

УДК 004.75

Алгоритм маршрутизации для обеспечения быстрого восстановления связи при обрывах маршрутов в сетях MANET

Новиков А. С., Ивутин А. Н., Пестин М. С.

Постановка задачи: Беспроводные сети MANET мобильных абонентов характеризуются высокой динамикой изменения топологии. Ввиду этого обнаруженные маршруты передачи трафика относительно быстро теряют свою актуальность. Поэтому специальным программным агентам – службам сети, функционирующим на каждом из абонентов, необходимо регулярно производить обновление маршрутов, для чего им требуется взаимодействовать между собой. В протоколах проактивной маршрутизации восстановление неисправных маршрутов сопровождается высоким объёмом служебного трафика, который возникает в результате взаимодействия множества абонентов между собой. В применяемых на практике протоколах реактивной маршрутизации выполняется повторный поиск маршрутов до целевого абонента. При этом службы реактивных протоколов взаимодействуют косвенно через сообщения запросов маршрутов, из-за чего отсутствуют возможности комплексной оценки восстанавливаемых путей. Поэтому для увеличения срока жизни маршрутов связи в настоящей работе предлагается алгоритм маршрутизации, который позволяет обеспечить оперативное восстановление маршрутов с образовавшимися обрывами при невысоком объёме служебного трафика и наименьшем задействовании дополнительных узлов. **Целью работы** является сокращение времени восстановления маршрутов с разрывами каналов связи между абонентами и увеличение времени их эксплуатации в сетях MANET. Предлагается производить локальное восстановление маршрутов связи на неисправных участках путем удаления из актуального маршрута неисправного абонента или канала связи, введения дополнительных транзитных абонентов, при условии, что оценка критерия эффективности качества обновлённого пути превышает минимально допустимый предел. **Используемые методы:** решение задачи восстановления маршрутов с разрывами каналов связи между абонентами, используемых в сетях MANET для передачи трафика, основано на методе реактивного взаимодействия между службами узлов, локализованных в радиусе двух шагов от абонента, обнаружившего разрыв связи и инициирующего поиск альтернативного пути. Кроме того, в алгоритме предлагается использовать процедуру проактивного обмена между смежными абонентами первого и второго порядка для актуализации информации о показателях производительности самих узлов и пропускной способности смежных каналов. Описанный процесс синхронизации совмещается с процедурами обеспечения и поддержания связи между абонентами. **Новизна:** предложен алгоритм маршрутизации, который может быть применён для быстрого восстановления маршрутов связи с образовавшимися разрывами, отличающийся использованием локализованного реактивного взаимодействия и проактивным обменом между смежными абонентами о производительности собственных узлов. **Результат:** использование представленного алгоритма маршрутизации позволяет сократить время восстановления маршрутов между абонентами и объём используемого для этого служебного трафика, уменьшить задержку и повысить надёжность передачи пакетов данных. Проведенное моделирование для сети из 20 узлов продемонстрировало уменьшение времени для восстановления маршрутов связи в 1,5–2 раза по сравнению со стандартными технологиями, сокращение среднего времени передачи трафика в сети на 8–9 % и повышение надёжности на 3–4%. **Практическая значимость:** представленное решение реализовано в качестве программного модуля восстановления маршрутов связи реактивного многопутевого протокола маршрутизации трафика в сети MANET на языке C++, который может быть имплементирован в из-

Библиографическая ссылка на статью:

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. 2024. № 2. С. 14-42. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-014-042

Reference for citation:

Novikov A. S., Ivutin A. N., Pestin M. S. Routing algorithm to ensure quick restoration of communication in case of route breaks in MANET networks. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 2, pp. 14-42 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-014-042

вестные реализации протоколов организации передачи данных в сетях MANET служб специального назначения, в том числе в военной сфере, экстренного реагирования, поисково-спасательных операций и научных экспедиций.

Ключевые слова: MANET, протокол маршрутизации, служба маршрутизации, программный агент сети, многопутевая маршрутизация, реактивная маршрутизация, восстановление маршрута.

1. Актуальность

Мобильная одноранговая сеть (MANET – mobile ad-hoc network) является подходом, который позволяет организовывать связь между мобильными абонентами в условиях отсутствия централизованной сетевой инфраструктуры или возможностей её использования [1]. Особенно это актуально в областях обеспечения связью служб специального назначения, в том числе в военной сфере, экстренного реагирования, поисково-спасательных операций и научных экспедиций. В таких сетях, имеющих динамически меняющуюся ячеистую топологию, каждый абонент является одновременно конечной точкой и маршрутизатором для других узлов, что обеспечивает передачу трафика и его балансировку [2] между другими абонентами.

На каждом узле сети действуют службы маршрутизации – программные агенты сети [3], которые обеспечивают построение маршрутов и передачу трафика по ним. Они реализуют протоколы проактивной и реактивной маршрутизации [4, 5]. Проактивные протоколы предполагают, что агенты периодически обмениваются информацией о соединениях между абонентами. За счет этого формируется таблица маршрутизации, по которой можно строить маршруты до целевых абонентов. В реактивных протоколах маршруты строятся с использованием алгоритма лавинной рассылки. В нем программные агенты сети взаимодействуют друг с другом для достижения запроса целевого абонента и передачи сформированного маршрута службе, инициировавшей поиск. Недостатком такого подхода является высокая задержка перед передачей данных для поиска маршрута, если ранее не было актуальных маршрутов до целевого абонента.

Пути передачи трафика имеют сравнительно небольшой срок службы из-за высокой динамики изменения топологии, что требует их регулярного обслуживания или переопределения. Использование существующих технологий проактивной маршрутизации сопровождается большим объемом служебного трафика для построения графа сети для каждого из абонентов. Это обуславливает высокую инерционность данных на маршрутах связи и, как следствие, низкую пригодность проактивных протоколов в высокомобильных сетях. Программные службы протоколов реактивной маршрутизации взаимодействуют опосредованно через сообщения запроса маршрута, что не позволяет всесторонне оценивать маршруты связи, находить оптимальные маршруты и оперативно их восстанавливать. Кроме того, в большинстве случаев процесс восстановления инициируется узлом-источником, которому должно быть отправлено сообщение о сбое маршрута.

Из-за отсутствия процедуры локального восстановления маршрутов возникают дополнительные задержки передачи данных. В то же время в проактив-

ных протоколах программная служба узла-инициатора передачи данных может не располагать актуальными данными о состоянии соединений между удаленными абонентами, из-за чего построение альтернативного маршрута связи не гарантируется за приемлемое время. В реактивных протоколах процесс восстановления маршрута представляет собой повторный поиск.

Таким образом, в настоящей работе предлагается новый алгоритм маршрутизации для обеспечения быстрого восстановления связи при обрывах маршрутов, используя который узлы могут производить обслуживание маршрутов связи сетей MANET в части оперативных корректировок неисправных участков и восстановления разрывов на них в условиях высокой динамики изменения топологии ad-hoc сети.

В разделе 2 анализируются подходы, методы и алгоритмы, используемые при восстановлении и обслуживании маршрутов связи в сетях MANET. В разделе 3 представляется алгоритм маршрутизации для обеспечения быстрого восстановления связи при обрывах маршрутов в сетях MANET, а также предложена структура служебных пакетов, используемые программными агентами сети при взаимодействии. В разделе 4 приводится описание протокола многопутевой маршрутизации, в который был внедрён разработанный алгоритм. В разделе 5 произведено описание экспериментального исследования по проверке разработанного алгоритма. В разделе 6 подведены итоги исследования, которые показывают, что предложенный алгоритм позволяет сократить время восстановления связи, повысить надёжность и оперативность доставки данных по маршрутам передачи данных в сетях MANET.

2. Обзор работ по теме исследования

Одним из подходов к решению проблемы восстановления связи между абонентами является резервирование запасных маршрутов. Эта концепция реализуется такими протоколами многопутевой маршрутизации, как AOMDV [6], DSR, OLSR [7], ESIM-DSR [8], AOMDV_RR [9]. Если основной маршрут становится неисправным во время передачи по нему трафика, на исходный узел отправляется уведомление о сбое канала. Если имеется запасной маршрут, передача трафика производится по нему. Однако наличие резервных каналов связи не гарантируется во всех случаях. В этом случае повторяется процесс построения маршрута до целевого абонента.

Тематике обеспечения устойчивости сети и восстановления маршрутов связи посвящены труды Макаренко С.И. [10-12], Михайлова Р.Л. [11, 13], Перепёлкина Д.А. [14, 15], Одоевского С.М. [16, 17], Лебедева П.В. [17; 18], Бахтина А.А. [19]. В частности, в работах [10, 11] предлагается метод и модифицированный на его основе алгоритм Беллмана-Форда для обеспечения устойчивости телекоммуникационных сетей за счёт использования её топологической избыточности. При поиске маршрута для каждого промежуточного узла запоминаются соседние абоненты в качестве элементов потенциальных резервных путей. На каждом последующем шаге функционирования алгоритма обнаружения маршрута проверяется наличие текущего достигнутого абонента в перечне эле-

ментов потенциальных резервных путей. Если абонент входит в данный перечень, формируется резервный путь к ранее достигнутому узлу. В случае отказа элементов маршрута для передачи трафика выбирается резервный путь с минимальным весом, не содержащий отказавшие элементы. Это позволяет оперативно восстанавливать связь между узлами с минимальными временными задержками.

В статье Перепёлкина Д.А. [14] предложен алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола OSPF при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети. В работе [15] производится описание алгоритма адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола IGRP при динамическом добавлении элементов корпоративной сети. В соответствии с алгоритмами, перестроение таблиц маршрутизации производится не полностью, а только той её части, в которой произошли изменения. При этом в обоих алгоритмах вычислительная сложность изменения дерева кратчайших путей представляет линейную функцию от числа вершин.

Одоевским С.М. и Бусыгиным А.В. [16] была разработана аналитическая модель обслуживания мультимедийного трафика с распределением Парето на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования. При её помощи рассчитываются показатели своевременного обслуживания трафика в сетевом устройстве коммутации с помощью аналитических выражений. Для моделирования обслуживания самоподобного трафика в сетевых устройствах использовалась модель системы массового обслуживания. Среднее время ожидания применялось в качестве показателя своевременности обслуживания. Полученные результаты могут быть использованы при выборе и настройке механизмов обеспечения качества обслуживания мультимедийного трафика в сетевых устройствах коммутации для оперативного прогноза ожидаемых показателей качества обслуживания.

В статьях Одоевского С.М. и Лебедева П.В. [16-17] описан общий подход решения проблемы обеспечения функциональной устойчивости и непрерывности функционирования системы связи. Описывается определение состава, размещения и времени активной работы станций системы технологического управления, при этом учитываются функциональные зависимости от показателей структурной и функциональной устойчивости инфокоммуникационной сети. Это позволяет смоделировать различные ситуационные задачи, максимально приближенные к условиям реального применения. При помощи модели достигается обеспечение выполнения требуемого перечня функций и задач, а также целевого назначения системы.

Лебедев П.В. предлагает методику [18] повышения устойчивости функционирования инфокоммуникационной сети на основе выработки оптимальных управляющих воздействий, которая включает расчёт и перераспределение пропускной способности по типам трафика, расчёт коэффициента загрузки обслуживающих устройств с учётом обеспечения заданного качества обслуживания (QoS) под воздействием дестабилизирующих факторов. Применение методики позволяет защитить служебный трафик от внешних воздействий и тем самым повысить устойчивость функционирования сети в целом.

