Q, Wang X., Jiang F. Multi-path Routing Improved Protocol in AODV Based on Nodes Energy // *International Journal of Future Generation Communication and Networking*. 2015. vol. 8. no. 1. pp. 207–214. DOI: 10.14257/ijfgcn.2015.8.1.21.

26. Alghamdi S.A. Load balancing maximal minimal nodal residual energy ad hoc on-demand multipath distance vector routing protocol (LBMMRE-AOMDV) // *Wireless Netw.* 2016. vol. 22. pp. 1355–1363. DOI: 10.1007/s11276-015-1029-6.
27. Er-rouidi M., Moudni H., Mouncif H., Merbouha A. A balanced energy consumption in mobile ad hoc network // *Procedia Computer Science.* 2019. vol. 151. pp. 1182–1187. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.169.
28. Anand M., Sasikala T. Efficient energy optimization in mobile ad hoc network (MANET) using better-quality AODV protocol // *Cluster Computing.* 2019. vol. 22. pp. 12681–12687. DOI: 10.1007/s10586-018-1721-2.
29. Periyasamy P., Karthikeyan E. Link reliable multipath routing protocol for mobile ad hoc networks // *Proceeding of International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015].* 2015. pp. 1–7. DOI: 10.1109/ICCPCT.2015.7159291.
30. Benatia S.E., Smail O., Boudjelal M., Cousin B. ESMRsc: Energy Aware and Stable Multipath Routing Protocol for Ad Hoc Networks in Smart City // *Proceeding of Renewable Energy for Smart and Sustainable Cities.* 2019. pp. 31–42.
31. Rump F., Jopen S.A., Frank M. Using Probabilistic Multipath Routing to Improve Route Stability in MANETs // *Proceeding IEEE 41st Conference on Local Computer Networks (LCN), Dubai, United Arab Emirates.* 2016. pp. 192–195. DOI: 10.1109/LCN.2016.40.
32. Gomes R.D., Queiroz D.V., Lima A.C., Fonseca I.E., Alencar M.S. Real-time link quality estimation for industrial wireless sensor networks using dedicated nodes // *Ad Hoc Networks.* 2017. vol. 59. pp. 116–133. DOI: 10.1016/j.adhoc.2017.02.007.
33. Alghamdi S.A. Load balancing ad hoc on-demand multipath distance vector (LBAOMDV) routing protocol // *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.* 2015. no. 242. DOI: 10.1186/s13638-015-0453-8.
34. Pourbemany J., Mirjalily G., Abouei J., Fahim Raouf A.H. Load Balanced Ad-Hoc On-Demand Routing Based on Weighted Mean Queue Length Metric // *Proceeding of Electrical Engineering (ICEE).* 2018. pp. 470–475. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472705.
35. Novikov A.S., Ivutin A., Voloshko A., Pestin M.S. Method for Optimizing Ad-hoc Networks Communication Protocol Parameter Values // *Proceeding of 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO).* 2020. pp. 1–4. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134154.
36. Постников В.М., Спиридонов С.Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // *Наука и Образование.* 2015. № 06. С. 267–287. DOI: 10.7463/0615.0780334.
37. Piryonesi S.M., El-Diraby T. Data Analytics in Asset Management: Cost-Effective Prediction of the Pavement Condition Index // *Journal of Infrastructure Systems.* 2020. vol. 26. no. 1. 25 p. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000512.
38. 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 // *International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation.* 2022. pp. 553–558. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896315.
39. Jhaveri S., Khedkar I., Kantharia Y., Jaswal S. Success Prediction using Random Forest, CatBoost, XGBoost and AdaBoost for Kickstarter Campaigns // *Proceeding of 3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC).* 2019. pp. 1170–1173. DOI: 10.1109/ICCMC.2019.8819828.
40. Пестин М.С., Новиков А.С. Имитационная модель беспроводной ad-hoc сети для исследования алгоритмов маршрутизации трафика // *Прикладная информатика.* 2022. Т. 17. № 4. С. 75–86. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-75-86.
41. Pullin A., Pattinson C., Kor A.L. Building Realistic Mobility Models for Mobile Ad Hoc Networks // *Informatics.* 2018. vol. 5. no. 2. p. 22. DOI: 10.3390/informatics5020022.

