

На правах рукописи

Якимов Михаил Юрьевич

Анализ механизмов повышения эффективности передачи информации в высокоскоростных локальных и городских беспроводных сетях

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2008

Работа выполнена в Институте проблем передачи информации  
им. А.А. Харкевича РАН

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Ляхов Андрей Игоревич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
академик РАН  
Кузнецов Николай Александрович  
кандидат технических наук,  
Винель Алексей Викторович

Ведущая организация: Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Защита состоится 10 июня 2008 г. в 15 часов на заседании диссертационного  
совета Д.212.156.04 при Московском физико-техническом институте (ГУ) по  
адресу: 141700, г.Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9, ауд.  
204 Нового корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Московского физико-технического института (ГУ).

Автореферат разослан 05 мая 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.212.156.04,  
кандидат технических наук, доцент

Л.П. Куклев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Последнее десятилетие характеризуется бурным развитием беспроводных сетей передачи информации. В первую очередь это относится к сетям локального и городского масштаба, где применение беспроводных технологий обеспечивает гибкость архитектуры сети, включая поддержку мобильности, быстроту проектирования и низкие затраты на реализацию. Рост числа пользователей беспроводных сетей, а также объёмов передаваемых данных обусловил появление новых высокоскоростных технологий. За десять лет скорость передачи в локальных и городских беспроводных сетях выросла с 1-2 Мбит/с до 50-70 Мбит/с. В скором времени ожидается появление устройств беспроводного доступа со скоростями до 500 Мбит/с. На сегодняшний день наиболее популярными технологиями построения высокоскоростных локальных и городских беспроводных сетей являются WiFi (стандарт IEEE 802.11) и WiMAX (стандарт IEEE 802.16).

Современные беспроводные протоколы должны обеспечивать не только высокоскоростную передачу данных, но и качественную доставку голосовой и видеоинформации в условиях наличия электромагнитных помех, неизбежных в локальных и городских беспроводных сетях. Под качеством понимается достижение определенных показателей производительности и надежности при передаче информации по беспроводной сети. В последних версиях стандартов беспроводных сетей появился ряд механизмов поддержки качества обслуживания. Однако, требуется детальное исследование эффективности этих механизмов, для чего необходимо разработать новые методы оценки производительности и надежности передачи данных. Проблемам оценки производительности сетей передачи информации на основе стохастических моделей посвящено значительное количество работ, среди которых следует отметить работы российских и зарубежных ученых: Г.П. Башарина, П.П.

Бочарова, О.М. Брехова, В.М. Вишневого, В.С. Жданова, В.А. Жожикашвили, Н.А. Кузнецова, О.Г. Мелентьева, А.В. Печинкина, В.К. Попкова, В.В. Рыкова, С.Н. Степанова, G. Balbo, S.C. Bruell, L. Fratta, L. Kleinrock, M. Olivetty, H. Takagi, S.C. Vorst, O.J. Voxma и др. Среди аналитических работ, посвященных исследованию протоколов IEEE 802.11 и IEEE 802.16 и оценке производительности построенных на их базе беспроводных сетей, наиболее значимыми являются работы А.В. Винеля, В.М. Вишневого, А.И. Ляхова, G. Bianchi, F. Cali, M. Conti, E. Gregory, Q. Ni. В большинстве этих работ производительность оценивается в предположении идеального канала.

В работах, учитывающих влияние помех, имеется ряд недостатков. В частности, работа различных механизмов беспроводного протокола (переключение скоростей, фрагментация пакетов и др.) в условиях помех анализируются разрозненно, т.е. не существует моделей, позволяющих проводить анализ совместного влияния этих механизмов на эффективность передачи информации по беспроводной сети. Следовательно, методы, предлагаемые в этих работах, невозможно напрямую использовать при оптимизации параметров протокола. Кроме того, одним из основных недостатков существующих протоколов беспроводных сетей является отсутствие средств поддержки качества передачи многоадресного трафика. В связи с этим необходимо создать механизм, обеспечивающий надежную многоадресную передачу в локальных и городских сетях, и разработать адекватную математическую модель этого механизма, позволяющую оптимизировать его работу с учетом требований к качеству обслуживания.

**Целью диссертационной работы** является разработка комплекса аналитических и имитационных моделей для анализа механизмов повышения эффективности передачи информации в высокоскоростных локальных и городских беспроводных сетях, а также исследование и оптимизация этих

механизмов с учетом влияния помех и требований, предъявляемых к качеству обслуживания.

**Задачами диссертационного исследования** являются:

1. Получение аналитических зависимостей вероятности искажения кадра от уровня помех;
2. Разработка метода совместной оптимизации скорости передачи и порога фрагментации;
3. Аналитическое исследование механизма переключения скоростей;
4. Изучение интерференции прямых соединений станций в сетях IEEE 802.11 и разработка механизмов избегания этой интерференции;
5. Разработка нового протокола надежной многоадресной передачи в беспроводной сети и его математической модели.

**Методы исследования.** Для достижения поставленной цели в диссертационной работе используются методы теории вероятностей, теории стохастических процессов, комбинаторного анализа, вычислительной математики, а также имитационного моделирования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методы полиномиально-логарифмической и экспоненциально-логарифмической аппроксимации вероятности искажения кадра;
2. Аналитическая модель обобщенного механизма переключения скорости передачи типа ARF (Auto-Rate Fallback);
3. Метод совместной оптимизации скорости передачи и механизма фрагментации;
4. Механизм защиты прямых соединений от интерференции в беспроводных сетях с протоколом IEEE 802.11;

5. Мультилидерный механизм многоадресной передачи;
6. Аналитическая модель мультилидерного механизма с фиксированными лидерами;
7. Аналитическая модель мультилидерного механизма со случайно выбираемыми лидерами.