В. Лалита и Р.С. Раджеш в статье [20] представили протокол ELRAODV, основанный на AODV. В нём маршрут восстанавливается локально. В отличие от базового протокола, RREP содержит два предыдущих узла маршрута. Кроме того, в качестве альтернативы пакету «Hello» представлен пакет «NHello», который содержит список соседей для абонента отправителя. Поэтому в случае обрыва канала связи имеется возможность быстро восстановить маршрут, если между абонентами, потерявшими связь, есть общий сосед. Ч. Джин и С. Ан разработали алгоритм [21] построения альтернативного пути, при котором каждому узлу основного маршрута известен ближайший путь к узлам альтернативного маршрута.

В статье [22] предлагается подход к восстановлению маршрутов связи, называемый make-before-break. Абоненты связи следят за состоянием абонентов связи – уровнем остаточной энергии и размером очередей входящих пакетов. В случае их критических показателей осуществляется запрос соседним абонентам о наличии актуальных маршрутов до целевого абонента. Если один из абонентов отвечает положительно, нисходящая часть маршрута подключается к актуальному маршруту соседнего абонента.

В [23] для восстановления маршрутов связи используется прогноз времени жизни каналов связи на основе алгоритма роя частиц (PSO – particle swarm optimization). На основе показателей мобильности узлов, расстояния между ними, интенсивности энергопотребления узлами прогнозируется срок службы каналов связи. Информация распределяется между всеми узлами. В случае ухудшения характеристик существующих маршрутов они перестраиваются с включением более производительных каналов и узлов. Этот подход более адаптирован для сетей с проактивной маршрутизацией трафика. Однако его эффективность снижается в высокодинамичных сетях связи.

Авторы работы [24] (Ч. Чжон, К. Ли, Ч. Ким) предложили концепцию резервного узла для восстановления маршрута связи. Абоненты, являющиеся соседями узлов маршрута, знают о его составе. Они прослушивают передачу данных по маршруту каждые 3 последовательных узла (узел-источник, транзитный узел, узел назначения). Если от транзитного узла не получены сообщения подтверждения передачи данных, его функцию в маршруте берет на себя резервный узел. Подход применим в тех случаях, когда узел-источник, транзитный абонент и узел назначения являются соседями резервного узла.

А. Раджарам и др. предлагают [25] определять надежные узлы в процессе работы сети. Эти узлы можно использовать для надежной передачи данных. Во время трансляции трафика по сети отслеживается, какие абоненты теряют данные чаще других. Эти абоненты исключаются из маршрутов, а надежные узлы включаются в маршрут. В тоже время не гарантируется, что рядом с абонентом с низкой производительностью находится надежный узел.

Рассмотренные подходы, методы и алгоритмы позволяют повысить устойчивость телекоммуникационных сетей связи и обеспечивают восстановление маршрутов между абонентами отправителем и получателем. Однако в представленных публикациях не учитывается высокая динамика изменения то-

пологии мобильных децентрализованных сетей связи, ввиду чего эффективность механизмов восстановления путей не гарантируется.

3. Алгоритм маршрутизации для обеспечения быстрого восстановления связи при обрывах маршрутов в сетях MANET

В рамках разработанного алгоритма используются следующие обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения, используемые в предложенном алгоритме

Обозначение	Физический смысл обозначения
P	– корректируемый маршрут передачи трафика в MANET. Маршрут – набор узлов, последовательно соединённые между собой каналами связи, через которые пакеты трафика могут быть доставлены от абонента-источника абоненту-назначения
$C_1(A, B)$	– предикат, принимающий истинное значение, если A и B являются соседними абонентами первого порядка
$C_2(A, B)$	– предикат, принимающий истинное значение, если A и B – являются соседними абонентами второго порядка (существует абонент E , для которого предикаты $C_1(A, E)$ и $C_1(E, B)$ принимают истинные значения)
$F_S(X)$	– функция оценки качества маршрута связи на основе частных маршрутных метрик X
F_S'	– минимальное значение качества маршрута связи, при котором маршрут является исправным
F_{FN}	– флаг, устанавливаемый для маршрута связи на текущем абоненте, если маршрута было принято сообщение FaultNotify
S	– стартовый абонент маршрута
D	– целевой абонент маршрута
N	– абонент, обнаруживший неисправность маршрута
N_{+i}	– следующий относительно N абонент маршрута, опережающий его на i -шагов
N_{-i}	– предыдущий относительно N абонент маршрута, отстающий от него на i -шагов
T	– абонент, которого можно включить в маршрут или заменить им N
$C_{A,B}$	– канал связи между абонентами A и B

Обслуживание маршрутов связи заключается в их корректировке, когда их производительность снизилась со временем или в маршруте образовался разрыв. В дальнейшем оба случая будем называть неисправностью. Каждая программная служба хранит информацию о производительности соседей первого и второго порядков и каналов связи между ними. За счёт этого, служба маршрутизации абонента, которая обнаружила неисправность, может инициировать процесс восстановления маршрута связи за счёт включения в него соседних узлов.

При этом можно выделить несколько вариантов корректировки пути, которые включают сокращение, сохранение и увеличение длины маршрута. Общая схема вариантов восстановления маршрутов, в соответствии с которыми был разработан алгоритм маршрутизации в текущей работе, а также схемы взаимодействия программных агентов сети для каждого из вариантов, представлена на рис. 1:

- вариант «а». Сетевая служба текущего абонента N , которая произвела обнаружение разрыва связи со следующим абонентом N_{+1} в маршруте, проверяет, является ли текущий абонент и N_{+2} соседними. При положительной проверке производится коррекция маршрута путём удаления из него абонента N_{+1} (рис. 1а). В ином случае производится переход к варианту «б»;
- вариант «б». Сетевая служба текущего абонента N , которая произвела обнаружение разрыва связи со следующим абонентом N_{+1} в маршруте, проверяет, является ли текущий абонент и N_{+2} соседними узлами второго порядка. При положительной проверке производится коррекция маршрута путём замены в маршруте абонента N_{+1} на T (рис. 1б). В ином случае производится переход к варианту «в»;
- вариант «в». Сетевая служба текущего абонента N , которая произвела обнаружение разрыва связи со следующим абонентом N_{+1} в маршруте, проверяет, является ли N_{+1} соседним абонентом второго порядка транзитивно через T . При положительной проверке производится коррекция маршрута путём включения в него T (рис. 1в). В ином случае производится переход к вариантам «д» и «е»;
- варианты «д» и «е». Сетевая служба отправляет запрос восстановления маршрута предыдущему абоненту маршрута N_{-1} . Приняв запрос, абонент N производит попытку восстановления маршрута в соответствии с вариантами «а» и «б». Если маршрут не удалось восстановить, производится уведомление абонента-инициатора построения маршрута S о сбое маршрута связи.
- в случае если маршрут удалось восстановить, производится уведомление абонентов пути по нисходящей ветви о внесённых в него изменениях.

Разрыв соединения между узлами маршрута определяется, когда служба маршрутизации не получает сообщения Hello от соседнего узла в маршруте в течение заданного интервала. Ухудшение производительности пути выявляется после обновления его маршрутных метрик на основе информации из сообщений Hello от соседних абонентов, входящих маршрут связи. Это может наблюдаться при резком увеличении загруженности абонента и канала связи трафиком, что оказывает критическое влияние на производительность пути при передаче данных.

В соответствии приведёнными вариантами, был разработан алгоритм маршрутизации, используя который можно восстановить маршрут связи одним из выше приведённых вариантов. Пусть на некотором участке маршрут последовательно включает узлы N_{-2} , N_{-1} , N , N_{+1} , N_{+2} , N_{+3} . Обслуживание маршрутов связи производится по алгоритму маршрутизации, состоящему из следующих шагов:

1. Абонент N обнаруживает неисправность в актуальном маршруте, где следующим абонентом является N_{+1} . Это может быть обусловлено разрывом соединения между узлами N и N_{+1} или снижением производи-

тельности маршрута связи до критического значения из-за перегрузки абонентов или канала связи между ними ($F_S(X) < F_S'$).

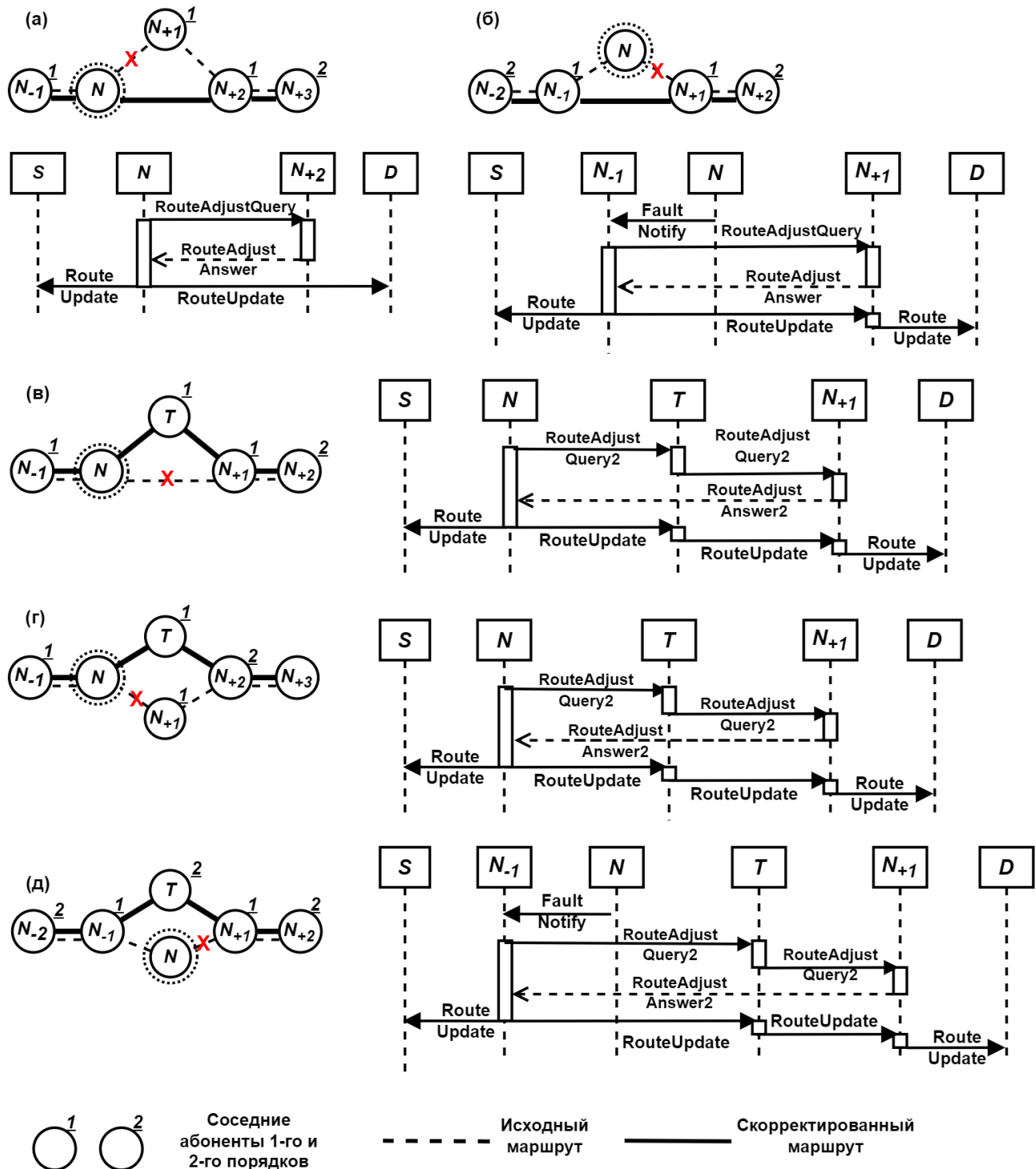


Рис. 1. Варианты восстановления маршрута связи за счёт соседних абонентов, и соответствующие схемы взаимодействия программных агентов сети

