

На правах рукописи

Шпилев Сергей Алексеевич

**Исследование механизмов управления и оценка  
производительности широкополосных беспроводных  
сетей передачи информации под управлением протокола  
IEEE 802.11**

Специальность 05.13.13 — Телекоммуникационные системы  
и компьютерные сети

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва — 2008

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Вишневский Владимир Миронович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Саксонов Евгений Александрович  
доктор физико-математических наук, профессор  
Рыков Владимир Васильевич

Ведущая организация: Институт программных систем РАН

Защита состоится 22 декабря 2008 г. в 11 часов на заседании  
диссертационного совета Д.002.077.01  
при Учреждении Российской академии наук  
Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН  
по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, Большой Каретный пер., д. 19, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Учреждения Российской академии наук  
Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН.

Автореферат разослан 20 ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.002.077.01,  
доктор физико-математических наук

И.И. Цитович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В последние годы все большую популярность завоевывают беспроводные сети передачи информации. Это связано с легкостью и быстротой их развертывания, простотой в обслуживании и другими их преимуществами. При этом, среди беспроводных сетей передачи информации наибольшее распространение получили широкополосные беспроводные сети передачи информации (ШБС) под управлением протокола IEEE 802.11, известные также как Wi-Fi. Успех данного протокола объясняется высокими скоростями передачи данных (до 300 Мбит/с для нового стандарта IEEE 802.11n), широким набором сервисов, огромным диапазоном устройств, представленных на рынке, поддерживающих данный стандарт сетей. Так в настоящее время большинство современных ноутбуков, КПК, смартфонов и даже многие модели цифровых фото- и видеокамер, принтеров и цифровых фоторамок используют Wi-Fi сети. В крупных городах мира, таких как Москва, Париж, Мельбурн и др. Wi-Fi доступ к Интернету есть практически повсеместно, а в большинстве аэропортов и многих кафе по всему миру беспроводный доступ к Интернету и вовсе бесплатный. Таким образом, исследование локальных сетей передачи информации под управлением протокола IEEE 802.11 является весьма актуальным.

Кроме беспроводных локальных сетей передачи информации Wi-Fi может применяться и для развертывания региональных сетей, для чего на его основе могут строиться многокилометровые каналы точка-точка, обеспечивающие связь областей с областными центрами. Такой подход позволит наиболее дешево и эффективно обеспечить отдаленные регионы доступом в Интернет, телефонной связью и телевидением. Такое применение ШБС, в том числе, помогло в реализации национального проекта “Образование” при обеспечении школ доступом в Интернет. Такой же подход позволит решить проблему “информационного неравенства”.

Новым и наиболее многообещающим направлением развития протокола IEEE 802.11 является дополнение IEEE 802.11s, известное, как mesh-сети. Одним из главных принципов построения mesh-сети является принцип самоорганизации архитектуры, обеспечивающий следующие возможности: реализацию топологии сети “каждый с каждым”; устойчивость сети при отказе отдельных компонентов; масштабируемость сети: увеличение зоны информационного покрытия в режиме самоорганизации; динамическую маршрутизацию трафика, контроль состояния сети и т. д.

Для вышеперечисленных задач характерно использование сетей с различными топологиями. При каждой топологии используются различные функ-

ции управления, предусмотренные в протоколе. Соответственно, для исследования, оптимизации, усовершенствования и проектирования таких сетей используется широкий круг аналитических и имитационных моделей, разработка и комплексное использование которых является ключевым моментом на каждом из перечисленных этапов.

Исследованию ШБС и механизмов, используемых при их построении, посвящено значительное количество работ российских и зарубежных ученых: О.М. Брехова, В.А. Васенина, В.М. Вишневого, В.С. Жданова, А.П. Кулешова, А.И. Ляхова, И.А. Мизина, В.В. Рыкова, Е.А. Саксонова, G. Ash, G. Bianchi, S. Borst, O. Voxma, F. Cali, M. Conti, R. G. Gallager, L. Kleinrock, P. Kyasanur, M. Neuts, C. Perkins, E. Royer, H. Takagi и др. Обзор работ, посвященных каналу точка-точка, приведен в главе 2, региональным беспроводным сетям – в главе 3, mesh-сетям – в главе 4 диссертации. Однако круг нерешенных задач непрерывно растет, и модели, построенные всего несколько лет назад, уже не удовлетворяют всем требованиям и особенностям современных протоколов. Так, например, несмотря на распространение идеи об использовании Wi-Fi при построении региональных сетей и появлении на рынке устройств, пригодных для организации многокилометровых каналов, особенности работы протокола в данном случае до сих пор остаются неисследованными. В сетях с централизованным управлением остается немало неизученных механизмов опроса, которые могут быть реализованы в современном оборудовании, что значительно улучшит дифференциацию качества обслуживания, уменьшит дрожание задержек и т. д. К современным протоколам маршрутизации, предложенным в mesh-сетях, предъявляются характерные для таких сетей требования и, следовательно, необходимы новые модели для оценки эффективности данных протоколов. Таким образом, интенсивное развитие широкополосных беспроводных технологий привело к необходимости исследования новых моделей, которые и рассматриваются в настоящей диссертационной работе.

**Целью** диссертационной работы является разработка и исследование моделей функционирования ШБС под управлением протокола IEEE 802.11: оценка производительности и выбор оптимальных параметров для различных видов топологии, в том числе точка-точка, точка-многоточка и mesh; и различных функций управления, включая централизованную, распределенную и гибридную.

**Методы исследования.** Для достижения цели диссертационной работы используются методы теории вероятности, теории массового обслуживания, теории случайных процессов и компьютерное моделирование.

**Научная новизна** работы заключается в комплексном исследовании основных видов топологии и механизмов управления ШБС под управлением протокола IEEE 802.11: аналитическом и имитационном моделировании канала точка-точка произвольной длины и с различными функциями управления; моделировании адаптивного механизма опроса со шлюзовой дисциплиной обслуживания; изучении и сравнении протоколов маршрутизации в новых mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Разработка аналитической и имитационной моделей канала точка-точка произвольной длины под управлением протокола IEEE 802.11 с распределенным или гибридным управлением в режиме насыщения и с распределенным управлением в режиме нормальной нагрузки с ограниченными очередями.
2. Исследование ШБС под управлением протокола IEEE 802.11 с централизованным управлением с использованием аналитической и имитационной моделей системы адаптивного поллинга.
3. Проведение сравнительного анализа протоколов маршрутизации OLSR и HWMP в mesh-сети под управлением протокола IEEE 802.11s с использованием имитационного моделирования.
4. Разработка программного комплекса, объединяющего в себе все перечисленные модели, позволяющего провести аналитическое или имитационное моделирование сетей передачи информации под управлением протокола IEEE 802.11 с различными механизмами управления и топологиями.