42. Пестин М.С., Новиков А.С. Программа для исследования характеристик протоколов маршрутизации в беспроводных децентрализованных сетях связи // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022612832. 2022.
43. 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 RU 2022663501. 2022.
44. Пестин М.С., Новиков А.С. Программное обеспечение для маршрутизации трафика в беспроводных децентрализованных сетях связи // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022663502. 2022.

**Ивутин Алексей Николаевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра вычислительной техники, Тульский государственный университет (ТулГУ). Область научных интересов: многоагентные системы, учебно-тренировочные средства, параллельные и распределенные информационные процессы. Число научных публикаций — 160. alexey.ivutin@gmail.com; проспект Ленина, 92, 300012, Тула, Россия; р.т.: +7(4872)257-943.

**Новиков Александр Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры, кафедра вычислительной техники, Тульский государственный университет (ТулГУ). Область научных интересов: сетевые протоколы, обеспечение устойчивой связи в беспроводных децентрализованных сетях, статический и динамический анализ программного кода, поиск гонок данных в программном обеспечении, распараллеливание программного кода. Число научных публикаций — 87. thesis-tsu@yandex.ru; проспект Ленина, 92, 300012, Тула, Россия; р.т.: +7(4872)257-943.

**Пестин Максим Сергеевич** — аспирант, кафедра вычислительной техники, Тульский государственный университет. Область научных интересов: взаимодействие программ и программных систем, беспроводные децентрализованные самоорганизующиеся сети. Число научных публикаций — 25. maxime1996rus@mail.ru; проспект Ленина, 92, 300012, Тула, Россия; р.т.: +7(4872)257-943.

**Волошко Анна Геннадьевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры, кафедра вычислительной техники, Тульский государственный университет (ТулГУ). Область научных интересов: сетевые протоколы, моделирование параллельных систем, статический и динамический анализ программного кода, поиск гонок данных в программном обеспечении, распараллеливание программного кода. Число научных публикаций — 91. atroshina@mail.ru; проспект Ленина, 92, 300012, Тула, Россия; р.т.: +7(4872)257-943.

A. IVUTIN, A. NOVIKOV, M. PESTIN, A. VOLOSHKO  
**DECENTRALIZED PROTOCOL FOR ORGANIZING  
SUSTAINABLE INTERACTION BETWEEN SUBSCRIBERS  
IN NETWORKS WITH HIGH DYNAMICS OF TOPOLOGY  
CHANGES**

*Ivutin A., Novikov A., Pestin M., Voloshko A.* **Decentralized Protocol for Organizing Sustainable Interaction between Subscribers in Networks with High Dynamics of Topology Changes.**

**Abstract.** Emergency services often have to carry out rescue and liquidation operations in the absence of centralized communications. The inability to ensure stable communication between members of the rescue unit significantly reduces the quality of work. Moreover, in modern realities, stable communication means not only voice exchange, which can be provided by shortwave radio transmitters, but also intensive exchange of large volumes of traffic. The use of standard solutions based on standard network equipment (Wi-Fi, satellite communications, etc.) and existing algorithms for ensuring quality of service in the conditions under consideration does not allow quickly ensuring information exchange between heterogeneous subscribers. Moreover, operation in high-Hz bands can be very difficult in the presence of obstacles, which reduces the overall coverage area and the quality of data transmission. We propose a network layer routing protocol designed to organize decentralized communication in an emergency service department, where subscribers have different degrees of mobility and types of transmitted traffic. This protocol includes algorithms for connecting to the network, detecting optimal and alternative communication routes, and transmitting and balancing traffic along the found routes. The original route search algorithm analyzes the performance of communication channels and determines all possible paths for transmitting traffic between subscribers. Using the route evaluation function based on gradient boosting of decision trees, optimal and alternative communication routes are formed, and when transmitting data, traffic balancing is performed based on the received information. An experimental study of the proposed protocol showed an improvement in the speed of deployment and quality of service in scenarios with varying degrees of subscriber mobility.

**Keywords:** MANET, ad-hoc routing protocol, routing metrics, gradient boosting, packet delivery ratio, end-to-end delay, quality of service.