2. Если абонент N_{+2} является соседним для абонента N , производится попытка восстановления маршрута абонента за счёт сокращения его длины путём исключения из него абонента N_{+1} (вариант «а», рис. 1а).
 - 2.1. Служба узла N на основе информации о производительности канала связи корректирует метрики X для текущего маршрута связи P на осно-

- ве обновлённой информации о производительности соседних абонентов и каналов связи между ними, извлекаемой из сообщений Hello, а также с учетом удаления из него абонента N_{+1} : $X \rightarrow X'$.
- 2.2. Если критерий качества скорректированного маршрута ниже порогового значения ($F_S(X') < F_S'$), производится переход к пункту 4 текущего алгоритма.
 - 2.3. Служба маршрутизации узла N отправляет абоненту N_{+2} запрос корректировки пути RouteAdjustQuery.
 - 2.4. После приёма пакета служба маршрутизации N_{+2} отправляет подтверждение RouteAdjustAnswer с обновлёнными маршрутными метриками восходящей ветви маршрута.
 - 2.5. Программная служба узла N ожидает подтверждение в течение интервала ROUTE_ADJUST_INTERVAL. Если пакет был принят в течение указанного периода, служба узла N формирует пакет RouteUpdate, в котором записывается обновлённый маршрут с его метриками и по нисходящей ветви маршрута отправляет пакет абоненту источнику и абоненту назначения. Узлы маршрута на основе информации из пакета RouteUpdate обновляют информацию о текущем пути.
 - 2.6. В ином случае принимается, что указанным способом невозможно восстановить маршрут. Производится переход к пункту 3.
3. Если абоненты N_{+2} или N_{+1} являются соседями второго порядка для узла N , производится попытка восстановить маршрут путём замены одного абонента (вариант «г», рис. 1г) или включением в путь дополнительного узла (вариант «в», рис. 1в).
 - 3.1. Для этого формируется множество двухшаговых маршрутов $L_T = (N, T, N_{+2})$, где T – соседний абонент, через которого транзитивно как сосед второго порядка доступен N_{+2} – следующий за N_{+1} абонент в маршруте связи. Множество L_T сортируется по убыванию метрики $F_S(X)$.
 - 3.2. Если ранее не был установлен флаг F_{FN} , то производится формирование множества кортежей – двухшаговых маршрутов $L_T' = (N, T, N_{+1})$, где N_A – соседний абонент, через которого транзитивно доступен N_{+1} . Множество L_T' сортируется по убыванию метрики $F_S(X)$, после чего L_T' добавляется в конец множества L_T .
 - 3.3. Из множества L_T поочерёдно достаются кортежи L_{T1} . При помощи узлов из кортежа производится корректировка повреждённого участка пути (рис. 1в и рис. 1г). Если оценка критерия эффективности скорректированного маршрута меньше порогового значения $F_S(X_{LN1}) < F_S'$, производится переход к пункту 4. При этом вводится обозначение N_{Next} , где $N_{Next} = N_{+2}$, если $N_{Next} \in L_T$ или $N_{Next} = N_{+1}$, если $T_{Next} \in L_T'$.
 - 3.4. Служба узла N отправляет абоненту N_{Next} запрос корректировки RouteAdjustQuery2, при этом в качестве транзитного абонента указывается T .
 - 3.5. При получении пакета RouteAdjustQuery2 программный агент T проверяет, возможно ли включение текущего абонента в маршрут. При не-

возможности абоненту N отправляется уведомление RouteAdjustAnswerNo, в ином случае сообщение RouteAdjustQuery2 ретранслируется на следующий узел.

- 3.6. При получении пакета служба абонента N_{Next} отправляет подтверждение RouteAdjustAnswer2 с обновлёнными маршрутными метриками.
- 3.7. Агент N ожидает подтверждение в течение заданного интервала времени. Если в течении этого промежутка был получен пакет RouteAdjustAnswer2, абонент N формирует пакет RouteUpdate, в который записывает обновлённый маршрут с метриками и отправляет по нисходящей ветви пути абоненту источнику и абоненту назначения. При прохождении пакета RouteUpdate через узлы маршрута они производят обновление информации о пути в своих таблицах маршрутизации.
- 3.8. Если время ожидания пакета RouteAdjustAnswer2 истекло, и при этом множество L_T не пусто, производится переход к пункту 3.3. Если множество L_T не содержит элементов, производится переход к пункту 5.
- 3.9. Если агент N принимает пакет RouteAdjustAnswerNo от абонента T , производится переход к пункту 3.3.
4. Если абонент не получал ранее сообщения FaultNotify (для текущего маршрута не установлен флаг F_{FN}):
 - 4.1. Если N_{-1} или N_{+1} являются соседними абонентами (вариант «б», рис. 1б, и вариант «д», рис. 1д), агент N отправляет уведомление агенту N_{-1} о сбое маршрута путём отправки пакета FaultNotify. Служба N_{-1} , приняв FaultNotify, выполняет действия пункта 2, при этом устанавливает флаг F_{FN} .
 - 4.2. В ином случае производится переход к пункту 5.
5. Иначе агент N помечает маршрут сбойным. N формирует пакет RouteError, в который записывает множество узлов нисходящей ветви маршрута. При получении пакета RouteError службы нисходящих абонентов маршрута удаляют его из своих таблиц маршрутизации.

На рис. 2 приведено графическое представление разработанного алгоритма. Номера блоков в схеме алгоритма соответствуют вариантам, в соответствии с которыми ведётся восстановление маршрута. При этом блок с номером «б-в» реализуют общую часть соответствующих вариантов. На рис. 3-4 представлены структуры сетевых пакетов, используемые алгоритмом для информационного обмена между сетевыми агентами при решении задачи восстановления маршрута связи. Сообщения RouteAdjustQuery и RouteAdjustQuery2 предназначены для запроса восстановления маршрута соседям первого и второго порядков соответственно. Положительный коммуникационный ответ осуществляется использованием пакетов RouteAdjustAnswer и RouteAdjustAnswer2. В качестве отрицательной квитанции выступает RouteAdjustAnswerNo RouteUpdate предназначен для уведомления оставшихся узлов маршрута об его изменении.

