

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 5 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 объемов 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 Borst, O J Vохта 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 сетей, 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),
- 3rd 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 σ . 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 $[0, CW]$, 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, блочная передача и подтверждение, установление прямых соединений, а также

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

Отдельно дается 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)

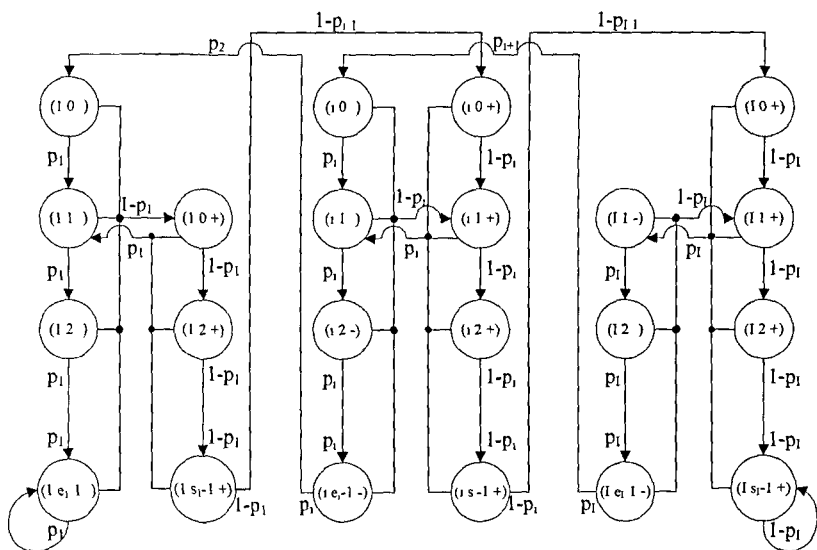


Рис. 1 Марковская цепь процесса передачи кадров

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^\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, λ_i – вероятность «рождения», т.е. увеличения битовой скорости, а μ_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 λ_i и μ_i находятся с помощью уравнений баланса, записанных для исходной марковской цепи (Рис 1), по формулам

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

а стационарные вероятности $R_{i,j}^*$, состояний исходной цепи Маркова

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

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

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 σ , 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 τ 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_s , p_i и p_c , а также определено среднее количество информации U , передаваемое за успешный слот.

Выражение для пропускной способности сети имеет вид

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

Затем определяется вероятность τ как отношение среднего числа попыток передачи кадра \bar{f} к общему числу виртуальных слотов, прошедших с момента начала передачи кадра до успешного ее 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^\pm , и зависят от вероятностей неудачной попытки передачи кадра p_i .

С другой стороны, вероятности p_i связаны с τ 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 τ и p_i , решение которой дает значения соответствующих вероятностей для нахождения средней пропускной способности сети по формуле (3).

С использованием стационарных вероятностей R_i^+ , также предлагается способ нахождения вероятности потери пакета с данными η , 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 v 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 η 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 $\hat{T} = (1 - p)\bar{f}T_{succ} + p\bar{f}T_{fail} + \bar{w}$, T_{succ} – время успешной передачи фрагмента, T_{fail} – время неудачной передачи фрагмента, \bar{w} – среднее число слотов

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

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

Проводя минимизацию времени $\bar{T}_i(\hat{L})$ совокупно по порогу фрагментации и номеру скорости передачи, определяются оптимальный порог фрагментации $\hat{L}_{opt} = \arg \min_{i, L} \bar{T}_i(\hat{L})$, оптимальная скорость передачи $i_{opt} = \arg \min_{i, L} \bar{T}_i(\hat{L})$ и среднее время $\bar{T}_{min} = \min_{i, L} \bar{T}_i(\hat{L})$ 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 B-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 η^* , минимально допустимую пропускную способность S^* и максимально допустимую задержку передачи пакета T^* . Требование к задержке удовлетворяется путем установки $T_{\max} \leq T^*$, QoS-требования η^* 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 η_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 v через время T , между последовательными передачами блока кадров $K = \lceil T_{\max} / T \rceil$

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 η_{\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 π_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 γ_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 $T_i < \frac{T^*}{\lceil \ln \eta^* / \ln p_i \rceil - 1}$ и $T_i < \frac{8LB(1 - p_{J+1}^K)}{S^*(1 + p_i)}$. 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_i которых меньше, чем

$\tilde{p} = \sqrt{\left(\frac{(1-p_i)}{2p_i}\right)^2 + \eta^*/p_i} - (1-p_i)/2p_i$, интенсивность потерь пакетов заведомо меньше η^* , 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 $\tilde{\pi}_i$, а с помощью них – среднее количество попыток передачи кадра γ_k . Кроме того, определяются вероятности ρ_{hk} 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

$\eta_h = \sum_{k=1}^K \rho_{hk}$ 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 α пропускной способности от ее 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.

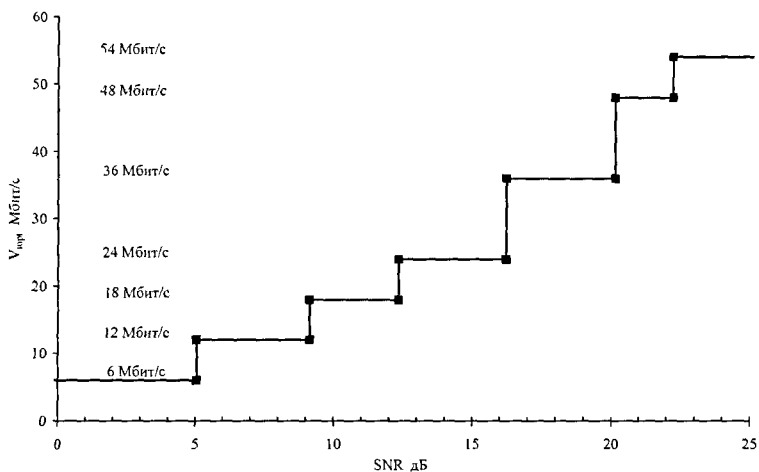


Рис. 2 Оптимальная битовая скорость передачи в канале точка-точка

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 расчета 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 η^* при $T^{frame} = 5$ мс и $T^* = 20$ мс.

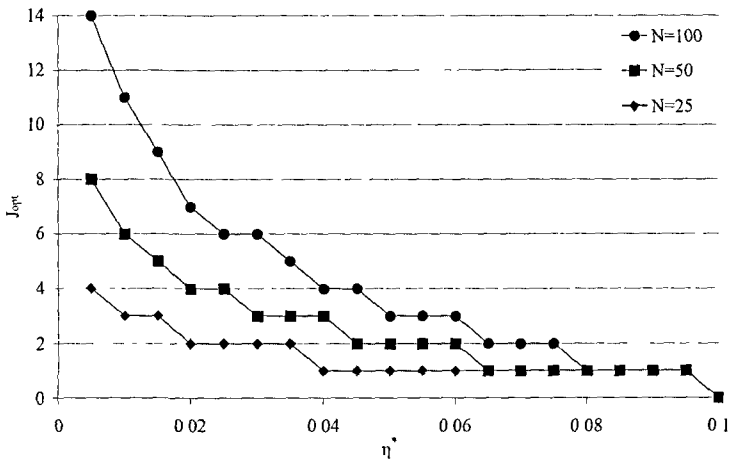


Рис. 3 Оптимальное число лидеров в сети из N получателей

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 η_{\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

Заказ № 251/04/08 Подписано в печать 04 05 2008 Тираж 100 экз Усл п л 1,5



ООО "Цифровичок", тел (495) 797-75-76, (495) 778-22-20
www.cfr.ru , e-mail info@cfr.ru