

На правах рукописи

Лукин Дмитрий Вадимович

**Аналитическое моделирование передачи данных
в высокоскоростных городских беспроводных сетях**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства
телекоммуникаций.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

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
Степанов Сергей Николаевич
ОАО «Интеллект Телеком»,
кандидат технических наук
Воробьев Владимир Михайлович
ЗАО НПФ "ИНСЕТ"

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники им.
В.А. Котельникова РАН, г. Москва.

Защита состоится 30 ноября 2010 г. в 15.00 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 «___» октября 2010 г.

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

Л.П. Куклев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние два десятилетия бурный рост вычислительной техники и компьютерного оборудования привели к стремительному развитию сетевых технологий. Основным направлением развития сетей в настоящее время является построение новых высокоскоростных беспроводных сетей, которые получают все большее и большее распространение, причем развитие получили не только беспроводные локальные сети (WLAN), но и городские беспроводные сети (Wireless Metropolitan Access Network, WirelessMAN).

Городские беспроводные сети призваны решить проблему последней мили, при этом обеспечивая высокую скорость передачи, сопоставимую с традиционными кабельными сетями, и допуская мобильность пользователей. Городские беспроводные сети характеризуются широкой зоной покрытия (километры или даже десятки километров), гибкостью архитектуры сети, быстротой проектирования и низкими затратами на развертывание сети. Именно эти возможности и делают городские беспроводные сети одним из наиболее перспективных направлений развития сетевых технологий.

Стандарт IEEE 802.16 является основой технологии широкополосной связи, рассчитанной на внедрение в городских беспроводных сетях. Стандарт IEEE 802.16 определяет общие правила передачи, не оговаривая при этом конкретные способы реализации предусмотренных стандартом механизмов и взаимодействия их между собой, таким образом, предоставляя широкие возможности для выработки алгоритмов и проверки их эффективности. Таким образом, требуется детальное исследование эффективности этих алгоритмов в сетях различной конфигурации и условиях динамически меняющихся потоков передаваемой информации. Проблемам оценки производительности сетей передачи информации на основе стохастических моделей и методам доступа

посвящено значительное количество работ, среди которых следует отметить работы российских и зарубежных ученых: Г.П. Башарина, О.М. Брехова, В.М. Вишневого, В.С. Жданова, В.А. Жожикашвили, Н.А. Кузнецова, А. П. Кулешова, О.Г. Мелентьева, А.В. Печинкина, В.К. Попкова, В.В. Рыкова, О. В. Семенову, С.Н. Степанова, М. Adamou, G. Balbo, S.C. Borst, О.Ј. Voxma, S.C. Bruell, L. Fratta, L. Kleinrock, M. Olivetty, H. Takagi и др. Среди аналитических работ, посвященных исследованию протокола 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, А.М. Тюрликова, D. Cho, С. Cicconetti, Q. Ni, J. Seo, D. Staehle, Y. Zhang.

Время работы централизованной сети под управлением протокола IEEE 802.16 делится на кадры. Каждый кадр состоит из восходящего и нисходящего подкадров, используемых для передачи восходящего (от оконечных станций к базовой станции) и нисходящего (от базовой станции к оконечным станциям) трафика. При передаче оконечной станцией (ОС) регулярного трафика базовая станция (БС) выделяет фиксированные интервалы в восходящем подкадре для передачи данных на постоянной основе. При динамически меняющемся трафике ОС информируют базовую станцию о необходимости выделения полосы пропускания в следующих кадрах с помощью отправки запросов полосы пропускания (ЗПП). Получая ЗПП и учитывая количество буферизованных данных восходящего и нисходящего трафика, БС выделяет время для передачи данных (полосу пропускания) в восходящем подкадре для оконечных станций. Временем регистрации пакета называется интервал времени с момента прихода пакета в очередь ОС до окончания кадра, в котором ЗПП был успешно принят БС. Таким образом, время обслуживания пакета, которое отсчитывается с момента прихода пакета в очередь ОС до получения подтверждения от БС о получении пакета, складывается из времени регистрации и времени передачи зарегистрированного пакета.

Большинство существующих аналитических работ были посвящены исследованию времени задержки на этапе регистрации пакетов данных и не рассматривали процесс обслуживания зарегистрированных пакетов. Следовательно, методы, предлагаемые в этих работах, невозможно напрямую использовать при оптимизации параметров протокола. Кроме того, в существующих работах не учитывается опциональный механизм по встраиванию запросов полосы пропускания в пакеты с данными, хотя этот механизм дает как значимую экономию используемой полосы пропускания, так и уменьшение время регистрации.

Таким образом, на данный момент не существует моделей, позволяющих проводить всесторонний анализ передачи пакетов данных и запросов полосы пропускания в городских беспроводных сетях под управлением протокола IEEE 802.16.

Целью диссертационной работы является разработка комплекса аналитических моделей для анализа механизмов передачи данных и запросов полосы пропускания в высокоскоростных городских беспроводных сетях стандарта IEEE 802.16, а также исследование эффективности этих механизмов с учетом особенностей конфигурации сети и входного трафика.