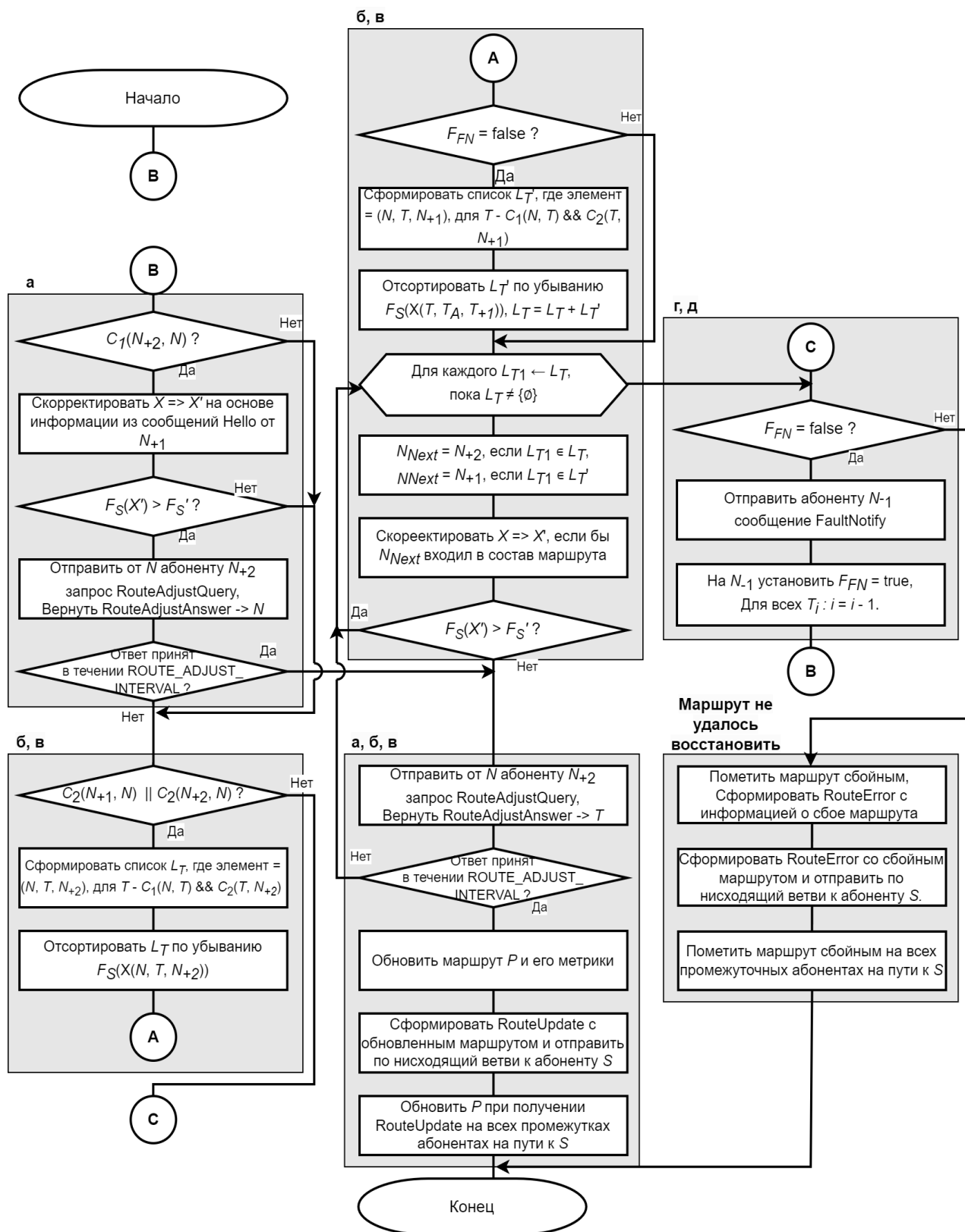


Рис. 2. Алгоритм восстановления маршрута связи

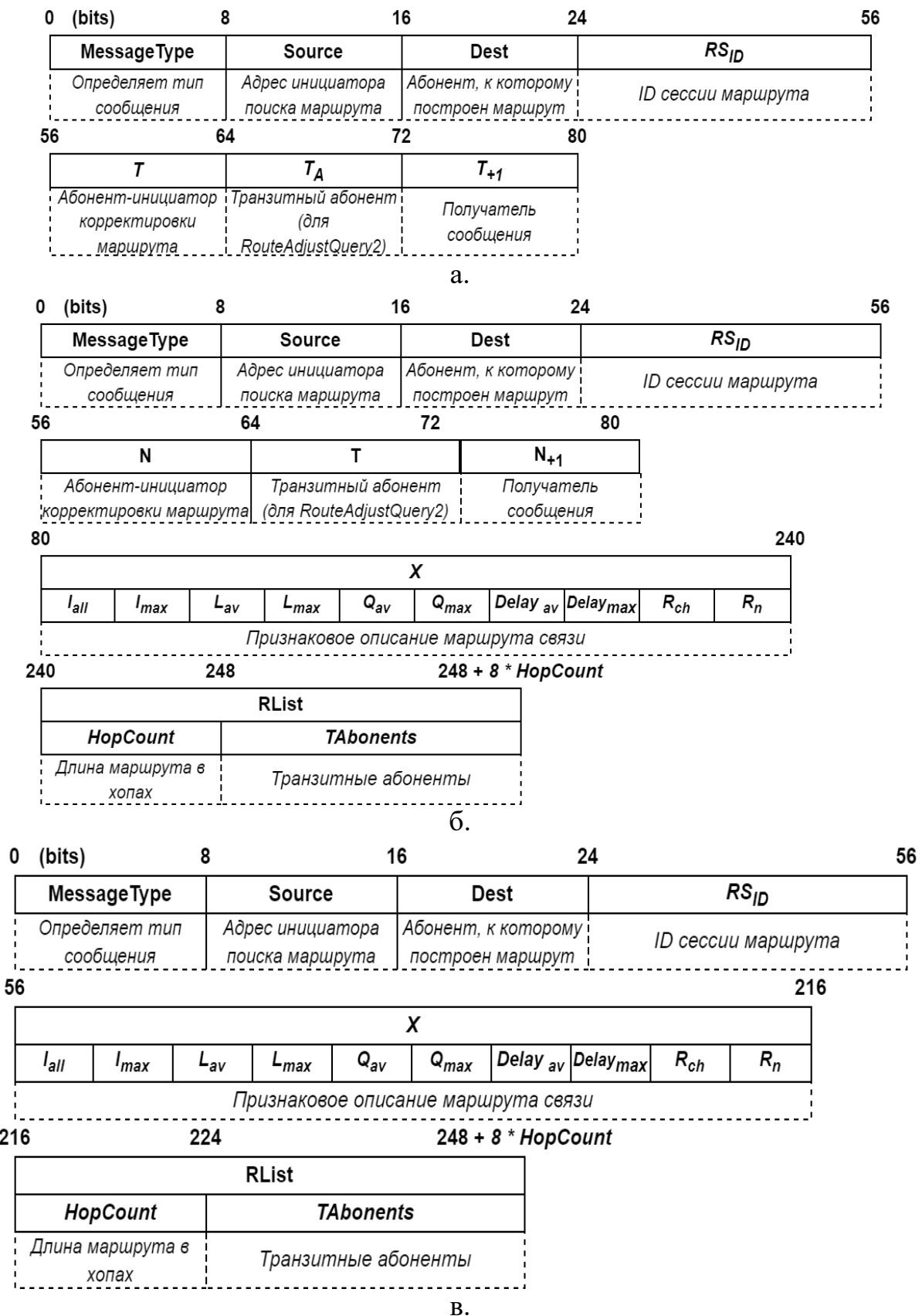


Рис. 3. Структура пакетов взаимодействия программных агентов сети:
(а) – RouteAdjustQuery и RouteAdjustQuery2, (б) – RouteAdjustAnswer и RouteAdjustAnswer2, (в) – RouteUpdate

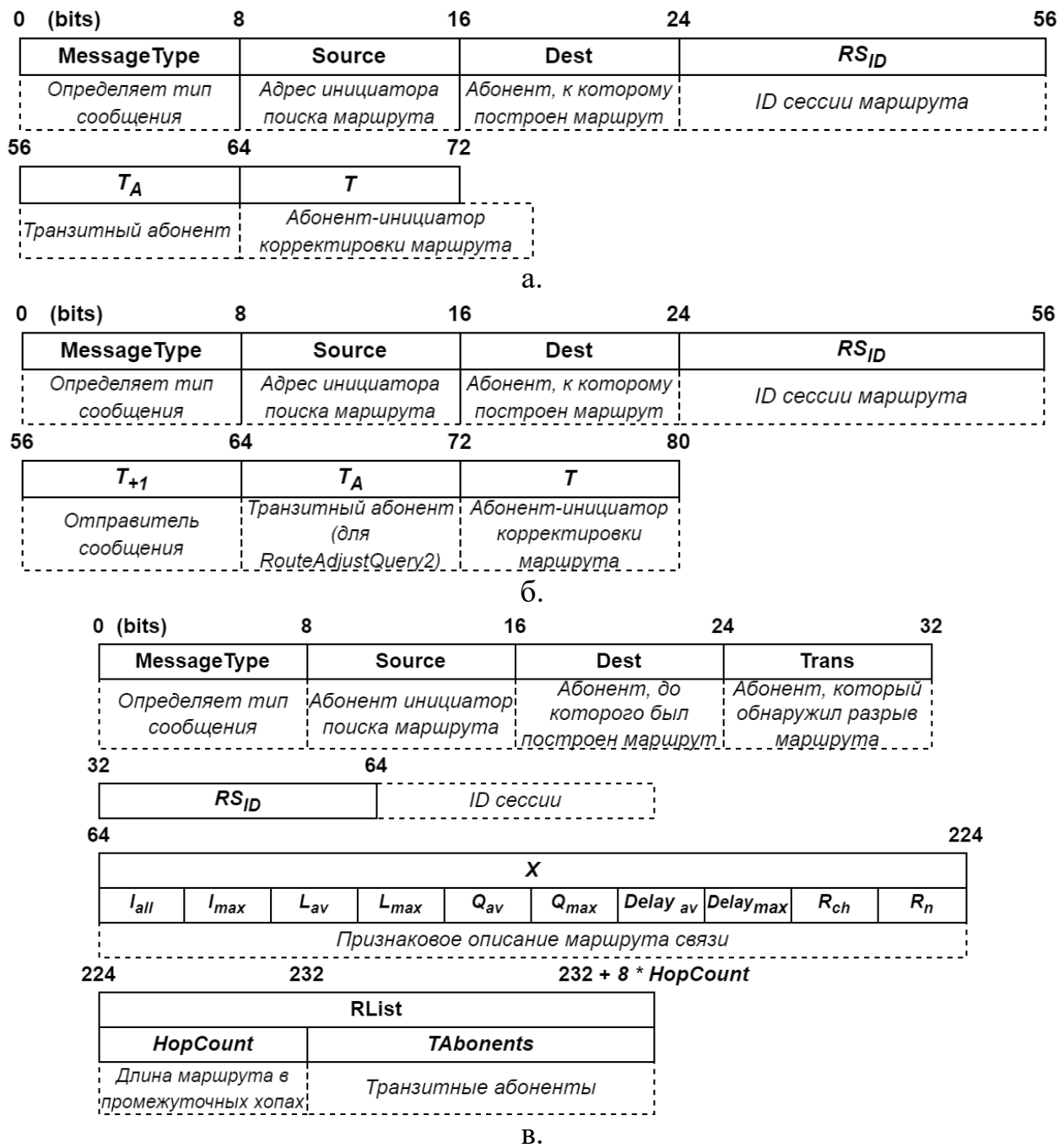


Рис. 4. Структура пакетов взаимодействия программных агентов сети:
(а) – FaultNotify, (б) – RouteAdjustAnswerNo, (в) – RouteError

Если текущий абонент не способен скорректировать маршрут, то он отправляет уведомление FaultNotify предыдущему в пути узлу. В случае, когда обновить маршрут за счет соседних узлов не представляется возможным, абоненту-источнику отправляется пакет RouteError с информацией о неисправности маршрута связи. В этом случае трафик распределяется по альтернативным маршрутам, если они имеются. Если такие маршруты отсутствуют, производится запуск алгоритма поиска пути к целевому абоненту, подобно тому, как это происходит в стандартных реактивных протоколах маршрутизации. Если за максимально допустимое время построения маршрутов их не удалось обнаружить, процедура может быть повторена через заданный период.

4. Применение разработанного алгоритма для восстановления маршрутов в протоколе многопутевой маршрутизации

Разработанный алгоритм был внедрён в протокол многопутевой маршрутизации (ПММ) [26]. В основе функционирования протокола многопутевой маршрутизации лежат алгоритмы взаимодействия программных служб для подключения к сети и дальнейшего поддержания соединения с ней, построения многопутевых маршрутов связи и балансировки трафика по ним. ПММ включает следующие процедуры:

- установление абонентом соединения с сетью и его дальнейшее поддержание. Текущая процедура включает формирование двухшагового графа сети, который содержит информацию об абонентах и прямых соединениях между ними, доступных в двух хопах от текущего узла;
- построение маршрутов до целевого абонента, включающее стадии запроса маршрута с рассылкой пакета RouteSearch, формирование временного, оптимального и альтернативных маршрутов (рис. 5);
- передача трафика по нескольким маршрутам и балансировка трафика между ними. Текущий протокол предполагает использование частично-пересекающихся маршрутов – маршруты могут включать общих абонентов (как показано далее на рис. 7);

В протокол внедрён алгоритм маршрутизации для обеспечения быстрого восстановления связи. Для этого каждый абонент маршрута отслеживает возникновение разрывов соединения со смежными узлами пути. В случае обнаружения разрыва производится приостановка передачи данных по текущему маршруту, запускается алгоритм, в соответствии с которым производится взаимодействие с соседними абонентами для восстановления пути. В случае если маршрут удалось восстановить, передача данных возобновляется (рис. 5), иначе производится уведомление узла-источника данных о неисправности маршрута.

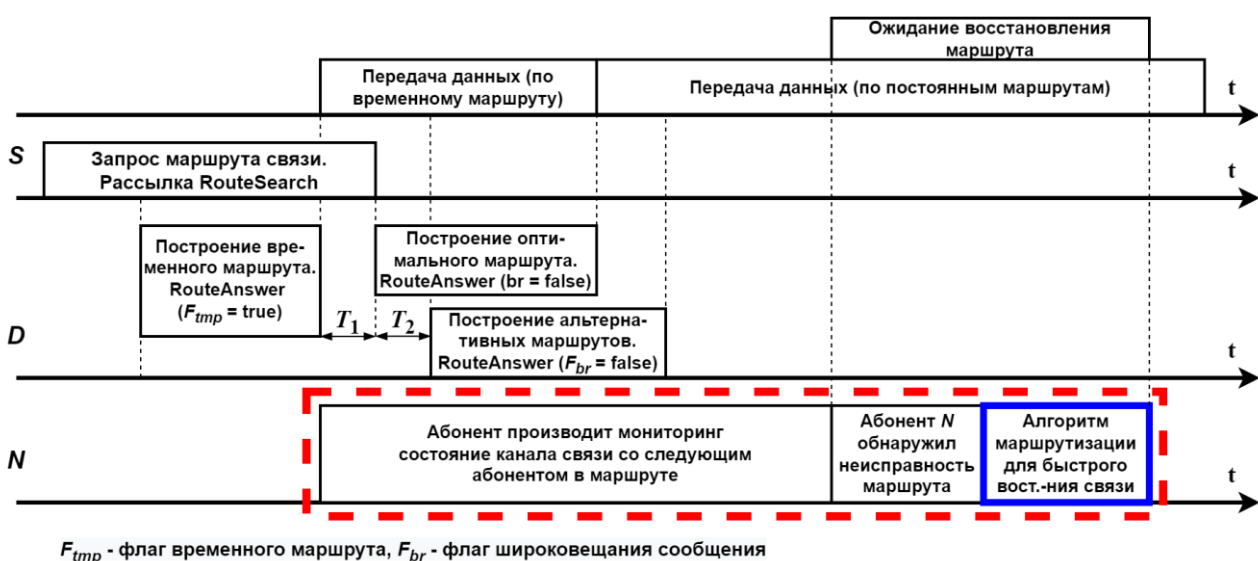


Рис. 5. Временная диаграмма функционирования протокола многопутевой маршрутизации с внедрённым алгоритмом маршрутизации

Протоколом используются функции оценки эффективности маршрутов связи, в основе которых лежит прогнозирование алгоритмом градиентного бустинга [18] мультипликативной свёртки R_{PDR} и D_{E2E} :

$$F_S(X) = \frac{R_{PD}^{0.7}}{D_{E2E}^{0.3}}, \quad (1)$$

$$F_B(X) = \frac{R_{PD}^{0.5}}{D_{E2E}^{0.5}}, \quad (2)$$

где R_{PD} – packet delivery ratio (коэффициент доставки пакетов), D_{E2E} – end to end delay of packets (сквозная задержка передачи пакета).

