

На правах рукописи

Красилов Артем Николаевич

**Анализ эффективности гибридного доступа
к каналу в многошаговых беспроводных сетях**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в *Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН)*.

Научный руководитель: *доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Ляхов Андрей Игоревич*

Официальные оппоненты: *Степанов Сергей Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
директор информационно-
аналитического департамента
ОАО «Интеллект-телеком»*

*Осипов Дмитрий Сергеевич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
лаб. №3 ИППИ РАН*

Ведущая организация: *Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем информатики
Российской академии наук*

Защита состоится « 2 » декабря 2013 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.156.04 при *Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московском физико-техническом институте (государственном университете)»* по адресу: 141700, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9, ауд. 204 Нового корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *МФТИ (ГУ)*.

Автореферат разослан « 24 » октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к. ф.-м. н.



Стрыгин Л. В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В последние годы во всем мире наблюдается повышенный интерес к исследованию и разработке многошаговых беспроводных самоорганизующихся сетей (МБСС) с распределенным управлением. Примерами таких сетей являются высокоскоростные локальные сети Wi-Fi Mesh (стандарт IEEE 802.11s), персональные сети WiMedia (стандарт ECMA-368), а также сенсорные сети ZigBee (стандарт IEEE 802.15.4). По сравнению с беспроводными сетями с традиционной архитектурой «клиент–базовая станция» такие сети лучше масштабируются, обладают большей зоной покрытия за счет возможности использования нескольких шагов ретрансляции пакетов, более высокой отказоустойчивостью, а также адаптивны к условиям работы.

Одной из ключевых задач при построении МБСС является задача обеспечения множественного доступа станций к беспроводному каналу. В большинстве современных МБСС базовый механизм доступа к каналу обычно основан на методе случайного множественного доступа с детектированием несущей и предотвращением коллизий – CSMA/CA. Однако, как показывают многие исследования, в многошаговых сетях механизм случайного доступа не гарантирует надежную доставку данных из-за проблемы скрытых станций. Для решения этой проблемы недавно опубликованные стандарты МБСС в дополнение к базовому механизму случайного доступа предлагают опциональный механизм детерминированного доступа, основанный на заблаговременном резервировании интервалов времени для передачи данных и позволяющий существенно увеличить надежность их доставки. Таким образом, в современных МБСС предполагается использование механизма *гибридного* доступа, объединяющего в себе как случайный, так и детерминированный механизмы доступа к каналу.

Исследованию эффективности механизмов множественного доступа к каналу в беспроводных сетях посвящено значительное количество работ, среди которых следует особо отметить работы российских и зарубежных ученых: О.М. Брехова, А.В. Винеля, К.Ш. Зигангирова, В.В. Зяблова, А.П. Кулешова, Д.В. Лаконцева, А.И. Ляхова, Д.Н. Мацнева, В.И. Неймана, Д.С. Осипова, А.А. Сафонова, С.Н. Степанова, А.М. Тюрликова, Е.М. Хорова, И.И. Цитовича, М.Ю. Якимова, G. Bianchi, F. Cali, C. Cicconetti, M. Conti, M. Daneshi, J. Deng, G. Hiertz, E. Hossain, D. Malone, E. Mingozzi, J. Pan, I. Tinnirello, C. Wu, Y. Yang и др. Среди них большинство работ посвящено анализу эффективности только механизма случайного доступа. Другие работы предполагают, что в сети используется только механизм детерминированного доступа. Таким образом, остается открытой задача анализа производительности МБСС, в которых станции могут использовать одновременно два механиз-

ма доступа. Кроме того, представляет интерес исследовать, как, используя механизм гибридного доступа, увеличить надежность доставки различных типов трафика в многошаговых сетях, в том числе, мультимедийного трафика, предъявляющего определенные требования к качеству обслуживания, и обеспечить выполнение этих требований.

Целью диссертационной работы является анализ эффективности механизма гибридного доступа к каналу в многошаговых беспроводных сетях, а также разработка методов повышения надежности передачи данных и обеспечения качества обслуживания в сетях с гибридным доступом.

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

1. Исследование влияния интерференции на эффективность работы механизмов случайного и детерминированного доступа в многошаговых беспроводных сетях.
2. Разработка методов борьбы с интерференцией и повышения эффективности использования канальных ресурсов при передаче данных с помощью механизма детерминированного доступа.
3. Разработка методов обеспечения качества обслуживания при передаче потоковых данных с использованием механизма детерминированного доступа в условиях переменной интенсивности помех.
4. Разработка аналитической модели сети с гибридным доступом для исследования взаимодействия механизмов случайного и детерминированного доступа.

Методы исследования

В диссертации используются методы теории вероятностей и математической статистики, комбинаторного анализа, вычислительной математики, теории случайных процессов, а также имитационного моделирования.

Научная новизна

В данной работе получены следующие новые результаты:

- проведена классификация возможных случаев интерференции для двух прямых соединений станций многошаговой беспроводной сети, использующих механизм случайного доступа, с учетом особенностей работы протоколов канального и физического уровней; определены случаи интерференции, которые приводят к существенно неравномерному распределению пропускной способности канала между соединениями, а также получена оценка вероятности возникновения таких случаев;
- разработаны новые методы защиты резервирований канала, устанавливаемых с помощью механизма детерминированного доступа, от интерференции, вызванной передачами других станций сети;
- предложено улучшение процедуры резервирования канала для случая

- передачи данных без использования подтверждений, позволяющее значительно увеличить пропускную способность сети;
- разработан метод адаптивного управления резервированиями, обеспечивающий выполнение требований к качеству обслуживания при передаче потоковых данных в условиях переменной интенсивности помех;
 - разработана аналитическая модель сети с гибридным доступом, позволяющая оценить степень взаимного влияния соединений, использующих различные механизмы доступа к каналу, а также сравнить эффективность различных схем взаимодействия механизмов случайного и детерминированного доступа.

