

Анисимов Дмитрий Владимирович

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ
КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СТАНДАРТА
IEEE 802.11, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В СОСТАВЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
СИСТЕМ**

Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего образования "Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации" (Академия ФСО России, г. Орёл).

Научный руководитель: **Дмитриев Сергей Владимирович**,
кандидат технических наук, сотрудник Академии
ФСО России.

Официальные оппоненты: **Савинков Андрей Юрьевич**,
доктор технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования "Воронежский
государственный технический университет"
(ФГБОУ ВО "ВГТУ"), профессор кафедры систем
информационной безопасности.

Султанов Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, Акционерное общество "Московский
ордена Трудового Красного Знамени научно-
исследовательский радиотехнический институт"
(АО "МНИРТИ"), начальник Группы системных
исследований.

Ведущая организация: Акционерное общество "Концерн "Созвездие"
(г. Воронеж)

Защита состоится "28" февраля 2017 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Московский технический университет связи и информатики" по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, МТУСИ, аудитория А-448 (малый зал заседаний ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ <http://srd-mtuci.ru/index.php/ru/council>.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 219.001.04
кандидат технических наук, доцент

Терешонок Максим Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время беспроводные сетевые технологии заняли прочное место в нашей жизни. Они широко используются в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве, военной сфере не только как самостоятельные системы связи, но и в качестве сегментов различного рода распределенных систем управления (PCY). Наиболее широкое распространение получили технологии стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi, Wireless Fidelity). Несмотря на большое разнообразие расширений (протоколов) данного стандарта, их канальный уровень един, а следовательно, от эффективности его функционирования во многом зависит и производительность беспроводных сетей в целом. Именно на MAC-уровне устанавливаются правила совместного использования среды передачи данных одновременно несколькими станциями (элементами) беспроводной сети.

Несмотря на достаточно продолжительное время, прошедшее с момента разработки стандарта IEEE 802.11, научный интерес к нему не ослабевает и по настоящее время, что подтверждается большим количеством научных работ, посвященных аналитическому моделированию беспроводных сетей и оценке их производительности в различных условиях. К сожалению, особенности функционирования беспроводных сетей при оценке их производительности до сих пор учтены недостаточно полно. Так, полученные результаты оказываются неприменимыми в условиях "нормальной" нагрузки (ненасыщенное состояние сети), когда буферы станций сети периодически оказываются пустыми, а также в условиях помех и искажений передаваемых пакетов. Кроме того, изменение настраиваемых параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11 по-разному влияет на его производительность, что требует наличия алгоритмов их оптимизации, а бистабильность протокола предполагает разработку механизмов предотвращения перегрузок в сети. Таким образом, исследование моделей функционирования сетей стандарта IEEE 802.11, учитывающих произвольный режим нагрузки в сети (насыщенное и ненасыщенное состояния), влияние помех и получение на их основе конкретных алгоритмов управления параметрами канального уровня, обеспечивающих повышение пропускной способности сети, является весьма актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Вопросам, касающимся моделирования, оценки производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 и повышения эффективности их функционирования, посвящено большое количество научных работ, среди которых следует особо отметить труды российских и зарубежных ученых: В.М. Вишневого, А.И. Ляхова, С.Л. Портного, С.Н. Степанова, М.С. Немировского, Ю.С. Шинакова, О.И. Шелухина, П.П. Бочарова, В.Б. Крейнделина, А.Ю. Савинкова, G. Bianchi, F. Cali, E. Ziouva, K. Szczypiorski, P. Chatzimisios, R. Oliveira, P. Raptis, A. Zanella, Chuan Heng Fox, K. Ghaboosi и др. Среди этих исследований большинство посвящено анализу производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 для условий максимальной нагрузки (насыщенное состояние сети) и предполагаемой идеальности характеристик канала связи (отсутствие шумов, помех и других мешающих радиосигналов в сети),

другая часть работ частично учитывает данные факторы, но результаты, как правило, носят локальный по областям и условиям применения характер, обладают как определенными достоинствами, так и недостатками. Анализ этих и других опубликованных результатов показывает актуальное направление исследований по дальнейшему развитию существующих методов моделирования и оценки производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 с целью объединения их достоинств и исключения присущих им недостатков. Разработка и анализ новых моделей и алгоритмов, учитывающих особенности реальных условий функционирования беспроводных сетей, позволит более точно оценивать показатели их производительности как при проектировании новых, так и при модернизации существующих сетей связи.

Цель диссертационной работы состоит в повышении пропускной способности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11, функционирующих в составе распределенных систем при произвольном режиме нагрузки (ненасыщенное и насыщенное состояния) и наличии помех в радиоканале, за счет управления параметрами канального уровня.

Задачи диссертационной работы, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Провести аналитическое моделирование процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне с учетом степени загрузки станций и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех.

2. Разработать комплекс алгоритмов по настройке параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 и управлению доступом к среде передачи данных, обеспечивающих повышение пропускной способности сети и ее стабилизацию на максимальных значениях в режиме высокой нагрузки.

3. Провести имитационное компьютерное моделирование беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии и оценить ее производительность.

Методы исследования. Для достижения цели исследования использовались методы теории вероятностей, математической статистики, телетрафика, системного анализа, методы нелинейного целочисленного программирования и имитационного моделирования.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в следующем:

1. В разработке математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, базирующейся на математическом аппарате цепей Маркова и отличающейся от известных учетом состояния загрузки станций сети и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех.

2. В разработке алгоритма настройки параметров канального уровня (за счет поиска их оптимальных значений) беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, обеспечивающего повышение пропускной способности сети и отличающегося от известных:

- учетом при оптимизации нескольких параметров протокола (минимальный размер окна конкуренции, количество попыток передачи пакета);

- обеспечением поиска как оптимальных (по критерию максимума пропускной способности сети), так и рациональных (при наличии ограничений на максимальный размер окна конкуренции и относительный прирост пропускной способности сети) значений параметров стандарта, обеспечивающих повышение пропускной способности сети.

3. В разработке модифицированного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающего стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях в режиме высокой нагрузки и отличающегося от известных:

- учетом остаточной пропускной способности канала с дальнейшим формированием решающего правила о допуске в канал нового информационного потока (или отказе в обслуживании);

- учетом требований к качеству обслуживания передаваемого трафика (QoS) по показателю пропускной способности;

- формированием дополнительных этапов повторной передачи для трафика, требовательного к надежности передачи.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в построении и исследовании модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне, позволяющей оценить основные показатели производительности сети с учетом уровня загруженности ее станций и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех.