На этапе построения маршрутов применяется функция $F_S(X)$ для упорядочивания нисходящих ветвей и исключения путей с низкой эффективностью. $F_B(X)$. Она используется для определения пропорций, в которых будет распределён трафик при его балансировке по альтернативным маршрутам. Коэффициенты весов в приведённых формулах выбраны таким образом, чтобы на этапе построения маршрутов исключить ненадёжные, а при балансировке трафика увеличить его объём на маршрутах с более низкими задержками.

В процессе подключения к сети и поддержания связи абоненты-соседи обмениваются сообщениями Hello, содержащими список соседей, информацию о работоспособности собственного узла, соседей и каналов связи между ними и собственным абонентом (рис. 6). Соседним или смежным называется такой абонент, с которым установлена прямая связь. Если между абонентами она отсутствует, но имеется общий соседний узел, то они являются соседями второго порядка.

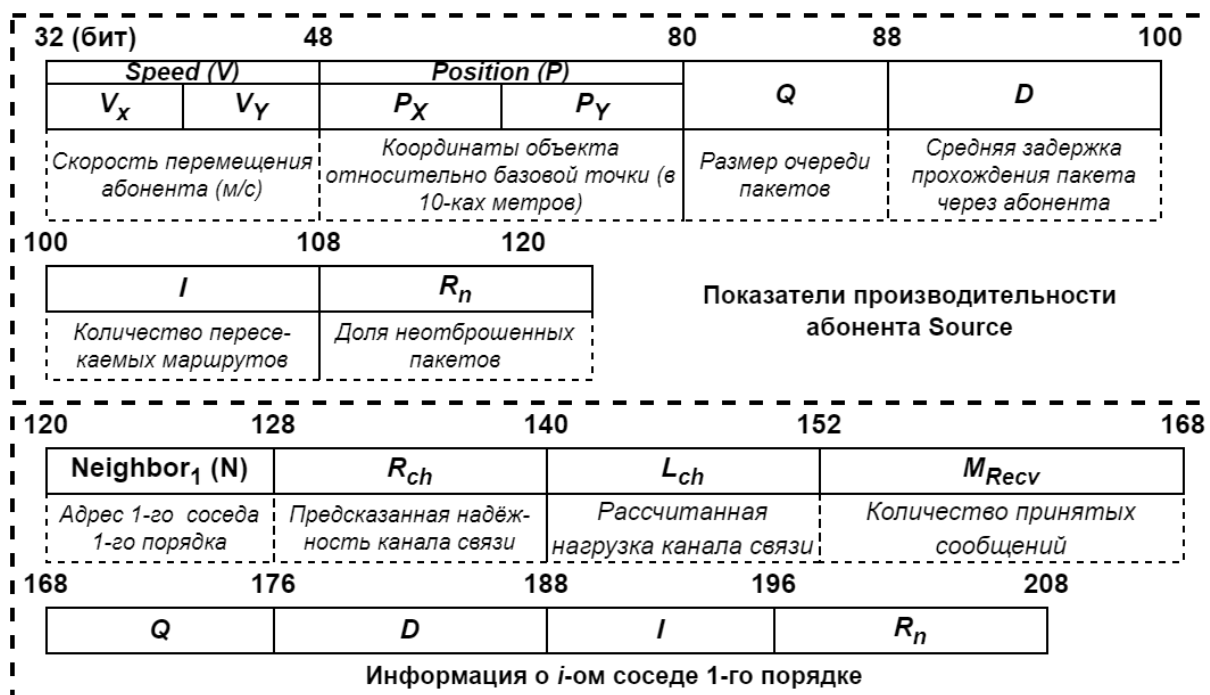


Рис. 6. Структура информации о собственном узле и соседних абонентах в сообщении Hello

Для построения многопутевых маршрутов передачи трафика абоненты обмениваются пакетами RouteSearch и RouteAnswer. На этапе распространения RouteSearch по сети для каждого абонента формируется несколько нисходящих ветвей маршрутов связи, каждая из которых характеризуется вектором частных метрик X . RouteSearch содержит информацию о формируемом маршруте и его X . Пакет включает, проходящий через каждый транзитный узел, добавляет его в маршрут, а также обновляет частные метрики производительности маршрута. При этом нисходящие ветви маршрутов сортируются по функции $F_S(X)$ [27].

На втором этапе с использованием накопленных данных первого этапа строится оптимальный маршрут между абонентами S и D . Для этого абоненты отправляют пакет RouteAnswer абоненту-инициатору. В качестве последующего абонента для пересылки выбирается сосед, которого включает лучшая нисходящая ветвь маршрута связи по метрике $F_S(X)$. Кроме того, предусмотрено строительство альтернативных маршрутов, которые могут частично пересекаться с основным (рис. 7). Структура частных метрик маршрута в пакетах RouteSearch и RouteAnswer X представлена на рис. 8. Каждый показатель передаётся в виде 2-ух байтового значения. При этом метрики I_{all} , I_{max} являются целыми значениями, Q_{av} , Q_{max} , D_{av} , D_{max} – вещественные числа, где целая и дробная части занимают по 1-му байту, L_{av} , L_{max} , R_n , R_{ch} – параметры в интервале $[0,0; 1,0]$.

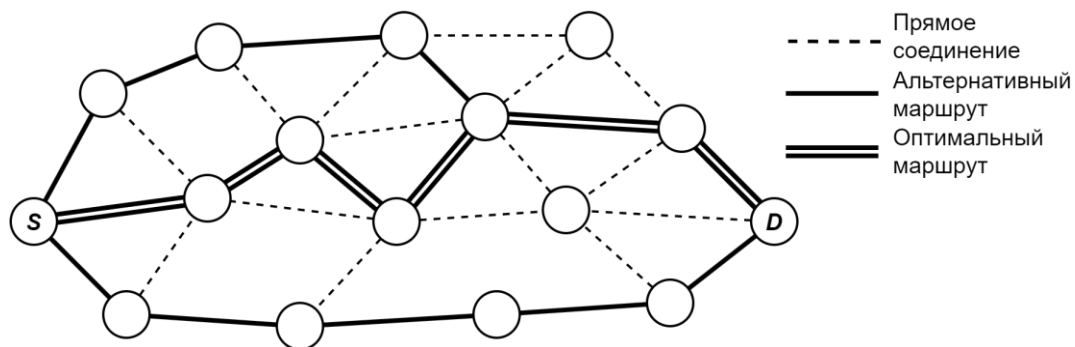


Рис. 7. Результат работы протокола построения маршрутов связи

X				
I_{all}	I_{max}	Q_{av}	Q_{max}	R_n
общее и максимальное на одном абоненте количество пересечений с другими маршрутами между другими узлами		средний и максимальный размеры очереди пакетов на транзитных абонентах		надёжность абонентов
D_{av}	D_{max}	L_{av}	L_{max}	R_{ch}
средняя и максимальная задержки пакета на узлах маршрута		средняя и максимальная загрузки каналов связи		надёжность каналов связи

Рис. 8. Структура частных метрик в пакетах RouteSearch и RouteAnswer

Балансировка трафика заключается в распределении пакетов данных по нескольким частично пересекающимися маршрутам в пропорциях $F_B(X_{R1}) : F_B(X_{R2}) : \dots : F_B(X_{RN})$, где X_{R1} , X_{R2} , ..., X_{RN} – показатели эффективности маршрутов R_1 , R_2 , R_N .

5. Экспериментальное исследование

В экспериментальном исследовании авторы сравнили алгоритм маршрутизации для быстрого восстановления связи при обрывах маршрутов в сети MANET, реализованный в протоколе ПММ, с аналогичными алгоритмами протоколов AODV и AOMDV. Восстановление маршрута в AODV подразумевает его повторный поиск. В AOMDV производится замена неисправного маршрута одним из альтернативных, если таковые существуют. Для практической проверки алгоритмы в составе протоколов были реализованы в имитационной модели [28], при помощи которой и было произведено экспериментальное исследование. Структура модели продемонстрирована на рис. 9. Данная модель позволяет устанавливать соединения между узлами, их надежность и скорость обмена, параметры используемого протокола связи, а также моделировать трафик прикладного программного обеспечения. Предложенный алгоритм был реализован в «Модуле маршрутизации».

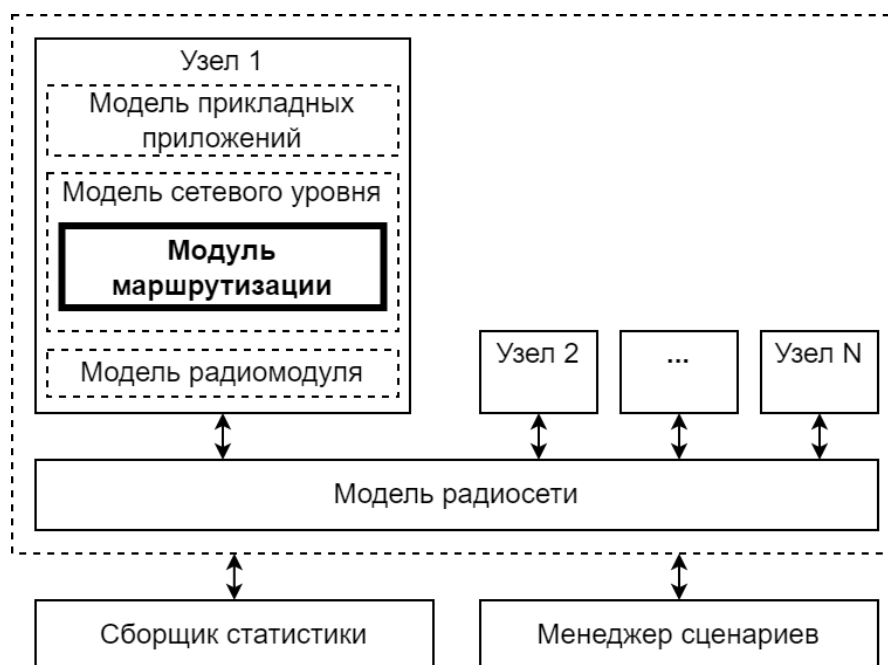


Рис. 9. Структура имитационной модели

В эксперименте скорость передачи данных составляла 10 кбайт/с, максимальное время нахождения пакета в очереди равнялось 10 с. На каждом из узлов генерировался прикладной трафик объемом 2 кбайт/с, а именно 8 пакетов по 255 байт для передачи соседним абонентам. Топология сети из эксперимента представлена на рис. 10.

В каждом из экспериментов происходил разрыв одного из каналов связи между абонентами маршрутов. В ходе исследования была получена зависимость временной задержки восстановления маршрута от номера абонента, между которым и последующим в маршруте узлом произошел разрыв соединения. Результаты исследования представлены на рис. 11. Они демонстрируют, что время работы алгоритма восстановления маршрута, реализованного в протоколе AODV, занимает существенно большее время, чем альтернативные алгорит-

мы, и при росте количества абонента и длины пути механизм становится неэффективным. С ростом длины маршрута эффективным становится алгоритм, который предложен в текущей работе.