Задачами диссертационного исследования являются:

1. Разработка аналитической модели передачи запросов полосы пропускания путем конкурентного доступа;
2. Разработка аналитического метода оценки среднего времени обслуживания пакетов восходящего трафика;
3. Аналитическое исследование опционального механизма прикрепления запросов полосы пропускания к данным;

4. Исследование эффективности передачи пакетов в зависимости от особенностей физического уровня протокола IEEE 802.16.

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

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитическая модель передачи запросов полосы пропускания путем конкурентного доступа;
2. Аналитическая модель сети с прикреплением запросов полосы пропускания к данным;
3. Метод определения среднего времени обслуживания пакетов с учетом как собственно времени передачи пакета, так и времени резервирования полосы для его передачи.

Научная новизна: Впервые разработаны математические модели для анализа эффективности передачи пакетов данных и запросов полосы пропускания в городских беспроводных сетях стандарта IEEE 802.16 в режимах с прикреплением и без прикрепления запросов полосы пропускания к данным. Разработанные модели позволяют оценивать следующие вероятностные и временные показатели: средние времена регистрации и обслуживания пакетов, распределение длины очереди зарегистрированных пакетов, вероятность коллизии при отправке запроса полосы пропускания.

Практическая ценность и реализация результатов. Результаты работы внедрены и используются на практике, а также в учебном процессе на базовой

кафедре МФТИ (ГУ) в ИППИ РАН «Проблемы передачи и обработки информации», что подтверждено соответствующими актами. В частности, предложенные аналитические модели передачи данных и запросов полосы пропускания использованы при разработке НИР, проводимых ИППИ РАН, по программам Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН «Новые физические структурные решения в инфокоммуникациях» и «Фундаментальные проблемы разработки новых структурных решений и элементной базы в телекоммуникационных системах».

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

- Международный семинар «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети. Теория и приложения» (2007 г., Москва);
- Конференция молодых ученых и специалистов "Информационные технологии и системы" (ИТиС-2009, пос. Бекасово, МО);
- Научная конференция МФТИ (2005г., Долгопрудный, МО);
- Семинары ИППИ РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 58 наименований. Работа изложена на 101 странице и содержит 33 рисунка и 10 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 стандарта высокоскоростных городских беспроводных сетей IEEE 802.16, в частности рассмотрены различные механизмы уровня контроля доступа к среде передачи, призванные обеспечить требования качества обслуживания для различных видов трафика.

Особое внимание уделено механизму запроса полосы пропускания, согласно которому Оконечные Станции (ОС) информируют Базовую станцию (БС) о необходимости выделения полосы пропускания в последующих кадрах с помощью отправки запросов полосы пропускания (ЗПП). Получая ЗПП и учитывая количество буферизованных данных восходящего и нисходящего трафика, БС выделяет время для передачи данных (полосу пропускания) в восходящем подкадре каждой из ОС. В протоколе предусмотрены два основных метода отправки ЗПП: выделение отдельных слотов для отправки ЗПП или прикрепление ЗПП к данным. При этом БС может либо регулярно опрашивать отдельные ОС, периодически выделяя им отдельные слоты для отправки ЗПП, либо организовывать интервал конкурентного доступа в каждом восходящем кадре.

Активными станциями считаются ОС, для которых выделено время для передачи данных. Стандарт предоставляет опциональный механизм для активных станций по встраиванию ЗПП в пакеты с данными в восходящем канале. Данный механизм называется передачей ЗПП с прикреплением (piggy-backing).

Неактивные станции (станции, для которых не выделено времени для передачи данных), но имеющие пакеты с данными в очереди для передачи, передают ЗПП либо в ходе регулярного одноадресного опроса оконечных станций базовой станцией, либо методом конкурентного доступа. Далее в работе рассматривается конкурентный метод доступа для неактивных ОС. При конкурентном доступе для организации доступа группы абонентов к общему каналу связи применяются алгоритмы случайного множественного доступа (СМД). В сети IEEE 802.16 БС определяет временные интервалы, в которые ОС могут передавать ЗПП с использованием алгоритма СМД. Каждый восходящий подкадр работы сети содержит один такой интервал, состоящий из K слотов, причем K не меняется в процессе передачи. За время одного слота возможна передача ровно одного ЗПП.

Стандартизованным в IEEE 802.16 алгоритмом СМД, применяемым ОС в интервале конкурентного доступа для передачи ЗПП, является “двоичный экспоненциальный откат” (Binary Exponential Backoff, ВЕВ). При поступлении пакета данных ОС начинает действовать по алгоритму ВЕВ для передачи ЗПП по восходящему каналу.

При выполнении этого алгоритма ОС сначала равновероятно выбирает кадр (в пределах текущего окна разрешения конфликтов W_i , зависящего от числа i неудачных попыток передачи текущего ЗПП) для передачи ЗПП, а затем также равновероятно – слот из K возможных. После каждой неудачной передачи ЗПП ввиду коллизии в выбранном слоте ОС спустя тайм-аут T_{pi} , необходимый для обнаружения неудачи, удваивает окно до тех пор, пока оно не достигнет максимума W_M , т.е. максимальной стадии M разрешения конфликта.