Практическая значимость работы заключается:

- в доведении полученных результатов до реализуемого алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, что позволяет использовать его при разработке программного обеспечения для телекоммуникационного оборудования (точек доступа, сетевых элементов) данного стандарта;

- реализации теоретических положений, разработанной методики и алгоритма в проектной деятельности ООО "НТЦ Космос-Нефть-Газ" (г. Воронеж) и ООО "Специальный технологический центр" (г. Санкт-Петербург). Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами;

- применении разработанной модели и алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 при реализации программного средства управления ресурсами в среде корпоративного портала (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Предложенная математическая модель процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне позволяет оценить основные показатели производительности сети с учетом уровня загруженности ее станций и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех.

2. Разработанный алгоритм настройки параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 обеспечивает повышение пропускной способности сети. В зависимости от условий функционирования сети (трафиковая нагрузка, конфигурация сети, помеховая обстановка) выигрыш (по показателю пропускной способности) от применения алгоритма может достигать до 30 % для

базового механизма доступа и до 12 % для RTS/CTS механизма доступа в сравнении с показателями, полученными для значений параметров канального уровня, рекомендованных стандартом IEEE 802.11.

3. Предложенная методика оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала стандарта IEEE 802.11 позволяет рассчитать его пропускную способность в насыщенном и ненасыщенном состояниях и обеспечивает формирование решающего правила (критерия) по допуску в канал нового информационного потока (с целью исключения перегрузки канала).

4. Разработанный модифицированный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, в отличие от известных, учитывает состояние загруженности станций сети и обеспечивает стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях в режиме высокой нагрузки. Алгоритм рекомендуется использовать как при проектировании новых, так и при модернизации (повышении эффективности функционирования) уже существующих систем беспроводного доступа.

Степень достоверности и апробация результатов. Полученные теоретические результаты обоснованы корректным применением методов теории вероятностей, математической статистики, телетрафика, системного анализа и подтверждены численными результатами имитационного компьютерного моделирования. Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации подтверждается апробацией ее основных результатов, которые докладывались и обсуждались на Международной научно-технической интернет-конференции "Информационные системы и технологии" (ГУ-УНПК, г. Орёл, 2013); XI Международной научно-практической интернет-конференции "Энерго- и ресурсосбережение XXI век" (ГУ-УНПК, г. Орёл, 2013); VIII Всероссийской межведомственной научной конференции "Актуальные проблемы развития технологических систем государственной охраны, специальной связи и специального информационного обеспечения" (Академия ФСО России, г. Орёл, 2013); V Международной научной конференции "Фундаментальные проблемы системной безопасности и устойчивости" (ЕГУ, г. Елец, 2014). По теме диссертационного исследования опубликовано 13 печатных работ, из них 9 в рецензируемых периодических изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России. Основные результаты по теме диссертации получены автором лично.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 144 наименований и двух приложений. Объем диссертации составляет 181 страницу текста. Диссертация содержит 50 рисунков, 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, обозначена цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна и практическая значимость достигнутых результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ основных существующих распределенных систем управления (PCY). Показано, что PCY являются неотъемлемой частью всех крупных, территориально-разнесенных предприятий. Классическим примером использования таких систем являются газо (нефти) – транспортные предприятия (ГТП), в которых они реализуют подсистемы сигнализации, сбора информации, диспетчерского управления и информационного обмена. Анализ применимости беспроводных технологий передачи данных в составе PCY ГТП показал, что наибольшее распространение в данных системах получил стандарт IEEE 802.11. Исследованы существующие механизмы доступа к беспроводному каналу стандарта IEEE 802.11, выявлены их особенности, достоинства и недостатки. Основным механизмом доступа к среде передачи данных в сетях данного стандарта является функция распределенного управления DCF, в основе которой лежит протокол множественного случайного доступа с контролем несущей и разрешением коллизий – CSMA/CA. В режиме DCF стандартом IEEE 802.11 предусматриваются два механизма доступа: базовый и RTS/CTS. Ключевой особенностью алгоритма DCF является механизм случайного определения времени отсрочки передачи пакетов, основанный на схеме двоичной экспоненциальной задержки. Проведенный анализ основных существующих аналитических методов оценки производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне, в различных условиях их функционирования, показал, что, несмотря на широкий спектр научных работ (разнообразие аналитических моделей и подходов), особенности функционирования беспроводных сетей при оценке их производительности до сих пор учтены недостаточно полно. Так, в большинстве научных работ, посвященных исследованиям данного вопроса, делается предположение о том, что станции сети находятся в состоянии насыщения (в буферах станций всегда имеются пакеты готовые к передаче). Однако на практике такое предположение оказывается невыполнимым и в большинстве беспроводных сетей, функционирующих в составе PCY (например ГТП), преобладающим является ненасыщенный режим работы, который характеризуется ситуацией, когда буферы станций сети периодически оказываются пустыми.

Кроме того, большинство известных результатов получены в предположении об идеальности канала, то есть об отсутствии помех. Однако пренебрежение помехами, как правило, приводит к существенному завышению оценок пропускной способности, так как в реальных условиях функционирования беспроводных сетей электромагнитные помехи являются неизбежным фактором, ухудшающим пропускную способность сети из-за искажения пакетов. По результатам проведенного анализа осуществляется постановкой задачи исследования.

Во второй главе разработана математическая модель процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, базирующаяся на аппарате цепей Маркова и учитывающая уровень загруженности элементов сети и возможное искажение передаваемых пакетов в результате воздействия помех. При разработке модели исследовалась беспроводная сеть, состоящая из n элементов. В качестве модели поведения станции стандарта IEEE 802.11 (с точки зрения процесса поступления пакетов и их обслуживания) была использована модель типа M/M/1, в

соответствии с которой вероятность пустой очереди q_k у элемента сети k может быть определена как

$$q_k = 1 - \lambda_k / \mu_k, \quad (1)$$

где λ_k и μ_k – интенсивность поступления и скорость обработки пакетов соответственно ($k = 1 \dots n$).

Предположим, что в канале могут присутствовать шумы и помехи, воздействие которых приводит к искажению передаваемых пакетов, что, в свою очередь, требует их повторной передачи. Вероятность повреждения пакета p_f длиной L_p байт в результате воздействия помехи может быть определена как

$$p_f = 1 - \exp\{-L_p \cdot BER\}, \quad (2)$$

где BER (Bit Error Rate) – вероятность битовой ошибки, характеризующая интенсивность воздействующих помех.

Тогда вероятность неудачной передачи пакета p_k k -й станцией сети определяется как

$$p_k = 1 - (1 - p_f)(1 - p_c) = p_f + p_c - p_f p_c, \quad (3)$$

где p_c – вероятность возникновения коллизии (одновременной передачи двумя и более станциями сети).

Модель процесса функционирования беспроводной сети при реализации механизма DCF была представлена в виде цепи Маркова (рисунок 1) с дискретным целочисленным временем, единицей которого является виртуальный слот – промежуток времени между последовательным изменением счетчика отсрочки у каждого элемента сети, не находящегося в состоянии простоя. Виртуальные слоты не однородны, и каждый из них может представлять собой "пустой", "успешный", "коллизийный" слот и "слот с ошибкой в кадре" (рисунок 2).