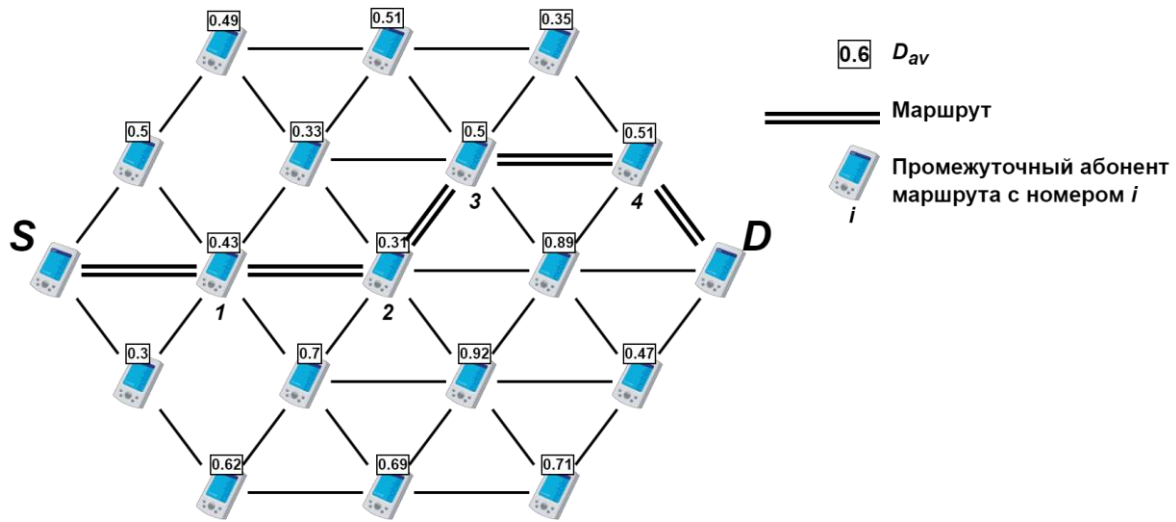


Рис. 10. Топология сети

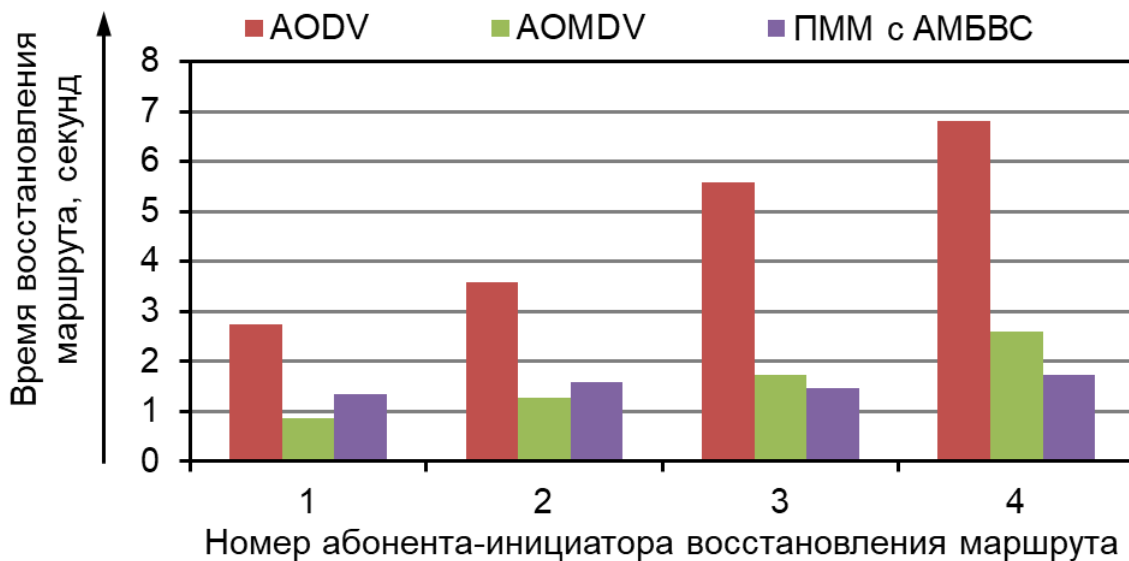


Рис. 11. Результат экспериментального исследования с сетью со статичной топологией

В следующем эксперименте производилась проверка алгоритма восстановления маршрута в сети с высокой динамикой изменения топологии (рис. 12). Наличие и отсутствие связи, кроме сценариев, определялось расстоянием между узлами (максимальная дальность между абонентами – 400 м). Движение абонентов описывается моделью перемещений на основе случайных точек в заданной области. Узлы отправитель и получатель задаются перед началом моделирования, им присваиваются координаты за пределами зоны пространственного перемещения абонентов. На графике (рис. 13) демонстрируется зависимость времени восстановления маршрута от номера канала, на котором произошёл разрыв связи. Результаты моделирования показывают, что восстановление

маршрута связи в AOMDV более затратное по времени, и оно увеличивается по мере того, как далеко от начала маршрута произошёл разрыв канала связи. В тоже время восстановление маршрута при помощи использования предложенного в работе алгоритма остаётся приблизительно одинаковым не зависимо от участка маршрута, где произошёл разрыв.

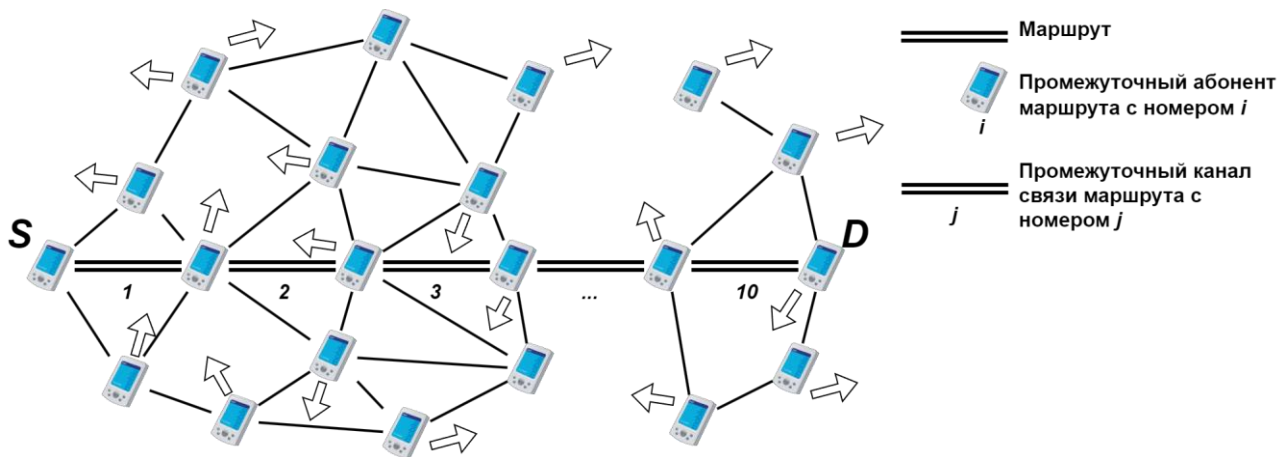


Рис. 12. MANET с сеть с мобильными абонентами

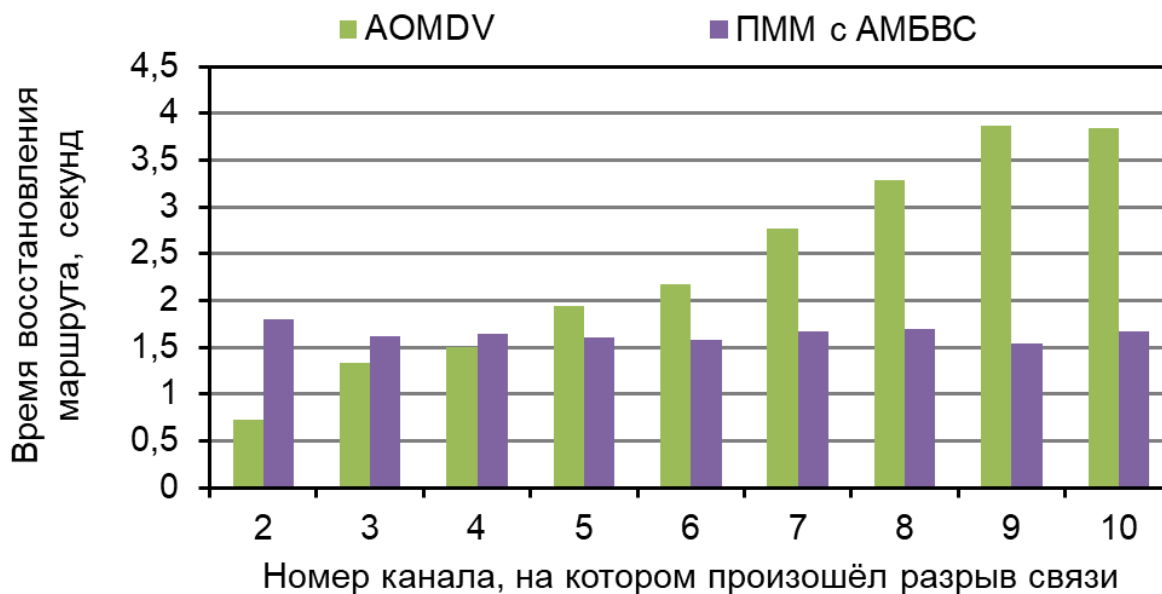


Рис. 13. Результат экспериментального исследования с сетью с высокой динамикой изменения топологии

В следующем эксперименте производилось исследование влияния предложенного алгоритма маршрутизации на надёжность и оперативность доставки данных. Сравнивались AOMDV, предложенный авторами протокол маршрутизации с активированным алгоритмом маршрутизации для быстрого восстановления связи (АМБВС) в высокодинамичных сетях и без его поддержки. Надёжность выражалось показателем PDR (packet delivery ratio) – коэффициент безошибочной доставки пакетов по маршруту передачи данных. В качестве показателя оперативности доставки данных использовался E2EDG (end-to-end delay of group – групповая сквозная задержка) – время, за которое между двумя аби-

нентами производится передача фрейма объёмом 255 пакетов. Результаты моделирования представлены на рис. 14 и таблице 2.

Экспериментальное исследование демонстрирует, что использование предложенного в работе алгоритма маршрутизации позволяет повысить PDR в 1,03-1,04 раза относительно базового протокола и в 1,15-1,17 раз относительно AOMDV, показатель E2EDG – в 1,08-1,09 раз относительно базового протокола и в 2,25-2,39 раз относительно AOMDV.

