

На правах рукописи

Некрасов Павел Олегович

**Разработка и анализ механизмов
самоорганизации, направленных на
обеспечение качества обслуживания, в
мобильных одноранговых сетях**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в *Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»*

Научный руководитель: *Ляхов Андрей Игоревич,
доктор технических наук, профессор*

Официальные оппоненты: *Степанов Сергей Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
и.о. заведующего кафедрой
«Сети связи и системы коммутации»,
Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский технический
университет связи и информатики»*

*Гайдамака Юлия Васильевна,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры прикладной информатики
и теории вероятностей, ФГАОУ ВО
«Российский университет дружбы народов»*

Ведущая организация: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»*

Защита состоится «_____» _____ 2016 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.077.05 при *Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем передачи информации им. А.А.Харкевича РАН (ИППИ РАН)*, расположенном по адресу: 127051, г. Москва, Большой Каретный пер., д. 19, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ИППИ РАН*, а также на сайте <http://iitp.ru/>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

д. ф.-м. н.

Цитович И.И.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. На сегодняшний день технологии мобильных одноранговых сетей активно применяются для построения сетей профессиональной радиосвязи, тактических сетей, сенсорных сетей, сетей интернета вещей, а также для расширения зоны покрытия сетей доступа к проводной инфраструктуре. Сети такого рода формируются равноправными узлами, которые могут связываться напрямую или через промежуточные ретрансляторы, при этом алгоритмы управления сетью являются распределенными.

Особенно важной задачей при построении мобильных одноранговых сетей является задача самоорганизации узлов сети – автоматическая адаптация узлов под текущую топологию сети, качество соединений, загруженность узлов и т.д. Ключевые механизмы самоорганизации – механизмы распределенного доступа к каналу и механизмы динамической маршрутизации, должны подстраиваться под текущее состояние сети, максимизируя при этом ее пропускную способность и обеспечивая качество обслуживания пользовательских данных. Более того, механизмы самоорганизации должны учитывать специфику мобильных одноранговых сетей, а именно: ненадежность соединений между узлами сети, наличие «скрытых станций», мобильность узлов и отсутствие координатора сети.

Таким образом, на сегодняшний день актуальным направлением исследований мобильных одноранговых сетей является разработка и анализ механизмов распределенного доступа к каналу и механизмов динамической маршрутизации, направленных не просто на доставку данных между узлами сети и максимизацию пропускной способности, а на обеспечение качества обслуживания пользовательских данных, с учетом мобильности узлов, отсутствия координатора и наличия помех в радиоканале.

Степень разработанности темы. Исследованию эффективности механизмов доступа к каналу и механизмов динамической маршрутизации в беспроводных сетях посвящено значительное количество работ, среди которых следует особо отметить работы российских и зарубежных ученых: Н.Д. Введенской, А.Н. Красиловой, Е.А. Крука, А.П. Кулешова, А.И. Ляхова, О.Г. Мелентьева, В.И. Неймана, А.Н. Рыбко, К.Е. Самуйлова, А.А. Сафонова, О.Д. Соколовой, С.Н. Степанова, А.М. Тюрликова, Е.М. Хорова, И.И. Цитовича, В.В. Шахова, С.Б. Шлосмана, М.Ю. Якимова, G. Bianchi, T. Clausen, M. Conti, R. Draves, M. Gerla, P. Jacquet, L. Kleinrock, J. Macker, R. Nelson, C. Young и др. Некоторые из них фокусируются на максимизации пропускной способности сети, не рассматривая при этом вопросы обеспечения качества обслуживания, другие не учитывают наличие помех в радиоканале, третьи предполагают наличие координирующего узла в сети, либо неподвижность узлов. Таким образом, задача обеспечения качества обслуживания с

учетом всех особенностей мобильных одноранговых сетей не рассматривалась в должном объеме, что и определило направление исследований, выполненных в диссертации.

Цель диссертационной работы состоит в разработке и анализе механизмов самоорганизации, направленных на обеспечение качества обслуживания, в мобильных одноранговых сетях.

Для достижения поставленной цели в диссертации ставятся и решаются следующие задачи.

1. Разработка аналитической модели для анализа эффективности механизмов рассылки сетевой информации в узкополосной мобильной одноранговой сети.
2. Разработка и анализ алгоритмов резервирования слотов и метрик маршрутизации для передачи речевых потоков в широкополосной мобильной одноранговой сети с детерминированным доступом TDMA к каналу.
3. Разработка и анализ распределенных алгоритмов выбора ретрансляторов для передачи многоадресных данных в широкополосной мобильной одноранговой сети.

Методы исследования. В диссертации используются методы теории телекоммуникационных сетей, теории вероятностей, теории графов, комбинаторного анализа, а также имитационного моделирования.

Научная новизна. В диссертации впервые:

- разработана новая аналитическая модель механизма инкрементальной рассылки сетевой информации, позволяющая оценить вероятность того, что в случайный момент времени каждый узел сети имеет актуальную информацию обо всех других сетевых узлах в узкополосной мобильной одноранговой сети со случайным доступом к каналу;
- разработан оригинальный метод выбора слотов для многошаговой передачи одноадресных речевых потоков, гарантирующий выполнение ограничений на вероятность потери и задержку доставки пакета при наличии помех в канале и нацеленный на минимизацию вероятности блокировки речевых потоков, в широкополосной мобильной одноранговой сети с детерминированным доступом TDMA к каналу;
- предложен новый распределенный алгоритм выбора ретрансляторов для передачи многоадресных данных, использующий лишь информацию о соседних узлах и соединениях между ними и нацеленный на формирование минимального связного доминирующего множества Штейнера, в широкополосной мобильной одноранговой сети.