Цепь Маркова представляет собой двумерный случайный процесс, где $b(t)$ и $s(t)$ – процессы, описывающие состояние счетчика обратного отсчета и его уровень соответственно. Состояние k -го элемента сети описывается как $\{i, l\}$, где i – это этап задержки со значением в интервале $(0, 1, \dots, m + \Delta t)$, m – максимальное количество этапов (попыток) передачи пакета, Δt – дополнительные этапы передачи; l – счетчик времени задержки во временном интервале $(0, 1, \dots, W_i - 1)$, $W_i = 2^i W_0$ – длительность "окна конкуренции" на i -м этапе задержки. Состояние $\{-1, 0\}$ указывает, что очередь элемента сети пуста. При появлении пакета доступного для передачи, элемент сети переходит в одно из состояний в строке "0" с вероятностью $(1 - q_k)/W_0$, где W_0 – длительность минимального "окна конкуренции". В случае неудачной попытки передачи в состоянии $\{i, 0\}$ элемент сети переходит в одно из состояний в строке $i + 1$ с вероятностью p_k / W_{i+1} . В случае успешной передачи, элемент сети переходит в состояние $\{-1, 0\}$ с вероятностью $(1 - p_k)q_k$ (если очередь пуста) или к одному из состояний в строке "0" с вероятностью

стью $(1 - p_k)(1 - q_k)/W_0$ при условии, что буфер данного элемента сети содержит готовый пакет для следующей передачи. Когда элемент сети достигает строки m , время конкуренции увеличивается до максимального значения, при этом элемент сети пытается осуществить еще не более Δm повторных передач с максимальным, но фиксированным размером "окна конкуренции" W_m . Когда элемент сети достигает этапа $m + \Delta m$ и таймер задержки уменьшается до нуля, пакет либо успешно передается с вероятностью τ_k , или отбрасывается с вероятностью $P_{\text{отк}}$. При этом элемент сети возвращается в состояние $\{-1, 0\}$ с вероятностью q_k (если очередь пуста) или к одному из состояний в строке "0" (если в очереди есть готовый для передачи пакет). Для разработанной цепи Маркова определены все возможные одношаговые переходы между состояниями и соответствующие им вероятности.

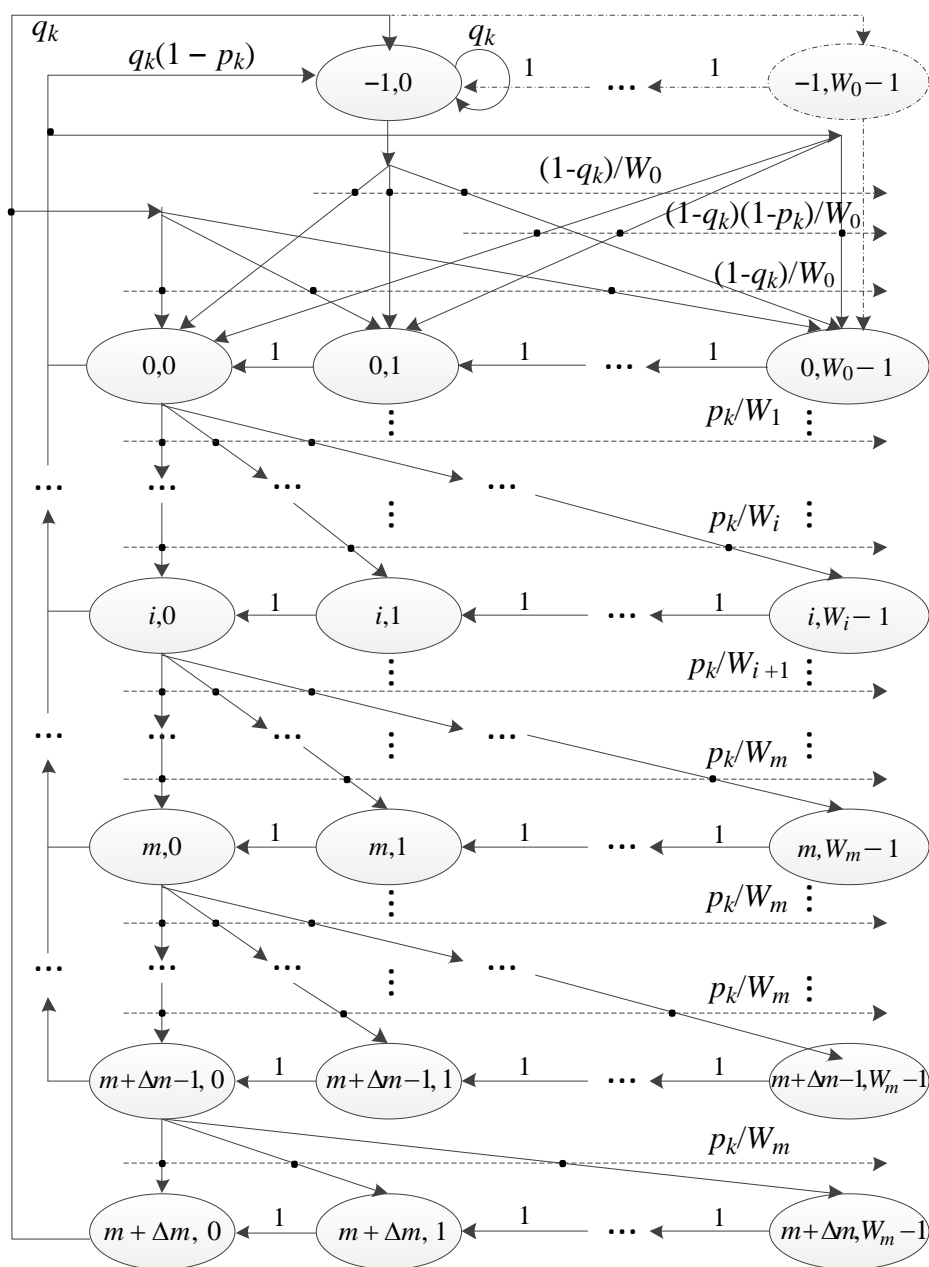
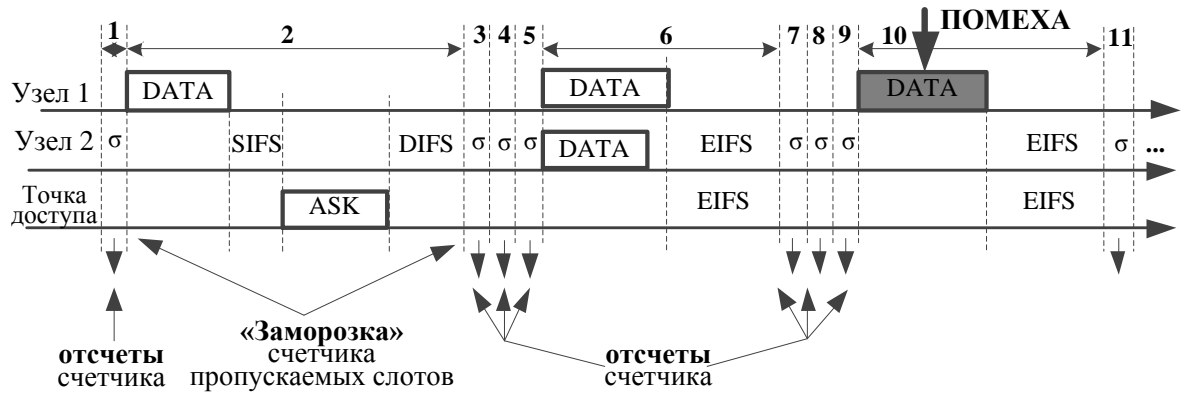