## References

1. Xie Y., Min G., Bin H., Wang H., Ma S. Selection of Communication Frequency Points for Shortwave Radio Network Based on VOACAP. Proceedings of 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal (ICSP). 2021. pp. 488–491. DOI: 10.1109/ICSP51882.2021.9408644.
2. Yuxuan G., Yue L., Penghui S. Research Status of Typical Satellite Communication Systems. Proceedings of 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). 2021. pp. 1–3. DOI: 10.1109/ICOON53177.2021.9563909.
3. Duan T., Dinavahi V. Starlink Space Network-Enhanced Cyber-Physical Power System. IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. vol. 12. no. 4. pp. 3673–3675. DOI: 10.1109/TSG.2021.3068046.
4. Li S., Zhao Y., He H., Li X., Wang W. The Design and Implementation of Data Link Terminal Based on Two Modes Satellite Communication. Proceedings of International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). 2022. pp. 1–5. DOI: 10.1109/ISNCC55209.2022.9851765.

5. Mohanti S., Bozkaya E., Naderi M.Y., Canberk B., Secinti G., Chowdhury K.R. WiFED Mobile: WiFi Friendly Energy Delivery with Mobile Distributed Beamforming. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2021. vol. 29. no. 3. pp. 1362–1375. DOI: 10.1109/TNET.2021.3061082.
6. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE Std 802.11-2020*. 2021. DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.
7. Han J., Geng J., Wu H., Wang K., Zhou H., Ren C., Hayat Q., Zhao X., Yang S., He C., Liang X., Jin R., Ma B., Shen J. The Ultra-Compact ELF Magneto-Mechanical Transmission Antenna with the Speed Modulated EM Signal Based on Three-Phase Induction Motor. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2021. vol. 69. no. 9. pp. 5286–5296. DOI: 10.1109/TAP.2021.3060149.
8. Hopjan M. Mesh Network Application. *Proceeding of International Conference on Military Technologies (ICMT)*. 2021. pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICMT52455.2021.9502829.
9. Wang W., Yang B., Shen S., Shi G., Liu Y. Message Delivery Probability of 3D MANETs Under Erasure Coding. *Proceeding International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*. 2020. pp. 180–185. DOI: 10.1109/NaNA51271.2020.00039.
10. Shruthi S. Proactive routing protocols for a MANET – A review. *Proceeding of International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*. 2017. pp. 821–827. DOI: 10.1109/I-SMAC.2017.8058294.
11. Ali A.K.S., Kulkarni U.V. Comparing and Analyzing Reactive Routing Protocols (AODV, DSR and TORA) in QoS of MANET. *Proceeding of IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)*. Hyderabad. India. 2017. pp. 345–348. DOI: 10.1109/IACC.2017.0081.
12. Chai Y., Shi W. Access-enhanced hybrid routing protocol for hybrid wireless mesh network. *IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*. Guangzhou. China. 2017. pp. 138–141. DOI: 10.1109/ICCSN.2017.8230094.
13. Ramaiah P., Narmadha R., Gurumoorthy S., Kokulavani K., Gowri V. Exploring Vanet Routing Using A Novel Geographic Routing Protocol. *Proceeding of International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)*. 2023. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICDCECE57866.2023.10150904.
14. El-Hadidi M.G., Azer M.A. Traffic Analysis for Real Time Applications and its Effect on QoS in MANETs. *Proceeding of International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC)*. 2021. pp. 155–160. DOI: 10.1109/MIUCC52538.2021.9447611.
15. Kiki M.J.M., Iddi I., Yunusa H. Improved AOMDV Routing Protocol in Manet UAV Based on Virtual Hop. *Proceeding of 3rd International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI)*. 2021. pp. 146–151. DOI: 10.1109/ICCCI51764.2021.9486832.
16. Yuan Y.H., Chen H.M., Jia M. An Optimized Ad-hoc On-demand Multipath Distance Vector(AOMDV) Routing Protocol. *Proceeding of Asia-Pacific Conference on Communications*. 2005. pp. 569–573. DOI: 10.1109/APCC.2005.1554125.
17. Lee R.H., Jeon D.A. Mobile Ad-hoc Network multi-path routing protocol based on biological attractor selection for disaster recovery communication. *ICT Express*. 2015. vol. 1. no. 2. pp. 86–89. DOI: 10.1016/j.ict.2015.10.001.