### **Научная новизна:**

1. Разработаны новые методы полиномиально-логарифмической и экспоненциально-логарифмической аппроксимации зависимости вероятности искажения кадра от отношения сигнал/шум;
2. Разработана аналитическая модель обобщенного механизма переключения скорости передачи, основанного на автоматическом откате скорости;
3. Разработан метод совместной оптимизации скорости передачи и механизма фрагментации;
4. Предложен новый механизм работы прямых соединений в структурированных беспроводных сетях с протоколом IEEE 802.11, позволяющий избегать взаимной интерференции соединений;
5. Предложен новый механизм многоадресной передачи, основанный на выделении части получателей в качестве лидеров, ответственных за подтверждение многоадресных пакетов;
6. Разработаны аналитические модели мультилидерного механизма с различными схемами выбора лидеров.

**Практическая ценность и реализация результатов.** Результаты работы внедрены и используются на практике, что подтверждено соответствующими актами. Предложенные и изученные механизмы переключения скорости передачи, защиты прямых соединений и многоадресной передачи реализованы в радиомаршрутизаторе РЭС «Рапира», который был разработан ИППИ РАН в

рамках Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы по Государственному контракту № 02.477.11.1003 «Разработка технологии создания нового поколения широкополосных телекоммуникационных средств комплектации беспроводных систем передачи данных, голоса и информации».

Теоретические и практические результаты работы использованы при разработке НИР, проводимой ИППИ РАН, по программе Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН «Новые физические структурные решения в инфокоммуникациях».

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

- Международных семинарах «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети. Теория и приложения» (2003 г., 2007 г., Москва), (2006 г., София, Болгария);
- 4th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2007, Pisa, Italy);
- 3<sup>rd</sup> ACM International Workshop on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks (Q2SWinet 2007, Chania, Crete Island, Greece);
- Международных конференциях по проблемам управления (МКПУ-III 2006г., 2008г., Москва);
- Научных конференциях МФТИ в 2005 и 2007г. (Долгопрудный);
- Конференции молодых ученых и специалистов "Информационные технологии и системы" (ИТиС-2007, Звенигород);
- 4-th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC'07, Las Vegas, Nevada, USA);

- IX Международной научно-практической конференции "Проблемы функционирования информационных сетей" (ПФИС-2006, Новосибирск);
- Семинарах ИППИ РАН.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, список которых приведен в конце автореферата. Из них, 2 статьи [1, 2] опубликованы в рецензируемых научных журналах, один из которых утвержден в перечне ВАК, а остальные 13 работ опубликованы в трудах ведущих международных и российских научно-технических конференций.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 70 наименований, и приложения. Работа изложена на 158 страницах и содержит 64 рисунка и 9 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** рассмотрена структура и дано функциональное описание стандартов высокоскоростных беспроводных сетей IEEE 802.11 и IEEE 802.16. Оба этих стандарта регламентируют работу уровня управления доступом к среде и физического уровня устройств беспроводной сети. В частности, для протокола IEEE 802.11 фундаментальным механизмом доступа к беспроводной среде является режим распределенного управления, реализующий метод множественного доступа с контролем несущей и избеганием коллизий CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Прежде чем начать передачу, каждая станция сети, убедившись, что среда свободна,



выжидает в течение случайно выбираемого интервала отсрочки, который формируется из слотов постоянной длительности  $\sigma$ . Отсчет слотов отсрочки станция ведет только при свободном канале. Если счетчики двух и более станций одновременно достигли нулевого значения, происходит коллизия, длительность которой определяется кадром максимальной длины из числа вовлеченных в коллизию. Перед переходом в состояние отсрочки после передачи очередного кадра данных станция инициализирует счетчик слотов отсрочки некоторым начальным значением, равновероятно выбираемым из интервала целых чисел  $[0, \dots, CW]$ , где величина  $CW$  называется конкурентным окном (Contention Window). Если предыдущая передача прошла успешно, то конкурентное окно равно своему минимально возможному значению  $CW_{\min}$ . В противном случае, оно определяется числом  $k$  неудачных попыток передачи кадра, которое ограничено пределом  $K$ , и равно  $CW_k = (CW_{\min} + 1)2^k - 1$ , однако, не может быть больше некоторого значения  $CW_{\max} = (CW_{\min} + 1)2^m - 1$ . Если переданный кадр данных успешно принят станцией назначения, она по истечении интервала времени  $SIFS$  отправляет подтверждение успешной передачи – кадр ACK (Acknowledgement). После завершения попытки передачи очередного кадра данных станция переходит в состояние отсрочки спустя интервал  $DIFS$ , если попытка была успешной, или  $EIFS$  – при неудачной попытке.

Для защиты передачи длинных кадров данных от коллизий, в протоколе IEEE 802.11 может использоваться так называемый механизм RTS/CTS, при котором передача данных предваряется обменом короткими кадрами RTS и CTS.

Далее рассматриваются такие механизмы повышения эффективности передачи данных, как фрагментация пакетов, переключение скорости передачи, блочные передача и подтверждение, установление прямых соединений, а также

механизмы, направленные на обеспечение качества обслуживания (QoS – Quality of Service).

Отдельно даётся описание канального и физического уровней протокола IEEE 802.16, в котором организуется бесколлизийный регулируемый множественный доступ на основе механизма TDMA с временным (TDD) или частотным (FDD) дуплексированием для работы в сетях городского масштаба. Время работы сети с протоколом IEEE 802.16 разделено на суперкадры фиксированной длины  $T^{frame}$ , в пределах которых базовая станция выделяет слоты для передачи в соответствии со своими потребностями и запросами, принимаемыми от оконечных станций.