Практическая ценность и реализация результатов. Результаты работы внедрены и используются на практике, а также в учебном процессе на кафедре МФТИ (ГУ) «Проблемы передачи и обработки информации» при ИППИ РАН, что подтверждено соответствующими актами. В частности, разработанные модели и методы использованы в НИР, выполняемых ИППИ РАН в рамках соглашений с Министерством образования и науки РФ и Российским фондом фундаментальных исследований, в международном исследовательском проекте FLAVIA, проводимом в рамках 7-й рамочной программы Евросоюза, а также при проектировании протоколов канального уровня МБСС, разрабатываемых ЗАО «Телум».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанные методы защиты резервирований, устанавливаемых с помощью механизма детерминированного доступа, от интерференции, вызванной передачами других станций, позволяют существенно увеличить вероятность успешной доставки данных в интервалах резервирований по сравнению с методами защиты, рекомендованными в стандарте.
2. Разработанный метод адаптивного управления резервированиями обеспечивает выполнение требований к качеству обслуживания при передаче потоковых данных в условиях переменной интенсивности помех, используя для этого минимальный объем канальных ресурсов.
3. Построенная аналитическая модель сети с гибридным доступом позволяет оценить пропускную способность станции, использующей механизм случайного доступа, в зависимости от того, какая часть ресурсов канала зарезервирована другими станциями сети с помощью механизма детерминированного доступа.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на ведущих международных и российских конференциях: 3rd Int. Workshop on Multiple Access Communications (Испания, 2010 г.), 8th IEEE Int. Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (Испания, 2011 г.), 1st Int. Workshop on Wireless Access Flexibility (Россия, 2013 г.), Future Network and Mobile Summit (Португалия, 2013 г.), «Информационные технологии и системы» в 2009–2012

гг., а также на семинарах ИППИ РАН.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них 7 статей ([1–7]) в рецензируемых изданиях, 4 из которых ([1–4]) входят в перечень ВАК, 5 статей ([8–12]) в сборниках трудов конференций. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем диссертации 130 страниц, включая 43 рисунка и 6 таблиц. Библиография включает 69 наименований.

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 описывается архитектура многошаговых беспроводных самоорганизующихся сетей (МБСС) с распределенным управлением на примере технологии Wi-Fi Mesh (стандарт IEEE 802.11s), которая на сегодняшний день является наиболее перспективной технологией построения МБСС. Особое внимание уделено описанию механизма гибридного доступа к каналу, используемому в таких сетях. Термин «гибридный доступ» означает, что для доступа к каналу станции сети могут использовать два механизма: механизм случайного доступа (МСД) и механизм детерминированного доступа (МДД).

В основе работы МСД лежит метод множественного доступа с детектированием несущей и предотвращением коллизий (CSMA/CA). Прежде чем начать передачу, каждая станция сети, убедившись, что канал был свободен в течение интервала времени *AIFS*, выжидает случайно выбранный интервал отсрочки. Интервал отсрочки состоит из слотов постоянной длительности σ , а количество этих слотов равновероятно выбирается из множества $[0, CW]$, где величина *CW* называется конкурентным окном. Значение счетчика отсрочки уменьшается на единицу, если в течение всего предшествующего слота канал воспринимался как свободный. Отсчет слотов отсрочки приостанавливается, когда канал становится занят. При этом в следующий раз значение счетчика отсрочки уменьшится на единицу, когда канал окажется свободным в течение интервала *AIFS*, если прием последнего кадра, зафиксированного данной станцией, был успешен, или *EIFS*, если прием неудачен. Когда счетчик отсрочки достигает нулевого значения, станция предпринимает очередную попытку передачи. Если станция-приемник успешно получила кадр данных, то она отвечает передачей кадра подтверждения. Отсутствие под-

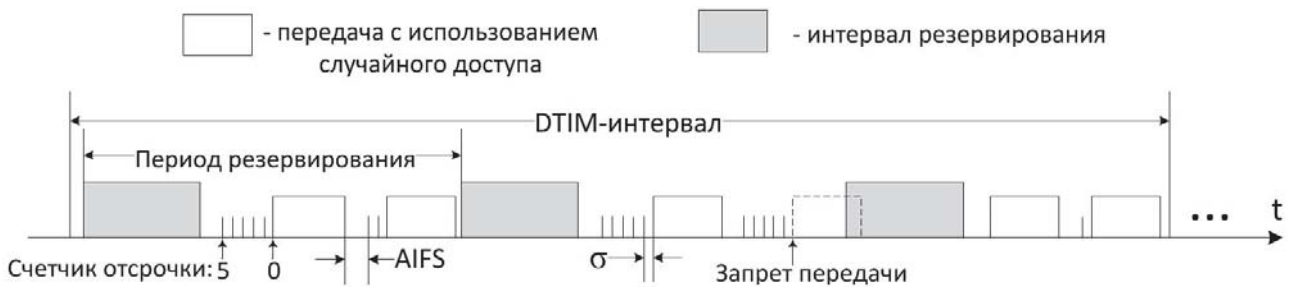


Рис. 1. Механизм гибридного доступа к каналу

тверждения означает, что передача была неудачной и станция должна повторить попытку передачи. При первой попытке передачи кадра данных конкурентное окно равно CW_{\min} , а при последующих попытках оно увеличивается в соответствии с правилом двоичной экспоненциальной отсрочки.