Рисунок 1 – Цепь Маркова, описывающая изменение состояний станции стандарта IEEE 802.11



Примечание.

- 1,3,4,5,7,8,9,11 – «пустой слот» отсрочки передачи длительностью σ , в котором ни одна из станций сети не осуществляет передачу и канал остается свободным;
 2 – «успешный слот» - только одна из станций сети осуществляет передачу;
 6 – «коллизийный слот» - одновременно передают несколько станций сети;
 10 – «слот с ошибкой в кадре» - пакет поврежден в результате воздействия помех

Рисунок 2 – Графическая интерпретация виртуальных слотов для базового механизма доступа стандарта IEEE 802.11

Обозначим через τ_k вероятность того, что элемент сети производит передачу данных в рассматриваемом временном интервале. Он передаст пакеты в том случае, когда его счетчик задержки уменьшится до нуля, т. е. будет находиться в состоянии $\{i, 0\}$. В соответствии с этим в работе показано, что вероятность передачи τ_k элементом сети k в рассматриваемом временном интервале определяется как

$$\tau_k = \frac{2(1 - p_k^{m+\Delta m+1})}{\frac{2q_k(1 - p_k)}{1 - q_k} + (1 - p_k^{m+\Delta m+1}) + W_0 \left[\frac{[1 - (2p_k)^{m+1}](1 - p_k)}{1 - 2p_k} + p_k(2p_k)^m(1 - p_k^{\Delta m}) \right]}. \quad (4)$$

На основании выражения (4) в работе определена вероятность возникновения коллизии p_{ck} для k -й станции сети ($k = 1 \dots n$):

$$p_{ck} = 1 - \prod_{i=1, i \neq k}^n (1 - \tau_i). \quad (5)$$

Рассмотрена вероятность P_{tr} того, что по крайней мере один элемент сети производит передачу в данном временном интервале:

$$P_{tr} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tau_i). \quad (6)$$

Определена вероятность успешной передачи P_s :

$$P_s = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i \prod_{j=1, j \neq i}^n (1 - \tau_j)}{P_{tr}}. \quad (7)$$

Далее были определены средние длительности всех типов виртуальных слотов для базового механизма доступа:

$$\begin{aligned} T_s &= T_{DIFS} + T_{wait} + T_{SIFS} + T_{data} + T_{ACK} + T_{\sigma}, \\ T_c = T_e &= T_{EIFS} + T_{wait} + T_{data} + T_{\sigma} \end{aligned} \quad (8)$$

и RTS/CTS механизма доступа:

$$\begin{aligned} T_s &= T_{DIFS} + T_{wait} + T_{RTS} + 3T_{SIFS} + T_{CTS} + T_{data} + T_{ACK} + T_{\sigma}, \\ T_c = T_e &= T_{EIFS} + T_{wait} + T_{RTS} + T_{\sigma}, \end{aligned} \quad (9)$$

где T_s , T_c , T_e – длительности "успешного", "коллизийного" и "ошибочного" слотов соответственно; T_{DIFS} , T_{EIFS} , T_{SIFS} – интервалы времени DIFS, EIFS, SIFS соответственно; $T_{wait} = MAC_{hdr} + PHY_{hdr}$ – интервал времени, отводимый на передачу заголовков кадров на MAC- и PHY-уровнях; T_{RTS} , T_{CTS} , T_{ACK} , T_{data} – время передачи кадров RTS, CTS, ACK и кадра данных соответственно; T_{σ} – длительность "пустого" слота (ни одна из станций не ведет передачу).

Нормированная пропускная способность канала в работе представлена в виде отношения средней полезной нагрузки передаваемой информации во временном интервале к средней длине этого временного интервала. Следовательно, ожидаемая пропускная способность сети в ненасыщенном состоянии может быть определена как

$$C_u = \frac{E[L_p](1 - \prod_{i=1}^n q_i)P_{tr}P_s}{(1 - P_{tr})T_{\sigma} + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c + P_{tr}P_s p_f T_e}, \quad (10)$$

где $E[L_p]$ – средняя длина пакета.

Одним из состояний, описываемых разработанной моделью, является насыщенное состояние сети, которое достигается при $q_k = 0$. На основе разработанной аналитической модели проведено исследование влияния параметров трафика, конфигурации беспроводной сети, интенсивности помех, длины пакета и параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11 (размер минимального "окна конкуренции" – W_0 , количество попыток повторных передач пакета – m) на показатели производительности беспроводной сети (рисунки 3–6).

В качестве основного показателя производительности сети выбрана ее пропускная способность. Исследования проводились для сети стандарта IEEE 802.11b (наиболее распространенный стандарт в существующих PCY ГТП), для условий идеального канала ($p_f = 0$) и канала с помехами ($p_f = 0,1$ – что примерно соответствует $BER = 5 \cdot 10^{-5}$ при $E[L_p] = 500$ байт), для базового и RTS/CTS механизмов доступа.