Практическая ценность и реализация результатов. Использование теоретических и практических результатов, полученных в диссертации, позволит повысить эффективность механизмов самоорганизации, направленных на обеспечение качества обслуживания, в мобильных одноранговых се-

тях.

Результаты работы внедрены и используются на практике, что подтверждено соответствующими актами. В частности, предложенные в диссертации алгоритмы резервирования слотов и маршрутизации используются в сетевых протоколах широкополосных мобильных одноранговых сетей, разрабатываемых ОАО «ГлобалИнформСервис». Разработанная в диссертации аналитическая модель механизмов рассылки сетевой информации использовалась ЗАО «Телум» для анализа и настройки механизмов рассылки сетевой информации в узкополосных мобильных одноранговых сетях.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная аналитическая модель для оценки эффективности механизма инкрементальной рассылки сетевой информации в узкополосной мобильной одноранговой сети со случайным доступом к каналу позволяет с достаточно высокой точностью оценить вероятность того, что в случайный момент времени каждый узел сети имеет актуальную информацию обо всех других сетевых узлах;
2. Предложенный алгоритм выбора слотов для многошаговой передачи одноадресных речевых потоков в широкополосной мобильной одноранговой сети с детерминированным доступом TDMA к каналу гарантирует выполнение ограничений на вероятность и задержку доставки пакета до адресата при наличии помех в канале и при этом увеличивает емкость сети до 30 % по сравнению с базовыми алгоритмами;
3. Предложенный распределенный алгоритм выбора ретрансляторов для передачи многоадресных данных в широкополосной мобильной одноранговой сети позволяет до 2,5 раз увеличить число одновременно передаваемых многоадресных потоков с высокой надежностью по сравнению с алгоритмом доставки многоадресных данных с помощью связного доминирующего множества, обеспечивая ту же устойчивость к мобильности узлов сети.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на ведущих международных и российских конференциях: IEEE International Conference on Communications (Великобритания, 2015), International Conference on Computing, Networking and Communications (США, 2015), Military Communications Conference 2014 (США, 2014), Military Communications Conference 2013 (США, 2013), «Информационные технологии и системы» (Россия, 2015 г.), «Кибернетика и высокие технологии» (Россия, 2015 г.), «Радиолокация, навигация, связь» (Россия, 2016 г.), а также на семинарах ИППИ РАН и МФТИ.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 5 статей ([1–5]) в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, 3 статьи ([6–8]) в сборниках трудов конференций. Подготовка к публи-

кации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим.

В опубликованных работах диссертантом были разработаны аналитические и имитационные модели для анализа механизмов самоорганизации в мобильных одноранговых сетях, а также предложены новые механизмы самоорганизации, направленные на обеспечение качества обслуживания. Вклад соавторов заключался в проведении сравнительного анализа предложенных диссертантом механизмов и существующих решений с помощью разработанных диссертантом средств моделирования.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем диссертации 115 страниц, включая 27 рисунков и 6 таблиц. Библиография включает 114 наименований. В приложении на 2 страницах приведены акты о внедрении.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе описываются особенности построения мобильных одноранговых сетей, а также механизмы самоорганизации для мобильных одноранговых сетей. Особое внимание уделено методам доступа к каналу, а также механизмам динамической маршрутизации.

Мобильные одноранговые сети могут быть организованы с помощью узкополосных и широкополосных радиоканалов. Основным преимуществом узкополосных каналов для организации мобильных одноранговых сетей является большое расстояние уверенного радиоприема, что позволяет передавать данные без использования промежуточных ретрансляторов и делает сеть *одношаговой*. Однако, сети, организованные с помощью узкополосных каналов, обладают низкой пропускной способностью. Использование широкополосных каналов для построения мобильных одноранговых сетей позволяет значительно повысить их пропускную способность по сравнению с узкополосными, однако дальность уверенного приема в таких сетях меньше, и для обеспечения той же зоны покрытия узлы должны также выполнять роль ретрансляторов, что делает сеть *многошаговой*.

Ключевым механизмом самоорганизации для мобильных одноранговых сетей является метод распределенного доступа к каналу. Популярный механизм CSMA (англ.: Carrier Sense Multiple Access – множественный доступ с прослушиванием несущей) случайного доступа к каналу обеспечивает высокую пропускную способность и приемлемую задержку, когда узлы сети «слы-

шат» передачи друг друга, что делает CSMA подходящим решением для одношаговых мобильных одноранговых сетей. Однако, когда в сети есть «скрытые станции» – узлы, которые не «слышат» передачи друг друга, использование CSMA приводит к низкой пропускной способности сети и непредсказуемым задержкам, поэтому CSMA не в состоянии обеспечить качество обслуживания в многошаговых мобильных одноранговых сетях.

Более подходящим решением для доступа к каналу в многошаговых мобильных одноранговых сетях является механизм DTDMA (англ.: Dynamic Time Division Multiple Access – множественный доступ с динамическим временным разделением) детерминированного доступа к каналу, в котором узлы осуществляют доступ к каналу *по расписанию*, причем расписание динамически меняется в зависимости от требований узлов и топологии сети распределенным образом. В DTDMA все время разделено на кадры одинаковой длительности, состоящие из контрольных слотов и слотов для передачи данных. Контрольные слоты используются для распределенного резервирования слотов для передачи данных. Узлу, зарезервировавшему слот в кадре, гарантируется отсутствие коллизий с другими узлами. Таким образом, DTDMA является подходящей основой для обеспечения качества обслуживания в многошаговых мобильных одноранговых сетях. Поэтому в диссертации рассматривается именно этот механизм для доступа к каналу в широкополосной мобильной одноранговой сети.