**Практическая ценность и реализация результатов.** Результаты работы нашли практическое применение при выполнении ряда проектов, что подтверждено соответствующими актами. В частности, результаты исследования механизмов опроса, дуплексного канала точка-точка и протоколов маршрутизации используются в программном обеспечении первого отечественного беспроводного маршрутизатора “Рапира”, который по ряду параметров превосходит зарубежные аналоги. Исследования протоколов mesh-сетей и выбора их оптимальных параметров, проведенные в рамках выполнения данной работы, вошли составной частью в проекты:

- Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса

России на 2007-2012 годы”, проект 2007-4-2.4-00-03-004 “Разработка интегрированной технологической платформы для мониторинга элементов и систем жизненно важной инфраструктуры на основе информационно-коммуникационных технологий расширенного Интернета”;

- Программы фундаментальных исследований Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (ОНИТ РАН) “Новые физические и структурные решения в инфотелекоммуникациях” проекта 3.2 – Структура и методы построения инфокоммуникационных сетей;
- Гранта РФФИ № 08-07-90102 “Разработка методов и алгоритмов исследования протоколов передачи мультимедийной информации в широкополосных беспроводных сетях с централизованным управлением”.

Результаты работы также используются в курсах “Протоколы и стандарты телекоммуникационных сетей”, “Математические и имитационные модели телекоммуникационных сетей” и “Моделирование сетей”, которые читаются студентам Московского физико-технического института (ГУ).

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

- Третьей международной конференции по проблемам управления Института проблем управления (Москва, 2006);
- Международном семинаре “Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети. Теория и приложения” (София, Болгария, 2006; Москва, 2007; София, Болгария, 2008);
- 19-й международной научной конференции “Математические методы повышения эффективности информационно-телекоммуникационных сетей”, (Гродно, Белоруссия, 2007);
- 30-й и 31-й конференциях молодых ученых и специалистов ИППИ РАН “Информационные технологии и системы” (Звенигород, Россия, 2007; Геленджик, Россия, 2008);
- Третьей всероссийской молодежной научной конференции по проблемам управления (Москва, 2008);

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, список которых приведен в конце автореферата. Из них 5 статей в научных журналах, 10 статей в сборниках материалов научных конференций. Кроме того, получен 1 патент на полезную модель, поданы 2 заявки на изобретение и 1 заявка на свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из списка условных обозначений и сокращений, введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 88 наименований. Работа изложена на 125 страницах и содержит 17 рисунков и 14 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована основная цель, научная новизна и практическая значимость результатов, приведено краткое описание структуры диссертации.

В **первой главе** представлены принципы построения и особенности ШБС. В **разделе 1.1** дается общее описание ШБС, история их развития, классификация и текущее положение дел. В **разделе 1.2** более детально рассмотрено семейство протоколов IEEE 802.11x, его физический уровень и уровень управления доступом к среде. Представлены особенности и отличия различных версий протокола и дополнений к нему (IEEE 802.11a/b/g/e/s). Описаны функции управления, включая последнюю из предложенных – функцию гибридного управления (HCF) и две основные – функции централизованного и распределенного управления. В **разделе 1.3** приведены основные виды топологий сети – точка-точка, точка-многоточка или сота и mesh, и даны области их применения.

Во **второй главе** проведено исследование простейшей из топологий сети – канала точка-точка с различными функциями управления, представлен обзор литературы по данной тематике. В **разделе 2.1** дан краткий обзор возможных методов повышения производительности канала точка-точка, описаны проблемы, возникающие при построении многокилометровых каналов и их особенности. В **разделе 2.2** исследованы две аналитические модели, описывающие канал точка-точка как в режиме насыщения (в том числе и многокилометровый канал), так и в режиме нормальной нагрузки. В **подразделе 2.2.1** представлена модель широкополосного беспроводного канала точка-точка в режиме насыщения. Согласно подходу Бьянки в модели используется дискретная целочисленная шкала времени, в которой  $t$  и  $t + 1$  соответствуют началу двух последовательных виртуальных слотов. Виртуальным слотом называется интервал времени между двумя последовательными изменениями счетчика отсрочки. Виртуальные слоты имеют разную длину. Каждый из них может быть: 1) “пустым” слотом отсрочки  $\sigma$ , когда ни одна станция не передает, 2) “успешным” слотом, когда одна и только одна станция передает и 3) “коллизийным” слотом, когда две или более станций пробуют передать одновременно.

Рассмотрена сеть состоящая из  $n$  узлов. Заметим, что в начале каждого слота все станции сети имеют одинаковую вероятность  $\tau$  начать отправку пакета. В модели Кали время отсрочки  $b$  предполагается независимым от количества попыток послать текущий пакет  $n_c$ , и имеет геометрическое распределение:  $P\{b = k\} = \tau(1 - \tau)^k, k \geq 0$ . Однако  $\tau$  выбирается с учетом реального правила отсрочки и вероятности коллизии. Таким образом, вероятности возникновения “пустого” ( $p_e$ ), “успешного” ( $p_s$ ), и “коллизийного” ( $p_c$ ) слотов определяются равенствами

$$p_e = (1 - \tau)^n, \quad p_s = n\tau(1 - \tau)^{n-1}, \quad p_c = 1 - (1 - \tau)^n - n\tau(1 - \tau)^{n-1}. \quad (1)$$

Для упрощения дальнейшего анализа предполагается, что используется только базовый механизм доступа к среде, и считается, что все пакеты в сети имеют одинаковый размер. Обозначим длительности слотов в случае короткого канала точка-точка верхним индексом 0; в случае многокилометрового канала точка-точка при условии, что  $H + P \leq 2\delta$  – индексом  $s$ ; и при условии, что  $H + P > 2\delta$  – индексом  $l$ . Здесь  $P$  и  $H$  – времена, необходимые для передачи данных и заголовка пакета данных соответственно. Разделение случая многокилометрового канала на два типа связано с тем, что при коротком пакете в случае коллизии одна станция все же успешно передает пакет, а при длинном пакете коллизия происходит практически так же, как и в случае короткого канала точка-точка. Таким образом, длительности “успешного” и “коллизийного” слотов –  $T_s$  и  $T_c$  задаются выражениями

$$T_s^0 = H + P + t_{ACK} + \text{SIFS} + \text{DIFS}, \quad T_c^0 = H + P + \text{ACK\_TimeOut}, \quad (2)$$

$$T_s^s = T_c^s = H + P + t_{ACK} + 2\delta + \text{SIFS} + \text{DIFS}, \quad (3)$$

$$T_s^l = T_s^s, \quad T_c^l = H + P + 2\delta + \text{EIFS}. \quad (4)$$

Рассмотрим временной интервал  $t_v$  между двумя последовательными успешными передачами, который будем называть виртуальным временем передачи. Тогда пропускная способность в режиме насыщения  $S$  определяется формулой  $S = \frac{V_c P}{E[t_v]}$ , где  $E[t_v]$  – среднее значение  $t_v$ , а  $V_c$  – номинальная скорость передачи данных в канале.