18. Tabatabaei S., Nahook H.N. A new routing protocol in MANET using cuckoo optimization algorithm. *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI)*. 2020. vol. 9. no. 1. pp. 75–82. DOI: 10.22061/JECEI.2020.7511.397.
19. Subramaniam K., Tamilselvan L. Predictive energy efficient and reliable multicast routing in MANET. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2015. vol. 9. pp. 706–714. DOI: 10.19026/rjaset.9.2615.
20. Papanna N., Reddy A.R.M., Seetha M. EELAM: Energy efficient lifetime aware multicast route selection for mobile ad hoc networks. *Applied Computing and Informatics*. 2019. vol. 15. pp. 120–128. DOI: 10.1016/j.aci.2017.12.003.
21. Kacem I., Sait B., Mekhilef S., Sabeur N. A New Routing Approach for Mobile Ad Hoc Systems Based on Fuzzy Petri Nets and Ant System. *IEEE Access*. 2018. vol. 6. pp. 65705–65720. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2878145.
22. Bhattacharya A., Sinha K. An efficient protocol for load-balanced multipath routing in mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*. 2017. vol. 63. pp. 104–114. DOI: 10.1016/j.adhoc.2017.05.008.
23. Chen J., Li Z., Liu J., Kuo Y. QoS multipath routing protocol based on cross layer design for ad hoc networks. *Proceeding International Conference on Internet Computing and Information Services*. 2011. pp. 261–264. DOI: 10.1109/ICICIS.2011.168.
24. Pandey P., Singh R. Efficient Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing Protocol Based on Route Stability in MANETs. *International Journal of Wireless Information Networks*. 2022. vol. 29. no. 3. pp. 393–404. DOI: 10.1007/s10776-022-00570-x.
25. Xiaoxia Q, Wang X., Jiang F. Multi-path Routing Improved Protocol in AODV Based on Nodes Energy. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*. 2015. vol. 8. no. 1. pp. 207–214. DOI: 10.14257/ijfgen.2015.8.1.21.
26. Alghamdi S.A. Load balancing maximal minimal nodal residual energy ad hoc on-demand multipath distance vector routing protocol (LBMMRE-AOMDV). *Wireless Netw.* 2016. vol. 22. pp. 1355–1363. DOI: 10.1007/s11276-015-1029-6.
27. Er-rouidi M., Moudni H., Mouncif H., Merbouha A. A balanced energy consumption in mobile ad hoc network. *Procedia Computer Science*. 2019. vol. 151. pp. 1182–1187. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.169.
28. Anand M., Sasikala T. Efficient energy optimization in mobile ad hoc network (MANET) using better-quality AODV protocol. *Cluster Computing*. 2019. vol. 22. pp. 12681–12687. DOI: 10.1007/s10586-018-1721-2.
29. Periyasamy P., Karthikeyan E. Link reliable multipath routing protocol for mobile ad hoc networks. *Proceeding of International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015]*. 2015. pp. 1–7. DOI: 10.1109/ICCPCT.2015.7159291.
30. Benatia S.E., Smail O., Boudjelal M., Cousin B. ESMRsc: Energy Aware and Stable Multipath Routing Protocol for Ad Hoc Networks in Smart City. *Proceeding of Renewable Energy for Smart and Sustainable Cities*. 2019. pp. 31–42.
31. Rump F., Jopen S.A., Frank M. Using Probabilistic Multipath Routing to Improve Route Stability in MANETs. *Proceeding IEEE 41st Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Dubai, United Arab Emirates. 2016. pp. 192–195. DOI: 10.1109/LCN.2016.40.
32. Gomes R.D., Queiroz D.V., Lima A.C., Fonseca I.E., Alencar M.S. Real-time link quality estimation for industrial wireless sensor networks using dedicated nodes. *Ad Hoc Networks*. 2017. vol. 59. pp. 116–133. DOI: 10.1016/j.adhoc.2017.02.007.
33. Alghamdi S.A. Load balancing ad hoc on-demand multipath distance vector (LBAOMDV) routing protocol // *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2015. no. 242. DOI: 10.1186/s13638-015-0453-8.
34. Pourbemany J., Mirjalily G., Abouei J., Fahim Raouf A.H. Load Balanced Ad-Hoc On-Demand Routing Based on Weighted Mean Queue Length Metric. *Proceeding of Electrical Engineering (ICEE)*. 2018. pp. 470–475. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472705.