Кадр исследуемого механизма DTDMA состоит из L слотов длительности τ . Контрольные слоты статически закреплены за узлами сети и используются для установления резервирований в слотах для передачи данных, синхронизации узлов, определения списка соседей и рассылки сетевой информации протоколов верхнего уровня (например, протоколов маршрутизации). Зарезервированный узлом x слот становится недоступен для передачи узлам из двухшаговой окрестности узла x . Также, контрольные слоты используются для блочного квитирования успешного приема пакетов в слотах для передачи данных. Данное решение обусловлено тем, что квитирование непосредственно после успешного приема в слоте требует дополнительного резервирования ресурсов приемником. В силу того, что квитирование в контрольных слотах происходит с некоторой задержкой, для потоков реального времени (например, речевых потоков) квитирование не выполняется. Вместо этого для надежной доставки потоков реального времени выполняются безусловные повторы передачи пакетов.

Вторым ключевым механизмом самоорганизации в мобильных одноранговых сетях является динамическая маршрутизация, одной из важных задач которой является рассылка сетевой информации. Чем более актуальна информация на узлах сети о других узлах, тем менее вероятны ошибки при построении маршрутов. Можно выделить два основных способа рассылки

сетевой информации: реактивный и проактивный. В реактивном подходе сетевая информация определяется *по запросу*, что может привести к непредсказуемой задержке определения необходимой сетевой информации при построении маршрутов. В отличие от реактивного, в проактивном подходе сетевая информация определяется *заранее*, что делает его более подходящим для обеспечения качества обслуживания. Существенным недостатком проактивного подхода является большой объем рассылаемой узлами информации, поэтому важной задачей при проактивной рассылке сетевой информации является снижение объема рассылаемой информации, сохраняя при этом степень актуальности информации, предоставляемой узлам сети. Например, в протоколе маршрутизации OLSR (Optimized Link State Routing) с помощью механизма MPR (Multi-Point Relay) снижается число ретрансляций служебных сообщений и их размер, в протоколе маршрутизации TBRPF (Topology dissemination Based on Reverse-Path Forwarding) узлы рассылают инкрементальные сообщения.

В многошаговых мобильных одноранговых сетях важной является задача выбора метрики построения кратчайших маршрутов между узлами сети. Метрика маршрутизации должна быть направлена на обеспечение высокой пропускной способности сети с учетом механизмов обеспечения качества обслуживания, используемых на уровне доступа к каналу. Например, метрика ETX учитывает среднее число передач пакета по соединению для успешной доставки при использовании механизма ARQ (Automatic Repeat reQuest). Метрика «airtime», рекомендованная стандартом IEEE 802.11, учитывает среднее время занятости канала при передаче пакета по соединению.

Классические подходы к многоадресной маршрутизации, используемые в проводных сетях, такие как построение многоадресного дерева Штейнера, неприменимы для мобильных одноранговых сетей, так как не учитывают их особенностей, а именно: ненадежность соединений, мобильность узлов и широковещательный характер радиоканалов. Широкое применение для многоадресной маршрутизации в мобильных одноранговых сетях получил стандартизованный рабочей группой MANET протокол SMF (Simplified Multicast Forwarding), осуществляющий доставку многоадресных данных на всю сеть с помощью ретрансляторов из связного доминирующего множества – такого связного подмножества узлов сети, что каждый узел сети является либо членом этого подмножества, либо смежен с членом этого подмножества. В силу свойства широковещательности радиоканала, только узлам из связного доминирующего множества достаточно ретранслировать пакеты для доставки их на всю сеть.

Содержание главы опубликовано в работах [2, 4–6, 8].

Во второй главе проводится анализ механизмов рассылки сетевой информации в узкополосных мобильных одноранговых сетях. Рассматривается

узкополосная мобильная одноранговая сеть, все узлы которой находятся в области уверенного приема друг друга. Доступ к узкополосному каналу осуществляется согласно методу «1-настойчивый» CSMA. К каждому узлу сети подключено множество абонентов с уникальными адресами. Множество узлов сети и множество абонентов на каждом из узлов может меняться. Для эффективной маршрутизации узлы сети должны в каждый момент времени иметь актуальную информацию о других узлах сети и подключенных к ним абонентах.

В качестве механизма рассылки сетевой информации рассматривается механизм рассылки инкрементальных сообщений (МРИС), в котором узлы периодически (с периодом T) рассылают сообщения, содержащие информацию о подключенных к ним абонентах. Согласно принятым сообщениям, узлы определяют список соседних узлов и список абонентов, подключенных к соседним узлам.

Узел A , приняв сообщение от узла B , считает, что B является соседним узлом (если он не был таковым ранее). Если узел A не получил подряд l сообщений от узла B , то в таком случае узел B перестает считаться соседним.

Сообщения могут иметь один из трех типов:

1. FULL – сообщение, содержащее полный состав абонентов узла;
2. DIFF – сообщение, содержащее информацию об изменении состава абонентов узла;
3. EMPTY – сообщение, не содержащее сетевой информации.

Тип генерируемого сообщения выбирается следующим образом. Сообщение FULL генерируется, если с момента последней генерации очередного сообщения FULL было сгенерировано n сообщений или после обнаружения нового узла в сети было сгенерировано меньше f сообщений FULL. Сообщение DIFF генерируется, если после изменения сетевой информации об узле было сгенерировано меньше d сообщений DIFF или FULL, при этом в сообщениях DIFF содержалась информация именно об этом изменении. Сообщение EMPTY генерируется во всех остальных случаях.