МДД позволяет станциям заблаговременно резервировать интервалы времени работы канала для получения в них бесконкурентного доступа. Каждое резервирование представляет собой строго периодическую последовательность интервалов времени одинаковой длительности. Для определения положения всех интервалов, относящихся к одному резервированию, станция делит время на равные промежутки, называемые DTIM-интервалами. Каждое резервирование задается 3 параметрами: 1) длительностью каждого интервала; 2) периодичностью – числом зарезервированных интервалов в одном DTIM-интервале; 3) смещением первого зарезервированного интервала относительно начала DTIM-интервала. При установлении нового резервирования станция-передатчик (владелец резервирования) и станция-приемник (адресат резервирования) должны убедиться, что оно не пересекается во времени с уже установленными резервированиями их соседей, и оповестить своих соседей, которые, в свою очередь, должны воздерживаться от передачи в зарезервированных интервалах и также оповестить своих соседей о новом резервировании. Таким образом, информация о каждом резервировании распространяется в двухшаговой окрестности от владельца и адресата резервирования.

Для обеспечения совместной работы двух механизмов доступа вводятся следующие правила. Доля временных ресурсов канала MAF , которая может быть зарезервирована станциями с помощью МДД, ограничена величиной $MAFLimit$. В интервалах времени, не занятых резервированиями, станции могут осуществлять доступ с использованием МСД (см.рис. 1). При этом станции запрещается начинать передачу с использованием МСД, если планируемая передача пересекает во времени интервал резервирования, владельцем или адресатом которого является соседняя станция или сама эта станция.

В последнем разделе главы проводится анализ существующих работ по исследованию МСД и МДД и ставятся задачи диссертации. В частности, показано, что в существующих работах предполагается, что в сети исполь-

зуются либо только МСД, либо только МДД, и не рассматривается случай, когда в сети могут использоваться одновременно два механизма. Кроме того, в литературе отсутствуют решения, позволяющие обеспечить в многошаговых сетях передачу мультимедийных потоков с заданными требованиями к качеству обслуживания в условиях переменной интенсивности помех.

Во второй главе анализируется эффективность работы МСД в многошаговых сетях. Особенностью работы беспроводных сетей является то, что все станции разделяют одну общую среду, и поэтому передачи сигналов одними станциями оказывают влияние на передачи сигналов других станций. Данное явление называется интерференцией.

Рассмотрим два прямых соединения станций сети Wi-Fi Mesh: $A \rightarrow B$ и $C \rightarrow D$, в которых передающие станции A и C работают в режиме насыщения и используют для передачи данных механизм случайного доступа. Если все станции находятся в зоне радиоприема друг друга, то они одинаково воспринимают занятость канала, поэтому одновременная передача станций A и C возможна только, когда эти станции одновременно закончат отсчет интервалов отсрочки, причем вероятность такого события мала. В многошаговых сетях передатчики разных соединений могут быть скрыты друга от друга, например, когда станции располагаются в цепочку $A-B-C-D$ и каждая из них слышит только соседей. Так как станции A и C не слышат передачу друг друга, а длительность слота σ значительно меньше длительности передачи, то с вероятностью, близкой к единице, станция C может отсчитать слоты отсрочки за время передачи станции A и начать свою передачу. Интерференция, вызванная передачей станции C , будет приводить к тому, что станция B не сможет декодировать данные, передаваемые станцией A , в то время как передача станции C всегда будет успешна. Таким образом, в рассматриваемом случае интерференция приводит к существенно неравномерному распределению пропускной способности канала между соединениями. Представляет интерес исследовать, насколько часто возникают такие случаи интерференции в сети при произвольном расположении станций и к каким иным эффектам может приводить интерференция при других расположениях станций.

Для решения данной задачи в диссертации используется физическая модель интерференции, детально учитывающая особенности работы протоколов канального и физического уровней сетей Wi-Fi. Для каждой пары станций передатчика (TX) и приемника (RX) данная модель позволяет определить три зоны: 1) зону уверенного приема, в которой все станции в отсутствие интерференции успешно принимают кадры данных от станции TX; 2) зону блокировки, в которой все станции регистрируют физическую занятость среды при передаче станции TX; 3) зону интерференции приемника, в которой передача любой станции приведет к тому, что станция RX не сможет декодировать кадр, передаваемый станцией TX. Используя данную модель, опре-

деляется конечное множество случаев интерференции, отличающихся тем, в каких зонах передатчика и приемника одного соединения находятся передатчик и приемник другого соединения. С помощью имитационного моделирования среди них выявляются случаи интерференции, которые приводят к существенно неравномерному распределению пропускной способности между соединениями, и определяются условия их возникновения. Далее, используя методы стохастического моделирования, получена оценка вероятности возникновения данных случаев при случайном расположении станций, образующих соединения, на плоскости в зависимости от используемого параметра физического уровня, определяющего размер зоны блокировки. Численные результаты показывают, что доля случаев, в которых наблюдается существенная неравномерность распределения пропускной способности, составляет более 30% при использовании стандартного значения этого параметра, и даже при его уменьшении до предельного значения эта доля все равно остается высокой. В связи с этим МСД не может использоваться для доставки трафика, предъявляющего требования к качеству обслуживания.

Основные результаты второй главы опубликованы в [1, 8].

В третьей главе анализируется эффективность работы МДД.