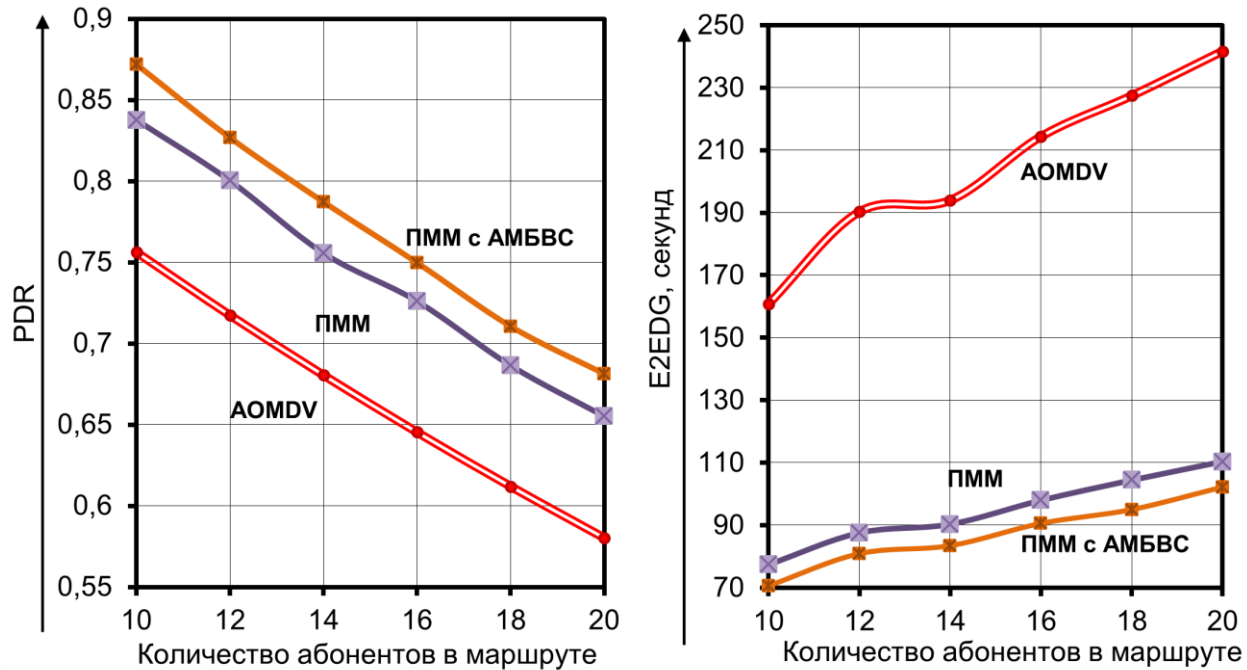


Рис. 14. Результат экспериментального исследования зависимости показателей PDR и E2EDG от количества абонентов в маршруте в сети с высокой динамикой изменения топологии

Таблица 2 – Результаты экспериментального исследования

Протокол	Количество абонентов					
	10	12	14	16	18	20
PDR						
AOMDV	0,76	0,72	0,68	0,65	0,61	0,58
PMM	0,84	0,80	0,76	0,73	0,69	0,66
PMM с АМБВС	0,87	0,83	0,79	0,75	0,71	0,68
E2EDG						
AOMDV	160,84	190,29	193,96	214,39	227,43	241,68
PMM	77,4	87,55	90,30	97,96	104,41	110,35
PMM с АМБВС	70,55	80,69	82,59	89,52	96,64	102,01

Эксперимент демонстрирует, что предложенный алгоритм позволяет сократить сквозную задержку передачи данных. При маршрутизации не требуется перераспределять нагрузку между оставшимися исправными маршрутами, поскольку производится корректировка текущего пути.

Выводы

В работе предложен алгоритм маршрутизации для обеспечения быстрого восстановления связи, позволяющий сократить время корректировки маршрутов и уменьшить сквозную задержку передачи трафика при возникновении неисправностей в путях. Элементами новизны предложенного решения по сравнению с известными является использование локализованного реактивного алгоритма и проактивным обменом между смежными абонентами информацией о производительности собственных узлов. Преимуществом предложенного алгоритма является отсутствие зависимости времени восстановления маршрута от его длины и удалённости поврежденного участка от начала маршрута, так как в алгоритме задействованы не более 4 абонентов.

Программные агенты сети взаимодействуют друг с другом на уровне соседей первого и второго уровней для формирования двухэтапного сетевого графа и координации корректировок маршрутов связи. За счет этого происходит локальное восстановление маршрутов связи, при этом задержка восстановления маршрута не зависит от того, на каком расстоянии от начала маршрута канал связи стал поврежденным. В AOMDV задержка генерируется тем, что абонент, обнаруживший разрыв, отправляет RERR узлу-источнику, который заменяет неисправный маршрут альтернативным. В AODV неисправный маршрут требует его перестроения. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет существенно снизить задержку передачи данных при возникновении обрывов маршрута и расширяет возможности предложенного ранее протокола связи.

Разработанный алгоритм предоставляет гибкие, уменьшающие затраты трафика механизмы, которые позволяют оперативно восстанавливать разрывы в маршрутах связи. Получая информацию о производительности смежных абонентов и состоянии каналов связи через сообщения Hello, сетевые службы могут инициировать процесс корректировки пути до момента передачи до него трафика, снижая, таким образом, уровень его потерь и время его доставки до целевого абонента. Представленное решение реализовано в качестве программного модуля восстановления маршрутов связи реактивного многопутевого протокола маршрутизации трафика в сети MANET на языке C++ [29], который может быть имплементирован в известные реализации протоколов организации передачи данных в MANET сетях.

Полученные результаты могут быть использованы для улучшения производительности протоколов связи, функционирующих в условиях низкой пропускной способности и нестабильности каналов связи, вызванных высокой динамикой изменения топологии сети и необходимостью передачи большого объема информации. Такие решения могут использоваться для обмена сетевым трафиком между распределенными абонентами и организации распределенных вычислений [30], передачи потоковых данных [31] в сетях MANET, применяемые службами специального назначения, в том числе в военной сфере, экстренного реагирования, поисково-спасательных операций и научных экспедиций.

Литература

1. Ramphull A., Armoogum A. M., Pudaruth S. A Review of Mobile Ad hoc NETwork (MANET) Protocols and their Applications // Proceeding of 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). Madurai. India. 2021. P. 204–211. DOI: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432258.
2. Koryachko V., Perepelkin D., Byshov V. Approach of dynamic load balancing in software defined networks with QoS // Proceeding of 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Bar. Montenegro. 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/MECO.2017.7977237.
3. Li X., Gaowa N., Yang M. Improved MAODV link repair technique for group team communication in MANET // Proceeding of 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Sardinia. Italy. 2013. P. 1023–1028. DOI: 10.1109/IWCMC.2013.6583697.
4. Shrivastava P. K., Vishwamitra L. K. Comparative analysis of proactive and reactive routing protocols in VANET environment // Measurement: Sensors. 2021. Vol. 16. P. 10. DOI: 10.1016/j.measen.2021.100051.
5. Patel D. N., Patel S. B., Kothadiya H. R., Jethwa P. D., Jhaveri R. H. A survey of reactive routing protocols in MANET // Proceeding of International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014). Chennai. India. 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICICES.2014.7033833.
6. Zhong H., Zhou H. Research and Implementation of AOMDV Multipath Routing Protocol // Proceeding of Chinese Automation Congress (CAC). Xi'an. China. 2018. P. 611–616. DOI: 10.1109/CAC.2018.8623785.
7. Istikmal, Subekti A., Perdana D., Muldina N. R., ArifIndra I., Sussi. Dynamic Source Routing and optimized Link State Routing Performance in Multipath Fading Environment with Dynamic Network Topology // Proceeding of 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE). Yogyakarta. Indonesia. 2022. P. 373–378. DOI: 10.1109/ICITISEE48480.2019.9003887.
8. Lutimath N. M., Suresh L., Naikodi C. Efficient source initiated multipath routing protocol for MANET // Proceeding of International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs). Paralakhemundi. India. 2016. P. 1442–1445. DOI: 10.1109/SCOPEs.2016.7955678.
9. Lalitha V., Rajesh R. S. Power aware and topology aware ad-hoc on-demand multipath distance vector routing for MANET // Proceeding of IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). Coimbatore. India. 2014. P. 115–119. DOI: 10.1109/ISCO.2014.7103929.
10. Макаренко С. И. Метод обеспечения устойчивости телекоммуникационной сети за счет использования ее топологической избыточности // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 14–30. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10302.
11. Цветков К. Ю., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения

устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 71–78.

12. Макаренко С. И., Квасов М. Н. Модифицированный алгоритм Беллмана-Форда с формированием кратчайших и резервных путей и его применение для повышения устойчивости телекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. № 3. С. 264–274. DOI: 10.18469/ikt.2016.14.3.06.

13. Михайлов Р. Л. Повышение устойчивости наземно-космических систем связи в условиях радиоэлектронного противоборства // Техника средств связи. 2018. №2 (142). С. 188–190.

14. Перепелкин Д. А. Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 1 (47). С. 84–91.

15. Перепелкин Д. А. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола IGRP при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 4 (42). С. 33–38.

16. Одоевский С. М., Бусыгин А. В. Аналитическая модель обслуживания мультимедийного трафика с распределением Парето на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 74–108. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10104.

17. Одоевский С. М., Лебедев П. В. Метод повышения устойчивости функционирования системы управления инфокоммуникационной сетью специального назначения в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 9-10 (171-172). С. 88–95. DOI: 10.53816/23061456_2022_9-10_88.

18. Лебедев П. В. Методика повышения устойчивости функционирования инфокоммуникационной сети на основе выработки оптимальных управляющих воздействий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. С. 10–17.

19. Бахтин А. А., Меркушев А. В. Метод локального восстановления маршрута в эпизодических сетях // Инженерный вестник Дона. 2011. № 3 (17). С. 78–83.

20. Singh J., Singh P., Rani S. Enhanced Local Repair AODV (ELRAODV) // Proceeding of International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies. Bangalore. India. 2009. P. 787–791. DOI: 10.1109/ACT.2009.199.

21. Jin J., Ahn S., Oh H. A multipath routing protocol based on bloom filter for multi-hop wireless networks // Proceeding of International Conference on Information Networking (ICOIN). Cambodia. 2015. P. 521–522. DOI: 10.1109/ICOIN.2015.7057960.

22. Srinivasan P., Kamalakkannan P. Enhancing route maintenance in RSEA-AODV for mobile ad hoc networks // Proceeding of 7th International Conference on

Intelligent Systems and Control (ISCO). Coimbatore. India. 2013. P. 464–469. DOI: 10.1109/ISCO.2013.6481199.

23. Manickavelu D., Vaidyanathan R. U. Particle swarm optimization (PSO)-based node and link lifetime prediction algorithm for route recovery in MANET // Journal Wireless Com Network. 2014. Vol. 107. P. 1–10. DOI: 10.1186/1687-1499-2014-107.

24. Jeon J., Lee K., Kim C. Fast route recovery scheme for Mobile Ad Hoc Networks // Proceeding of The International Conference on Information Networking 2011 (ICOIN2011). Kuala Lumpur. Malaysia. 2011. P. 419–423. DOI: 10.1109/ICOIN.2011.5723121.

25. Rahamat B. S., Sharma C., Farrukh S., Arularasan A. N. Implementation of Reliability Antecedent Forwarding Technique Using Straddling Path Recovery in Manet // Wireless Communications & Mobile Computing (Online). 2022. Vol. 2022. P. 1–9. DOI: 10.1155/2022/6489185.

26. 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.

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

28. 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). Budva. Montenegro. 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134154.

29. Пестин М. С., Новиков А. С. Программное обеспечение для маршрутизации трафика в беспроводных децентрализованных сетях связи // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022663502, опубл. 15.07.2022, бюллетень № 7.

30. Ivutin A. N., Troshina A. G. Use LLVM for optimization of parallel execution of program code on the certain configuration // Proceeding of ELEKTRO. 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398251.

31. Jin X., Kwok Y. K. Cloud Assisted P2P Media Streaming for Bandwidth Constrained Mobile Subscribers // Proceeding of IEEE 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems. Shanghai. China. 2010. P. 800–805. DOI: 10.1109/ICPADS.2010.78.

References

1. Ramphull A., Armoogum A. M., Pudaruth S. A Review of Mobile Ad hoc NETWORK (MANET) Protocols and their Applications. *Proceeding of 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*. Madurai, India, 2021, pp. 204–211. DOI: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432258.