Назовем *степенью актуальности* P_{rel} вероятность того, что в случайный момент времени все узлы сети имеют актуальную информацию об абонентах всех узлов, находящихся в области их уверенного приема, при этом все узлы, находящиеся в области уверенного приема, и только эти узлы считаются соседними. Информация на узлах может быть неактуальной по следующим причинам:

1. Изменился состав абонентов у некоторого узла, и остальные узлы не получили сообщение, содержащее информацию об изменении. Вероятность того, что в случайный момент времени хотя бы один узел имеет неактуальную информацию по причине изменения состава абонентов на некотором узле, обозначим через π_h .

2. В сети появился новый узел, и остальные узлы сети не знают состава его абонентов, а также появившийся узел не знает состава абонентов других узлов. Вероятность того, что в случайный момент времени хотя бы один узел сети не знает состава абонентов появившегося узла и/или появившийся узел не знает состава абонентов других узлов, обозначим через π_n .
3. Узел покинул сеть, однако остальные узлы сети все еще считают его соседним. Вероятность того, что в случайный момент времени узлы считают узел, покинувший сеть, соседним, обозначим через π_l .
4. Некоторый узел сети ошибочно перестал считаться соседним. Вероятность того, что в случайный момент времени хотя бы один узел сети ошибочно не считается соседним хотя бы одним другим узлом сети, обозначим через π_p .

Степень актуальности P_{rel} оценивается аналитически в предположении, что все случаи неактуальности информации, приведенные выше, возникают независимо. Следовательно, P_{rel} может быть оценена следующим образом:

$$P_{rel} = (1 - \pi_h)(1 - \pi_n)(1 - \pi_l)(1 - \pi_p).$$

Так как все узлы сети находятся в области уверенного приема друг друга, передача пакета может быть неуспешной только из-за коллизии. В среднем через T_n изменяется состав узлов сети – поочередно происходит одно из событий: в сети появляется новый узел или один из узлов покидает сеть. Также предполагается, что в среднем через T_h на каждом узле изменяется состав абонентов – поочередно происходит одно из событий: подключается новый абонент или отключается один из подключенных абонентов. В рамках данных предположений можно считать, что число N узлов и число N_h абонентов, подключенных к каждому узлу, в среднем остается постоянным.

Для оценки вероятностей π_h , π_n , π_l определяются средние времена t_h , t_n , t_l неактуальности информации после возникновения соответствующих событий. Для оценки вероятности π_p определяется доля времени, в течение которого узлы сети ошибочно не считают некоторый узел соседним.

Наибольший интерес представляет полученная в диссертации оценка среднего времени t_n . Предполагается, что время, в течение которого все узлы узнают состав абонентов нового узла, будет всегда меньше времени, в течение которого новый узел узнает состав абонентов других узлов.

Для того чтобы найти время t_n , введем следующую вспомогательную величину

$$\xi_{ij}(N, p) = \sum_{m=i}^j p_m(N, p), \quad (1)$$

где $p_m(N, p)$ – вероятность того, что за m попыток передачи не все N узлов успешно передали свой пакет, при этом вероятность успешной передачи пакета составляет p .

Утверждение 1. Величина ξ_{ij} , определенная в (1), вычисляется следующим образом:

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^N \binom{N}{k} (-1)^{k+1} (1-p)^{ik} \frac{1 - (1-p)^{(j-i+1)k}}{1 - (1-p)^k}.$$

Также введем величину β_N – математическое ожидание случайной величины, равной максимуму из N независимых случайных величин η_k , имеющих равномерное распределение на отрезке $[0, 1]$:

$$\beta_N = M[\max_{k=1..N} \eta_k] = \frac{N}{N+1}.$$

Определив $\xi_{ij}(N, p_s)$ и β_N , перейдем к расчету времени t_n , в течение которого новый узел узнает о составе абонентов других узлов.

В рассматриваемом МРИС узлы начнут генерировать сообщения FULL только после того, как получат первое сообщение от нового узла. Пусть t_n^1 – среднее время, в течение которого новый узел успешно передаст свое сообщение, t_n^2 – среднее время, в течение которого все узлы успешно передадут свои сообщения, содержащие полный состав абонентов, начиная с момента успешной передачи новым узлом своего сообщения. Тогда $t_n = t_n^1 + t_n^2$.

Новый узел сгенерирует свое первое сообщение в среднем через $\frac{T}{2}$ после появления, следующее сообщение будет сгенерировано через T после первого и т. д., следовательно время t_n^1 , в течение которого новый узел успешно передаст свое сообщение, составляет:

$$t_n^1 = T \left(\frac{1}{p_s^M} - \frac{1}{2} \right).$$

Здесь p_s^M – это вероятность успешной передачи пакета, когда в сети не происходит изменений (режим стабильной работы).

Получив первое сообщение от нового узла, остальные узлы сгенерируют f сообщений FULL. При этом первое сообщение FULL узлы сгенерируют в течение $\beta_{N-1}T$, второе сообщение FULL через T после первого и т. д. После того, как узлы сгенерировали f сообщений FULL, следующее сообщение FULL будет сгенерировано через $(n+1)T$ после генерации последнего сообщения FULL и так далее. Пользуясь вспомогательными величинами $p_m(N, p)$ и ξ_{ij} , определенными в (1), получаем выражение для t_n^2 :

$$t_n^2 = T(\beta_{N-1} + \xi_{1(f-1)}(N-1, p_s^F) + \beta_{N-1}(n+1)\xi_{ff}(N-1, p_s^F) + (n+1)\xi_{(f+1)\infty}(N-1, p_s^M)).$$

Здесь p_s^F – это вероятность успешной передачи пакета, когда все узлы сети рассылают сообщения FULL.