В разделе 3.1 исследуется проблема интерференции при использовании МДД. Согласно стандарту IEEE 802.11s для защиты передач внутри интервалов резервирования от интерференции, вызванной передачами других станций, одношаговые соседи владельца и адресата резервирования не могут начинать передачу с использованием как МСД, так и МДД, если она пересекается во времени с зарезервированными интервалами. Такой метод защиты резервирования действительно позволяет снизить интерференцию и, в частности, решить проблему скрытых станций, возникающую при использовании МСД, однако не решает проблему интерференции полностью. Детальный анализ, проведенный в разделе 3.1, показывает, что передачи внутри интервалов резервирования подвержены интерференции в следующих двух случаях. Во-первых, когда сосед адресата резервирования отвечает кадром подтверждения на кадр данных, переданный двухшаговым соседом с помощью МСД. Во-вторых, интерференция может быть вызвана передачами двухшаговых соседей владельца и адресата резервирования, которые для доступа к каналу могут использовать как МСД, так и МДД. С помощью имитационного моделирования в среде ns-3 показывается, что описанные выше случаи интерференции могут приводить к существенному снижению вероятности доставки данных в интервалах резервирования. В частности, в типичных сценариях развертывания многошаговых сетей, например, в сценарии с решетчатой топологией, при передаче пакетов только в интервалах резервирования доля потерянных пакетов может достигать 40%, что сводит на нет все преимущества от заблаговременного резервирования ресурсов канала.

Для увеличения вероятности доставки данных в интервалах резервирования в диссертации предлагаются следующие методы защиты резервирований от интерференции. Во-первых, это запрет передачи при использовании МСД, если станция-приемник является соседом адресата некоторого резервирования. Во-вторых, использование *двухшаговой* защиты, когда всем станциям, находящимся в двухшаговой окрестности от владельца и адресата резервирования, запрещается передавать как кадры данных, так и кадры подтверждения, а также устанавливать резервирования, если они пересекаются во времени с зарезервированными интервалами. В диссертации показано, что предложенные методы защиты легко могут быть реализованы путем незначительных изменений правил стандарта, причем для этого не требуется увеличение объема передаваемой служебной информации, так как информация о каждом резервировании распространяется в двухшаговой окрестности от владельца и адресата резервирования.

С помощью имитационного моделирования показывается, что использование описанных выше методов защиты позволяет существенно увеличить вероятность доставки данных в интервалах резервирования. В частности, в случае решетчатой топологии использование двухшаговой защиты позволяет полностью решить проблему интерференции, т.е. обеспечить вероятность успешной доставки в интервалах резервирования, близкую к единице, при отсутствии других источников помех. Однако, если для всех резервирований использовать только двухшаговую защиту, это приводит к существенному снижению (более чем на 40%) числа резервирований, которые могут быть установлены в сети, по сравнению со случаем использования только *одношаговой* защиты. Для достижения компромисса между надежностью передачи данных и емкостью сети каждая станция должна адаптивно выбирать одношаговый или двухшаговый метод защиты в зависимости от текущих условий в канале. Алгоритм такого выбора разработан в главе 4.

В разделе 3.2 предлагается улучшение процедуры резервирования канала для случая, когда в интервалах резервирования передача данных осуществляется без использования подтверждений. Согласно стандарту одношаговые соседи владельца и адресата резервирования не различают, какая из станций в интервалах резервирования является передатчиком, а какая – приемником, поэтому они не могут ни передавать, ни принимать данные. Однако, если в интервалах резервирований не используется передача подтверждений, то соседи владельца резервирования и соседи адресата резервирования могли бы соответственно передавать и принимать данные в своих резервированиях, не создавая помех друг другу. Таким образом, знание о направлении передачи позволяет увеличить возможное число установленных резервирований. Однако для этого необходимо, чтобы соседние станции могли различать владельца и адресата резервирования и используемую политику квитирования.

В диссертации описывается, как модифицировать поля передаваемых служебных сообщений, чтобы обеспечить соседние станции такой информацией, а также описываются правила их обработки. С помощью метода Монте-Карло проведен численный анализ предлагаемого улучшения, который показал, что для сети с произвольной топологией в случае, когда не используются подтверждения, предлагаемое улучшение позволяет более чем на 30% увеличить максимальное число установленных в сети резервирований, т.е. более чем на 30% увеличить емкость сети.

Результаты, полученные в третьей главе, опубликованы в [5, 6, 9].

В четвертой главе рассматривается задача обеспечения качества обслуживания при передаче потоковых данных в МБСС. Проведенный в главах 2 и 3 анализ МСД и МДД показал, что ввиду явления интерференции приемлемое качество обслуживания при передаче потоковых данных может быть достигнуто только с использованием МДД. Стандарт IEEE 802.11s лишь описывает правила установления резервирований, но не регламентирует, когда устанавливать резервирования и как выбирать параметры резервирований.

В разделе 4.1 анализируются различные способы организации передачи потоковых данных в многошаговой сети с помощью МДД. Рассматривается передача потока постоянной интенсивности, для которого заданы размер пакета L , интервал поступления пакетов T , а также требования к качеству обслуживания (требования QoS). Требования QoS представляют собой два ограничения: D^{QoS} – максимально допустимая задержка при передаче пакетов от станции-источника до станции-получателя, PLR^{QoS} – максимально допустимая доля пакетов, которая может быть не доставлена станции-получателю или доставлена не вовремя. Предполагается, что для потока найден маршрут, состоящий из N шагов. Как уже было показано в главе 3, передачи пакетов в интервалах резервирования могут быть неудачны из-за интерференции или случайного шума. Поэтому при резервировании ресурсов на каждом шаге маршрута следует учитывать повторные попытки передачи пакетов, необходимые для выполнения требований QoS. При этом объем ресурсов, который необходимо зарезервировать для выполнения требований QoS, зависит от используемой в интервалах резервирования политики квитиования.