В последнем разделе главы проводится анализ существующих методов и алгоритмов оценки и повышения эффективности работы беспроводных сетей и ставятся задачи диссертации. Показано, что как существующие беспроводные протоколы, так и методы их исследования обладают существенными недостатками. В частности, протоколы не определяют механизм переключения скоростей и не обеспечивают надежную доставку многоадресных сообщений.

**Во второй главе** проведен анализ механизмов повышения эффективности передачи одноадресных сообщений.

В пункте 2.1 проведен анализ прямого метода нахождения зависимостей вероятностей искажения бита  $BER$  (Bit Error Rate) и кадра  $PER$  (Packet Error Rate) от отношения сигнал/шум  $SNR$  (Signal-to-Noise Ratio) в канале с АБГШ (Аддитивный Белый Гауссовский Шум), в результате которого показана неэффективность этого метода ввиду того, что он не является универсальным для всех типов модуляции и способов кодирования, применяемых в протоколах беспроводных сетей, имеет лишь оценочный характер и аналитически сложен, так как требует проведения большого количества вычислений. Далее предлагаются два новых метода, позволяющие в явном виде получить приближенные зависимости  $BER$  и  $PER$  от  $SNR$ . Метод полиномиально-

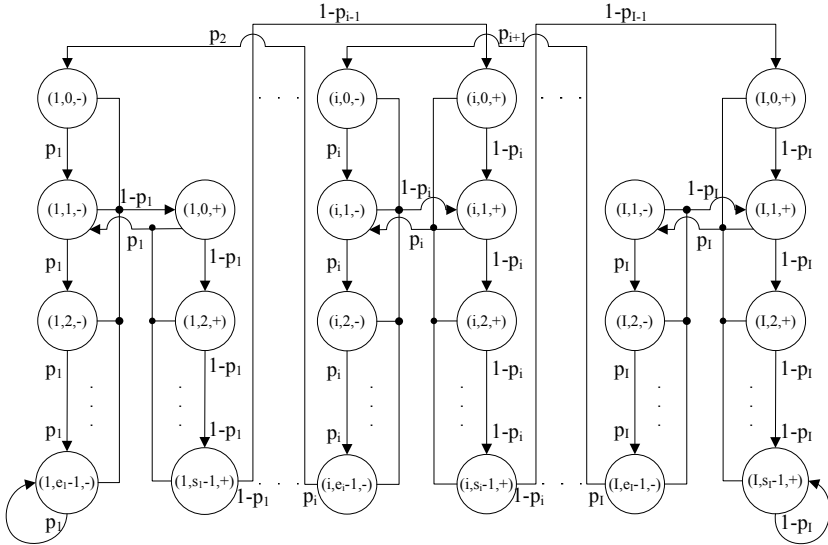
логарифмической аппроксимации основывается на том, что логарифмы  $BER$  хорошо приближаются полиномами  $S^{(i)}(SNR)$  по степеням отношения  $SNR$ , коэффициенты которых зависят только от типа модуляции и способа кодирования, используемых для передачи на  $i$ -ой битовой скорости. При этом для вероятности искажения кадра длины  $L$  Байт справедливо приближение:

$$PER = 1 - \left(1 - \exp\left(S^{(i)}(SNR)\right)\right)^{8L} \quad (1)$$

В методе экспоненциально-логарифмической аппроксимации логарифмы  $BER$ , а точнее функции  $-\ln(2BER)$ , аппроксимируются экспонентами вида  $\exp\left(\left(SNR - \beta^{(i)}\right)/\alpha^{(i)}\right)$ , где коэффициенты  $\alpha^{(i)}$  и  $\beta^{(i)}$  определяются только типом модуляции и способом кодирования при передаче на  $i$ -ой скорости. Таким образом, для вероятности искажения кадра длины  $L$  Байт справедливо:

$$PER = 1 - \left(1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\exp\left(\frac{SNR - \beta^{(i)}}{\alpha^{(i)}}\right)\right)\right)^{8L}. \quad (2)$$

В пункте 2.2 предложена аналитическая модель универсального механизма переключения скорости передачи, обобщающего правила выбора битовой скорости ARF. В частности, предполагается, что пороги  $s_i$  и  $e_i$  переключения скоростей по числу последовательных успешных и неудачных попыток передач могут выбираться произвольно для каждой  $i$ -ой битовой скорости передачи,  $i = 1, \dots, I$ . Показано, что процесс передачи кадра в присутствии механизма переключения скорости представим марковским процессом с дискретным временем, единицей которого является время выполнения попытки передачи кадра (Рис. 1).



**Рис. 1 Марковская цепь процесса передачи кадров**

Из любого состояния  $(i, j, \pm)$ , означающего, что на скорости  $i$  последовательно произошло  $j$  успешных «+» или неудачных «-» передач, возможно ровно два альтернативных перехода, соответствующих успеху (вероятность  $1 - p_i$ ) или неудаче (вероятность  $p_i$ ) очередной попытки передачи.