Как в случае короткого, так и в случае многокилометрового канала при условии  $H + P > 2\delta$  виртуальное время передачи может состоять из  $l \geq 1$  виртуальных слотов, где последний слот “успешный”,  $k$  слотов “коллизийные” ( $k = \overline{0, l-1}$ ) и  $l-1-k$  слотов “пустые”, то есть  $t_v^0 = T_s^0 + kT_c^0 + (l-1-k)\sigma$ . Таким образом,

$$E[t_v^0] = T_s^0 + \frac{p_c T_c^0}{p_s} + \frac{p_e \sigma}{p_s}. \quad (5)$$

Однако, в случае многокилометрового канала при условии  $H + P \leq 2\delta$  в случае возникновения коллизии одна из станций, тем не менее, успешно передает свой пакет. Поэтому виртуальное время передачи может состоять из  $l \geq 1$  виртуальных слотов, где последний слот “успешный” или “коллизионный”, а оставшиеся  $l - 1$  слотов “пустые”, то есть  $t_v^s = T_s^s + (l - 1)\sigma$  или  $t_v^c = T_c^s + (l - 1)\sigma$ . Таким образом,

$$E[t_v^s] = \frac{T_s^s p_s + T_c^s p_c}{1 - p_e} + \frac{\sigma p_e (p_c + p_s)}{(1 - p_e)^2}. \quad (6)$$

Чтобы определить пропускную способность  $S$  в режиме насыщения, остается найти  $\tau$ . Конкурентное окно при  $i$ -ой посылке пакета задается выражением

$$W_i = \begin{cases} CW_{min} 2^i, & \text{при } i < m; \\ CW_{max} = CW_{min} 2^m, & \text{при } i \geq m. \end{cases}$$

Воспользуемся формулой  $\tau = 2/(E[w] + 1)$  и леммой, которая гласит: если количество повторных посылок пакета ограничено числом  $R$ , то среднее конкурентное окно  $E[w]$  определяется следующими формулами:

$\left\{ \sum_{i=1}^R p^{i-1} W_i + \frac{p^R W_R - W_0}{1-p} \right\} \times \frac{(1-p)^2}{1-p^R}$ , при  $R \leq m$  и  
 $\left\{ \sum_{i=1}^m p^{i-1} W_i + W_m \sum_{i=m}^{R-1} (i - m + 2) p^i + \frac{(R-m+1)W_m p^R - W_0}{1-p} \right\} \frac{(1-p)^2}{1-p^R}$ , в противном случае. Здесь  $p = 1 - (1 - \tau)^{n-1}$  – вероятность того, что данная попытка передачи оказалась неуспешной. В случае канала точка-точка  $p = \tau$ .

Далее, численными методами находим  $\tau$  и подстановкой его в (1)-(6), получаем пропускную способность канала точка-точка во всех описанных случаях.

В случае использования функции централизованного или гибридного управления в режиме насыщения, осуществляется неконкурентный доступ к среде, а в этом случае нет коллизий и отсрочки посылки пакетов. Вместо пакетов данных и подтверждений координатор использует пакет  $D + A + P$  – данные с подтверждением и опросом, а вторая станция использует пакет  $D + A$  – данные с подтверждением, что разрешено стандартом IEEE 802.11, для минимизации накладных расходов. При этом размеры этих пакетов равны размеру обычного пакета данных. В этом случае виртуальное время передачи задается формулой  $t_v = H + P + \delta + \text{SIFS}$ , и, следовательно,  $S = \frac{V_c P}{H + P + \delta + \text{SIFS}}$ .

В подразделе 2.2.2 представлен матричный метод анализа ШБС с протоколом IEEE 802.11 и ограниченными очередями при нормальной нагрузке. Стохастическое поведение станции моделируется цепью Маркова, где станция может быть в одном из следующих состояний: простоя, отсрочки, передачи и заключительной отсрочки.

Будем различать два типа передач: 1) синхронные передачи, выполняемые

после отсрочки, и 2) асинхронные передачи, выполняемые без предварительной отсрочки, когда пакет прибывает на станцию в состоянии простоя и канал оказывается свободен. Синхронные передачи подвержены коллизиям, так как станции отсчитывают свои времена отсрочки синхронно и счетчики отсрочки нескольких станций могут достичь 0 одновременно. Пакет, передаваемый асинхронно, попадает в коллизию значительно реже. Станция может начать асинхронную передачу в любой момент в пределах слота  $\sigma$ , и вероятность того, что она начнется ровно на границе слота или одновременно с другой асинхронной передачей, пренебрежимо мала.

Пусть  $x(t)$  – случайный процесс, описывающий число пакетов в очереди данной станции в момент времени  $t$ , с пространством состояний  $\{0, 1, \dots, K\}$ . Буфер каждой станции предполагается конечным и равным  $K$ . Пусть  $s(t)$  – случайный процесс, описывающий стадию отсрочки в момент времени  $t$ , с пространством состояний  $\{0, 1, \dots, I\}$ .  $s(t)$  представляет собой число неудачных передач первого пакета в очереди. Пусть  $W = CW_{min}$ . Тогда  $W_i = 2^{\min\{i,m\}}W$ , где  $0 \leq i \leq I$ , а  $m$  находится из условия  $CW_{max} = 2^m CW_{min}$ . Если пакет передан неудачно на максимальной стадии отсрочки  $I$ , он отбрасывается. Пусть  $b(t)$  – стохастический процесс, описывающий счетчик отсрочки данной станции в момент времени  $t$ , с пространством состояний  $\{0, 1, \dots, W_i - 1\}$ , определяемым стадией отсрочки  $i$ . Применяется дискретная целочисленная шкала времени, идентичная предложенной в предыдущей модели.

Считаем, что при каждой попытке передачи независимо от числа предшествующих попыток пакет попадает в коллизию с постоянной вероятностью  $p$ :  $p$  – это условная вероятность коллизии, т. е. это вероятность попадания в коллизию пакета, передача которого началась. Вероятность  $p$  тесно связана с вероятностью  $\tau$  того, что станция передает синхронно в произвольно выбранном слоте, и эта связь будет отражена далее уравнением (8). Введем также вероятность  $\tau_a$  того, что станция передает асинхронно. Далее будем считать, что все информационные пакеты имеют фиксированный размер, одинаковый для всех станций, и канал занимает на время  $T_p$  при каждой передаче кадра DATA. Пакеты поступают в соответствии со стационарным пуассоновским потоком с параметром  $\lambda$ . Сеть состоит из  $n$  станций.