В диссертации рассматриваются и сравниваются два метода передачи потоковых данных, которые отличаются между собой тем, какая политика квитиования используется в интервалах резервирования, а именно – метод с подтверждениями и метод без подтверждений. При использовании метода с подтверждениями на каждом шаге i маршрута устанавливается одно резервирование с периодом T_i ($T_i < T$) и длительностью каждого интервала, достаточной для осуществления одной попытки передачи, включая время передачи подтверждения. На шаге i пакет обслуживается до тех пор, пока он либо не будет передан успешно, т.е. будет получено подтверждение, ли-

бо не истечет время D_i^{QoS} , отведенное на его передачу. При использовании метода без подтверждений на каждом шаге устанавливается K_i одинаковых резервирований с периодом T и длительностью каждого интервала, достаточной для осуществления одной попытки передачи, т.е. для каждого пакета осуществляется ровно K_i попыток передачи. Для каждого из методов показывается, как при заданных вероятностях q_i неудачной попытки передачи разделить требования QoS между шагами передачи (т.е. назначить на каждом шаге ограничения PLR_i^{QoS} и D_i^{QoS} , чтобы $\prod_i(1 - PLR_i^{QoS}) = 1 - PLR^{QoS}$ и $\sum_i D_i^{QoS} = D^{QoS}$) и выбрать параметры резервирований, чтобы на каждом шаге выполнялись найденные ограничения и при этом суммарный объем зарезервированных канальных ресурсов был минимален. Сравнение двух методов показывает, что в случае передачи пакетов малого размера (что имеет место при передаче голосовых потоков) и использования высоких скоростей передачи метод без подтверждений является более предпочтительным, так как он обеспечивает выполнение требований QoS, используя для этого меньший объем канальных ресурсов, чем метод с подтверждениями.

Рассмотрим один шаг передачи потока постоянной интенсивности, на котором заданы требования QoS (PLR^{QoS} и D^{QoS} , индекс i опущен для краткости записи), а для передачи используется метод без подтверждений. При использовании метода без подтверждений выполнение ограничения на задержку D^{QoS} обеспечивается таким размещением интервалов резервирований, что последняя попытка передачи пакета расположена не далее, чем D^{QoS} от времени поступления пакета в очередь. Таким образом, для выполнения требований QoS на данном шаге передачи необходимо установить такое число резервирований (число попыток передачи пакета), при котором будет выполнено ограничение на долю потерянных пакетов. Как уже отмечалось выше, попытки передачи пакетов в зарезервированных интервалах могут быть неудачными из-за помех, вызванных случайным шумом и интерференцией со стороны других станций. Так как интенсивность передач других станций сети может изменяться со временем, то интенсивность помех в интервалах резервирований также может изменяться. В связи с этим для выполнения требований QoS необходимо настраивать число резервирований, используемых для передачи потока, с учетом возможных изменений интенсивности помех, а также корреляции ошибок, вызванной наложением во времени передач других станций на соседние интервалы резервирований.

Для решения данной задачи в разделе 4.2 предлагается метод управления резервированиями, к которому предъявляются следующие требования. 1) Должно выполняться ограничение на долю потерянных пакетов с некоторой *надежностью* α . Метод выполняет ограничение на долю потерянных пакетов с надежностью α , если для любого интервала времени фиксированной длительности, за который передается W пакетов, доля потерянных пакетов L/W

меньше заданного ограничения PLR^{QoS} с вероятностью большей, либо равной α , т.е. $\mathbb{P}\{L/W \leq PLR^{QoS}\} \geq \alpha$. 2) При условии выполнения ограничения на долю потерянных пакетов число используемых резервирований должно быть минимально. 3) Метод должен быть *стабилен*, т.е. частота установления резервирований FA должна быть много меньше порога $FA_0 = 1/t_{setup}$, где t_{setup} – характерное время оповещения передатчиком и приемником своих соседей об установлении нового резервирования.

Суть предлагаемого метода заключается в периодическом запуске процедуры, состоящей из трех шагов. На *первом шаге* предполагается, что свойства канала существенно не меняются за интервал времени между двумя последовательными запусками процедуры. На основании этого предположения и с учетом информации X об успешных и неудачных попытках передачи последних h пакетов в каждом резервировании из текущего множества резервирований R^{cur} (X – бинарная матрица размером $|R^{cur}| \times h$, где $|R|$ – размер множества R) строится функция $P_X(R)$, являющаяся оценкой вероятности успешной доставки пакета при использовании множества R резервирований. Данная функция определяется для любого множества R , которое можно получить из текущего множества R^{cur} только добавлением новых или только удалением некоторых из существующих резервирований. Для любого множества $R \subseteq R^{cur}$ вероятность $P_X(R)$ можно оценить как $P_X(R) = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^h \{1 - \prod_{i \in R} (1 - X_{i,j})\}$.

Для предсказания качества новых резервирований (т.е. для случая $R \supset R^{cur}$) используются следующие предположения. 1) Вероятность возникновения ошибки при передаче пакета в интервале резервирования i зависит только от того, возникла ли ошибка при передаче этого пакета в соседнем интервале резервирования ($i - 1$), причем вероятность возникновения ошибки в интервале резервирования i при условии, что возникла ошибка в интервале резервирования ($i - 1$), определяется формулой $\pi_{i,i-1} = q_i + (1 - q_i)e^{-\lambda \rho_{i,i-1}}$, где q_i – безусловная вероятность ошибки при передаче в интервале резервирования i , а $\rho_{i,i-1}$ – расстояние между резервированиями i и $i - 1$ (т.е. промежуток времени между началами двух соответствующих интервалов резервирований). 2) Вероятность q_i ошибки при передаче в новых резервированиях (т.е. для $i \notin R^{cur}$) равна средней вероятности для уже установленных резервирований. Используя информацию X , оцениваются вероятности q_i и $\pi_{i,i-1}$ для всех резервирований из множества R^{cur} , и с помощью метода наименьших квадратов находится оценка параметра λ . Далее, используя введенные выше предположения, оцениваются вероятности $\pi_{i,i-1}$ для тех пар резервирований $(i, i - 1)$, для которых резервирования i или $i - 1$ не принадлежат множеству R^{cur} , и находится искомая оценка вероятности $P_X(R) = 1 - q_1 \prod_{i=2}^{|R|} \pi_{i,i-1}$.