35. Novikov A.S., Ivutin A., Voloshko A., Pestin M.S. Method for Optimizing Ad-hoc Networks Communication Protocol Parameter Values. Proceeding of 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). 2020. pp. 1–4. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134154.
36. Postnikov V.M., Spiridonov S.B. [Selecting methods of the weighting factors of local criteria]. Nauka i Obrazovanie – Science and Education. 2015. no. 06. pp. 267–287. DOI: 10.7463/0615.0780334. (In Russ.).
37. Piryonesi S.M., El-Diraby T. Data Analytics in Asset Management: Cost-Effective Prediction of the Pavement Condition Index. Journal of Infrastructure Systems. 2020. vol. 26. no. 1. 25 p. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000512.
38. 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. International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation. 2022. pp. 553–558. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896315.
39. Jhaveri S., Khedkar I., Kantharia Y., Jaswal S. Success Prediction using Random Forest, CatBoost, XGBoost and AdaBoost for Kickstarter Campaigns. Proceeding of 3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). 2019. pp. 1170–1173. DOI: 10.1109/ICCMC.2019.8819828.
40. Pestin M., Novikov A. [Simulation model of wireless ad-hoc network to study algorithms of traffic routing]. Prikladnaya informatika – Journal of Applied Informatics. 2022. vol. 17. no. 4. pp. 75–86. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-75-86. (In Russ.).
41. Pullin A., Pattinson C., Kor A.L. Building Realistic Mobility Models for Mobile Ad Hoc Networks. Informatics. 2018. vol. 5. no. 2. p. 22. DOI: 10.3390/informatics5020022.
42. Pestin M.S., Novikov A.S. Programma dlia issledovaniia kharakteristik protokolov marshrutizatsii v besprovodnykh detsentralizovannykh setiakh sviazi [Software for studying the characteristics of routing protocols in wireless decentralized communication networks]. Certificate of registration of a computer program, no. 2022612832. 2022. (In Russ.).
43. Pestin M.S., Novikov A.S. Programmnoe obespechenie dlia modelirovaniia vzaimnogo prostranstvennogo peremeshcheniia otdel'nykh uzlov v besprovodnykh detsentralizovannykh setiakh sviazi [Software for modeling the mutual spatial movement of individual nodes in wireless decentralized communication networks]. Certificate of registration of a computer program, no. 2022663501. 2022. (In Russ.).
44. Pestin M. S., Novikov A. S. Programmnoe obespechenie dlia marshrutizatsii-trafika v besprovodnykh detsentralizovannykh setiakh sviazi [Software for Traffic Routing in Wireless Decentralized Communication Networks]. Certificate of registration of a computer program, no. 2022663502. 2022. (In Russ.).

**Ivutin Alexey** — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Head of the department, Department of computer technology, Tula State University. Research interests: multi-agent systems, training aids and simulators, parallel and distributed information processes. The number of publications — 160. alexey.ivutin@gmail.com; 92, Lenin Av., 300012, Tula, Russia; office phone: +7(4872)257-943.

**Novikov Alexander** — Ph.D., Associate professor of the department, Department of computer technology, Tula State University. Research interests: network protocols, ensuring stable communications in wireless decentralized networks, static and dynamic analysis of program code, data races detection in software, parallelizing program code. The number of publications — 87. thesis-tsu@yandex.ru; 92, Lenin Av., 300012, Tula, Russia; office phone: +7(4872)257-943.

**Pestín Maxim** — Postgraduate, Department of computer technology, Tula state university. Research interests: interaction of programs and software systems, wireless decentralized self-organizing networks. The number of publications — 25. maxime1996rus@mail.ru; 92, Lenin Av., 300012, Tula, Russia; office phone: +7(4872)257-943.

**Voloshko Anna** — Ph.D., Associate professor of the department, Department of computer technology, Tula State University. Research interests: network protocols, simulation of parallel systems, static and dynamic analysis of program code, data race detection in software, parallelizing program code. The number of publications — 91. atroshina@mail.ru; 92, Lenin Av., 300012, Tula, Russia; office phone: +7(4872)257-943.