Можно выделить следующие типы слотов:

- пустой слот  $\sigma$ , когда ни одна станция не передает;
- успешный слот, когда только одна станция передает синхронно; длительность этого слота составляет  $T_s = T_p + SIFS + t_{ACK} + DIFS$ ;  $t_{ACK}$  – время передачи подтверждения;

- коллизийный слот, когда две или более станции передают синхронно; длительность этого слота равна  $T_c = T_p + ACK\_TimeOut$ , где  $ACK\_TimeOut = SIFS + \sigma + 25$  мкс;
- асинхронный слот, когда одна из станций передает асинхронно; средняя длительность этого слота равна  $T_a = T_s + \sigma/2$ .

Случайный процесс  $\xi_t = \{x(t), s(t), b(t)\}, t \geq 0$  – вложенная цепь Маркова. Пространство состояний этой цепи:  $\{(0, j), 0 \leq j \leq W - 1\} \cup \{(k, i, j) : 1 \leq k \leq K, 0 \leq i \leq I, 0 \leq j \leq W_i - 1\}$ . Здесь  $(0, j), j = \overline{1, W - 1}$ , – состояние заключительной отсрочки с текущим значением счетчика, равным  $j$ ;  $(0, 0)$  – состояние простоя. Для дальнейшего анализа введем ряд вероятностей.

- $P_e$  – вероятность того, что случайно выбранный слот является пустым при условии, что данная станция не передает,  $P_e = (1 - \tau - \tau_a)^{n-1}$ .
- $P_s$  – вероятность того, что случайно выбранный слот является успешным при условии, что данная станция не передает,  $P_s = (n - 1)\tau(1 - \tau)^{n-2}$ .
- $P_a$  – вероятность того, что случайно выбранный слот является асинхронным при условии, что данная станция не передает,  $P_a = (n - 1)\tau_a(1 - \tau)^{n-2}$ .
- $P_c$  – вероятность того, что случайно выбранный слот является коллизийным при условии, что данная станция не передает,  $P_c = 1 - P_e - P_s - P_a$ .
- $r_i, s_i, a_i$  и  $t_i$  – вероятности того, что данная станция генерирует (т. е. в ее очередь поступают)  $i$  пакетов в течение соответственно пустого, успешного, асинхронного и коллизийного слота,

$$r_i = \frac{(\lambda\sigma)^i}{i!}e^{-\lambda\sigma}, \quad a_i = s_i = \frac{(\lambda T_s)^i}{i!}e^{-\lambda T_s}, \quad t_i = \frac{(\lambda T_c)^i}{i!}e^{-\lambda T_c}.$$

Так как  $n\lambda\sigma \ll 1$ , можно считать, что не более одного пакета может поступить в очереди всех станций за время  $\sigma$ , т. е.  $r_1 \approx \lambda\sigma e^{-\lambda\sigma} \approx \lambda\sigma$  и  $r_i \approx 0$  при  $i > 1$ . По той же причине  $a_i \approx s_i$ .

- $q_i$  – вероятность того, что  $i$  пакетов поступит в очередь данной станции за случайно выбранный слот при условии, что данная станция не передает,  $q_i = P_e r_i + P_s s_i + P_a s_i + P_c t_i$ .

Отсюда получаем следующие вероятности одношаговых переходов:

$P\{(0, 0)|(0, 0)\} = q_0 + s_0 r_1 P_e / W$ : ни одного пакета не поступило за слот, либо 1) пакет поступает в пустую очередь станции находящейся в состоянии простоя, в слоте, когда ни одна станция не передает синхронно, и, следовательно,

пакет передается асинхронно; 2) больше ни одного пакета не поступает в очередь данной станции в течение данной асинхронной передачи, что означает переход в состояние заключительной отсрочки; 3) время отсрочки выбирается равным 0, поэтому станция возвращается в состояние простоя.

$P\{(0, j)|(0, 0)\} = s_0 r_1 P_e / W$ ,  $1 \leq j \leq W - 1$ : пакет поступает в пустую очередь станции в состоянии простоя в течение слота, когда ни одна станция не передает синхронно, и, следовательно, пакет передается асинхронно. В течение этой передачи больше ни одного пакета не прибывает в очередь данной станции, и станция переходит в состояние заключительной отсрочки с начальным значением счетчика  $j > 0$ .

$P\{(k, 0, j)|(0, 0)\} = [s_k(r_1 P_e + P_s + P_a) + t_k P_c] / W$ ,  $1 \leq k < K$ ,  $0 \leq j \leq W - 1$ : либо 1) пакет, поступающий в пустую очередь станции, передается асинхронно, и в течение этой передачи в очередь данной станции поступает еще  $k$  пакетов, либо 2) слот, в начале которого данная станция была в состоянии простоя, оказывается непустым, и в течение него (включая завершающий IFS интервал) в очередь данной станции поступает  $k$  пакетов.

$P^*\{(K, 0, j)|(0, 0)\} = [(1 - \sum_{k=0}^{K-1} s_k)(r_1 P_e + P_s + P_a) + (1 - \sum_{k=0}^{K-1} t_k) P_c] / W$ ,  $0 \leq j \leq W - 1$ : аналогично предыдущему выражению, но в очередь данной станции поступает не менее  $K$  пакетов.

$P\{(k, 0, j-1)|(0, j)\} = q_k$ ,  $1 \leq k < K$ ,  $0 < j \leq W - 1$ :  $k$  пакетов прибывает в очередь данной станции в течение слота, когда она находилась в состоянии заключительной отсрочки со значением счетчика  $j$ .

$P^*\{(K, 0, j-1)|(0, j)\} = 1 - \sum_{k=0}^{K-1} q_k$ ,  $0 < j \leq W - 1$ : не менее  $K$  пакетов прибывает в очередь данной станции в течение слота, когда она находилась в состоянии заключительной отсрочки со значением счетчика  $j$ .

$P\{(0, j-1)|(0, j)\} = q_0$ ,  $0 < j \leq W - 1$ : ни одного пакета не прибывает в очередь данной станции в течение слота, когда она находилась в состоянии заключительной отсрочки со значением счетчика  $j$ .

$P\{(0, j)|(1, i, 0)\} = (1 - p)s_0 / W$ ,  $0 \leq j \leq W - 1$ ,  $0 \leq i \leq I - 1$ : последний пакет в очереди передается успешно, и ни одного пакета не прибывает в очередь данной станции в течение этой передачи.