На *втором шаге* процедуры с помощью построенной функции $P_X(R)$ определяется минимальное множество R^* резервирований, для которого бу-

дет выполнено ограничение на долю доставленных пакетов с надежностью α :

$$F_{W,P_X(R)}(\lfloor W \cdot PLR^{QoS} \rfloor) \geq \alpha, \text{ где } F_{W,P_X(R)}(k) = \sum_{i=0}^k \frac{W!}{(W-i)!i!} (1-P_X(R))^i P_X(R)^{W-i}$$

– функция распределения *неудач* в W испытаниях Бернулли с вероятностью успеха $P_X(R)$, $\lfloor \cdot \rfloor$ – округление снизу.

Чтобы повысить стабильность метода, на *третьем шаге* новое множество R^{new} резервирований формируется с учетом истории решений, полученных за l последних запусков процедуры, т.е. с учетом множеств R_s^* , R_{s-1}^* , \dots , R_{s-l+1}^* , где s – порядковый номер текущего запуска процедуры.

Если в результате выполнения процедуры не были установлены новые резервирования, то в следующий раз процедура запускается после того, как будет передано τ пакетов. Если были установлены новые резервирования, то процедура запускается через $\tau' = \lceil \frac{t_{setup}}{T} \rceil + h$ пакетов, так как необходимо время t_{setup} для их установления и время для получения информации об успехах/неудачах в новых резервированиях.

Для анализа области применимости и настройки параметров метода в диссертации рассматривается синтетический сценарий, в котором интенсивность помех скачкообразно меняется в конце каждого интервала времени T_{change} , т.е. $1/T_{change}$ – характерная частота изменений условий в канале. В результате экспериментов были найдены диапазоны значений параметров τ , h и l , которые при любых значениях $T_{change} > T_{change}^0$ позволяют удовлетворить заданным ограничениям PLR^{QoS} , α и FA_0 при используемом числе резервирований, близком к минимальному. $1/T_{change}^0$ – это характерная частота изменений условий в канале, выше которой метод не позволяет удовлетворить заданным ограничениям при любых значениях τ , h и l . Показано, что T_{change}^0 – величина порядка $\bar{h}/(1-\alpha)$, где \bar{h} – среднее значение из полученного диапазона значений параметра h . Сделанные выводы подтверждены с помощью имитационного моделирования применения метода управления резервированиями в реальном сценарии сети с решетчатой топологией, в котором передачи в интервалах резервирований подвержены интерференции со стороны других станций сети.

В разделе 4.3 метод управления резервированиями расширяется на случай, когда станции могут устанавливать резервирования двух типов: с одношаговым или двухшаговым методом защиты. Для этого любое множество резервирований представляется как объединение $R = R_{oh} \cup R_{th}$ двух подмножеств, каждое из которых содержит резервирования одного типа. Предполагается, что ошибки при передаче в интервалах резервирований разных типов возникают независимо, поэтому $P_X(R) = 1 - (1 - P_X(R_{oh}))(1 - P_X(R_{th}))$. Кроме того, резервированиям разных типов приписывается разная стоимость, чтобы учесть разницу в числе станций, блокируемых при установлении резервирований. Стоимость множества резервирований $C(R) = |R_{oh}| + c_{th}|R_{th}|$,

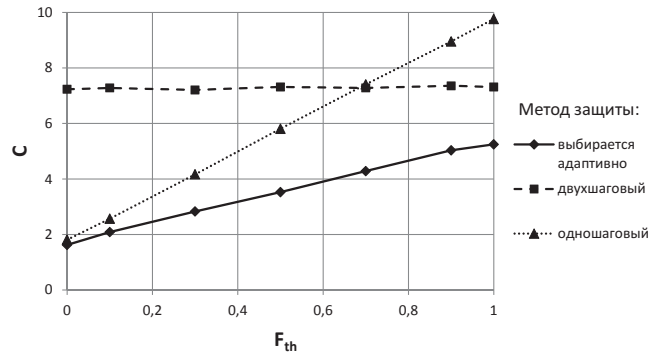


Рис. 2. Средняя стоимость C множества резервирований в зависимости от доли времени F_{th} , когда передают двухшаговые соседи; $c_{th} = 4$

где c_{th} – отношение числа станций, находящихся в двухшаговой окрестности от владельца и адресата резервирований, к числу станций в одношаговой окрестности. Таким образом, на втором шаге процедуры находится множество резервирований, которое минимизирует функцию стоимости $C(R)$. На рис. 2 представлены результаты эксперимента, в котором передачи в интервалах резервирований подвержены интерференции, вызванной передачами двухшаговых соседей. Данные результаты показывают, что адаптивный выбор метода защиты для устанавливаемых резервирований позволяет существенно уменьшить объем блокируемых канальных ресурсов по сравнению со случаями использования только одношагового или только двухшагового метода защиты при выполнении требований QoS.

Основные результаты четвертой главы опубликованы в [2, 4, 11].

В пятой главе анализируется взаимодействие МСД и МДД.