Была проведена валидация аналитической модели с помощью имитационного моделирования в среде NS-3 (см. рис. 1). Было показано, что предложенная аналитическая модель позволяет достаточно точно оценить степень

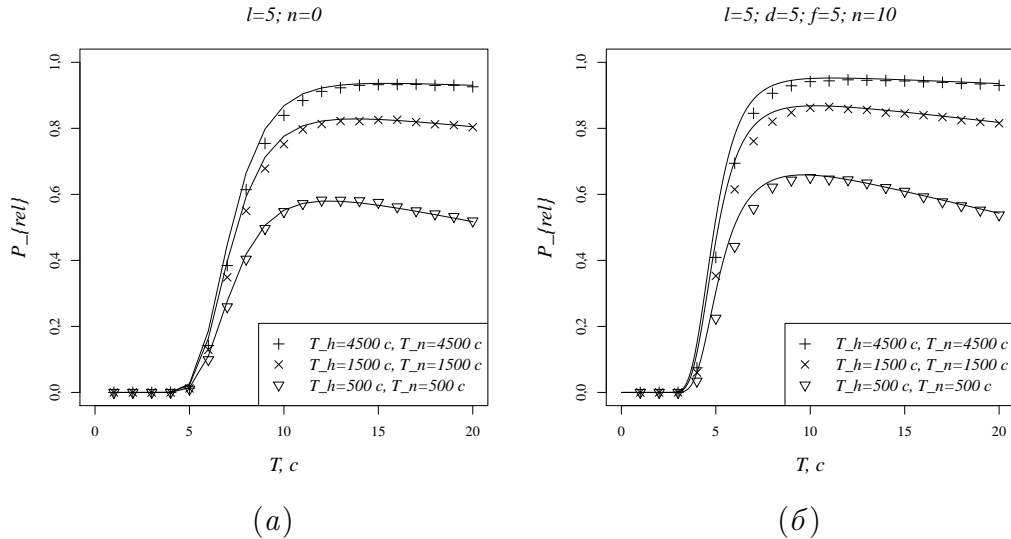


Рис. 1. Зависимости P_{rel} от параметра T для $N = 20$, $N_h = 20$, полученные аналитически (линии) и имитационно (точки).

актуальности сетевой информации при различных параметрах сети и параметрах МРИС. Предложенная аналитическая модель может быть использована для выбора параметров механизма рассылки сообщений, при использовании которых максимизируется степень актуальности сетевой информации при заданных параметрах сети, а также для сравнительного анализа различных механизмов рассылки сетевой информации и определения допустимых параметров сети, при которых степень актуальности не ниже определенного порога. Содержание главы опубликовано в работах [1, 3].

В третьей главе анализируются механизмы передачи речевых потоков в широкополосной многошаговой мобильной одноранговой сети. Топология такой сети может быть представлена ненаправленным графом G . Наличие ребра e_{ij} означает, что узлы i и j могут обмениваться данными. Каждое соединение (ребро e_{ij}) характеризуется вероятностью p_{ij} успешной попытки передачи пакета. Для координации доступа к каналу узлы сети используют механизм DTDMA детерминированного доступа. Для упрощения предполагается, что все L слотов кадра используются для передачи данных, и что границы кадров всех узлов идеально синхронизированы. Предполагается, что длительность $L\tau$ кадра равна периоду поступления пакетов речевого потока, причем пакет речевого потока «помещается» в один слот.

Качество обслуживания речевого потока удовлетворительно, если одновременно выполняются два условия:

1. вероятность потери пакета потока на всем маршруте от отправителя до получателя не больше, чем Q_{max} ;
2. задержка при передаче пакета потока от отправителя до получателя не больше, чем D_{max} .

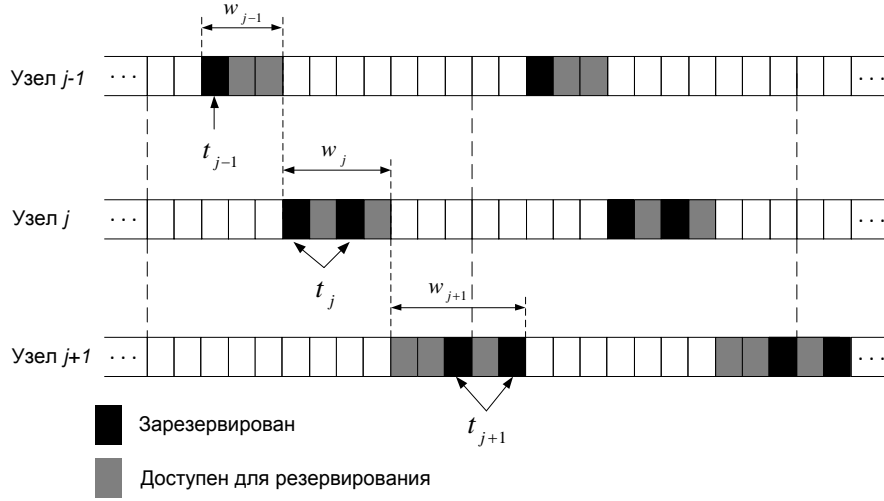


Рис. 2. Оконный механизм с обязательными повторами.

Чтобы выполнить ограничение на вероятность потери пакета, узлы маршрута могут передавать пакет более, чем 1 раз, резервируя соответствующее число слотов в кадре. Обозначим через \vec{t} вектор, в котором t_i – это число слотов, зарезервированных на i -ом шаге маршрута. Предполагая, что успешные передачи в разных слотах являются независимыми событиями, получаем:

$$1 - \prod_{j=1}^H [1 - (1 - p_j)^{t_j}] \leq Q_{max}. \quad (2)$$

Пусть \mathbb{F} – множество речевых потоков, которые могут быть запущены в сети. Последовательность запуска потоков равновероятно выбирается среди всех возможных последовательностей потоков из \mathbb{F} . Потоки запускаются до тех пор, пока для очередного потока $\xi + 1$ не смогут быть выполнены требования качества обслуживания.