$P\{(0, j)|(1, I, 0)\} = [(1 - p)s_0 + p t_0] / W$ ,  $0 \leq j \leq W - 1$ : последний пакет в очереди передается успешно или отбрасывается на максимальной стадии отсрочки  $I$ , и ни одного пакета не прибывает в очередь данной станции в течение этой передачи.

$P\{(k+l, i, j-1)|(k, i, j)\} = q_l$ ,  $1 \leq k < K$ ,  $0 \leq l < K - k$ ,  $0 \leq i \leq I$ ,  $1 \leq j \leq W_i - 1$ :  $l$  пакетов прибывает в очередь данной станции в течение слота, когда эта станция не передает.

$P^*\{(K, i, j - 1)|(k, i, j)\} = 1 - \sum_{l=0}^{K-k-1} q_l$ ,  $1 \leq k \leq K$ ,  $0 \leq i \leq I$ ,  $1 \leq j \leq W_i - 1$ : не менее чем  $K - k$  пакетов прибывает в очередь данной станции в течение слота, когда эта станция не передает.

$P\{(k - 1 + l, 0, j)|(k, i, 0)\} = (1 - p)s_l/W$ ,  $1 \leq k \leq K$ ,  $0 \leq l \leq K - k$ ,  $0 \leq i \leq I - 1$ ,  $0 \leq j \leq W - 1$ : пакет передается успешно, и  $l$  пакетов прибывает в очередь данной станции в течение этой передачи.

$P^*\{(K, 0, j)|(k, i, 0)\} = (1 - p)(1 - \sum_{l=0}^{K-k} s_l)/W$ ,  $1 \leq k \leq K$ ,  $0 \leq i \leq I - 1$ ,  $0 \leq j \leq W - 1$ : пакет передается успешно, и более  $K - k$  пакетов прибывает в очередь данной станции в течение этой передачи.

$P\{(k - 1 + l, 0, j)|(k, I, 0)\} = [(1 - p)s_l + pt_l]/W$ ,  $1 \leq k \leq K$ ,  $0 \leq l \leq K - k$ ,  $0 \leq j \leq W - 1$ : последний пакет в очереди передается успешно или отбрасывается на максимальной стадии отсрочки  $I$ , и  $l$  пакетов прибывает в очередь данной станции в течение этой передачи.

$P^*\{(K, 0, j)|(k, I, 0)\} = [(1 - p)(1 - \sum_{l=0}^{K-k} s_l) + p(1 - \sum_{l=0}^{K-k} t_l)]/W$ ,  $1 \leq k \leq K$ ,  $0 \leq j \leq W - 1$ : последний пакет в очереди передается успешно или отбрасывается на максимальной стадии отсрочки  $I$ , и более чем  $K - k$  пакетов прибывает в очередь данной станции в течение этой передачи.

$P\{(k + l, i + 1, j)|(k, i, 0)\} = pt_l/W_{i+1}$ ,  $1 \leq k < K$ ,  $0 \leq l < K - k$ ,  $0 \leq i \leq I - 1$ ,  $0 \leq j \leq W_{i+1} - 1$ : пакет передается неудачно из-за коллизии, и  $l$  пакетов прибывает в очередь данной станции в течение этой коллизии.

$P^*\{(K, i + 1, j)|(k, i, 0)\} = p(1 - \sum_{l=0}^{K-k-1} t_l)/W_{i+1}$ ,  $1 \leq k \leq K$ ,  $0 \leq i \leq I - 1$ ,  $0 \leq j \leq W_{i+1} - 1$ : пакет передается неудачно из-за коллизии, и не менее чем  $K - k$  пакетов прибывает в очередь данной станции в течение этой коллизии.

Из вероятностей одношаговых переходов, упорядоченных лексикографически, формируется матрица  $\mathbf{P}$  вероятностей одношаговых переходов в рассматриваемой цепи Маркова, которая имеет блочную структуру:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} C_0 & A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & \cdots & A_K \\ C_1 & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & \cdots & B_K^* \\ O & C_2 & B_1 & B_2 & B_3 & \cdots & B_{K-1}^* \\ O & O & C_2 & B_1 & B_2 & \cdots & B_{K-2}^* \\ O & O & O & C_2 & B_1 & \cdots & B_{K-3}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ O & O & O & O & \cdots & C_2 & B_1^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

– матрица размерности  $(W + \beta K) \times (W + \beta K)$ , где

$$\beta = \sum_{i=0}^I W_i = \begin{cases} (2^{m+1} - 1)W, & m \geq I, \\ (2^{m+1} - 1 + 2^m(I - m))W, & m < I. \end{cases}$$

Ввиду схожести вида блоков матрицы  $\mathbf{P}$  введем матрицу размерности  $a \times b$ :

$$G_{a,b}(x, y) = \begin{bmatrix} x & x & \cdots & x & x \\ y & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & y & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & y & 0 \end{bmatrix}.$$

Далее приводятся блоки матрицы  $\mathbf{P}$ . Матрицы  $C_i$ ,  $i = 0, 1, 2$ , определяются следующим образом:

$$C_0 = \begin{bmatrix} q_0 + \frac{s_0 r_1 P_e}{W} & \frac{s_0 r_1 P_e}{W} & \cdots & \frac{s_0 r_1 P_e}{W} & \frac{s_0 r_1 P_e}{W} \\ q_0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & q_0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & q_0 & 0 \end{bmatrix} - \text{матрица размерности } W \times W,$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{11} \\ C_{12} \\ \vdots \\ C_{1I} \end{bmatrix} - \text{матрица размерности } \beta \times W, \text{ где}$$

$$C_{1i} = G_{W_i, W} \left( \frac{(1-p)s_0}{W}, 0 \right), \quad 0 \leq i \leq I-1, \quad C_{1I} = G_{W_I, W} \left( \frac{(1-p)s_0 + p t_0}{W}, 0 \right),$$

$$C_2 = [C_1 \quad O] - \text{матрица размерности } \beta \times \beta.$$

$A_i = [G_{W, W}(x_i, z_i) \quad O]$  - матрица размерности  $W \times \beta$ , где  $x_i = \frac{s_i(r_1 P_e + P_s + P_a) + t_i P_c}{W}$ , и  $z_i = q_i$  при  $i < K$ ,  $x_K = P^*\{(K, 0, j) | (0, 0)\}$  и  $z_K = P^*\{(K, 0, j-1) | (0, j)\}$ .