Для нахождения стационарных вероятностей  $R_{i,j}^{\pm}$  состояний  $(i, j, \pm)$ , марковская цепь преобразуется к упрощенному виду, представляющему собой процесс рождения-гибели с  $I$  состояниями, в котором состояние  $i$  со стационарной вероятностью  $R_i$  соответствует передаче станции на  $i$ -ой битовой скорости,  $\lambda_i$  – вероятность «рождения», т.е. увеличения битовой скорости, а  $\mu_i$  – вероятность «гибели», т.е. уменьшения битовой скорости. Стационарные вероятности состояний для упрощенной цепи равны:

$$R_1 = \frac{1}{1 + \sum_{k=2}^I \prod_{i=2}^k \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i}}, \quad R_i = R_1 \prod_{k=2}^i \frac{\lambda_{k-1}}{\mu_k}, \quad i = 2, \dots, I.$$

Вероятности переходов  $\lambda_i$  и  $\mu_i$  находятся с помощью уравнений баланса, записанных для исходной марковской цепи (Рис. 1), по формулам:

$$\lambda_i = \frac{p_i (1 - p_i)^{s_i}}{1 - (1 - p_i)^{s_i}}, \quad \mu_i = \frac{(1 - p_i) p_i^{e_i}}{1 - p_i^{e_i}},$$

а стационарные вероятности  $R_{i,j}^{\pm}$ , состояний исходной цепи Маркова:

$$R_{i,j}^+ = \frac{p_i (1 - p_i)^j}{1 - (1 - p_i)^{s_i}} R_i, \quad R_{i,j}^- = \frac{(1 - p_i) p_i^j}{1 - p_i^{e_i}} R_i, \quad j \neq 0$$

$$R_{i,0}^+ = \mu_i R_i, \quad i = 2, \dots, I, \quad R_{i,0}^- = \lambda_i R_i, \quad i = 1, \dots, I - 1.$$

Далее разрабатывается аналитическая модель оценки производительности и надежности передачи беспроводной сети типа Hot spot, состоящей из  $N$  станций и работающей по протоколу IEEE 802.11 в режиме DCF. Для анализа сети используется дискретная целочисленная временная шкала, моменты времени на которой соответствуют началам следующих друг за другом, так называемых *виртуальных слотов*. В начале виртуального слота каждая станция меняет значение своего счетчика отсрочки передачи согласно правилам протокола IEEE 802.11 и может приступить к очередной передаче кадра, если значение этого счетчика стало равным нулю.

Виртуальные слоты бывают 3-х типов: *Пустой слот* постоянной длительности  $\sigma$ , в котором ни одна из станций сети не передает, *успешный слот* со средней длительностью  $T_s$ , в котором начинает передачу только одна из станций сети, и *коллизийный слот* со средней длительностью  $T_c$ , в котором одновременно начинают передачу две или более станций сети. Как и в большинстве работ по анализу сетей IEEE 802.11, вводится допущение, что для

любой станции вероятность  $\tau$  начала передачи в произвольно выбранный виртуальный слот не зависит ни от предыстории, ни от текущих состояний других станций и одинакова для всех станций сети. Исходя из этого допущения, используя полученные стационарные вероятности  $R_i$  передачи станции на  $i$ -ой скорости, получены аналитические выражения для длительностей слотов  $T_s$ ,  $T_c$  и вероятностей  $p_e$ ,  $p_s$  и  $p_c$ , а также определено среднее количество информации  $U$ , передаваемое за успешный слот.

Выражение для пропускной способности сети имеет вид:

$$S_{ARF} = p_s U / (p_e \sigma + p_s T_s + p_c T_c). \quad (3)$$

Затем определяется вероятность  $\tau$  как отношение среднего числа попыток передачи кадра  $\bar{f}$  к общему числу виртуальных слотов, прошедших с момента начала передачи кадра до успешного её окончания или исчерпания всех попыток передачи  $K$ :

$$\tau = \bar{f} / (\bar{f} + \bar{w}), \quad (4)$$

где  $\bar{w}$  – среднее число слотов, в которых станция вынуждена отложить передачу текущего кадра. Средние  $\bar{f}$  и  $\bar{w}$  определяются с использованием стационарных вероятностей  $R_{i,j}^{\pm}$  и зависят от вероятностей неудачной попытки передачи кадра  $p_i$ . С другой стороны, вероятности  $p_i$  связаны с  $\tau$  по формуле:

$$p_i = 1 - (1 - P_i^{DATA})(1 - P_i^{ACK})(1 - \tau)^{N-1}, \quad i = 1, \dots, I \quad (5)$$

где  $P_i^{DATA}$  и  $P_i^{ACK}$  – вероятности искажения кадров данных и подтверждений вследствие воздействия шумовых помех. Уравнения (4) и (5) совместно составляют систему из  $I+1$  независимых уравнений относительно  $\tau$  и  $p_i$ , решение которой даёт значения соответствующих вероятностей для нахождения средней пропускной способности сети по формуле (3).

С использованием стационарных вероятностей  $R_{i,j}^{\pm}$  также предлагается способ нахождения вероятности потери пакета с данными  $\eta$ , являющейся показателем надежности передачи данных.

В конце пункта 2.2 эффективность исследуемого механизма оценивается путем сравнения производительности сети с данным механизмом и сети, работающей на идеально выбранной скорости, исследование которой проводится путем редуцирования разработанной аналитической модели к случаю работы только на этой скорости.