2. Koryachko V., Perepelkin D., Byshov V. Approach of dynamic load balancing in software defined networks with QoS. *Proceeding of 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. Bar, Montenegro, 2017, pp. 1–5. DOI: 10.1109/MECO.2017.7977237.

3. Li X., Gaowa N., Yang M. Improved MAODV link repair technique for group team communication in MANET. *Proceeding of 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. Sardinia, Italy, 2013, pp. 1023–1028. DOI: 10.1109/IWCMC.2013.6583697.

4. Shrivastava P. K., Vishwamitra L.K. Comparative analysis of proactive and reactive routing protocols in VANET environment. *Measurement: Sensors*, 2021, vol. 16, 10p. DOI: 10.1016/j.measen.2021.100051.

5. Patel D. N., Patel S. B., Kothadiya H. R., Jethwa P. D., Jhaveri R. H. A survey of reactive routing protocols in MANET. *Proceeding of International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*. Chennai, India, 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICICES.2014.7033833.

6. Zhong H., Zhou H. Research and Implementation of AOMDV Multipath Routing Protocol. *Proceeding of Chinese Automation Congress (CAC)*. Xi'an, China, 2018, pp. 611–616. DOI: 10.1109/CAC.2018.8623785.

7. Istikmal, Subekti A., Perdana D., Muldina N. R., ArifIndra I., Sussi. Dynamic Source Routing and optimized Link State Routing Performance in Multipath Fading Environment with Dynamic Network Topology. *Proceeding of 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)*. Yogyakarta, Indonesia, 2019, pp. 373–378. DOI: 10.1109/ICITISEE48480.2019.9003887.

8. Lutimath N. M., Suresh L., Naikodi C. Efficient source initiated multipath routing protocol for MANET. *Proceeding of International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPE5)*. Paralakhemundi, India, 2016, pp. 1442–1445. DOI: 10.1109/SCOPE5.2016.7955678.

9. Lalitha V., Rajesh R. S. Power aware and topology aware ad-hoc on-demand multipath distance vector routing for MANET. *Proceeding of IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*. Coimbatore, India, 2014, pp. 115–119. DOI: 10.1109/ISCO.2014.7103929.

10. Makarenko S. I. Stability method of telecommunication network with using topological redundancy. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 14–30 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10302.

11. Tsvetov K. U., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Forming of reserve paths based on Dijkstra's algorithm in the aim of the enhancement of the stability of telecommunication networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2014, vol. 69, no. 2, pp. 71–78 (in Russian).

12. Makarenko S. I., Kvasov M. N. Modified Bellman-Ford Algorithm with Finding the Shortest and Fallback Paths and its Application for Network Stability Improvement. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2016, vol. 14, no. 3, pp. 264–274 (in Russian). DOI: 10.18469/ikt.2016.14.3.06.

13. Mikhailov R. L. Povishenie ustoichivosti nazemno-kosmicheskikh sistem svyazi v usloviyakh radioelektronnogo protivoborstva [Increasing the stability of

ground-space communication systems in conditions of electronic warfare]. *Means of communication equipment*, 2018, vol. 142, no. 2, pp. 188–190.

14. Perepelkin D. A. Algoritm parnykh perestанovok marshrutov na baze protokola OSPF pri dinamicheskom otkaze uzlov i linii svyazi korporativnoi seti [The algorithm of pairwise permutations of routes for OSPF Protocol under condition dynamic failure of nodes and communication lines network]. *Vestnik Riazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 47, no. 1, pp. 84–91 (in Russian).

15. Perepelkin D. A. Algoritm adaptivnoi uskorennoi marshrutizatsii na baze protokola IGRP pri dinamicheskom otkaze uzlov i linii svyazi korporativnoi seti [The algorithm is adaptive accelerated routing for IGRP Protocol under condition dynamic failure of nodes and communication lines network]. *Vestnik Riazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 42, no. 4, pp. 33–38 (in Russian).

16. Odoevsky S. M., Busygin A. V. Approximation of statistical characteristics of the multimedia traffic service process based on the Pareto distribution. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 1, pp. 74–108. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10104 (in Russian).

17. Odoevsky S. M., Lebedev P. V. The method of increasing the stability of the functioning of a special purpose infocommunication network management system under the influence of destabilizing factors. *Military Engineering. Counter-terrorism technical devices. Issue 16*, 2022, vol. 171–172, no. 9–10, pp. 88–95. DOI: 10.53816/23061456_2022_9-10_88 (in Russian).

18. Lebedev P. V. Methodology for improving the sustainability of the information and communication network functioning based on the operation of optimal controlling influences. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2022, no. 3, pp. 10–17 (in Russian).

19. Bakhtin A. A., Merkushev V. A. Metod lokalnogo vosstanovleniya marshruta v epizodicheskikh setyakh [Local route recovery method in episodic networks]. *Engineering Journal of Don*, 2011, no. 3, vol. 17, pp. 78–83.

20. Singh J., Singh P., Rani S. Enhanced Local Repair AODV (ELRAODV). *Proceeding of International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies*. Bangalore, India, 2009, pp. 787–791. DOI: 10.1109/ACT.2009.199.

21. Jin J., Ahn S., Oh H. A multipath routing protocol based on bloom filter for multi-hop wireless networks. *Proceeding of International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Cambodia, 2015, pp. 521–522. DOI: 10.1109/ICOIN.2015.7057960.

22. Srinivasan P., Kamalakkannan P. Enhancing route maintenance in RSEA-AODV for mobile ad hoc networks. *Proceeding of 7th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, Coimbatore, India, 2013, pp. 464–469. DOI: 10.1109/ISCO.2013.6481199.

23. Manickavelu D., Vaidyanathan R. U. Particle swarm optimization (PSO)-based node and link lifetime prediction algorithm for route recovery in MANET.

Journal Wireless Com Network, 2014, vol. 107, pp. 1-10. DOI: 10.1186/1687-1499-2014-107.

24. Jeon J., Lee K., Kim C. Fast route recovery scheme for Mobile Ad Hoc Networks. *Proceeding of The International Conference on Information Networking 2011 (ICOIN2011)*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2011, pp. 419–423. DOI: 10.1109/ICOIN.2011.5723121.

25. Rahamat B.S., Sharma C., Farrukh S., Arularasan A.N. Implementation of Reliability Antecedent Forwarding Technique Using Straddling Path Recovery in Manet. *Wireless Communications & Mobile Computing (Online)*, 2022, vol. 2022, pp. 1–9. DOI: 10.1155/2022/6489185.

26. 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. *Proceeding of International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, Russian Federation, 2022, pp. 553–558. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896315.

27. Pestin M.S. Machine learning methods for constructing communication routes in wireless ad-hoc – data transmission networks. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2022, no. 8, pp. 121–127 (in Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-121-128.

28. 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)*. Budva, Montenegro, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134154.

29. 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.

30. Ivutin A. N., Troshina A. G. Use LLVM for optimization of parallel execution of program code on the certain configuration. *Proceeding of ELEKTRO*. Mikulov, Czech Republic, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398251.

31. Jin X., Kwok Y.-K. Cloud Assisted P2P Media Streaming for Bandwidth Constrained Mobile Subscribers. *Proceeding of IEEE 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems*. Shanghai, China, 2010, pp. 800–805. DOI: 10.1109/ICPADS.2010.78.

Статья поступила 15 января 2024 г.

Информация об авторах

Новиков Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры вычислительной техники. Тульский государственный университет. 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. E-mail: thesis-tsu@yandex.ru

Ивутин Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой вычислительной техники. Тульский государственный университет. Область научных интересов: многоагентные системы, учебно-тренировочные средства, параллельные и распределенные информационные процессы. E-mail: alexey.ivutin@gmail.com

Пестин Максим Сергеевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Аспирант кафедры вычислительной техники. Тульский государственный университет. Область научных интересов: взаимодействие программ и программных систем, беспроводные децентрализованные самоорганизующиеся сети. E-mail: maxime1996rus@mail.ru

Адрес: 300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, д. 92.

Routing algorithm to ensure quick restoration of communication in case of route breaks in MANET networks

A. S. Novikov, A. N. Ivutin, M. S. Pestin

Problem statement: *Wireless MANET networks of mobile subscribers are characterized by high dynamics of topology changes. In view of this, the detected traffic transmission routes relatively quickly lose their relevance. Therefore, special software agents - network services operating on each subscriber, need to regularly update routes, for which they need to interact with each other. In proactive routing protocols, the restoration of faulty routes is accompanied by a high volume of service traffic, which arises as a result of the interaction of many subscribers with each other. In practical reactive routing protocols, routes to the target subscriber are repeatedly searched. At the same time, reactive protocol services interact indirectly through route request messages, which is why there is no possibility of a comprehensive assessment of restored paths. Therefore, to increase the lifespan of communication routes, this paper proposes a routing algorithm that allows for rapid restoration of routes with broken breaks with a low volume of service traffic and the least involvement of additional nodes. **The purpose** of the work is to reduce the recovery time of routes with breaks in communication channels between subscribers and increase their operation time in MANET networks. It is proposed to carry out local restoration of communication routes in faulty sections by removing a faulty subscriber or communication channel from the current route, introducing additional transit subscribers, provided that the assessment of the quality efficiency criterion of the updated path exceeds the minimum acceptable limit. **Methods.** The solution to the problem of restoring routes with broken communication channels between subscribers used in MANET networks for traffic transmission is based on the method of reactive interaction between services of nodes localized within a radius of two steps from the subscriber who has detected a broken connection and initiates a search for an alternative path. In addition, the algorithm proposes to use a proactive exchange procedure between adjacent first- and second-order subscribers to update information about the performance indicators of the nodes themselves and the throughput of adjacent channels. The described synchronization process is combined with procedures for ensuring and maintaining communication between subscribers. **Novelty.** The routing algorithm has been proposed that can be used to quickly restore communication routes with existing gaps, characterized by the use of localized reactive interaction and proactive exchange between adjacent subscribers about the performance of their own nodes **Results.** The use of the presented routing algorithm allows us to reduce the time for restoring routes between subscribers and the amount of service traffic used for this, reduce delay and increase the reliability of data packet transmission. The simulation carried out for a network of 20 nodes demonstrated a reduction in the time to restore communication routes by 1.5 - 2 times compared to standard technologies, a reduction in the average time of traffic transmission in the network by 8-9% and an increase in reliability by 3-4%. **Practical relevance.** The presented solution is implemented as a software module for restoring communication routes of a reactive multipath traffic routing protocol in the MANET network in C++, which can be implemented in known implementations of protocols for organizing data transmission in MANET networks for special-*

purpose services, including in the military sphere, emergency response, search and rescue operations and scientific expeditions.

Key words: *MANET, ad-hoc routing protocol, routing service, program agent of network, multipath routing, reactive routing, route repair.*

Information about Authors

Alexander Sergeevich Novikov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Associate Professor at the Department of Computer Science. Tula State University. Field of research: network protocols, ensuring stable communications in wireless decentralized networks, static and dynamic analysis of program code, data races detection in software, parallelizing program code. E-mail: thesis-tsu@yandex.ru

Alexey Nikolaevich Ivutin – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Head of Department of Computer Science. Tula State University. Field of research: multi-agent systems, training aids and simulators, parallel and distributed information processes. E-mail: alexey.ivutin@gmail.com

Maxim Sergeevich Pestin – Postgraduate at the Department of computer technology. Tula State University. Field of research: interaction of programs and software systems, wireless decentralized self-organizing networks. E-mail: maxime1996rus@mail.ru

Address: 300012, Russia, Tula, prospect Lenina, 92.