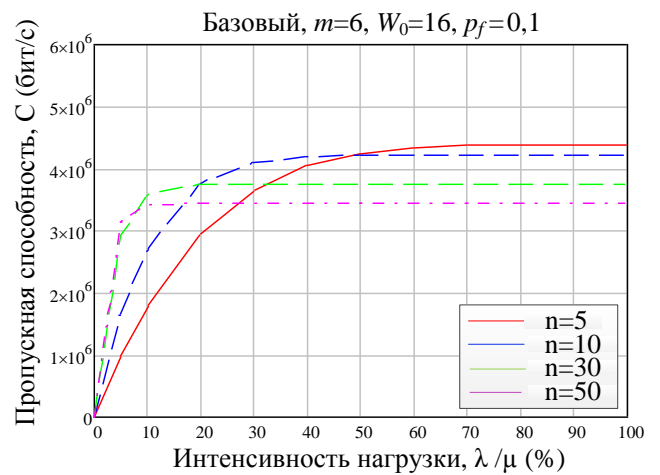
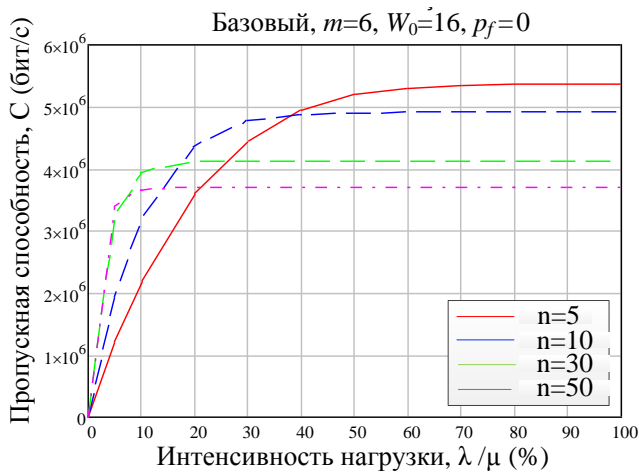


Рисунок 3 – Зависимость пропускной способности сети от интенсивности входной нагрузки для базового механизма доступа стандарта IEEE 802.11 в условиях идеального канала и канала с помехами

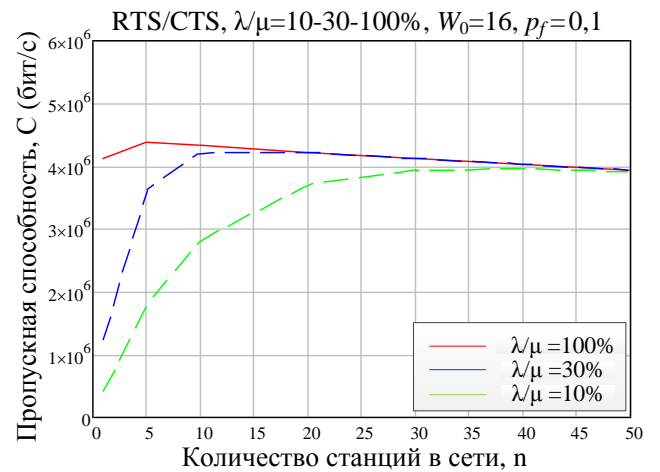
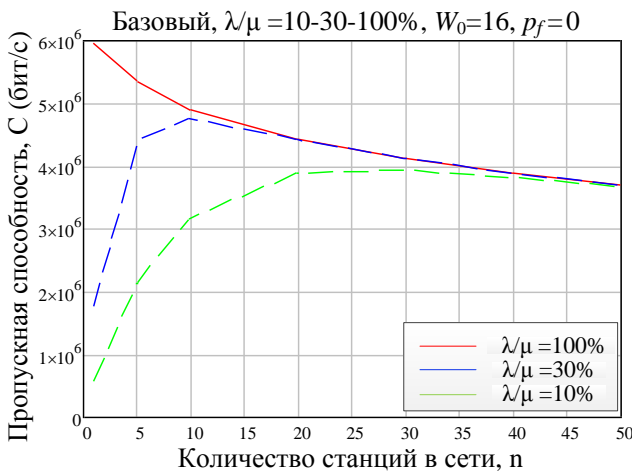


Рисунок 4 – Зависимость пропускной способности от количества станций в сети

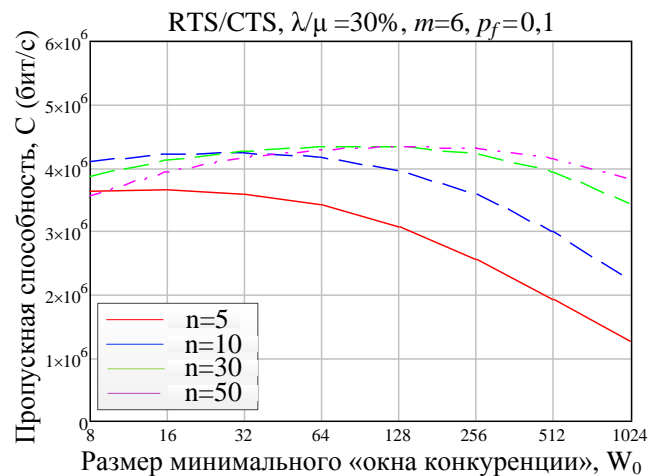
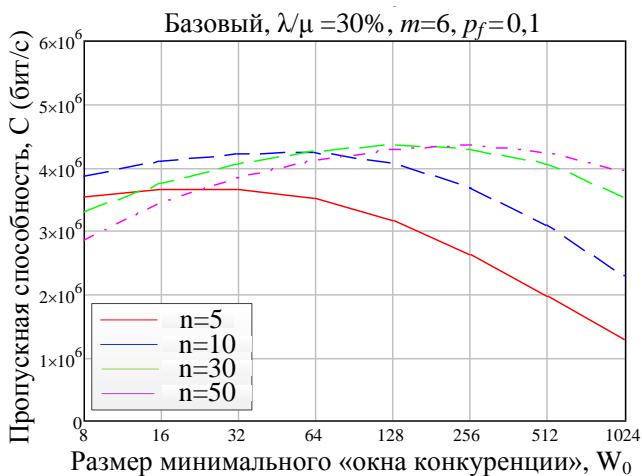


Рисунок 5 – Зависимость пропускной способности сети от размера минимального "окна конкуренции" W_0

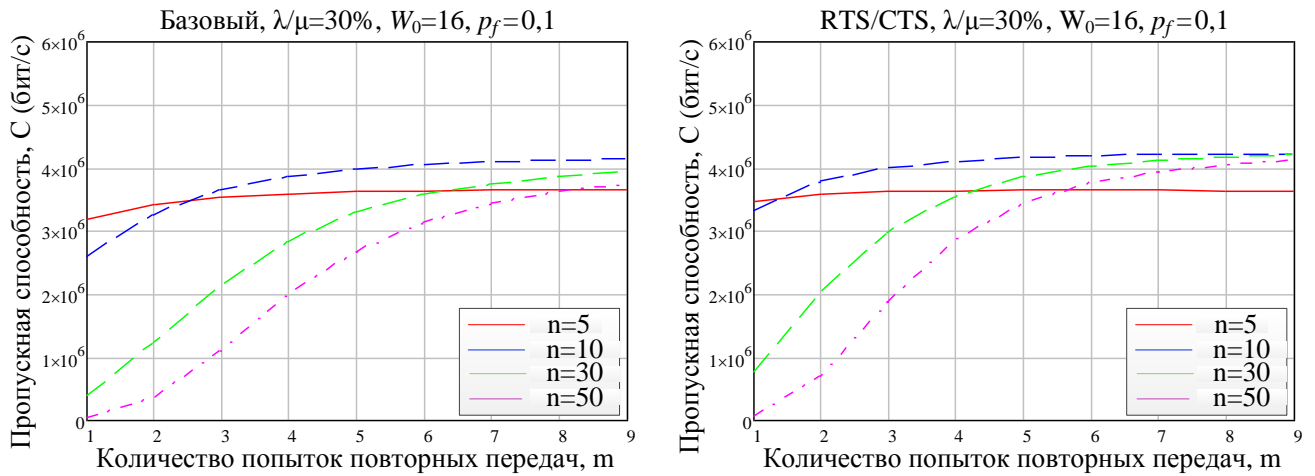


Рисунок 6 – Зависимость пропускной способности сети от количества попыток повторных передач пакета