Определим *емкость сети* как математическое ожидание величины ξ . Задача передачи речевых потоков в рассматриваемой сети состоит в максимизации емкости сети. Для решения данной задачи может потребоваться полный перебор всевозможных слотов и маршрутов для запуска потоков, поэтому в диссертации ищется приближенное решение, для чего исходная задача делится на две независимые подзадачи:

1. разработка алгоритма выбора слотов на заданном маршруте, гарантирующего выполнение требований качества обслуживания и направленного на максимизацию емкости сети;
2. выбор метрики построения маршрутов, направленной на максимизацию емкости сети при заданном алгоритме выбора слотов.

В диссертации предлагается «оконный» метод выбора слотов, который гарантирует выполнение ограничения на задержку D_{max} и при этом обладает гибкостью к изменению качества канала (см. рис. 2). Узлам разрешается

резервировать слоты не во всем кадре, а лишь в заранее определенной части кадра. Назовем множество непрерывно следующих друг за другом слотов кадра, которые узел может резервировать для передачи пакетов потока, *окном* этого узла. Окно $(i + 1)$ -ого узла маршрута начинается сразу после окончания окна i -ого узла маршрута. Окно узла, на котором поток был запущен, начинается в следующем после момента поступления пакета потока слоте. Обозначим через \vec{w} вектор, в котором $w_i \leq L$ – размер окна на i -ом шаге маршрута. После того, как \vec{t} и \vec{w} найдены на источнике маршрута и доведены до всех остальных узлов маршрута, каждый узел i маршрута определяет, какие слоты в пределах его окна длины w_i свободны, случайно выбирает из них t_i штук и резервирует их. Ограничение на задержку будет выполнено, если:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^H w_i \leq \delta_{max}, \\ 0 < w_i \leq L, \forall i, \end{cases} \quad (3)$$

где $\delta_{max} = \lfloor \frac{D_{max}}{\tau} \rfloor$. Задача выбора слотов для передачи речевых потоков по заданному маршруту сводится к поиску таких \vec{t} и \vec{w} , чтобы были выполнены ограничения (2) и (3), при этом максимизировалась бы емкость сети.

В диссертации предлагается алгоритм выбора векторов \vec{t} и \vec{w} , нацеленный на минимизацию вероятности блокировки потока. Под блокировкой понимается нехватка слотов в окне на одном из узлов маршрута для передачи очередного потока.

Предполагается, что источнику маршрута известно количество l_i занятых слотов в кадре DTDMA для каждого узла i маршрута. Определим величину α_i – среднее число свободных слотов в окне w_i , которое приходится на один из t_i слотов, которые необходимо зарезервировать на шаге i , в предположении, что l_i занятых слотов распределены равномерно по кадру DTDMA (состоит из L слотов) узла i :

$$\alpha_i = \frac{w_i(1 - \frac{l_i}{L})}{t_i}. \quad (4)$$

Идея предложенного алгоритма заключается в том, чтобы выбрать такие \vec{w} и \vec{t} , что α_i одинаковы для всех i , при этом выравненное значение α_i являлось максимальным. Примем α_i равными некоторой α для всех i . Очевидно, что наиболее эффективным в смысле вероятности блокировки является выбор w_i таким образом, что сумма w_i равна ограничению на задержку δ_{max} . Таким образом, величина α вычисляется следующим образом:

$$\alpha = \frac{\delta_{max}}{\sum_{i=1}^H \frac{t_i}{1 - c_i}}, \quad (5)$$

где $c_i = \frac{l_i}{L}$. Значение α будет максимально, если знаменатель в (5) минимален:

$$\min_{\vec{t}} \sum_{i=1}^H \frac{t_i}{1 - c_i}. \quad (6)$$

Следовательно, для выбора \vec{t} необходимо решить задачу (6) при ограничении (2). Выразим w_i из (4), заменим α_i на (5) и учтем, что $w_i \leq L$:

$$w_i = \min \left(L, \frac{\delta_{max} \frac{t_i}{1 - c_i}}{\sum_{j=1}^H \frac{t_j}{1 - c_j}} \right). \quad (7)$$

В выражении (7) учтено, что окно не должно превышать длину кадра, и, если рассчитать размер каждого окна, то может выйти так, что сумма w_i будет меньше δ_{max} . В этом случае на некоторых шагах маршрута окна, рассчитанные по выражению (7), можно увеличить, не нарушив при этом ограничение (3) на задержку. Для этого отсортируем номера шагов в порядке убывания величины $\frac{t_i}{1 - c_i}$. Затем будем последовательно рассчитывать окно для каждого шага из отсортированного массива согласно (7), но вместо δ_{max} будем подставлять ограничение на задержку (в слотах) за вычетом окон, рассчитанных на предыдущих шагах.

Для решения второй задачи, касающейся выбора метрики маршрутизации, была предложена аддитивная метрика маршрутизации BLOCK, нацеленная на минимизацию вероятности блокировки речевого потока. Метрика BLOCK приписывает соединению e_{ij} следующую стоимость:

$$BLOCK_{ij} = \frac{1}{1 - c_i} t_{ij}.$$

Здесь t_{ij} – оценка количества слотов для передачи речевого потока по соединению e_{ij} с удовлетворительным качеством. Предлагается следующая оценка для t_{ij} :

$$t_{ij} = \left\lceil \frac{\log(Q_0)}{\log(1 - p_{ij})} \right\rceil.$$

где Q_0 – настраиваемый параметр, определяемый средней длиной маршрута в сети и ограничением Q_{max} .