$$B_i = \begin{bmatrix} D & E_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ D_1 & F_1 & E_2 & \cdots & 0 & 0 \\ D_2 & 0 & F_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ D_{I-1} & 0 & 0 & \cdots & F_{I-1} & E_I \\ D_I & 0 & 0 & \cdots & 0 & F_I \end{bmatrix} - \text{матрица размерности } \beta \times \beta, \text{ блоки}$$

матрицы  $B_i^*$  определяются аналогично и помечены верхним индексом  $*$ .

$$D = G_{W, W} \left( \frac{(1-p)s_i}{W}, q_{i-1} \right), \quad D^* = G_{W, W}(u_i, m_i),$$

$$D_j = G_{W_j, W} \left( \frac{(1-p)s_i}{W}, 0 \right), \quad D_j^* = G_{W_j, W}(u_i, 0), \quad j = \overline{1, I-1},$$

$$D_I = G_{W_I, W} \left( \frac{(1-p)s_i + pt_i}{W}, 0 \right), D_I^* = G_{W_I, W} (g, 0),$$

$$E_j = G_{W_{j-1}, W_j} \left( \frac{pt_{i-1}}{W_j}, 0 \right), E_j^* = G_{W_{j-1}, W_j} (h_i, 0), j = \overline{1, I},$$

$$F_j = G_{W_j, W_j} (0, q_{i-1}), F_j^* = G_{W_j, W_j} (0, m_i), j = \overline{1, I},$$

где  $u_i = (1-p)(1 - \sum_{l=0}^{i-1} s_l)/W$ ,  $m_i = 1 - \sum_{l=0}^{i-2} q_l$ ,  
 $g = P^*\{(K, 0, j)|(K+1-i, I, 0)\}$  и  $h_i = p(1 - \sum_{l=0}^{i-2} t_l)/W_j$ .

Введем стационарные вероятности

$$\pi_{k,i,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{(x(t), s(t), b(t)) = (k, i, j)\}, \pi_{0,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{x(t) = 0, b(t) = j\}.$$

Также пусть  $\pi_k = (\pi_{k,0,0}, \pi_{k,0,1}, \dots, \pi_{k,I, W_I-1})$ ,  $k = \overline{1, K}$ ,  $\pi_0 = (\pi_{0,0}, \dots, \pi_{0, W-1})$ .  
 $\pi_0$  и  $\pi_k$ ,  $k \geq 1$ , – векторы стационарных вероятностей состояний на уровне  $k$ , упорядоченные в лексикографическом порядке возрастания компонент  $i$  и  $j$ . Распределение стационарных вероятностей  $\pi = (\pi_0, \dots, \pi_K)$  получено методом матричного анализа.

С использованием стационарных вероятностей  $\{\pi_k, k \geq 0\}$ , получены вероятности  $\tau$  и  $\tau_a$  того, что станция передает синхронно и асинхронно в произвольно выбранном слоте:

$$\tau = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^I \pi_{k,i,0}, \quad \tau_a = \pi_{0,0} r_1 P_e, \quad p = 1 - (1 - \tau)^{n-1}. \quad (8)$$

Система (8) с тремя неизвестными  $\tau$ ,  $\tau_a$  и  $p$  решается численными методами.

Вероятность потери пакета является важным показателем качества обслуживания (QoS) для большинства сетевых приложений. Согласно правилам IEEE 802.11 DCF, пакет отбрасывается при достижении предела  $I$  повторных попыток передачи, т. е. если все  $I+1$  последовательных попыток передачи этого пакета оказались неудачными. Вероятность потери пакета, передаваемого синхронно, равна  $p^{I+1}$ , в то время как пакеты, передаваемые асинхронно, не теряются вовсе. Таким образом, вероятность потери пакета равна  $P_{Loss} = \eta p^{I+1}$ , где  $\eta$  – доля пакетов, передаваемых синхронно, которая и должна быть найдена.

Среди всех пакетов, прибывающих на данную станцию в течение случайно выбранного слота, не более одного пакета передается асинхронно, и вероятность такой передачи равна  $\tau_a$ . Поэтому  $\eta = \frac{N_s - \tau_a}{N_s}$ , где  $N_s$  – среднее количество пакетов, прибывающих на станцию за слот. Вычисляя это количество для каждого из возможных состояний и учитывая, что новые пакеты могут поступить в очередь данной станции, пока она передает пакет асинхронно,

получаем:

$$N_s = \tau_a(1 + \lambda T_s) + \pi_{0,0} \lambda [(P_s + P_a)T_s + P_c T_c] + \lambda t_{slot}(1 - \pi_{0,0} - \tau) + \lambda \tau [(1-p)T_s + pT_c],$$

где  $t_{slot} = P_e \sigma + P_s T_s + P_a T_a + P_c T_c$  – средняя длительность слота при условии, что данная станция не передает.

Очевидно, вероятность потери пакета непосредственно определяет пропускную способность сети  $T$  в условиях нормальной нагрузки:

$$T = (1 - P_{Loss})n\lambda. \quad (9)$$

В **разделе 2.3** представлены имитационные модели канала точка-точка для всех предложенных случаев и результаты аналитического и имитационного моделирования. Дается сравнение полученных результатов и оценивается область сходимости аналитической модели с результатами эксперимента.

В **третьей главе** рассматривается сеть с топологией точка-многоточка или сота. В данном случае оптимальным решением является централизованный механизм управления, неотъемлемой частью которого является опрос станций (поллинг). Приведен обзор литературы посвященной различным моделям поллинга. В **разделе 3.1** представлен собственно обзор механизмов опроса, их классификация и особенности. В **разделе 3.2** представлена разработанная в данной работе система поллинга с адаптивным опросом и ее аналитическая модель. Система поллинга состоит из  $N$  очередей со шлюзовым обслуживанием. Поток заявок в  $i$ -ю очередь пуассоновский с параметром  $\lambda_i$ ; время обслуживания заявки распределено экспоненциально с параметром  $\mu_i$ ; время подключения сервера к очереди также полагаются экспоненциально распределенными с параметром  $1/g_i$ . Время простоя сервера распределено экспоненциально с параметром  $1/\tau$ . Пусть также  $\rho = \sum_{i=1}^N \lambda_i/\mu_i$  – загрузка системы. Для такой системы получены среднее время цикла и вероятность опроса очереди в цикле, для чего использован приближенный подход, основанный на описании адаптивной схемы с помощью схемы Бернулли с набором вероятностей  $(u_1, \dots, u_N)$ ,  $0 < u_i \leq 1$ ,  $i = \overline{1, N}$ . Сервер обслуживает  $i$ -ю очередь в цикле с вероятностью  $u_i$ , а с противоположной вероятностью  $1 - u_i$  сервер перемещается к следующей очереди.