Анализ полученных результатов показал, что поведение зависимостей пропускной способности от изменения параметров канального уровня (рисунки 5 и 6) имеет различный характер (немонотонный и монотонный соответственно), как для базового, так и для RTS/CTS механизмов доступа. Для заданной конфигурации сети имеются оптимальные значения W_0 и m , при которых обеспечивается максимальное значение пропускной способности. В связи с этим существует необходимость разработки механизма управления параметрами канального уровня стандарта IEEE 802.11. Целью управления является поиск таких значений W_0 и m (при фиксированных значениях n , λ/μ , p_f), при которых обеспечиваются максимальные значения пропускной способности сети.

В третьей главе осуществлена постановка задачи на разработку алгоритма настройки параметров канального уровня (за счет поиска их оптимальных значений) беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, обеспечивающего повышение ее пропускной способности. Для решения поставленной задачи проведено обоснование критерия, метода и параметров оптимизации, определена целевая функция, в качестве которой выступает максимум пропускной способности сети. Показано, что целевая функция является нелинейной гладкой унимодальной функцией без разрывов (рисунок 7), сложный, нелинейный характер зависимости которой не позволяет однозначно определить направление поиска ее максимума. В соответствии с этим сформулирована оптимизационная задача в следующем виде:

$$C = F\{W_0, m, n, \lambda, L_p, p_f\} \rightarrow \max_{m, W_0} \left| \begin{array}{l} n = const, \lambda = const < \infty, L_p = const, \\ p_f = const, W_{max} < \infty, m_{max} < \infty \end{array} \right. \quad (11)$$

для решения которой разработан алгоритм поиска оптимальных значений параметров W_0' и m' . В качестве оптимизатора предложено использовать дискретный аналог метода Гаусса–Зейделя.

С использованием разработанного алгоритма проведена оценка эффективности применения механизма настройки параметров W_0, m (таблица 1).

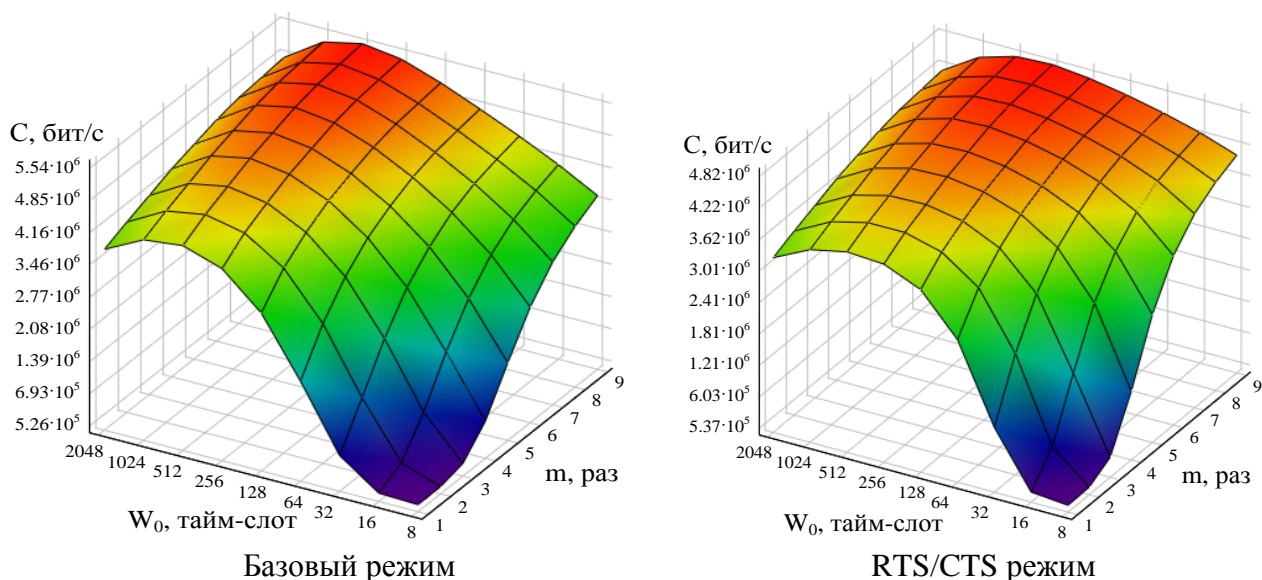


Рисунок 7 – Область значений целевой функции, в зависимости от параметров W_0 и m при фиксированных значениях $n = 50$, $\lambda/\mu = 30$, $p_f = 0$

Таблица 1 – Оценка эффективности оптимизации параметров канального уровня

n	W_0	m	C , Мбит/с	Оптимальное значение W_0'	Оптимальное значение m'	C'_{max} , Мбит/с	Δm	Выигрыш $\Delta C'$, Мбит/с	Выигрыш $\Delta C'$, %
Базовый механизм доступа, идеальный канал ($p_f = 0$)									
5	16	6	5,360	32	3	5,589	2	0,229	4,27
10	16	6	4,915	64	4	5,530	0	0,615	12,51
30	16	6	4,132	256	2*	5,539	0	1,407	34,05
50	16	6	3,700	512	1*	5,541	0	1,841	49,76
RTS/CTS механизм доступа, идеальный канал ($p_f = 0$)									
5	16	6	4,833	32	2	4,873	3	0,040	0,83
10	16	6	4,676	64	3	4,845	1	0,169	3,62
30	16	6	4,330	256	2*	4,815	0	0,485	11,2
50	16	6	4,103	256	2*	4,797	0	0,694	16,9
Базовый механизм доступа, при наличии помех в радиоканале ($p_f = 0$)									
5	16	6	4,383	16	3	4,383	3	0	0
10	16	6	4,183	32	4	4,517	1	0,334	7,98
30	16	6	3,744	128	3*	4,508	0	0,764	20,43
50	16	6	3,416	256	2*	4,484	0	1,068	31,27
RTS/CTS механизм доступа, при наличии помех в радиоканале ($p_f = 0$)									
5	16	6	4,375	16	2	4,375	4	0	0
10	16	6	4,326	32	3	4,467	2	0,12	2,77
30	16	6	4,090	64	4*	4,453	0	0,363	8,89
50	16	6	3,926	128	3*	4,406	0	0,48	12,23