Для оценки эффективности предложенных алгоритма выбора слотов и метрики маршрутизации, нацеленных на минимизацию вероятности блокировки речевого потока, была разработана имитационная модель, позволяющая для заданного графа G сети и множества \mathbb{F} речевых потоков определить емкость сети при использовании различных алгоритмов. Было показано, что предложенный алгоритм выбора слотов позволяет до 30% увеличить емкость сети по сравнению с базовыми алгоритмами: деление требований качества обслуживания поровну между узлами маршрута и минимизация количества занимаемых потоком ресурсов (см. рис. 3). Также был предложен метод оценки верхней границы емкости сети. Было показано, что в практически значимых сценариях предложенный алгоритм выбора слотов обеспечивает как

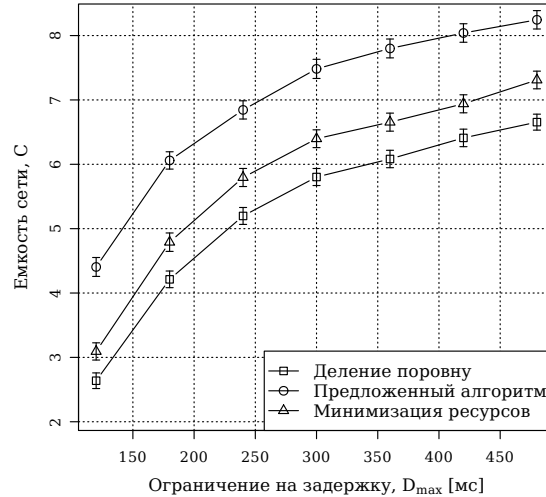


Рис. 3. Зависимости емкости сети от максимально допустимой задержки D_{max} для различных алгоритмов выбора слотов.

минимум 75% от верхней границы емкости сети. Также, было показано, что использование предложенной метрики маршрутизации до 30% увеличивает емкость сети по сравнению с метриками, известными в литературе.

Содержание главы опубликовано в работах [2, 6, 7].

В четвертой главе исследуются алгоритмы выбора ретрансляторов для передачи многоадресных данных в широкополосных многошаговых мобильных одноранговых сетях. Каждый из узлов сети может входить в одну или несколько *групп*. Участники группы генерируют многоадресные потоки постоянной интенсивности (например, речевые потоки), адресованные всем остальным участникам группы. Для того, чтобы доставить пакеты потока от участника группы до остальных участников группы, некоторые узлы сети должны выполнять роль ретрансляторов.

Когда диаметр группы примерно равен диаметру сети, наиболее подходящим способом доставки многоадресных данных является их доставка на всю сеть, используя узлы из минимального связного доминирующего множества (СДМ) сети в качестве ретрансляторов. Однако, в случае, если диаметр сети превышает диаметр группы, то доставка данных на всю сеть может привести к существенной избыточности, и ретрансляторы должны выбираться таким образом, чтобы многоадресные данные доставлялись только до участников группы. Задача поиска такого множества ретрансляторов известна в литературе как задача построения связного доминирующего множества Штейнера (СДМШ).

Связное доминирующее множество Штейнера для графа $G(V, E)$ и подмножества $M \subseteq V$ (участники группы) вершин графа – это связное множество $C \subseteq V$ вершин графа G такое, что каждая вершина из M либо содержит-

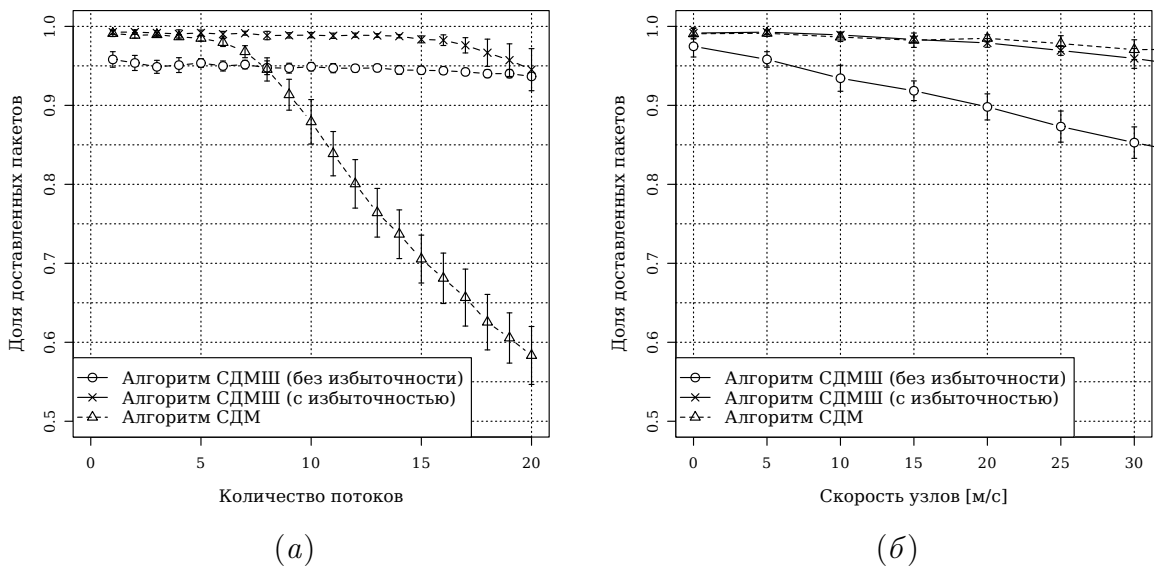


Рис. 4. Зависимость доли доставленных пакетов от количества передаваемых потоков (а) и скорости движения узлов (б).