В пункте 2.3 решается задача совместной оптимизации скорости  $i$  передачи и порога фрагментации  $\hat{L}$  с точки зрения минимизации среднего времени передачи пакета в канале «точка-точка». Количество фрагментов  $n$ , составляющих пакет данных общей длиной  $L$ , и длина  $L_f$  каждого из фрагментов равны:  $n = \lceil L/\hat{L} \rceil$  и  $L_f = L/n$ . При известных вероятностях искажения фрагмента  $P_i(L_f)$  и кадра подтверждения  $P_i^{ACK}$  вероятность  $p$  неудачной попытки передачи фрагмента определяется по формуле:

$$p = 1 - (1 - P_i(L_f))(1 - P_i^{ACK}),$$

а вероятности отказа  $p_{rej}$  в передаче фрагмента и потери  $\eta$  всего пакета:

$$p_{rej} = p^K, \quad \eta = 1 - (1 - p_{rej})^n.$$

Далее с учетом особенностей протокола определяется среднее время  $T$ , затрачиваемое на передачу всех фрагментов пакета:

$$T = \frac{CW_{\min}}{2} + \frac{\eta}{p_{rej}} \hat{T} + (1 - \eta)(DIFS - SIFS),$$

где  $\hat{T} = (1 - p)\bar{f}T_{succ} + p\bar{f}T_{fail} + \bar{\omega}$ ,  $T_{succ}$  – время успешной передачи фрагмента,  $T_{fail}$  – время неудачной передачи фрагмента,  $\bar{\omega}$  – среднее число слотов

отсрочки при передаче одного фрагмента, а  $\bar{f} = (1 - p_{rej}) / (1 - p)$  – среднее количество попыток его передач. После этого, используя плотность распределения длин пакетов  $\Theta(L)$ , выражаются время передачи и вероятность потери пакета:

$$\bar{T}_i(\hat{L}) = \sum_L \Theta(L) \cdot T, \quad \bar{\eta} = \sum_L \Theta(L) \eta.$$

Проводя минимизацию времени  $\bar{T}_i(\hat{L})$  совокупно по порогу фрагментации и номеру скорости передачи, определяются оптимальный порог фрагментации  $\hat{L}_{opt} = \arg \min_{\hat{L}} \bar{T}_i(\hat{L})$ , оптимальная скорость передачи  $i_{opt} = \arg \min_i \bar{T}_i(\hat{L})$  и среднее время  $\bar{T}_{min} = \min_{i, \hat{L}} \bar{T}_i(\hat{L})$  передачи пакета при этих оптимальных параметрах.

В пункте 2.4 проведено имитационное моделирование передачи данных посредством прямых соединений (в обход базовой станции) для типовых вариантов расположения станций структурированной сети IEEE 802.11. Показано, что наличие интерференции прямых соединений приводит к существенно неравномерному распределению пропускной способности канала между ними. Проанализированы основные причины, приводящие к этому. Разработан новый механизм организации прямых соединений, и показана его эффективность путем имитационного моделирования.

**В третьей главе** проводится анализ производительности и надежности передачи многоадресных сообщений в локальных и городских беспроводных сетях. Как известно, существующие версии стандартов IEEE 802.11 и IEEE 802.16 не регламентируют механизм, обеспечивающий надежность доставки многоадресных пакетов. В связи с этим предлагается и исследуется новый мультилидерный протокол многоадресной передачи ELBP (Enhanced Leader-Based Protocol), позволяющий достигать оптимального баланса производительности и надежности передачи.



В пункте 3.1 описывается протокол ELBP, согласно которому после очередного блока многоадресных кадров с данными посылаются кадры запроса на подтверждение BAR (Block-ACK Request) по очереди определенной части получателей (лидерам), каждый из которых отвечает кадром В-ACK (Block-ACK), содержащим битовую маску подтверждений на кадры блока. Если хотя бы один из лидеров не подтвердил прием какого-либо кадра из блока, то такой кадр должен быть передан вновь в следующем блоке при условии, что не истекло время его жизни  $T_{\max}$ . В протоколе ELBP число лидеров  $J$  может быть меньше общего количества получателей  $N$ , а число кадров  $B$  в блоке – произвольным. Показывается, что путем регулирования параметров  $J$  и  $B$ , а также схемой выбора лидеров можно удовлетворить самые разнообразные QoS-требования, предъявляемые к надежности и производительности, включая максимально допустимую интенсивность потерь пакетов  $\eta^*$ , минимально допустимую пропускную способность  $S^*$  и максимально допустимую задержку передачи пакета  $T^*$ . Требование к задержке удовлетворяется путем установки  $T_{\max} \leq T^*$ , QoS-требования  $\eta^*$  и  $S^*$ , очевидно, выполняются для каждого получателя при условиях  $\eta^* \geq \eta_{\max} = \max_j \eta_j$  и  $S^* \leq S_{\min} = \min_j S_j$ , где  $\eta_j$  и  $S_j$  – интенсивность искажения кадров и пропускная способность для получателя  $j$ .

В пункте 3.2 проводится анализ работы протокола ELBP с фиксированными лидерами (F-ELBP), т.е. когда лидеры, будучи выбраны, не меняются длительное время. Особенностью протокола ELBP является автоматическое определение максимального количества попыток передачи кадра  $K$  на скорости  $i$  через время  $T_i$  между последовательными передачами блока кадров:  $K = \lceil T_{\max} / T_i \rceil$ . Для протокола F-ELBP формулируется и доказывается теорема, указывающая на оптимальную схему выбора лидеров.

**Теорема 1:** Для протокола многоадресной передачи F-ELBP с  $J \geq 1$  лидерами показатель максимальной интенсивности потерь пакетов  $\eta_{\max}$  минимален в случае, если у всех лидеров уровень помех (а значит и вероятности искажения кадра  $p_j$ ) выше, чем у остальных получателей.