* – значения являются оптимальными по критерию максимума пропускной способности сети, при выполнении условия (ограничения): $2^{m'} \cdot W_0' \leq W_{max}$; n – количество элементов сети; W_0 , m – параметры рекомендованные стандартом; C и C'_{max} – значение пропускной способности до и после оптимизации параметров W_0 , m соответственно; W_0' и m' – найденные оптимальные значения параметров, обеспечивающие повышение пропускной способности сети

В зависимости от условий функционирования сети выигрыш (по показателю пропускной способности) от применения алгоритма может достигать до 30 % для базового механизма доступа и до 12 % для RTS/CTS механизма доступа в сравнении с показателями, полученными для значений параметров канального уровня, рекомендованных стандартом IEEE 802.11. Таким образом, применение разработанного алгоритма оптимизации позволит повысить эффективность функционирования сетей стандарта IEEE 802.11 по показателю пропускной способности в условиях ограничений, принятых при его разработке.

В четвертой главе на основании проведенного анализа показано, что протоколу CSMA/CA свойственна бистабильность, которая заключается в спонтанном снижении производительности протокола при увеличении интенсивности входной нагрузки сверх некоторого порогового значения. Для подтверждения данного факта было проведено имитационное моделирование в симуляторе OpNet, которое подтвердило факт наличия порогового значения входной нагрузки, при превышении которого производительность сети стремительно уменьшается. Проведенный анализ также показал, что в существующих методах доступа DCF и PCF стандарта IEEE 802.11 отсутствуют какие-либо механизмы предотвращения перегрузок в сети. В связи с этим определена актуальность задачи по разработке алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных, обеспечивающего стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях при высокой нагрузке в сети. Для решения данной задачи разработана методика оценки остаточной пропускной способности канала, учитывающая состояние загруженности элементов сети (насыщенное и ненасыщенное) и формирующая решающее правило по допуску в канал нового информационного потока. Методика включает следующие основные этапы.

Этап 1. Вычисление вероятности коллизий P_{C_k} и вероятности передачи τ_k для каждого k -го элемента сети ($k = 1 \dots n$), производимое точкой доступа в процессе своей работы при изменении конфигурации сети. Вычисление осуществляется за счет решения системы нелинейных уравнений (1)–(5). Определение с помощью разработанного алгоритма параметров W_0' и m' , обеспечивающих повышение пропускной способности при текущей интенсивности нагрузки (вероятность пустой очереди $0 < q_k \leq 1$).

Этап 2. Вычисление ненасыщенной пропускной способности канала C_u при текущей интенсивности нагрузки ($0 < q_k \leq 1$) с помощью выражения (10).

Этап 3. Вычисление насыщенной пропускной способности канала C_s с помощью выражения (10), но при значении $q_k = 0$.

Этап 4. Определение остаточной пропускной способности канала ΔC в соответствии со следующим выражением: $\Delta C = |C_s - C_u|$.

Этап 5. Формирование решающего правила по допуску в канал нового информационного потока с требованием $C_{тр}$ при выполнении условия $C_{тр} < \Delta C$. В противном случае запрос отклоняется и производится переход к этапу 1.

С учетом данной методики разработан модифицированный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечи-

вающий стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях при высокой нагрузке в сети (рисунок 8). Основной функциональной задачей алгоритма является повышение эффективности использования сетевых ресурсов при выполнении требований QoS по пропускной способности для новых запросов и исключении перегрузки сети (стабилизации пропускной способности на максимальных значениях). Проведено исследование основных свойств разработанного алгоритма: пошаговость, детерминированность, точность, сходимость, вычислительная сложность, устойчивость. Подготовлены научно-технические предложения по практическому использованию разработанного алгоритма в радиооборудовании сетей стандарта IEEE 802.11, функционирующих в составе РСУ (на примере ГТП). В рамках данных предложений определены варианты аппаратных платформ для реализации данного алгоритма (при построении новых беспроводных систем) и проведены исследования по повышению производительности уже существующих беспроводных сетей стандарта 802.11b, функционирующих в составе ГТП, на примере магистральной газораспределительной станции.



В пятой главе для проверки работоспособности и оценки эффективности предлагаемых в диссертационной работе решений было проведено имитационное компьютерное моделирование, основные цели которого составили: верификация

разработанной математической модели, оценка эффективности применения разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 и получение количественных показателей производительности моделируемой беспроводной сети. Верификация математической модели была произведена путем сравнения полученных с ее помощью численных результатов с результатами имитационного моделирования беспроводной сети стандарта 802.11b в симуляторе OpNet. Сравнительный анализ результатов аналитического и имитационного моделирования показал, что их относительная погрешность для базового механизма доступа составила 8,06 %, а для механизма RTS/CTS составила 7,62 %, что позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели.

Для оценки эффективности применения синтезированного алгоритма была разработана компьютерная программа имитационного моделирования MAC-уровня стандарта IEEE 802.11 (с учетом процедур разработанного алгоритма). Компьютерное моделирование показало (рисунок 9), что если алгоритм не используется, то зависимость пропускной способности сети с увеличением интенсивности нагрузки весьма неустойчива как в базовом режиме, так и в режиме RTS/CTS. При использовании разработанного алгоритма наблюдается стабилизация пропускной способности на уровне значений, близких к максимальным, а также наблюдается снижение времени задержки пакетов на MAC-уровне.

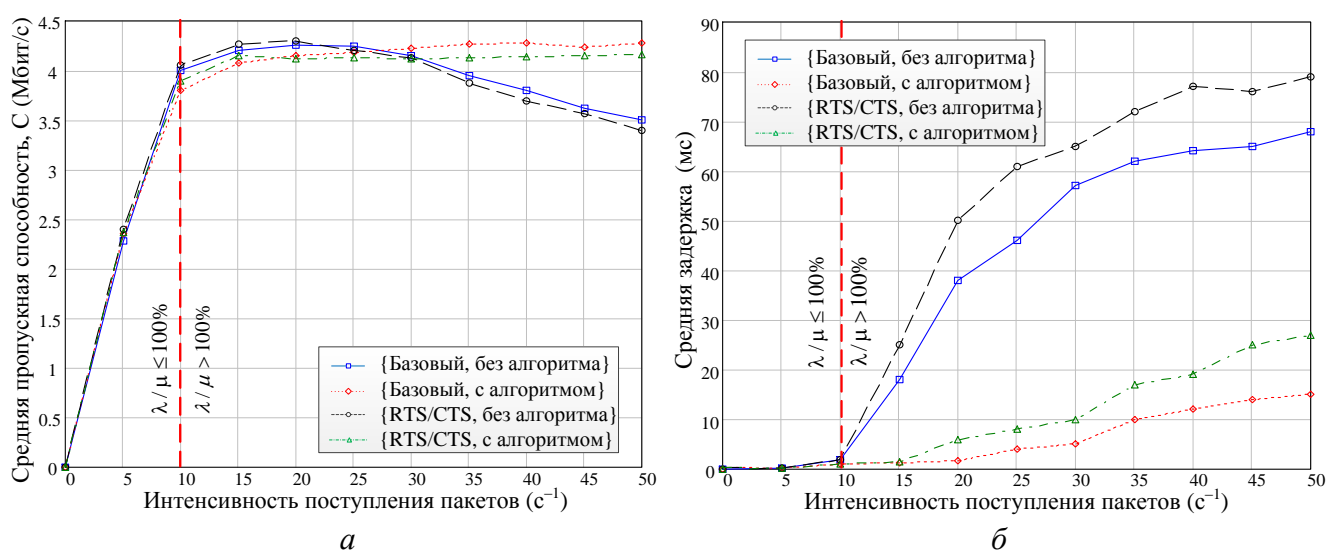


Рисунок 9 – Зависимость средней пропускной способности (а) и средней задержки передачи (б) от интенсивности поступления пакетов

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение разработанного алгоритма распределенного доступа позволяет повысить производительность сети в целом, как в базовом режиме работы, так и в режиме RTS/CTS. При этом учитываются требования QoS к передаваемым данным по пропускной способности, что позволяет качественно функционировать поддерживающим их сервисам.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы. **В приложениях** к диссертации приведены краткие характеристики стандартов беспроводных сетей передачи данных, используемых в PCY, и акты реализации результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Проведен анализ существующих распределенных систем управления, определены роль и место технологий беспроводной передачи данных в структуре данных систем. Проанализированы технологии стандарта IEEE 802.11, наиболее широко используемые в распределенных системах, с выявлением особенностей их функционирования. Проведен анализ способов и методов управления доступом к среде передачи данных в беспроводных сетях стандарта IEEE 802.11. Исследованы существующие аналитические подходы к оценке производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне в различных условиях их функционирования.

2. Разработана математическая модель процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, базирующаяся на аппарате цепей Маркова и отличающаяся от известных учётом состояния загруженности станций сети и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех. В результате моделирования получены в явном виде аналитические выражения для оценки пропускной способности сети, времени задержки передачи пакета, вероятности передачи и отказа в обслуживании (передаче) пакета.

3. Разработан алгоритм настройки параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий повышение пропускной способности сети за счет поиска оптимальных (по критерию максимума пропускной способности) значений начального "окна конкуренции" W_0 и количества попыток повторных передач пакета m . С использованием разработанного алгоритма проведена оценка эффективности применения механизма настройки параметров W_0 , m . В зависимости от условий функционирования сети выигрыш (по пропускной способности) от применения алгоритма может достигать до 30 % для базового механизма доступа и до 12 % для RTS/CTS механизма доступа в сравнении с показателями, полученными для значений параметров канального уровня, рекомендованных стандартом IEEE 802.11.

4. Разработана методика оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала, учитывающая состояние загруженности станций сети и формирующая решающее правило по допуску в канал нового информационного потока. На основе данной методики предложен модифицированный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий стабилизацию пропускной способности сети на значениях близких к максимальным при высокой нагрузке в сети. Разработанный алгоритм использует и дополняет механизм множественного доступа с функцией распределенной координации (DCF) стандарта IEEE 802.11. Алгоритм рекомендуется использовать как при проектировании новых, так и при модернизации уже существующих систем беспроводного доступа.

5. Разработана компьютерная имитационная модель MAC-уровня стандарта IEEE 802.11, реализующая разработанный алгоритм распределенного доступа в базовом и RTS/CTS режимах работы.

**Основные публикации по теме диссертации:
Публикации в изданиях, рекомендованных
ВАК при Минобрнауки России**

1. Анисимов, Д.В. Решение задач управления сетевыми ресурсами в условиях динамического изменения конфигурации беспроводной сети АСУП / В.Т. Ерёмченко, Д.В. Анисимов, Д.А. Плащенков, Д.А. Краснов, С.А. Черепков, А.Е. Георгиевский // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 6. – С. 114–119.

2. Анисимов, Д.В. Моделирование пропускной способности сегмента беспроводной сети АСУП на базе стандарта 802.11 / В.Т. Ерёмченко, Д.В. Анисимов, С.А. Черепков, А.А. Лякишев, П.А. Чупахин // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 2. – С. 82–86.

3. Анисимов, Д.В. Математическое моделирование беспроводного сегмента вычислительной сети АСУПП / В.Т. Ерёмченко, Д.В. Анисимов, Т.М. Парамохина, А.А. Лякишев // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 3. С. 67–72.

4. Анисимов, Д.В. Подход к оценке качества предоставления информационных услуг в беспроводной сети передачи данных АСУТП газотранспортного предприятия в условиях воздействия помех и вне протокольных прерываний / В.Т. Ерёмченко, Д.В. Анисимов, Д.А. Краснов, С.А. Воробьёв // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 4. – С. 96–105.

5. Анисимов, Д.В. Моделирование состояний пропускной способности беспроводного канала сети передачи данных газотранспортного предприятия на основе насыщенных цепей Маркова / Д.В. Анисимов // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 5. – С. 5–14.

6. Анисимов, Д.В. Моделирование процесса сбора и обработки данных в беспроводном сегменте АСУТП газотранспортного предприятия / Д.В. Анисимов // Информационные системы и технологии. – 2014. – № 3. – С. 5–10.

7. Анисимов, Д.В. Алгоритм оптимизации параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий максимизацию пропускной способности сети / Д.В. Анисимов, С.В. Дмитриев, В.В. Рябоконт // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – Т. 64. – № 2. – С. 67–72.

8. Анисимов, Д.В. Оценка производительности канального уровня стандарта IEEE 802.11 с учетом состояния загруженности элементов сети и влияния помех в распределенных автоматизированных системах управления / Д.В. Анисимов, С.В. Дмитриев, Двилянский А.А. // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2016. – № 7. – С. 10–18.

9. Анисимов, Д.В. Механизм распределенного доступа к среде передачи данных, обеспечивающий стабилизацию пропускной способности на максимальных значениях при высокой нагрузке в сетях стандарта IEEE 802.11 / Д.В. Анисимов // Т-Comm. – 2016. – № 10. – С. 4–11.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

10. Анисимов, Д.В. Программное средство управления ресурсами в среде корпоративного портала / С.А. Черепков, А.А. Лякишев, К.А. Мегаев, Д.В. Анисимов, С.В. Еременко, М.Ю. Рытов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619124 от 25 сентября 2013 г.