ся в множестве C , либо смежна с вершиной из множества C . В силу свойства широковещательности радиоканала, всем узлам СДМШ достаточно ретранслировать пакеты данных, адресованные группе, чтобы доставить их до всех участников группы. В диссертации предлагается распределенный алгоритм построения СДМШ для *локальных* групп. Группа называется *локальной*, если хотя бы один участник группы содержит всех остальных участников группы среди своих соседей и двухшаговых соседей.

Ретрансляторы для заданной группы g , выбранные предложенным алгоритмом, делятся на два множества: $C_1(g)$ и $C_2(g)$. Ретрансляторы из $C_1(g)$ соединяют участников группы, которые имеют общих соседей. Ретрансляторы из $C_2(g)$ соединяют узлы из $C_1(g)$ друг с другом, а также с участниками группы.

Узел проверяет, принадлежит ли он $C_1(g)$ или $C_2(g)$ для определенной группы g , основываясь на информации о соседних узлах и соединениях между ними, а также на приоритетах узлов для группы g . Приоритет узла x для группы g вычисляется как количество узлов группы g среди соседей узла x (включая x). Если два узла имеют одинаковый приоритет, то для сравнения приоритетов используются идентификаторы узлов. Стоит отметить, что предложенный алгоритм СДМШ может быть настроен на выбор избыточного множества C_1 .

В диссертации доказано, что предложенный алгоритм действительно формирует СДМШ для локальных групп, что формулируется следующим утверждением.

Утверждение 2. Для каждой пары несоседних узлов $x_1, x_2 \in M(g)$ существует маршрут от x_1 до x_2 , состоящий только из узлов, содержащихся в $C_1(g) \cup C_2(g)$.

С помощью имитационного моделирования в среде NS-3 было показано (см. рис. 4), что предложенный алгоритм СДМШ позволяет до 2,5 раз увеличить число одновременно передаваемых многоадресных потоков с высокой надежностью по сравнению с алгоритмом доставки многоадресных данных с помощью связного доминирующего множества, причем с использованием избыточности обеспечивает ту же устойчивость к мобильности узлов.

Содержание главы опубликовано в работах [4, 5, 8].

Основные результаты

В данной диссертации разработан комплекс аналитических и имитационных моделей для анализа механизмов самоорганизации в мобильных одноранговых сетях, а также разработаны новые механизмы самоорганизации, направленные на обеспечение качества обслуживания и учитывающие особенности мобильных одноранговых сетей. В частности:

1. Разработана аналитическая модель, позволяющая оценить вероятность того, что в случайный момент времени механизм инкрементальной рассылки сетевой информации предоставляет каждому узлу сети актуальную информацию обо всех других сетевых узлах в узкополосной мобильной одноранговой сети.
2. Разработан оригинальный метод выбора слотов для многошаговой передачи речевых потоков с выполнением требований качества обслуживания в широкополосной мобильной одноранговой сети с детерминированным доступом TDMA при наличии помех в канале. Предложены алгоритм выбора параметров разработанного метода выбора слотов и метрика маршрутизации, нацеленные на минимизацию вероятности блокировки речевого потока. Показано, что использование предложенных решений позволяет увеличить емкость сети до 30 % по сравнению с базовыми алгоритмами.
3. Предложен новый распределенный алгоритм выбора ретрансляторов для передачи многоадресных данных в широкополосной мобильной одноранговой сети, использующий лишь информацию о соседних узлах и соединениях между ними и нацеленный на формирование минимального связного доминирующего множества Штейнера.

Список публикаций

1. П.О. Некрасов, Д.Н. Фахриев. Рассылка сетевой информации в узкополосных самоорганизующихся сетях // Автоматика и телемеханика. 2015. № 4. С. 105–124.
2. Nekrasov P., Fakhriev D. [Transmission of real-time traffic in TDMA multi-hop wireless ad-hoc networks](#) // Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2015. — June. Pp. 6469–6474.
3. Fakhriev D., Nekrasov P. [Forwarding Protocol for Multi-channel Narrowband Ad Hoc Networks](#) // Proc. of Military Communications Conference (MILCOM). IEEE, 2013. — Nov. Pp. 516–520.
4. Nekrasov P., Fakhriev D. [Methods for Improving Fault Tolerance of Simplified Multicast Forwarding with CDS in MANETs](#) // Proc. of Military Communications Conference (MILCOM). IEEE, 2014. — Oct. Pp. 1223–1228.
5. Nekrasov P., Fakhriev D. [LG-CDS: Local group connected dominating set for multicasting in MANETs](#) // Proc. of International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). IEEE, 2015. — Feb. Pp. 791–795.
6. П.О. Некрасов, Д.Ю. Доронин, Д.Н. Фахриев. Метод обеспечения качества обслуживания потоков реального времени в сети MANET с динамическим TDMA // Труды конференции «Информационные технологии и системы». 2015. С. 672–678.
7. П.О. Некрасов, Д.Ю. Доронин, Д.Н. Фахриев. Передача потоков реального времени в беспроводных многошаговых самоорганизующихся сетях с динамическим TDMA // Труды конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века». 2015. С. 140–153.
8. П.О. Некрасов, Д.Н. Фахриев. Анализ алгоритмов формирования связного доминирующего множества в мобильных беспроводных многошаговых децентрализованных сетях // Труды конференции «Радиолокация, навигация, связь». 2016. С. 582–593.