Среднее время цикла определяется равенством

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N g_i u_i + \tau \prod_{i=1}^N (1 - u_i)}{1 - \rho} \quad (10)$$

– средний период времени, за который сервер посещает очереди, подлежащие опросу, либо время простоя сервера, если все очереди должны быть пропущены в цикле.

Вероятность  $u_i$  того, что очередь в цикле опрашивается, определяется равенством

$$u_i = \frac{1}{1 + e^{-\lambda_i C}}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (11)$$

Равенства (10) и (11) дают систему уравнений для нахождения неизвестных  $C$  и  $u_1, \dots, u_N$ .

Далее представлен анализ системы с адаптивным опросом методом средних. Обозначим через  $v_i$  среднее время, которое сервер проводит у  $i$ -й очереди за цикл,  $i = \overline{1, N}$ . Полагаем, что за время простоя, когда все очереди должны быть пропущены, сервер уделяет каждой очереди в среднем  $\tau/N$  времени. Величина  $v_i$  определяется равенством

$$v_i = \rho_i C + g_i u_i + \frac{y\tau}{N}, \quad i = \overline{1, N}, \text{ где } y = \prod_{i=1}^N (1 - u_i).$$

Определим  $(i, j)$ -й период как сумму  $j$  последовательных времен посещения, начиная от  $i$ -й очереди. Среднее для этого периода определяется равенством,  $v_{i,j} = \sum_{n=i}^{i+j-1} v_n$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ .

Доля времени, которое занимает  $(i, j)$ -й период, есть величина

$$q_{i,j} = \frac{v_{i,j}}{C}, \quad i, j = \overline{1, N}.$$

Обозначим через  $L_{i,j}$  среднюю длину  $i$ -й очереди в произвольный момент посещения сервером  $j$ -й очереди,  $i, j = \overline{1, N}$ . Соответствующая безусловная средняя длина  $i$ -й очереди определяется как  $L_i = \sum_{n=1}^N q_{n,1} L_{i,n}$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

Поскольку дисциплина обслуживания является шлюзовой, значение  $L_{i,j}$  в случае  $i = j$  разлагается на сумму двух величин  $\bar{L}_i$  и  $\tilde{L}_{i,j}$ , где  $\bar{L}_i$  – среднее число заявок, которое осталось обслужить серверу в  $i$ -й очереди, начиная с произвольного момента ее обслуживания, а  $\tilde{L}_{i,j}$  – среднее число заявок, которое поступило в очередь  $Q_i$  за прошедшее время посещения сервером  $j$ -й очереди, и будет обслужено при следующем посещении. В случае  $i \neq j$  имеем  $L_{i,j} = \tilde{L}_{i,j}$ . Таким образом,  $L_{i,j} = \bar{L}_i q_{i,1} I_{\{i=j\}} + \tilde{L}_{i,j}$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ .

Соответствующая безусловная средняя длина  $i$ -й очереди в произвольный момент определяется равенством

$$L_i = \tilde{L}_i + \bar{L}_i q_{i,1} = \sum_{n=1}^N q_{n,1} \tilde{L}_{i,n} + \bar{L}_i q_{i,1}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (12)$$

Заявки, находящиеся в очереди в произвольный момент периода  $(i, j)$ , – это заявки, поступившие за прошедшее время этого периода, и заявки, поступив-

шие за предыдущий цикл, если очередь в нем не опрашивалась, то есть

$$\sum_{n=i}^{i+j-1} \frac{q_{n,1}}{q_{i,j}} \tilde{L}_{i,n} = \lambda_i \left( v_{i,j} + \frac{1 - u_i - y}{1 - \rho + \rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N g_m u_m \right), \quad i, j = \overline{1, N}.$$

Подстановкой  $j = N$  находим  $\tilde{L}_i = \lambda_i \left( v_{i,N} + \frac{1 - u_i - y}{1 - \rho + \rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N g_m u_m \right)$ .

Воспользовавшись формулой Литтла вычисляем средние длины очередей

$$L_i = (1 + \rho_i) \lambda_i \left( v_{i,N} + \frac{1 - u_i - y}{1 - \rho + \rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N g_m u_m \right), \quad i = \overline{1, N}.$$

Зная  $L_i$ , можно вычислить среднее время ожидания  $W_i = L_i / \lambda_i$  и выразить  $\bar{L}_i$  из уравнения 12.

В **разделе 3.3** описывается имитационная модель систем поллинга и ее возможности. Приводятся результаты численного исследования представленных моделей.

**Четвертая глава** посвящена новому варианту топологии ШБС - mesh-сети. В ней приведен краткий обзор литературы посвященной вопросам маршрутизации вообще и маршрутизации в беспроводных, в том числе mesh, сетях. В **разделе 4.1** дается краткий обзор стандарта IEEE 802.11s, особенности таких сетей и их преимущества. В **разделе 4.2** разъясняется ключевая роль механизмов маршрутизации при построении mesh-сетей, дается описание предложенного в стандарте протокола маршрутизации, а также описаны некоторые другие протоколы маршрутизации применимые в mesh-сетях. В **разделе 4.3** описаны возможности построенной имитационной модели mesh-сети, приведены полученные с ее помощью результаты моделирования. Дана оценка выявленных сильных и слабых сторон протоколов.

В **пятой главе** представлен программный комплекс, который объединяет в себе все разработанные и описанные в работе аналитические и имитационные модели. Комплекс состоит из трех блоков: графического пользовательского интерфейса; программных модулей аналитических моделей, реализованных на языке программирования Java; программных модулей имитационных моделей, которые выполняются в программной среде GPSS World.

Программный комплекс представлен в виде WBN.jar файла, является платформонезависимым и для своего запуска требует наличия установленной на компьютере java-машины. Если требуется провести имитационное моделиро-

вание, то необходима также установленная среда имитационного моделирования GPSS World. Далее, кратко изложим последовательность операций при работе с ним.

**Графический пользовательский интерфейс.** В первом окне пользовательского интерфейса программы выбирается тип топологии: канал точка-точка, сота или mesh-сеть. В следующем окне находится набор текстовых полей и выпадающих списков для задания конкретных параметров для данной топологии. После заполнения всех полей пользователь выбирает тип модели: аналитическая или имитационная. Заметим, что в случае mesh-сети строятся лишь аналитические модели. После выбора модели производится проверка корректности введенных параметров, и в случае, если все верно, комплекс передает управление следующему блоку.

**Блок программных модулей аналитических моделей** состоит из следующего набора моделей: канал точка-точка с механизмом управления DCF; канал точка-точка с механизмом управления НССА; канал точка-точка с механизмом управления РСФ; адаптивный поллинг; циклический поллинг.