В разделе 5.1 рассматриваются различные способы организации взаимодействия двух механизмов. Согласно стандарту станции, использующие для передачи данных МСД, не могут начинать передачу, если планируемая передача пересекает во времени интервал резервирования соседней станции. Однако стандарт не регламентирует, что должна делать станция (например, станция А), которая отсчитала слоты отсрочки, но не может начать передачу по причине, описанной выше. Для восполнения данного пробела в диссертации предлагаются и сравниваются два способа отсчета слотов отсрочки. Согласно *способу 1* станция А выбирает новое значение счетчика отсрочки при том же значении конкурентного окна и «замораживает» отсчет до окончания интервала резервирования. Согласно *способу 2*, если станция А не может начать передачу, то она выбирает новое значение счетчика отсрочки и продолжает отсчет.

В разделе 5.2 разрабатывается аналитическая модель взаимодействия МСД и МДД, которая позволяет оценить пропускную способность станции, использующей МСД, при условии, что часть ресурсов канала зарезервирована с помощью МДД, а также сравнить эффективность двух предложенных

способов. Рассматриваются два соединения: $A \rightarrow B$ и $C \rightarrow D$. Станция A для передачи данных устанавливает резервирование с периодом T и длительностью D_M каждого интервала. Станция C , работая в режиме насыщения, передает пакеты фиксированного размера L с помощью только МСД, причем время, необходимое для передачи одного пакета и подтверждения, равно T_{tr} . Ввиду отсутствия других станций, использующих МСД, значение конкурентного окна на станции C постоянно и равно CW_{min} . Обозначим $W = CW_{min} + 1$.

Для нахождения пропускной способности S станции C рассматривается один период резервирования T ; тогда $S = LK/T$, где K – среднее число передач станции C за один период. Передача станции C рассматривается как марковский процесс, состояние которого описывается числом слотов i , которые станция C должна отсчитать после окончания интервала резервирования. Чтобы найти значение K определяются вероятности $p_{jk|i}$ того, что система перешла из состояния i в состояние j и при этом было передано ровно k пакетов. Для нахождения данных вероятностей для каждого из способов отсчета слотов отсрочки рассматриваются различные случаи $h = \{1, 2, 3\}$, которые отличаются между собой тем, в какой момент времени закончилась последняя передача станции C в рассматриваемом периоде, и определяются вероятности $p_{jk|i}^{(h)}$ для каждого случая h . Случай 1 возникает, когда после последней передачи станции C прошел цикл отсрочки (цикл отсрочки – интервал времени между началом и окончанием отсчета слотов отсрочки, содержащий случайное число слотов от 0 до $W - 1$), но станция C не может начать передачу, так как передача пересечет интервал резервирования (см.рис.1 – «запрет передачи»); случай 2 – когда от окончания последней передачи до интервала резервирования остался интервал времени, меньший $AIFS$; случай 3 – когда отсчет слотов отсрочки был прерван интервалом резервирования. В частности, для способа 1 вероятность $p_{jk|i}^{(1)}$ вычисляется по формуле

$$p_{jk|i}^{(1)} = \frac{1}{W} \sum_{l=0}^{l_1} s(k, l) 1\{R_1(l, i, k)\}, \quad (1)$$

где $s(k, l) = \frac{1}{W^k} \sum_{v=0}^{\lceil l/W \rceil} (-1)^{v+l+Wv} \binom{k}{v} \binom{-k}{l-Wv}$ – вероятность того, что за k циклов отсрочки был отсчитано ровно l слотов, l_1 – максимальное число слотов отсрочки, которое может быть отсчитано за k циклов отсрочки, а условие $R_1(l, i, k)$ проверяет, что при заданных l, i и k имеет место случай 1. В формуле для нахождения $s(k, l)$ используется доопределение отрицательных биномиальных коэффициентов $\binom{k}{v} = \frac{k(k-1)\dots(k-v+1)}{v!}$ (при $v > 0$) согласно Феллеру.

В отличие от способа 1 при использовании способа 2 от момента времени окончания отсчета цикла отсрочки, следующего за последней передачей станции C , до начала интервала резервирования может быть отсчитано неограниченное число циклов отсрочки, содержащих в сумме d_2 слотов. Поэтому

вероятность $p_{jk|i}^{(1)}$ для способа 2 приобретает другой вид

$$p_{jk|i}^{(1)} = \frac{1}{W} \sum_{l=0}^{l_1} s(k, l) 1\{R_1(l, i, k)\} \sum_{b=0}^{b'} \sum_{n_2=0}^{\infty} s(n_2, d_2(l, b, k, i)),$$

где b – число слотов, которые отсчитаны в последнем цикле отсрочки, прерванном интервалом резервирования. Для нахождения суммы внутреннего ряда данной формулы в диссертации с применением аппарата производящих функций доказывается следующее утверждение.

Утверждение 1. Пусть $s(n, j)$ – вероятность того, что сумма n случайных независимых целочисленных величин, равномерно распределённых на интервале $[0, W - 1]$, равна j . Тогда ряд $u_j = \sum_{n=0}^{\infty} s(n, j)$ сходится и равен:

$$u_j = \begin{cases} \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{j}{W} \rfloor} r(m, j - Wm + m) - \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{j-1}{W} \rfloor} r(m, j - 1 - Wm + m), & j > 0, \\ \frac{W}{W-1}, & j = 0, \end{cases}$$

где $r(m, g) = \frac{W}{W-1} \left(\frac{1}{W-1} \right)^g (-1)^m C_g^m W^{g-m}$.

В диссертации получены формулы для $p_{jk|i}^{(h)}$ в остальных случаях $h = \{2, 3\}$, аналогичные (1) и справедливые для обоих способов. Далее находятся вероятности перехода из состояния i в состояние j : $p_{j|i} = \sum_h \sum_k p_{jk|i}^{(h)}$ и стационарные вероятности α_i состояний i , позволяющие получить среднее число пакетов, переданных за один период резервирования $K = \sum_i \alpha_i \sum_{k,j} k p_{jk|i}$.