Далее рассматривается работа F-ELBP с оптимальной схемой выбора лидеров. Все получатели нумеруются в порядке убывания значений вероятности искажения кадра. В общем виде определяются вероятности  $\pi_k$ , что все лидеры получили данный кадр именно после  $k$ -ой попытки и вероятности  $\tilde{\pi}_k$ , что не все лидеры получили кадр данных после  $k$ -ой попытки, а также среднее количество попыток передачи кадра  $\gamma_k$  с учетом ограничения  $K$  на их число. Затем определяются показатели работы протокола F-ELBP для каждого получателя:

$$\eta_j = \begin{cases} p_j^K, & 1 \leq j \leq J, \\ \sum_{k=1}^K (\pi_k p_j^k) + \tilde{\pi}_K p_j^K, & J < j \leq N, \end{cases} \quad S_j = \frac{8LB}{\gamma_k T_i} (1 - \eta_j),$$

где  $L$  – длина кадров в блоке. Показано, что предложенный метод анализа протокола F-ELBP универсален и годится для использования как для локальных сетей на базе протокола IEEE 802.11, так и для городских сетей с протоколом IEEE 802.16.

В пункте 3.3 проведен анализ выполнимости QoS-требований к надежности передачи и производительности. Показано, что необходимыми условиями для

этого являются  $T_i < \frac{T^*}{\lceil \ln \eta^* / \ln p_1 \rceil - 1}$  и  $T_i < \frac{8LB(1 - p_{J+1}^K)}{S^*(1 + p_1)}$ . Кроме того,

формулируется и доказывается теорема, позволяющая ограничить сверху множество получателей, из которого выбираются лидеры.

**Теорема 2:** При многоадресной передаче по протоколу F-ELBP у получателей,  $p_j$  которых меньше, чем

$$\tilde{p} = \sqrt{\left(\frac{(1-p_1)}{2p_1}\right)^2 + \eta^*/p_1} - (1-p_1)/2p_1, \quad \text{интенсивность потерь пакетов}$$

заведомо меньше  $\eta^*$ , и они не должны выбираться в качестве лидеров.

В пункте 3.4 проводится анализ модификации W-ELBP протокола многоадресной передачи, в которой лидеры выбираются из числа всех получателей в соответствии с их весовыми показателями  $w_i$  каждый раз перед посылкой очередного блока кадров данных. Как и в случае протокола F-ELBP, определяются вероятности  $\tilde{\pi}_k$ , а с помощью них – среднее количество попыток передачи кадра  $\gamma_k$ . Кроме того, определяются вероятности  $\rho_{h,k}$  окончания передачи пакета на  $k$ -ой попытке с неудачей для определенного получателя  $h$ . Интенсивности потерь пакетов для данного получателя находится путем суммирования этих вероятностей по всем возможным попыткам передачи

$$\eta_h = \sum_{k=1}^K \rho_{h,k}. \quad \text{Пропускная способность для каждого получателя находится по тем}$$

же формулам, что и при анализе протокола F-ELBP.

В заключение главы предлагается альтернативный метод анализа протокола W-ELBP для сетей с большим количеством получателей, основанный на разделении всех получателей многоадресного трафика по группам так, чтобы у получателей в каждой из этих групп интенсивности искажения кадров были практически равны. При этом, внутри одной группы весовые показатели для получателей принимаются равными. Такой подход может быть полезен при рассмотрении городских сетей, в которых пользователи располагаются компактными группами, например, в отдельных зданиях.

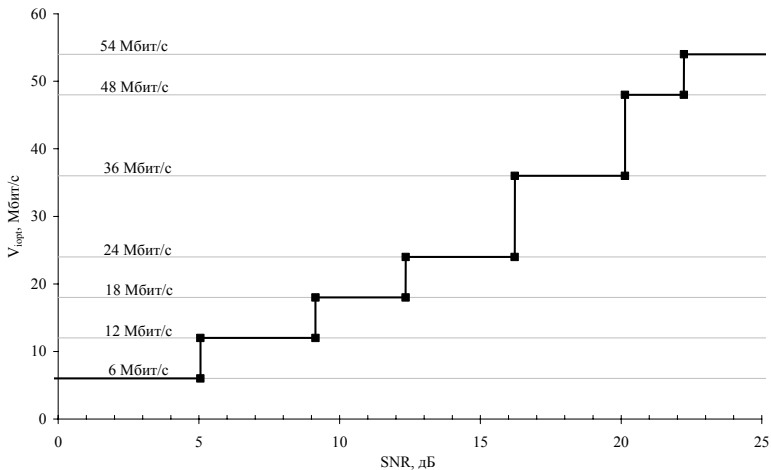
**В четвертой главе** получены и проанализированы результаты применения аналитических методов, разработанных в предыдущих главах.

В пункте 4.1 проведено имитационное моделирование работы физического уровня протокола IEEE 802.11a в канале связи с АБГШ. Найдены численные значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов  $S^{(i)}(SNR)$  первой и второй степени в формуле (1), а также коэффициентов  $\alpha^{(i)}$  и  $\beta^{(i)}$  в формуле (2). Путем сравнения с данными имитационного моделирования показано, что при использовании полиномов первой степени для расчетов по формуле (1) погрешность оценки  $PER$  составляет около 30%. Однако, для расчетов по формуле (1) с полиномами второй степени, а также для расчетов по формуле (2), та же погрешность не превосходит 5%, что говорит о хорошей точности предлагаемых способов аппроксимации.

В пункте 4.2 проведено сравнение результатов, полученных в пункте 2.2, с результатами имитационного моделирования на примере сети с протоколом IEEE 802.11a. Показано, что их отличие лежит в пределах 1%, что говорит о высокой точности разработанной математической модели. Проанализировано влияние алгоритма переключения скорости ARF при увеличении числа станций в сети на пропускную способность. Найдены наилучшие пороги переключения  $s_i$  и  $e_i$  для некоторых диапазонов значений числа станций в сети при различных показателях допустимого отклонения  $\alpha$  пропускной способности от её значения на оптимальной скорости. Показано, что при  $\alpha = 0.1$  наиболее эффективными являются схемы ARF с порогами  $s = 17; e = 4$  для диапазона  $N = [2; 3]$  и с порогами  $s = 12; e = 4$  для диапазона  $N = [3; 4]$ , а при  $\alpha = 0.25$  – схема ARF  $s = 7; e = 3$  для более широкого диапазона  $N = [2; 5]$ .

В пункте 4.3 путем программной реализации метода оптимизации предложенного в п. 2.3, найдены оптимальные значения битовой скорости передачи  $V_{i_{opt}}$  (Рис. 2) и порога фрагментации  $\hat{L}_{opt}$  в зависимости от отношения сигнал/шум в канале при работе в канале «точка-точка» по протоколу IEEE

802.11a. В процессе анализа полученных результатов выяснилось, что значения  $V_{i_{opt}}$  и  $\hat{L}_{opt}$  слабо зависят от вида распределения  $\Theta(L)$ , что говорит о потенциальной возможности применения данного метода при настройке беспроводного оборудования безотносительно к типу передаваемых данных. Также показано, что станция не должна передавать на скорости  $V_2 = 9$  Мбит/с и фрагментировать пакеты следует лишь при передаче на самых низких скоростях.

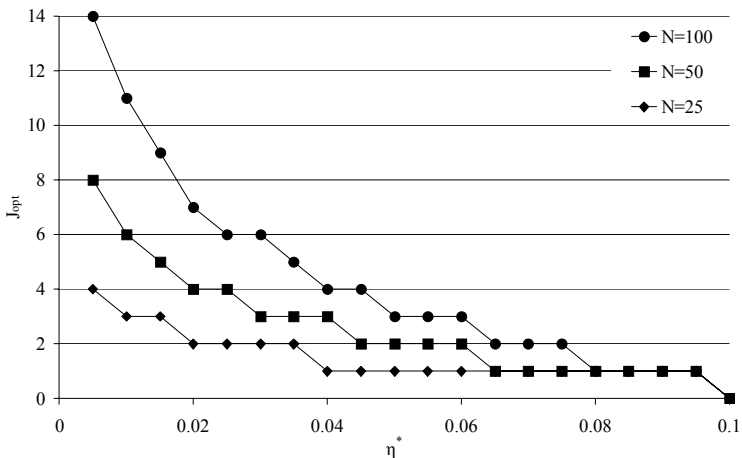


**Рис. 2** Оптимальная битовая скорость передачи в канале точка-точка

В пункте 4.4 на двух типовых примерах («Аудитория» и «Арена») беспроводной сети с протоколом IEEE 802.11 с большим (40 и 50 соответственно) числом получателей многоадресного трафика получены численные результаты расчёта по аналитической модели протокола F-ELBP из п. 3.2. Для обоих примеров найдены пары значений  $J$  и  $B$  ( $(J=3; B=9)$  и  $(J=4; B=9)$  соответственно) протокола F-ELBP, максимизирующие показатель пропускной способности при QoS-требованиях  $\eta^* = 0.08$  и  $T^* = 6667$  мкс. Кроме того, получены графики, в явном виде доказывающие превосходство предложенного

механизма F-ELBP над всеми известными протоколами многоадресной передачи.

Далее, на примере городской сети с протоколом IEEE 802.16 проведен анализ масштабируемости протокола F-ELBP. Получена зависимость (Рис. 3) оптимального (с точки зрения минимизации полосы, выделяемой под многоадресный поток данных в каждом суперкадре) числа лидеров  $J_{opt}$  от QoS-требования к интенсивности потерь пакетов  $\eta^*$  при  $T^{frame} = 5$  мс и  $T^* = 20$  мс.



**Рис. 3** Оптимальное число лидеров в сети из  $N$  получателей

Показано, что в протоколе F-ELBP даже при довольно большом числе получателей в сети и довольно жестких QoS-требованиях оптимальное число лидеров на порядок меньше общего количества получателей.

В последней части пункта 4.4 проводится исследование механизма W-ELBP в условиях сети с протоколом IEEE 802.16. С использованием альтернативной аналитической модели, разработанной в п. 3.4, для определенной топологии и QoS-требований найдены оптимальные (с точки зрения минимизации общего показателя интенсивности потерь  $\eta_{max}$  для конкретного числа  $J$ ) весовые показатели для всех групп станций сети. Далее, механизм W-ELBP с

оптимальными весовыми показателями сравнивается с механизмами W-ELBP с равновероятным выбором лидеров и F-ELBP при одинаковых условиях и QoS-требованиях. Показано, что механизму W-ELBP с оптимальными весовыми показателями необходимо меньше лидеров  $J$ , меньшее число  $B$  кадров в блоке и, следовательно, меньшая полоса, выделяемая под многоадресный поток, для выполнения определенных QoS-требований, чем остальным механизмам.

В **заключении** приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы.

В **приложении** приведены акты о внедрении результатов диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ основных механизмов повышения эффективности передачи в протоколах высокоскоростных локальных и городских беспроводных сетей IEEE 802.11 и IEEE 802.16;
2. Разработаны методы полиномиально-логарифмической и экспоненциально-логарифмической аппроксимации зависимости вероятности искажения кадра от отношения сигнал/шум. Показано, что эти методы обладают высокой точностью, что позволяет успешно использовать найденную с их помощью вероятность искажения кадра в аналитических моделях беспроводных сетей;
3. Разработана аналитическая модель обобщенного механизма переключения скорости передачи, основанного на автоматическом откате скорости. С помощью данной модели проведена оптимизация параметров механизма, исследована его эффективность при наличии коллизий и определено предельное число активных станций в сети, при котором данный механизм остается работоспособен;

4. Разработан метод совместной оптимизации скорости передачи и механизма фрагментации. В результате применения этого метода показано, что фрагментация эффективна только на относительно малых скоростях передачи;
5. На основе имитационного моделирования показано, что интерференция прямых соединений в структурированных сетях IEEE 802.11 приводит к существенно неравномерному распределению пропускной способности канала между соединениями. Для избегания этого эффекта разработан новый механизм работы прямых соединений, который был представлен на рассмотрение рабочей группы комитета IEEE;
6. Предложен новый механизм многоадресной передачи, основанный на использовании блочного подтверждения и выделении части получателей в качестве лидеров, ответственных за подтверждение многоадресных пакетов. Этот механизм также представлен на рассмотрение рабочей группы комитета IEEE. Разработаны аналитические модели мультилидерного механизма с различными схемами выбора лидеров. На основе этих моделей найдены значения параметров механизма, оптимальные для конкретных топологий сети и требований к качеству обслуживания.

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- [1] Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Якимов М.Ю. Оптимизация работы высокоскоростной беспроводной сети в условиях помех. // Электросвязь, 2007, №8, стр. 16-19.
- [2] V. Vishnevskiy, A. Safonov, M. Yakimov, E. Shim, Alexander Gelman "Scalable Blind Search and Broadcasting over Distributed Hash Tables", Journal on Computer Communications, Elsevier, vol. 31, is. 2, pp. 292-303, 2008.



- [3] A. Lyakhov, V. Vishnevsky and M. Yakimov. Multicast QoS Support in IEEE 802.11 WLANs. *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2007)*, Oct. 2007, Pisa, Italy.
- [4] A. Lyakhov, V. Vishnevsky, and M. Yakimov. 802.11 Reliable Multicast with Weighted Leaders. *Proceedings of the International Workshop "Distributed Computer and Communication Networks (DCCN-2007)"*. Moscow, Russia, vol.1. M.: VINITI, 2007, pp. 95-100.
- [5] A. Lyakhov, A. Safonov, M. Yakimov, A. Gudilov. Analysis of Direct Transmissions in IEEE 802.11 Networks. *Proceedings of the International Workshop "Distributed Computer and Communication Networks (DCCN-2007)"*. Moscow, Russia, vol.1. M.: VINITI, 2007, pp. 108-115.
- [6] A. Lyakhov, V. Vishnevsky, M. Yakimov. Multicast QoS support in IEEE 802.16. *Proceedings of the Third ACM International Workshop on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks (Q2SWinet'07)*, pp.63-70, Chania, Crete Island, Greece, Oct. 22, 2007.
- [7] Якимов М.Ю., Сафонов А.В. Обеспечение качества доставки многоадресных пакетов в WiFi сетях. // *Труды 50-й научной конференции МФТИ*, Долгопрудный, МО, Ноябрь 2007.
- [8] V. Vishnevsky, A. Lyakhov, M. Yakimov, S. Mo, A. Gelman. "An Efficient Packet Transmission Scheme for Millimeter Wave." *Proceedings of 4-th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC'07)*, FA2-L1, Las Vegas, Nevada, USA, Jan. 2007, pp. 7-11.
- [9] Якимов М.Ю., Сафонов А.В., Поддержка надежной многоадресной передачи в беспроводном протоколе IEEE 802.11. // *Труды конференции "Информационные технологии и системы" (ИТиС-2007)*, Звенигород, сентябрь 2007, с. 54-58.

- [10] В.М.Вишнеvский, А.И. Ляхов, А.А. Сафонов, М.Ю. Якимов, Распределенный MAC-уровень высокоскоростных беспроводных персональных сетей. // *Труды III Международной конференции по проблемам управления*, Москва, 20-22 июня 2006 г., т.2, с. 148.
- [11] В.М. Вишнеvский, А.И. Ляхов, М.Ю. Якимов, В.В. Лютов Справедливый доступ в беспроводных сетях типа "Hot Spot" // *Труды IX Международной научно-практической конференции "Проблемы функционирования информационных сетей" (ПФИС-2006)*, Новосибирск, 2006 г., с. 73-77.
- [12] V.M. Vishnevsky, A.I. Lyakhov, M.Yu. Yakimov, A.A. Safonov, D. Hahn, J.H. Sohn, D.H. Sim, S.H. Yang, "Reliable Multicast at MAC layer in IEEE 802.11," *Proc. Int. Workshop "Distributed Computer and Communication Networks" (DCCN-2006)*. Sofia, Bulgaria, October 30 - November 2, 2006, pp. 106-117.
- [13] А.И. Ляхов, Д.Н. Мацнев, М.Ю. Якимов, Адаптация протокола IEEE 802.11 к среде передачи. // *Труды международного семинара «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети. Теория и приложения» (DCCN-2003)*, М.: Техносфера, 2003, т. 2, с. 92-114.
- [14] М.Ю. Якимов, Адаптация работы протокола IEEE 802.11а в режиме распределенного управления к условиям беспроводной среды передачи. // *Труды 48-й научной конференции МФТИ*, Долгопрудный, МО, 2005.
- [15] И.В. Зарубинский, М.Ю. Якимов, Обзор механизмов автоматического переключения скорости передачи в ШБС. // *Труды III Международной конференции по проблемам управления*, Москва, 2008 г., с. 245-246.