Модель выбирается согласно выбранной топологии и механизму управления или дисциплине опроса, ей передаются входные параметры, заданные пользователем, и вычисляются ее характеристики. По окончании работы данного блока, характеристики модели сохраняются в файл “math.txt” в папке, в которой находится сама программа, содержимое файла также выводится на экран.

**Блок программных модулей имитационных моделей.** Блок включает в себя следующие модели: канал точка-точка с механизмом управления DCF; канал точка-точка с механизмом управления НССА; канал точка-точка с механизмом управления РСФ; поллинг; mesh-сеть.

Однако, в зависимости от входных параметров введенных пользователем, выбранная модель несколько модифицируется, и генерируется выходной текстовый файл “gpss.txt” с моделью на языке GPSS. Кроме этого, для mesh-сети формируется файл “topology.txt” с топологией сети. После этого пользователь должен выполнить описанный в модели эксперимент в среде имитационного моделирования GPSS World, используя команду “CONDUCT ex()”. По окончании выполнения эксперимента характеристики модели сохраняются в файл “sim.txt” в папке, в которой находится сама модель, содержимое файла также выводится на экран.

В **заключении** приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы. В **приложении** приведены акты о внедрении результатов диссертационной работы.

## Основные результаты и выводы

В диссертационной работе построены аналитические и имитационные модели канала точка-точка с различными механизмами управления в режиме насыщения и нормальной нагрузки. Разработан механизм адаптивного поллинга и модель адекватно его описывающая. Реализована имитационная модель mesh-сети под управлением протокола IEEE 802.11s с различными протоколами маршрутизации. Разработан программный комплекс исследования ШБС под управлением протокола IEEE 802.11.

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Разработаны аналитическая и имитационная модели канала точка-точка произвольной длины под управлением протокола IEEE 802.11 с распределенным или гибридным управлением в режиме насыщения и с распределенным управлением в режиме нормальной нагрузки с ограниченными очередями.
2. Исследована широкополосная беспроводная сеть под управлением протокола IEEE 802.11 с централизованным управлением с использованием аналитической и имитационной моделей системы адаптивного поллинга.
3. Проведен сравнительный анализ протоколов маршрутизации OLSR и HWMP в широкополосной беспроводной mesh-сети под управлением протокола IEEE 802.11s с использованием имитационного моделирования.
4. Разработан программный комплекс, объединяющий в себе все перечисленные модели, позволяющий провести аналитическое или имитационное моделирование сетей передачи информации под управлением протокола IEEE 802.11 с различными механизмами управления и топологиями.
5. Выводы, сделанные на основе результатов данной работы, а также разработанный в рамках выполнения работы программный комплекс нашли широкое применение при реализации проекта в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы”, а также при разработке программного обеспечения для оборудования широкополосных беспроводных региональных сетей, что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шпилев С.А. Пропускная способность широкополосного беспроводного канала точка-точка в режиме насыщения // Информационные технологии и системы (ИТиС'08). / Геленджик, 2008. С. 18-22.
2. Шпилев С.А. Проактивная маршрутизация в IEEE 802.11s mesh-сетях // Третья всероссийская молодежная научная конференция по проблемам управления (ВМКПУ-2008). / М., 2008. С. 295-296.
3. Шпилев С.А., Фахриев Д.Н. Анализ характеристик широкополосных беспроводных каналов, под управлением протокола IEEE 802.11 // Третья всероссийская молодежная научная конференция по проблемам управления (ВМКПУ-2008). / М., 2008. С. 289-290.
4. Фахриев Д.Н., Шпилев С.А. Анализ характеристик многокилометрового широкополосного беспроводного канала точка-точка с различными функциями управления // Информационные технологии и системы (ИТиС'08). / Геленджик, 2008. С. 39-44.
5. Фахриев Д.Н., Шпилев С.А. Эффект захвата в многокилометровом широкополосном беспроводном канале точка-точка // Международный семинар. Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети (DCCN-2008). / М.: ИППИ РАН, 2008. С. 17-28.
6. Вишневский В.М., Лаконцев Д.В., Сафонов А.А., Шпилев С.А. Mesh-сети стандарта IEEE 802.11s: технологии и реализация // Первая мила. 2008. № 2-3. С. 26-31.
7. Вишневский В.М., Лаконцев Д.В., Сафонов А.А., Шпилев С.А. IEEE 802.11s Mesh-сети. В ожидании стандарта IEEE 802.11s // Электроника. 2008. № 3. С. 98-107.
8. Ляхов А.И., Пустогаров И.А., Шпилев С.А. Многоканальные mesh-сети: анализ подходов и оценка производительности // Информационные процессы. 2008. Т. 8, № 3. С. 173-192.
9. Вишневский В.М., Лаконцев Д.В., Сафонов А.А., Шпилев С.А. Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s // Электроника. 2008. № 6. С. 64-69.
10. Вишневский В.М., Семенова О.В., Шпилев С.А. Метод анализа средних для адаптивного механизма опроса // Массовое обслуживание: потоки, системы, сети. Материалы международной научной конференции

"Математические методы повышения эффективности информационно-телекоммуникационных сетей". / Гродно, 2007. Вып. 19. С. 254-259.

11. Vishnevsky V.M., Gorodov P.V., Shpilev S.A. Performance analysis of RA-OLSR in IEEE 802.11s mesh networks // International Workshop. Proc. Of Distributed Computer and Communication Networks (DCCN-2007). / Moscow, 2007. Vol. 1. P. 85-90.
12. Вишневский В.М., Ляхов А.И., Шпилев С.А. Обеспечение качества обслуживания для видео потоков в режиме реального времени в mesh-сетях // 30-я конференция молодых ученых и специалистов ИППИ РАН "Информационные технологии и системы" (ИТиС'07). / М.: ИППИ РАН, 2007. С. 50-53.
13. Вишневский В.М., Лаконцев Д.В., Семенова О.В., Шпилев С.А. Модель системы поллинга для исследования широкополосных беспроводных сетей // Автоматика и телемеханика. 2006. № 12. С. 123-135.
14. Вишневский В.М., Лаконцев Д.В., Семенова О.В., Шпилев С.А. Об одной стохастической системе поллинга и ее применении для моделирования беспроводных сетей // Третья международная конференция по проблемам управления: Тезисы докладов. / М.: Институт проблем управления, 2006. Т. 2. С. 145.
15. Астафьева И.Н., Вишневский В.М., Лаконцев Д.В., Шпилев С.А. Адаптивный динамический механизм опроса, в применении к сетям IP телефонии // Международный семинар. Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети (DCCN-2006). / М.: Техносфера, 2006. С. 65-79.