В последнем разделе первой главы проводится анализ существующих методов оценки среднего времени обслуживания пакетов и ставятся задачи диссертации. В частности, показано, что существующие методы оценки

обладают существенными недостатками, так как нацелены в основном на оценку времени регистрации и не принимают во внимание собственно времени обслуживания зарегистрированных пакетов; в дополнении к этому требуется учитывать возможность прикрепления ЗПП к данным, а также специфику физической реализации сетей стандарта IEEE 802.16.

Во второй главе разработана базовая аналитическая модель передачи пакетов в сети стандарта IEEE 802.16, которая учитывает как передачу ЗПП с применением алгоритма ВЕВ, так и передачу пакетов данных.

Время обслуживания пакета складывается из времени регистрации (от момента прихода пакета в очередь ОС до момента регистрации) и собственно времени передачи зарегистрированных пакетов, которое называется временем отправки пакета. В этой главе исследование проведено в предположении, что пакеты поступают в очередь к каждой из N ОС по закону Пуассона с интенсивностью λ .

Среднее время обслуживания пакета T_{serv} равно

$$T_{serv} = T_{reg} + T_{send} = T_{reg} + \frac{L_Q}{N\lambda},$$
 где L_Q – средняя длина суммарной очереди зарегистрированных пакетов, а T_{reg} и T_{send} – средние времена регистрации и отправки пакетов.

Далее рассматривается система массового обслуживания, описывающая процесс изменения суммарного числа зарегистрированных пакетов всех ОС, на вход которой подается поток интенсивности $N\lambda$.

В момент t_ν окончания кадра ν число пакетов в системе претерпевает скачок за счет удаления обслуженных пакетов. Далее на обслуживание выбираются следующие S пакетов, которые покинут систему в конце следующего кадра $\nu+1$ по приходу к ОС подтверждения (ACK) от БС о

получении пакетов. Для того чтобы в момент t_{v+1} в системе осталось j пакетов при условии, что в момент t_v было $i \geq S$ пакетов, необходимо, чтобы за интервал времени (t_v, t_{v+1}) в систему поступило $j - i + S$ пакетов. Если в момент t_v число пакетов в системе $i(t_v)$ меньше S , то все эти пакеты будут переданы к моменту t_{v+1} , а вновь пришедшие пакеты будут ожидать начала следующего кадра для начала обслуживания.

Следовательно, все ненулевые элементы матрицы одношаговых переходов определяются следующим образом:

$$\begin{cases} p_{i,j} = f_j, 0 \leq i < S, j \geq 0 \\ p_{i,j} = f_{j-i+S}, i \geq S, j \geq i - S \end{cases},$$

где f_k - вероятность поступления в систему k пакетов за кадр.

Далее записывается уравнение глобального баланса и уравнение нормировки:

$$\begin{cases} \pi_j = f_j \sum_{i=0}^{S-1} \pi_i + \sum_{i=S}^{S+j} \pi_i f_{j-i+S} \quad j \geq 0 \\ \sum_{j=0}^{\infty} \pi_j = 1 \end{cases},$$

где π_j - стационарная вероятность нахождения в системе j пакетов.

Решение данной системы уравнений позволяет определить среднюю длину

очереди $L_Q = \sum_{j=0}^{\infty} j \pi_j$.

В следующем пункте 2.3 рассматривается передача запросов полосы пропускания путем конкурентного доступа. Для описания этого процесса вводится модель, в которой состояние станции к началу t -го кадра определяется

двумя величинами: этапом $s(t) = 0, \dots, M$ разрешения конфликтов i , характеризуемым текущим размером окна W_i и соответствующим (при $i < M$) числу неудачных попыток отправить текущий ЗПП, и величиной $r(t)$, либо (при $r(t) \geq 0$) равной количеству кадров до попытки отправки ЗПП, либо (при $r(t) < 0$) соответствующей счетчику таймаута T_{rt} . Началом этапа разрешения конфликта является начало кадра, следующего за T_{rt} кадров ожидания после отправки ЗПП на предыдущем этапе разрешения конфликта. В случае успешной передачи ЗПП концом этапа является начало кадра, в котором выделена полоса пропускания для отправки пакетов данных для данной ОС. После успешной передачи ЗПП станция переходит либо на нулевой этап, если в течение следующего кадра в ее очередь поступил новый пакет, либо в состояние простоя I . ОС переходит из состояния I на нулевой этап при поступлении нового пакета. Так как времена прихода пакетов распределены по закону Пуассона, то вероятность выхода станции из состояния I равна $1 - e^{-\lambda}$.

Поведение ОС рассматривается как двумерный случайный процесс $\{s(t) = i, r(t) = k\} \cup \{I\}$ с дискретным временем, единицей которого является кадр.

Переходные вероятности этого процесса, описываемого цепью Маркова на рис. 1, определяются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{ll} P\{0, k | I\} = (1 - e^{-\lambda}) / W_0, & k \in (0, W_0 - 1), \\ P\{i, k | i, k + 1\} = 1, & k \in (-T_{rt}, W_i - 2), k \neq -1, i \in (0, M), \\ P\{I | i, 0\} = (1 - p_c) e^{-\lambda}, & i \in (0, M), \\ P\{0, k | i, 0\} = (1 - p_c) (1 - e^{-\lambda}) / W_0, & k \in (0, W_0 - 1), i \in (0, M), \\ P\{i, -1 | i, 0\} = p_c, & i \in (0, M), \\ P\{j, k | i - 1, -T_{rt}\} = 1 / W_i, & k \in (0, W_i - 1), i \in (0, M - 1), \\ P\{M, k | M, -T_{rt}\} = 1 / W_M, & k \in (0, W_M - 1). \end{array} \right.$$

где p_c - вероятность коллизии при попытке передачи ЗПП.

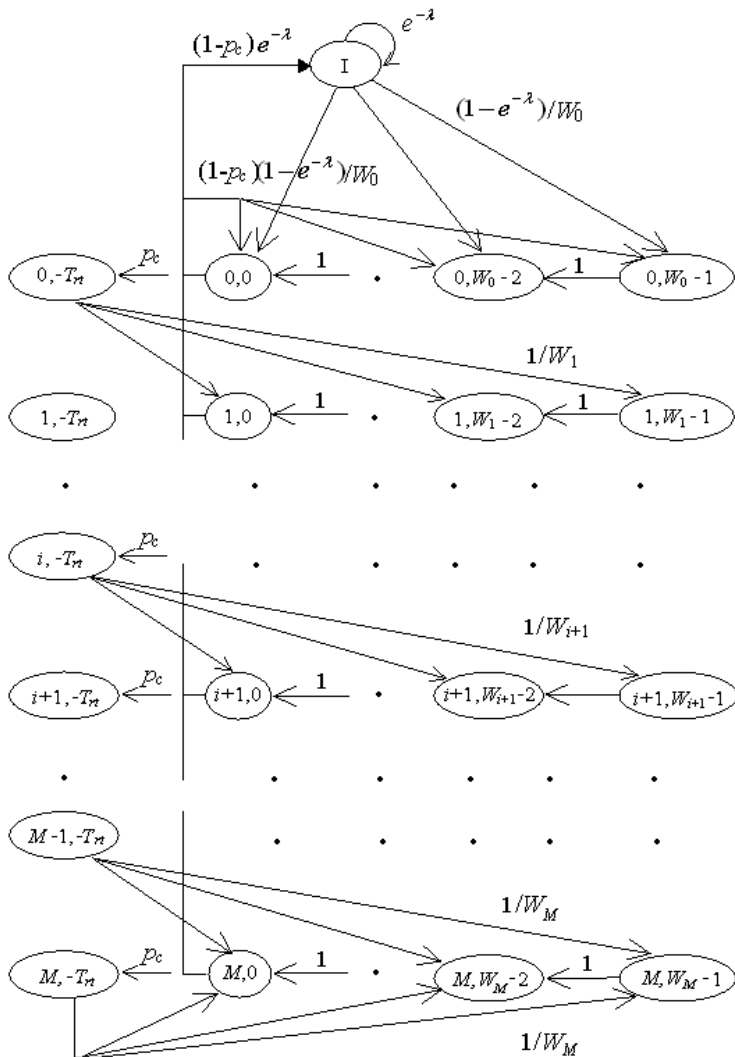


Рис. 1. Цепь Маркова для алгоритма двоичного экспоненциального отката для случая без прикреплений.

На основе переходных вероятностей и условия нормировки

$$1 = P\{I\} + \sum_{i=0}^M \sum_{k=-T_r}^{W_i-1} b_{i,k}, \text{ где } b_{i,k} - \text{ стационарная вероятность состояния } (i,k), \text{ после}$$

преобразований получается следующее выражение $b_{0,0}$ через p_c :

$$b_{0,0} = \left[\frac{(1 - 2p_c)(1 + W_0 + 2p_c T_r) + pW_0(1 - (2p_c)^M)}{2 \cdot (1 - 2p_c) \cdot (1 - p_c)} + \frac{e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} \right]^{-1}.$$

Далее определяется вероятность τ того, что станция отправляет ЗПП в произвольно выбранном слоте в данном кадре. Передача ЗПП производится при счетчике ожидания отправки, равном 0, вне зависимости от этапа разрешения конфликтов, поэтому вероятность того, что для передачи выбран данный кадр,

$$\text{равна } \tau_{fr} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1 - p_c}.$$

Поскольку внутри кадра слоты для отправки ЗПП выбираются равновероятно, а общее их число равно K , то вероятность выбора произвольно взятого слота в произвольно выбранном кадре равна

$$\tau = K^{-1} \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{(1 - p_c)K}.$$

Коллизия при передаче ЗПП происходит, если хотя бы одна из оставшихся $N-1$ станций также выбрала данный слот для отправки ЗПП, т.е. вероятность коллизии равна

$$p_c = 1 - [1 - \tau]^{N-1} = 1 - \left[1 - \frac{b_{0,0}}{(1 - p_c)K} \right]^{N-1}.$$

Таким образом, получается система из двух уравнений, решение которой определяют $b_{0,0}$ и p_c .

Среднее время регистрации T_{reg} равно отношению $E\{g(x, j)\}$ математического ожидания суммарного времени регистрации g пакетами, запросы полосы для которых передаются одним ЗПП, и $E\{n(x, j)\}$ математического ожидания количества n таких пакетов, где длина первого кадра равна x ($x \in (0, 1]$), а число целых кадров равно j , т.е. $T_{reg} = \frac{E\{g(x, j)\}}{E\{n(x, j)\}}$.

Далее в главе показано, что $E\{n(x, j)\} = 2 - \lambda \frac{e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} + \lambda \Omega'(1)$ и

$$E\{g(x, j)\} = \frac{2}{\lambda} - \frac{e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} \left(\frac{\lambda}{2} + 2 \right) + \left(2 - \lambda \frac{e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} + \frac{\lambda}{2} \right) \Omega'(1) + \frac{\lambda}{2} \Omega''(1),$$

где $\Omega(z)$ – производящая функция времени передачи ЗПП, равная

$$\Omega(z) = (1 - p_c) z^{-1 T_n} \left[\sum_{l=0}^M p_c^{l-1} \prod_{i=1}^l \Psi_i(z) + \frac{p_c^M}{1 - p_c \Psi_{M+1}(z)} \prod_{i=1}^{M+1} \Psi_i(z) \right],$$

а функция $\Psi_i(z)$ производящая функция длительности i -ой попытки передачи определяется как

$$\Psi_i(z) = \frac{1}{W_{i-1}} \sum_{j=1}^{W_{i-1}} z^{j+T_n}.$$

Таким образом, из построенной аналитической модели конкурентного доступа находится среднее время регистрации пакета.

Для решения системы уравнений из пункта 2.2 требуется определить вероятности f_k регистрации k пакетов за произвольно выбранный кадр всеми станциями. В работе показывается, что производящая функция $\theta(z)$ числа пакетов, запросы полосы для которых были успешно переданы в данном ЗПП,

равняется $\theta(z) = \frac{ze^{-\lambda+\lambda z}}{1-e^{-\lambda}} \Omega(e^{-\lambda+\lambda z})$, а вероятность, того что l станций из N попытаются передать ЗПП в данном кадре определяется по формуле Бернулли:

$$P_{tr}(l) = C_N^l \tau_{fr}^l (1 - \tau_{fr})^{N-l}.$$

Вероятность $P_{s_tr}(k|l)$ успешной передачи k ЗПП при условии, что l ЗПП

передавалось, равняется $P_{s_tr}(k|l) = \sum_{v=k}^{l-k} C_K^{v+k} \cdot C_{v+k}^k \cdot V(v, l-k)$,

где $\lfloor \frac{l-k}{2} \rfloor$ – означает наибольшее целое число, не превышающее $\frac{l-k}{2}$,

$$V(v, x) = 1 - v^{-x} \left(\sum_{y=1}^{v-1} C_y^v V(y, x) + \sum_{u=1}^{v-1} C_u^v \frac{x!}{(x-u)!} \sum_{y=1}^{v-1} C_y^{v-u} V(y, x-u) \right)$$

– число способов разместить x ЗПП по v слотам так, чтобы в каждом оказалось не меньше двух ЗПП.

Следовательно, вероятность μ успешных передач ЗПП в одном кадре

$$\text{равна } P_{s_tr}(\mu) = \sum_{l=\mu}^N P_{s_tr}(\mu|l) \cdot P_{tr}(l)$$

Пусть $p_{s_tr}(s)$ – производящая функция распределения $\{P_{s_tr}(\mu)\}$. Тогда, предполагая, что количества пакетов, запросы полосы для которых передаются в ЗПП разными станциями, одинаково распределены и независимы друг от друга, находится производящая функция $p_{s_tr}(\theta(s))$ распределения суммарного числа пакетов, зарегистрированных в данном кадре всеми станциями.

Таким образом, получены вероятности

$$f_k = \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k p_{s_tr}(\theta(s))}{ds^k} \right|_{s=0}$$

регистрации k пакетов в одном кадре, которые необходимы для нахождения среднего суммарного числа зарегистрированных пакетов L_Q и среднего времени отправки T_{send} . Определяя среднее время регистрации T_{reg} и среднее время отправки T_{send} , получаем среднее время обслуживания пакета T_{serv} .

Таким образом, разработанная в этой главе аналитическая модель позволяет определить среднее время обслуживания пакетов в сети с отсутствием прикреплений ЗПП к данным.

В третьей главе проводится анализ опционального механизма по встраиванию ЗПП для активных станций в пакеты с данными. Данный механизм позволяет существенно сократить время регистрации пакетов, поступающих к активным станциям, а также дает значимую экономию использования полосы пропускания за счет меньших накладных расходов для передачи ЗПП и при нагрузженности сети более 20-30% (а именно этот случай и интересен с практической точки зрения) начинает оказывать значительный эффект на отправку ЗПП, замещая конкурентный доступ по мере роста нагрузженности сети

Пакеты, поступающие к активным станциям, регистрируются посредством прикрепления ЗПП к данным и помещаются в очередь зарегистрированных пакетов в начале следующего кадра. Пакеты, поступающие к неактивным станциям, регистрируются посредством механизма конкурентного доступа.

Пусть T_{BEB} и $\Delta\tau$ – средние времена регистрации для пакетов, поступающих в очередь неактивной и активной станции соответственно. Пусть P_0 - вероятность нулевого числа зарегистрированных пакетов у станции в конце кадра, т.е. вероятность того, что она неактивна. Тогда среднее время регистрации определяется следующим образом:

$$T_{reg} = (1 - P_0)\Delta\tau + P_0T_{BEB}.$$

Поскольку пакеты поступают в очередь к каждой из N ОС по закону Пуассона с интенсивностью λ то, $\Delta\tau = [1 - \exp(-\lambda)]^{-1} - \lambda^{-1}$, а на основе формулы Литтла находится среднее время отправки пакета $T_{send} = \frac{L_Q}{N\lambda}$, где L_Q – средняя длина суммарной очереди зарегистрированных пакетов.

Следовательно, среднее время обслуживания пакета равняется

$$T_{serv} = (1 - P_0)\Delta\tau + P_0 T_{BEB} + \frac{L_Q}{N\lambda}.$$

Далее в пункте 3.2 рассматривается система массового обслуживания, описывающая процесс изменения суммы длин очередей зарегистрированных пакетов всех ОС, по аналогии с пунктом 2.2.

Зарегистрированные пакеты поступают на обслуживание двумя способами: посредством прикрепления ЗПП к данным для активных станций и из фазы конкурентного доступа для неактивных станций, и распределение вероятности прихода k зарегистрированных пакетов при условии, что m фиксированных станций активны, имеет вид $f(k, m) = f_{puass}(k, m) \otimes f_{BEB}(k, N - m)$, т.е. $f(k, m), k = 0, \dots$, – свертка двух распределений: распределения вероятностей $f_{puass}(k, m) = \frac{(m\lambda)^k}{k!} e^{-m\lambda}$ прихода k заявок за кадр при пуассоновском потоке с интенсивностью $m\lambda$, что соответствует поступлению новых пакетов в очереди активных станций, и распределения $f_{BEB}(k, N - m)$, соответствующего поступлению пакетов из фазы конкурентного доступа при $N - m$ неактивных станциях, которое определяется далее в разделе 3.3.

Распределение числа активных станций m зависит от длины очереди i . В работе выводится, что вероятность $\varphi(m | i)$ того, что ровно m станций являются активными при наличии i пакетов во всех очередях ОС, равняется:

$$\varphi(m|i) = C_N^m \sum_{l=1}^m (-1)^l C_m^l \left[\frac{m-l}{N} \right]^i, m \leq i, m \leq N,$$

а вероятность прихода k пакетов при наличии i пакетов в очереди равна

$$G(k,i) = \sum_{m=\min(1,i)}^{\min(N,i)} \varphi(m|i) f(k,m).$$

На основе этой вероятности определяются все ненулевые элементы матрицы одношаговых переходов между состояниями:

$$\begin{cases} p_{i,j} = G(j,i), 0 \leq i < S, j \geq 0, \\ p_{i,j} = G(j-i+S,i), i \geq S, j \geq i-S. \end{cases}$$

Далее записываются уравнения равновесия и уравнение нормировки для стационарных вероятностей для получения системы уравнений относительно π_j :

$$\begin{cases} \pi_j = \sum_{i=0}^{S-1} \pi_i G(j,i) + \sum_{i=S}^{S+j} \pi_i G(j-i+S,i), j \geq 0, \\ \sum_{j=0}^{\infty} \pi_j = 1. \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений позволяет определить среднюю длину

очереди $L_Q = \sum_{j=0}^{\infty} j \pi_j$ и вероятность P_0 отсутствия зарегистрированных пакетов

у данной станции в конце произвольно выбранного кадра

$$P_0 = \sum_{j=0}^{\infty} p(0|j) \pi_j = \pi_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\min\{j,N\}} \frac{(N-m) \varphi(m|j) \pi_j}{N}.$$

Таким образом, получены аналитические выражения для расчета L_Q и P_0 .

Однако, для их нахождения необходимо определить распределение пакетов,

регистрирующихся методом конкурентного доступа, $f_{BEB}(k, N - m)$, которое выводится в следующем разделе 3.3.

Для описания конкурентного доступа с учетом возможности прикрепления ЗПП к данным в модель без прикреплений, описанную в разделе 2.3, вводится новое состояние A , которое описывает нахождение станции в активном состоянии и прикрепление ЗПП к пакетам с данными. Станция переходит в активное состояние A после успешной передачи ЗПП. При отсутствии пакетов для передачи к началу восходящего кадра станция переходит в состояние простоя I . ОС переходит из состояния I на нулевой этап разрешения конфликтов при поступлении нового пакета.

Таким образом, поведение ОС рассматривается как двумерный случайный процесс $\{s(t) = i, r(t) = k\} \cup \{A\} \cup \{I\}$ с дискретным временем, единицей которого является кадр. Переходные вероятности этого процесса, описываемого цепью Маркова, определяются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} P\{I | A\} = x, \\ P\{0, k | I\} = (1 - e^{-\lambda}) / W_0, \quad k \in (0, W_0 - 1), \\ P\{i, k | i, k + 1\} = 1, \quad k \in (-T_{rt}, W_i - 2), k \neq -1, i \in (0, M), \\ P\{A | i, 0\} = 1 - p_c, \quad i \in (0, M), \\ P\{i, -1 | i, 0\} = p_c, \quad i \in (0, M), \\ P\{i, k | i - 1, -T_{rt}\} = 1 / W_i, \quad k \in (0, W_i - 1), i \in (0, M - 1), \\ P\{M, k | M, -T_{rt}\} = 1 / W_M, \quad k \in (0, W_M - 1). \end{array} \right.$$

Далее, используя подход, разработанный в разделе 2.3, находятся стационарные вероятности $b_{i,k}$ состояний (i, k) , вероятность коллизии p_c и среднее время регистрации пакета, поступающего в очередь к неактивной станции, T_{BEB} .

Для решения системы уравнений из пункта 3.2 требуется определить вероятности $f_{BEB}(k, N-m)$ регистрации k пакетов методом конкурентного доступа за произвольно выбранный кадр при $N-m$ неактивных станциях.

Вероятности находятся на основе подхода, описанного в разделе 2.3, с той разницей, что в передаче методом конкурентного доступа принимают участие только $N-m$ станций, что влияет на вероятность $P_{tr}(l)$ того, что l станций из $N-m$ выбрали данный кадр для передачи ЗПП:

$$P_{tr}(l) = C_{N-m}^l \tau_{fr}^l (1 - \tau_{fr})^{N-m-l}, \text{ где } \tau_{fr} = K \left[1 - (1 - p_c)^{1/(N-1)} \right] P_0^{-1}.$$

Для определения составляющих формулы среднего времени обслуживания модель изменения очереди зарегистрированных пакетов и модель конкурентного доступа используются итеративно: модель изменения очереди позволяет определить вероятность P_0 и среднюю длину очереди L_Q на основе распределения $f_{BEB}(k, N-m)$, которое, как и среднее время регистрации T_{BEB} для пакетов, поступающих в очередь неактивной станции, находится из модели конкурентного доступа, параметры которой, в свою очередь, полностью определяются по заданной вероятности P_0 . Таким образом, при подстановке P_0 из модели изменения очереди пакетов в модель конкурентного доступа получается распределение $f_{BEB}(k, N-m)$, подстановка которого в модель изменения очереди пакетов дает уточнение P_0 . Многочисленные эксперименты с данными моделями при различных параметрах показывают быструю сходимость итеративного метода вычислений.

В четвертой главе разрабатываются расширения моделей обслуживания пакетов восходящего трафика для учета особенностей конфигурации сети и входного трафика.

В первом пункте главы исследуется модель передачи пакетов в сетях IEEE 802.16 в случае входного группового потока, размер группы которого описывается геометрическим распределением.

Запросы службы World Wide Web, одной из основных служб глобальной интернет-сети, приходят группами, размер которых приближенно описать геометрическим распределением с некоторым параметром q .

Как было описано в главе 3, зарегистрированные пакеты поступают на обслуживание двумя способами, и распределение вероятности прихода i зарегистрированных пакетов при условии, что m фиксированных станций активны, имеет вид $f(i, m) = f_{group}(i, m) \otimes f_{WEB}(i, N - m)$. Далее в работе показывается, что распределение пакетов, поступающих от активных станций,

$$\text{равняется } f_{group}(i, N - m) = \frac{1}{i!} \frac{d^i \exp \left[-\lambda + \frac{\lambda p}{1 - qe^s} \right]}{ds^i} \Bigg|_{s=0}$$

Далее определяется вероятность m активных станций при условии i пакетов

$$\varphi(m | i) = C_N^m \sum_{k=1}^i C_{k-1}^{m-1} C_{i-1}^{k-1} p^{k-1} q^{i-k} / C_{N+k-1}^k,$$

а также вероятность прихода k пакетов при наличии i пакетов в очереди

$$G(k, i) = \sum_{m=\min(1, i)}^{\min(N, i)} \varphi(m | i) f(k, m).$$

Из уравнения равновесия и уравнение нормировки для стационарных вероятностей получается система уравнений относительно π_j . Решение этой системы уравнений позволяет получить среднюю длину очереди зарегистрированных пакетов и вероятность пустой очереди конкретной станции.

Модель конкурентного доступа полностью аналогична той, что исследовалась в предыдущей главе для негруппового потока. На ее основе находятся вероятности регистрации i пакетов в одном кадре посредством механизма конкурентного доступа при условии, что $N - m$ в этом кадре станций активны:

$$f_{BEB}(i, N - m) = \frac{1}{i!} \frac{d^i P_{s_tr}(\theta(\frac{P}{1 - qe^s}))}{ds^i} \Bigg|_{s=0} .$$

Распределение числа пакетов $f_{BEB}(i, N - m)$, регистрируемых за кадр посредством конкурентного доступа, позволяет определить $G(k, i)$ и затем - вероятность P_0 , от которой, в свою очередь, зависит распределение $f_{BEB}(i, N - m)$, что позволяет применить итеративный метод вычислений, описанный в предыдущей главе, для оценки среднего времени обслуживания пакета.

В следующих двух пунктах главы проводится адаптация разработанной модели передачи данных под особенности различных физических спецификаций протокола IEEE 802.16: учитывается наличие синхронизационных преамбул при передаче восходящего трафика в режиме OFDM и исследуется опциональный механизм конкурентного доступа на основе технологии CDMA в режиме OFDMA.

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

В пункте 5.1 проведено сравнение результатов базовой аналитической модели передачи пакетов сети IEEE 802.16, разработанной в главе 2, с результатами имитационного моделирования. Это сравнение показало, что точность построенной математической модели достаточна для ее использования для оптимизации параметров работы сети.

На основе аналитической модели проведена минимизация времени обслуживания пакета путем выбора оптимального соотношения между интервалами конкурентного доступа и передачи восходящего трафика данных при фиксированном размере восходящего подкадра.

В пункте 5.2 проводится исследование эффективности механизма встраивания ЗПП для активных станций в пакеты с данными в сети под управлением протокола IEEE 802.16. Было получено, что зависимость среднего времени обслуживания пакета T_{send} от интенсивности поступления пакетов немонотонна: большая интенсивность приводит к увеличению длины очереди и соответствующему росту времени отправки T_{send} , а при малой интенсивности ЗПП передаются в основном в режиме конкурентного доступа, при котором время регистрации T_{reg} велико.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В данной диссертации разработан комплекс аналитических моделей для анализа эффективности передачи пакетов данных и запросов полосы пропускания в высокоскоростных городских беспроводных сетях стандарта IEEE 802.16. В частности:

1. Проведен анализ основных механизмов повышения эффективности передачи запросов полосы пропускания в протоколах высокоскоростных городских беспроводных сетей IEEE 802.16, а также существующих методов аналитического моделирования этих механизмов.

2. Разработана аналитическая модель конкурентного доступа, позволяющая найти среднее время регистрации, а также распределение длины очереди зарегистрированных пакетов и вероятность коллизии при отправке запроса полосы пропускания.
3. Разработан аналитический метод оценки среднего времени обслуживания пакетов с учетом как собственно времени передачи пакета, так и времени резервирования полосы для его передачи;
4. Построена аналитическая модель передачи данных и запросов полосы пропускания в режиме прикрепления запросов полосы пропускания к данным.
5. Проведен анализ эффективности передачи пакетов в зависимости от особенностей физического уровня протокола IEEE 802.16.
6. Высокая точность и адекватность разработанных аналитических моделей подтверждена результатами имитационного моделирования высокоскоростных городских беспроводных сетей IEEE 802.16.
7. Теоретические и практические результаты данной работы использованы при разработке НИР, проводимых ИППИ РАН, по программам Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН «Новые физические структурные решения в инфокоммуникациях» и «Фундаментальные проблемы разработки новых структурных решений и элементной базы в телекоммуникационных системах», а также в учебном процессе МФТИ (ГУ).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1] Ляхов А.И., Лукин Д.В. Оценка производительности конкурентного доступа в сети IEEE 802.16. М.: Труды семинара Распределенные

Компьютерные и Телекоммуникационные Сети: теория и приложения (DCCN-2007), 2007. Т.2. С. 53-58.

- [2] Ляхов А.И., Лукин Д.В. Аналитическая модель передачи данных в сети IEEE 802.16. Автоматика и телемеханика. 2009. № 11. С. 87-100.
- [3] Ляхов А.И., Лукин Д.В. Оценка времени обслуживания пакетов в беспроводной сети под управлением протокола IEEE 802.16. Труды конференции "Информационные технологии и системы" (ИТиС-2009), МО, пос. Бекасово, декабрь 2009, с. 42-47.
- [4] Ляхов А.И., Лукин Д.В. Оценка эффективности прикрепления запросов полосы пропускания к пакетам данных в беспроводной сети под управлением протокола IEEE 802.16. Информационные процессы, 2010. № 2. С. 105-118.
- [5] Лукин Д.В., Контроль доступа в беспроводной сети под управлением протокола IEEE 802.16а. // Труды 48-й научной конференции МФТИ, Долгопрудный, МО, Ноябрь 2005.