В разделе 5.3 приводится сравнение численных результатов, полученных с помощью имитационной и аналитической моделей, которое показывает высокую точность последней. С помощью аналитической модели сравнивается эффективность двух предложенных способов отсчета слотов отсрочки и показывается, что оба способа обладают одинаковой эффективностью (дают одинаковые пропускные способности) в широком диапазоне сценариев. Кроме того, с помощью имитационного моделирования данный вывод подтвержден для случая, когда в сети одновременно работают несколько станций, использующих МСД. Также аналитическая модель используется для сравнения различных способов размещения интервалов резервирования при фиксированной доле ресурсов $MAF = D_M/T$, выделенных под МДД. Результаты показывают, что группировка интервалов резервирования (увеличение D_M) позволяет существенно увеличить пропускную способность станций, использующих МСД. Данный результат также позволяет сделать вывод, что использование величины $MAFLimit$, введенной в стандарте для ограничения

доли ресурсов, выделенных под МДД, не гарантирует какой-либо минимальной пропускной способности для станций, использующих МСД, и требуется разработка другого механизма, обеспечивающие такие гарантии.

Результаты пятой главы опубликованы в [3, 10, 12].

В Заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты

В данной диссертации проведен анализ эффективности механизма гибридного доступа к каналу в многошаговых беспроводных сетях и разработаны методы, повышающие надежность передачи данных и обеспечивающие выполнение требований к качеству обслуживания в сетях с гибридным доступом. В частности:

1. Проведена классификация возможных случаев интерференции для двух прямых соединений станций сети Wi-Fi Mesh, использующих механизм случайного доступа. Среди них выявлены случаи интерференции, которые приводят к существенно неравномерному распределению пропускной способности канала между соединениями, и получена оценка вероятности возникновения таких случаев.
2. Разработаны новые методы защиты резервирований канала, устанавливаемых с помощью механизма детерминированного доступа, от интерференции, вызванной передачами других станций сети, позволяющие существенно увеличить вероятность успешной доставки данных в интервалах резервирований. Разработанные методы были представлены на заседаниях комитета IEEE 802 LMSC по стандартам локальных и городских сетей.
3. Предложено улучшение процедуры резервирования канала для случая передачи данных без использования подтверждений, позволяющее более чем на треть увеличить максимально возможное число установленных в сети резервирований.
4. Разработан метод управления резервированиями, обеспечивающий выполнение требований к качеству обслуживания при передаче потоковых данных в условиях переменной интенсивности помех и коррелированных сбоев и использующий для этого минимальный объем канальных ресурсов.
5. Разработана аналитическая модель сети с гибридным доступом, позволяющая оценить пропускную способность станции, использующей механизм случайного доступа, в зависимости от того, какая часть ресурсов канала зарезервирована другими станциями сети с помощью механизма детерминированного доступа.

Список публикаций

1. A. Krasilov. Physical Model Based Interference Classification and Analysis // Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6235. 2010. Pp. 1–2.
2. А.Н. Красилов, А.И. Ляхов, Д.М. Островский, Е.М. Хоров. Метод динамического резервирования канальных ресурсов при передаче мультимедийных потоков в сетях Wi-Fi Mesh // Автоматика и телемеханика. 2013. № 9. С. 34–52.
3. А.Н. Красилов, А.И. Ляхов, Ю.И. Мороз. Аналитическая модель взаимодействия механизмов случайного и детерминированного доступа к каналу в сетях Wi-Fi Mesh // Автоматика и телемеханика. 2013. № 10. С. 119–136.
4. E. Khorov, A. Krasilov, A. Lyakhov, D. Ostrovsky. Dynamic Resource Allocation for МССА-Based Streaming in Wi-Fi Mesh Networks // Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8072. 2013. Pp. 93–111.
5. A. Krasilov, A. Lyakhov, A. Safonov. Interference, even with МССА channel access method in IEEE 802.11s mesh networks // Proc. 8th IEEE Int. Conf. on Mobile Adhoc and Sensor Systems. 2011. Pp. 752–757.
6. P. Gallo, A. Krasilov, A. Lyakhov, et.al. Breaking layer 2: A new architecture for programmable wireless interfaces // Proc. Int. Conf. ICT Convergence (ICTC). 2012. Pp. 342–347.
7. E. Khorov, A. Krasilov, A. Safonov, et.al. Making IEEE 802.11 Wireless Access Programmable // Proc. Future Network and Mobile Summit. 2013.
8. А.Н. Красилов. Физическая модель интерференции прямых соединений: классификация и анализ возможных случаев // Тр. конф. «Информационные технологии и системы». 2009. С. 15–22.
9. А.Н. Красилов, А.И. Ляхов. Использование МССА для предоставления QoS в сетях IEEE 802.11s // Тр. конф. «Информационные технологии и системы». 2011. С. 282–293.
10. А.Н. Красилов, А.И. Ляхов, Ю.И. Мороз. Анализ взаимодействия механизмов EDCA и МССА в сетях IEEE 802.11s // Тр. конф. «Информационные технологии и системы». 2011. С. 294–301.
11. А.Н. Красилов, Е.А. Швец. Анализ методов передачи потоковых данных с использованием МССА // Тр. конф. «Информационные технологии и системы». 2012.
12. А.Н. Красилов, А.И. Ляхов, Ю.И. Мороз. Аналитическая модель взаимодействия механизмов EDCA и МССА в сетях 802.11s // Тр. конф. «Информационные технологии и системы». 2012.

Подписано в печать: 22.10.2013

Заказ № 8946 Тираж - 100 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru