

Миллер Александр Борисович

Предотвращение перегрузок в сетях передачи данных
с помощью методов стохастического управления

Специальность 05.13.01 – Системный анализ,
управление и обработка информации
(технические системы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2012 г.

Работа выполнена в лаборатории № 2 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук.

Научный руководитель: академик,
доктор технических наук, профессор
Кулешов Александр Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
ИППИ РАН,
заведующий лабораторией № 18
Ляхов Андрей Игоревич

кандидат технических наук,
доцент,
ИРЭ РАН,
старший научный сотрудник,
Григорьев Федор Николаевич

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

Защита состоится “___” _____ 2012 г. на заседании диссертационного совета Д 002.077.01 на базе ИППИ РАН по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, Большой Каретный переулок, 19, стр.1. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИППИ РАН.

Автореферат разослан “___” _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 002.077.01
доктор физико-математических наук

И. И. Цитович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В самом начале развития сети Интернет было замечено, что неограниченный доступ к нему приводит к плохой производительности, а именно к высокой загрузке сети и потере передаваемых пакетов. Это привело к созданию первых методов управления перегрузками для сети Интернет. Основная идея первого метода управления, предложенного В. Джекобсоном, состояла в обнаружении перегрузки в сети через потери пакетов. При обнаружении потери источник пакетов уменьшает свою скорость передачи данных (окно потока), в противном случае он увеличивает скорость. Исходный алгоритм претерпел много небольших, но важных изменений, но основные признаки алгоритма, использовавшиеся для увеличения и уменьшения окна потока, оставались неизменными в различных версиях протокола TCP (Transmission Control Protocol - протокол управления передачей), таких как TCP-Tahoe, Reno, NewReno, SACK.

Вопросы управления перегрузками в сетях передачи данных рассматривались многими авторами, такими как Р. Шрикант, Ш. Вегешна, Э. Альтман, К.Б. Авраченко, Т. Башар, Ф. Келли, М.Л. Цетлин, В.Л. Стефанюк, А.В.Бутрименко, В.А. Васенин, Г.И. Симонова, Б.М. Миллер. На протяжении последних лет основными средствами анализа потоков данных в сети Интернет были жидкостные модели (fluid models). Данные модели учитывают среднюю скорость передачи данных, эволюцию потока пакетов. Эти модели доказали свою пригодность к нахождению точек равновесия, к которым может стремиться система, а также к определению условий, при которых данная сходимость выполняется, т.е. система стабильна. Однако реальное поведение сети Интернет далеко от стабильности и стационарности вследствие временных изменений, активного поведения пользователей и флуктуаций характеристик принимающих и передающих пакеты устройств.

Из-за присущей сети Интернет хаотичности, процесс передачи данных всегда имеет стохастическую и нестационарную природу. Многие авторы применяют управление марковскими цепями к передаче данных и оптимизации Интернет сетей, однако, большинство результатов, полученных до недавнего времени, относятся к стационарному случаю, при котором, как и в жидкостных моделях, система массового обслуживания устойчива, т.е. интенсивность входящего потока в среднем меньше скорости обслуживания. Поскольку в реальной жизни данное условие выполняется не всегда, для успешного функционирования система должна отклонять некоторые входящие пакеты, чтобы избежать перегрузки. Все существующие протоколы TCP работают по данному принципу. Примером могут служить хорошо известные протоколы TCP Reno, TCP Red, а так же все основные методы управления перегрузками в Интернете. В то же самое время, большинство существующих работ, связанных с анализом TCP не учитывают некоторые принципиальные особенности управления реальным потоком, они обычно рассматривают модели с дискретным временем и стационарные ECN (Ex-

PLICIT Congestion Notification - явное уведомление о перегрузке) потока. Реальные потоки данных нестационарны и их характеристики зависят от управления. Теория, описывающая оптимальное управление такими системами, должна учитывать различные критерии, характеризующие качество работы системы. Оптимальное управление показывает более стабильное поведение скорости передачи данных. Преимущества методологии, основанной на использовании стохастического управления, отмечались рядом авторов, работающих над оптимизацией TCP (TCP Illinois и TCP Westwood+) и созданием высокоскоростных сетей передачи данных, работающих на большие расстояния, а также в беспроводных сетях передачи данных.

Оптимальное управление марковскими цепями известно давно. В последние годы, были достигнуты серьезные результаты в области оценки и управления марковскими цепями с ограничениями. В ряде работ рассматривались задачи совместного управления доступом в очередь и скоростью обслуживания, однако в них не учитывалось влияние этих управлений на интенсивность входящего потока.

До последнего времени не было моделей управления перегрузками, учитывающих активное поведение пользователей, подстраивающих собственную скорость передачи данных в соответствии с вероятностью доступа в очередь и скоростью обслуживания, устанавливаемыми маршрутизатором.

Целью диссертационной работы является разработка методов стохастического управления доступом в очередь и скоростью обслуживания, учитывающих активное поведение пользователей и генерирование ими нестационарных потоков пакетов, с целью предотвращения перегрузок и повышения эффективности работы сети передачи данных в целом.

Методика исследования. Метод исследования основан на использовании теории нестационарных управляемых марковских цепей, которая в данной работе расширяется на класс связанных управляемых цепей. Основным достоинством данного подхода является возможность получения характеристик работы сети передачи данных без использования методов статистического моделирования, т.к. основные параметры получаются в результате решения системы детерминированных обыкновенных дифференциальных уравнений динамического программирования.

Научная новизна.

- Для статической модели управления доступом проведено исследование эффективности выбора профиля вероятностей отклонения пакетов аналогично алгоритму произвольного раннего случайного обнаружения (RED - random early detection) с учетом активного поведения пользователей. Предложен алгоритм вычисления вероятностей перегрузки в зависимости от профиля вероятностей отклонения пакетов.
- Впервые предложена математическая модель системы оптимального управления доступом в очередь и скоростью обслуживания в сетях

передачи данных, учитывающая нестационарное активное (зависящее от управления) поведение пользователей, и разработан численный метод оптимизации работы такой системы с учетом различных критериев, характеризующих качество ее работы. Проведен сравнительный анализ полученного оптимального управления со стационарным управлением (использующим алгоритм произвольного раннего обнаружения).

- Построена новая модель управления системой передачи данных со связанными полосами пропускания, описываемая в терминах связанных управляемых марковских цепей, и предложено описание управляемой системы с несколькими связанными марковскими цепями и уравнение динамического программирования в тензорной форме.

Практическая ценность и реализация результатов работы заключается в создании общей методологии анализа и оптимизации систем управления потоками данных в сетях передачи данных на основе теории управляемых марковских цепей. Данный подход позволяет осуществлять оптимизацию систем управления потоками данных на основе методов динамического программирования без использования трудоемкого статистического моделирования. Результаты работы внедрены и используются на практике, что подтверждено соответствующими актами. В частности, научные и практические результаты работы использованы:

- Институтом проблем информатики РАН в ходе выполнения ряда НИОКР по созданию информационно-аналитических систем специального назначения при реализации подсистем управления функционированием и интегрированного доступа.
- Научно-производственным предприятием “ЗАО Центром совместных технологических разработок” (ТЕХНОР) в ходе выполнения ряда НИОКР по созданию программного обеспечения для моделирования и оптимизации систем передачи данных интегрированного доступа.

Результаты работы использованы в рамках исследований по гранту РФФИ № 10-01-00710 “Оптимальное управление нестационарными марковскими цепями с ограничениями на состояние”.

Достоверность полученных результатов подтверждается строгими аналитическими выкладками и результатами имитационного моделирования.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: 52-ой научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” (Москва, 2009); 32-ой конференции молодых ученых и специалистов ИППИ РАН “Информационные технологии и системы” (Москва, 2009); Melbourne Probability Seminar at Monash University, Victoria (Australia, 2010); 49-ой Международной конференции IEEE Conference on Decision and Control (Atlanta, USA, 2010); 50-ой Международной конференции IEEE Conference

on Decision and Control (Orlando, USA, 2011); семинарах ИППИ РАН и ИПУ РАН (Москва, 2011).

Публикации. Соискатель имеет 12 научных работ, в том числе 6 по теме диссертации (общим объемом 69 стр.), из них 2 опубликованы в изданиях, входящих в Перечень ВАК [1],[2] (общим объемом 29 стр.) и 4 работы опубликованы в трудах научных конференций [3]-[6] (общим объемом 40 стр.), из них 2 выполнены в соавторстве (объемом 27 стр.). В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит: в [5] - вывод уравнений динамического программирования для стохастической модели управления доступом и скоростью обслуживания, а также реализация программного моделирования и выполнение сравнительного анализа оптимального управления со стационарным; [6] - вывод уравнений динамического программирования для стохастической модели управления доступом и скоростью обслуживания с двумя связанными полосами пропускания, а также сравнительный анализ эффективности использования двух связанных полос пропускания.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 61 наименование. Диссертация изложена на 132 страницах текста, содержит 20 рисунков, 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведен обзор и анализ механизмов управления потоками данных в Интернете, ставится задача исследования.

Протоколы управления передачей используют механизм управления окном потока, под которым подразумевается максимальное количество неподтвержденных пакетов, отправляемых пользователем в сеть в любой момент времени. Сетевой протокол — это набор правил, позволяющего осуществлять соединение и обмен данными между двумя включенными в сеть компьютерами. Одним из первых алгоритмов, внедренных в протокол ТСР, был адаптивный алгоритм управления окном В. Джекобсона. Основная идея алгоритма состоит в том, что размер окна увеличивается пока не наступает переполнение очереди. Наиболее распространенным в настоящее время является алгоритм произвольного раннего обнаружения (RED), использующий превентивный подход к предотвращению перегрузки сети. Вместо ожидания фактического переполнения очереди, RED начинает отбрасывать пакеты с ненулевой вероятностью, когда средний размер очереди превысит определенное минимальное пороговое значение. Данный алгоритм базируется на вычислении среднего размера очереди и вычислении вероятности отбрасывания пакетов. Совместно с протоколом ТСР используется механизм активного управления очередями (Active Queuing Management), который

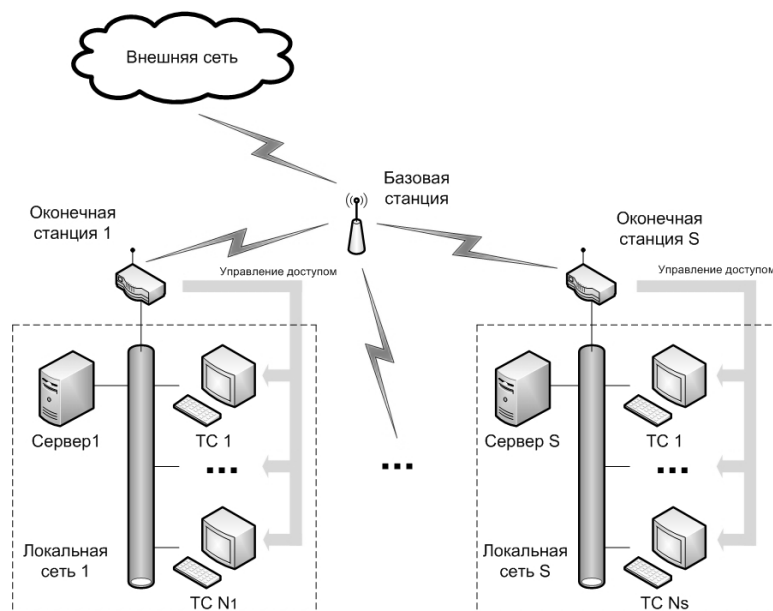


Рис. 1. Архитектура сети с централизованным управлением

вычисляет меру перегрузки каналов. Все протоколы ТСР имеют общую черту — они управляют вероятностью доступа, а самые современные управляют скоростью обслуживания и интенсивностью входящего потока через вероятность доступа. Тем самым задача управления и оптимизации характеристик системы передачи данных относится к задачам оптимального стохастического управления.

В работе ставится задача исследования, заключающаяся в предотвращении перегрузок в сетях передачи данных. В качестве сети передачи данных в следующих разделах работы рассматривается сеть беспроводного доступа с централизованным управлением, т.к. в беспроводных сетях можно управлять скоростью обслуживания, в то время как в проводных сетях полоса пропускания жестко фиксирована, т.е. интенсивность обслуживания является постоянной величиной. В данной модели радиосота объединяет S оконечных станций (ОС), каждая из которых подключает к радиосоте локальную сеть s ($s = 1, \dots, S$), состоящую из N_s терминальных станций (ТС) и одного или нескольких серверов (Рис. 1). Антенны ОС сфокусированы на антенну базовой станции (БС), являющейся точкой доступа во внешнюю сеть. При этом ОС не имеют радиовидимости друг с другом (т.е. скрыты друг от друга) и вынуждены взаимодействовать через ретрансляционную БС. Оконечная станция выступает в роли маршрутизатора пакетов, генерируемых терминальными станциями, т.е. ОС управляет вероятностью доступа в свою очередь. К тому же при централизованном управлении доступ ОС к беспроводному каналу управляется БС, т.е. БС выделяет часть полосы пропускания каждой ОС по их запросам. Таким образом, ОС может регулировать свою скорость обслуживания путем передачи соответствующего запроса к БС.

Во второй главе исследована детерминированная модель управления

потоками в модели передачи данных, учитывающая активное поведение пользователей и использующая стационарное управление доступом, зависящее от состояния очереди маршрутизатора. Рассматривается математическая модель системы “пользователи-маршрутизатор”, в которой каждый пользователь генерирует поток пакетов, основываясь на максимизации собственной функции полезности минус затраты.

Имеется N пользователей, каждый из которых генерирует поток пакетов с интенсивностью $u_i(t)$. Для суммарного потока пакетов она равна сумме $U(t) = \sum_{i=1}^N u_i(t)$. Каждый пользователь характеризуется своей собственной функцией полезности (utility function) $f_i(u)$ типа Кобба-Дугласа, так что при цене потока $q > 0$ “функция полезности минус затраты” удовлетворяет условию $f_i(u) - qu \rightarrow -\infty$ если $u \rightarrow \infty$. Эта функция достигает единственного максимума в некоторой точке $u_i(q)$, что и отражает стратегию пользователя.

Пусть N пользователей посылают свои потоки пакетов на общий маршрутизатор, имеющий очередь на M пакетов (очередь характеризуется $M + 1$ различными состояниями, соответствующими различным значениям вероятности доступа). Считается, что входящие пакеты должны встать в очередь, обслужиться с некоторой интенсивностью $\mu > 0$ и отправиться дальше, т.е. освободить место в очереди. Если в момент времени t приходит новый пакет и в очереди $0 \leq M(t) \leq M$ пакетов, то пакет либо ставится в очередь на обслуживание, либо отражается (это называется управление доступом)¹. Маршрутизатор стремится к тому, чтобы общий поток пакетов не создавал переполнения, т.к. если пакет поступает в момент когда очередь заполнена полностью, то он отражается с вероятностью 1, это и называется congestion (перегрузка, переполнение, затор и пр.). Поэтому маршрутизатору нужно заранее установить либо более высокую цену обслуживания, либо начать отражать пакеты раньше момента заполнения очереди. Пусть вероятность отражения пакета равна $q(M(t), U(t))$, где $U(t) = \sum_{i=1}^N u_i(t)$. Тогда функция выигрыша для i -го пользователя в момент времени t есть $F_i(u, t) = f_i(u) - \lambda_0 u - q(M(t), U(t))u$. Пользователю известна лишь величина $q(M(t), U(t))$ и он выбирает свой поток так, чтобы максимизировать функцию полезности минус затраты².

Вектор распределения вероятностей $\bar{p}(t) = (p_0(t), \dots, p_M(t))^T$ удовлетворяет системе уравнений вида³ $\dot{\bar{p}}(t) = A(U(P(t)))\bar{p}(t)$, где матрица $A(U)$ — переходная матрица системы уравнений процесса рождения-гибели. Стационарное решение данной системы \bar{p}^{stat} удовлетворяет нелинейной системе

¹Kelly F. P., Maulloo A. K., Tan D. K. H. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability // The journal of the operational research society. 1998. V. 49, № 3. P.237-252.

²Васенин В.А., Симонова Г.И. Математические модели управления трафиком и Интернете. Новые подходы на основе схем TSP/AQM // Автоматика и телемеханика. 2005. № 8. С. 94-107.

³Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения // М.: Мир. 1984. Т.1. С. 469-482.

уравнений

$$\begin{aligned}
 A(U(P^{stat}))\bar{p}^{stat} &= 0, \sum_{m=0}^M \bar{p}_m^{stat} = 1, \\
 u_i^{stat} &= u_i^{opt}(P^{stat}), U(P^{stat}) = \sum_{i=1}^n u_i^{opt}(P^{stat}).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Первые два уравнения служат для определения стационарных вероятностей. Их решения как функции $U(P^{stat})$ можно определить с помощью формул Эрланга.

Однако, само значение вероятности P^{stat} также зависит от установившихся вероятностей, поэтому если решение системы уравнений стремится к пределу, то в этом случае удастся получить стационарное распределение вероятностей. Для анализа сходимости к стационарному распределению и его поведения в работе используется метод математического моделирования, и на ряде примеров показано, что сходимость действительно имеет место.

Для анализа устойчивости системы “пользователи-маршрутизатор” и оптимизации алгоритма управления доступом разработана программа моделирования на MatLab. Для проведения моделирования задаются следующие параметры и начальные условия: M – размер очереди маршрутизатора, N – количество пользователей, $f(u_i) = -\frac{a_i}{u_i}$ – вид функции полезности i -го пользователя, a_i – коэффициент функции полезности i -го пользователя, k – цена потерь, p_0 – начальное распределение вероятностей длины очереди, u_{0i} – начальное значение потока i -го пользователя, T – временной интервал наблюдения системы, $\alpha_i > 0$ – скорость настройки (агрессивность протокола i -го пользователя). Рассмотрено два случая с одинаковыми параметрами и начальными условиями, но разными наборами вероятностей отклонения пакетов. В обоих случаях: $M = 19$, $N = 5$, $a_1 = 5$, $a_2 = 10$, $a_3 = 25$, $a_4 = 50$, $a_5 = 75$, $k = 1$, $p_0 = 0.05$ ($p_0 = \frac{1}{M+1}$), $u_{01} = 1$, $u_{02} = 3$, $u_{03} = 5$, $u_{04} = 7$, $u_{05} = 10$, $T = 10$. Вероятности $q(m)$, $m = 0, \dots, 19$ отклонения пакетов для первого случая выбраны следующим образом

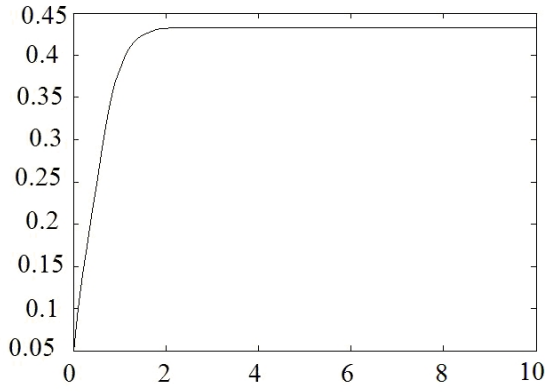
$$q_1 = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0.08; 0.16; 0.24; 0.32; 0.4; 0.48; 0; 0; 0; 0; 1],$$

а для второго случая

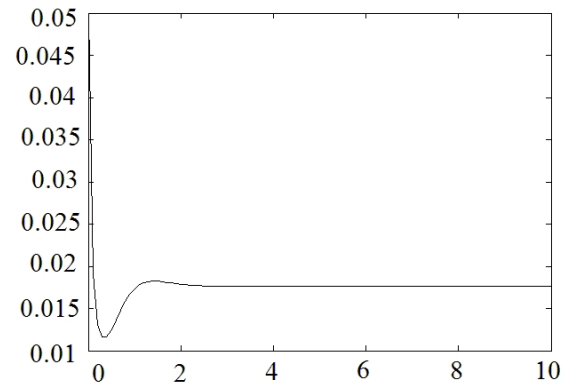
$$q_2 = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0.08; 0.16; 0.24; 0.32; 0.4; 0.48; 0.56; 0.64; 0.72; 0.8; 1].$$

Вероятность перегрузки системы (переполнения очереди) в первом случае устанавливается на уровне 0.43 (при средней длине очереди 18.3), а во втором случае на уровне 0.175 (при средней длине очереди 14.8) (Рис. 2, 3). Это означает, что выбор вероятностей доступа весьма эффективно влияет на вероятность перегрузки, сохраняя среднюю интенсивность обслуживания.

В третьей главе рассматривается модель динамического управления доступом в очередь и скоростью обслуживания при активных пользователях.

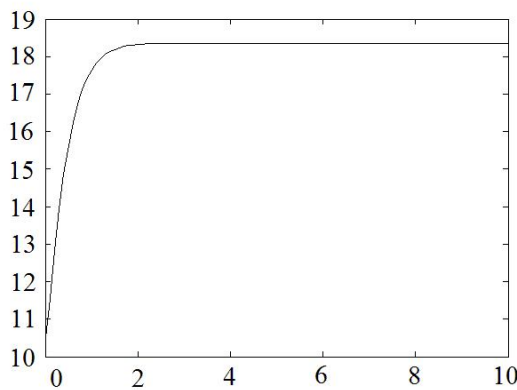


а)

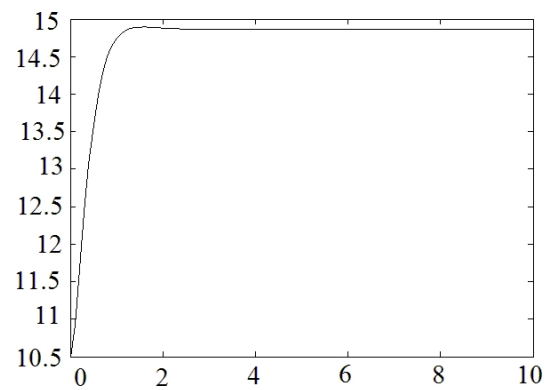


б)

Рис. 2. Зависимость вероятности перегрузки (переполнения очереди) от времени (а) - для первого случая, (б) - для второго случая



а)



б)

Рис. 3. Зависимость средней длины очереди от времени (а) - для первого случая, (б) - для второго случая

Динамическое управление доступом предполагает, что вероятность отклонения пакетов не является фиксированной величиной, а зависит от длины очереди и величин потоков входящих пакетов.

Рассматривается упрощенная модель беспроводной сети с централизованным управлением, в которой имеется несколько конечных станций (ОС), каждая из которых подключает к радиосоте локальную сеть из N терминальных станций (ТС). Трафик передается от терминальных станций к конечной станции, т.е. каждая ТС генерирует поток пакетов. Предполагаем, что поток пакетов представляет собой считающий процесс со случайной интенсивностью $\lambda(t) \geq 0, t \in [0, T]$, которая зависит от потребностей ТС и текущего состояния очереди. Очередь ОС ограничена некоторой константой $M < \infty$. Вводятся управления: интенсивность обслуживания ТС $\mu \in [\underline{\mu}, \bar{\mu}]$, где $\underline{\mu} > 0, \bar{\mu} > 0$, и $u(t) \in [0, 1]$ — вероятность принять пакет в момент времени $t \in [0, T]$.

Пусть $M(t)$ — число пакетов в системе в момент времени t , тогда общее

число состояний есть $M + 1$, а соответствующее пространство состояний S состоит из единичных векторов $\{e_0, \dots, e_M\}$ вида $e_i = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots)$ с единицей на i -м месте в пространстве размерности $M + 1$.

Т.к. управление доступом в системе зависит лишь от текущего числа пакетов, то модель управления может быть описана в терминах управляемой марковской цепи с $M + 1$ состояниями и генератором $A(t, u, \mu)$, матрицей размерности $(M + 1) \times (M + 1)$.

Особенностью рассматриваемой модели является предположение о формировании входного потока совокупностью терминальных станций, выбирающих интенсивность генерации пакетов таким образом, чтобы максимизировать собственную функцию полезности. Полагаем, что N ТС используют функции полезности следующего вида с учетом того, что пакет, отклоненный маршрутизатором, посылается обратно еще один раз:

$$f_i(v, t, P) = -\frac{a_i(t)}{v} - \lambda_0 v - \lambda_0 v P, \quad i = 1, \dots, N,$$

где v — интенсивность генерации пакетов i -ой ТС, λ_0 — цена трафика, P — вероятность отклонения пакета, которая определяется ОС в зависимости от времени и длины очереди, т. е. $P = P(t, M(t-))$. Параметр $a_i(t)$ характеризует потребность ТС в ресурсах. Полагаем, что ОС имеет информацию о функциях полезности ТС. Максимизируя свою функцию полезности, i -ая ТС устанавливает оптимальное значение интенсивности потока, равное

$$v_i^{opt}(t, P(t, M(t-))) = \arg \max_{0 < v < \infty} f_i(v, t) = \sqrt{\frac{a_i(t)}{\lambda_0(1 + P(t, M(t-)))}}. \quad \text{При этом}$$

общее значение интенсивности управляемого входного потока как функции от вероятности доступа, а значит, состояния очереди равно

$$\lambda(t, P(t, M(t-))) = \sum_{i=1}^N v_i^{opt}(t, P(t, M(t-))) = \frac{C(t)}{\sqrt{\lambda_0(1 + P(t, M(t-)))}},$$

где $C(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{a_i(t)}$ — величина, которая характеризует все множество ТС.

Далее получаем выражение для матрицы генератора $A(t, u, \mu)$ при управлении доступом в случае активных ТС. Данное выражение выведено в статье [1] и имеет вид матрицы генератора процесса размножения-гибели с управляемыми интенсивностями размножения (вероятность доступа) и гибели (скорость обслуживания).

В задаче рассматривается следующий критерий качества:

$$J[u(\cdot), \mu(\cdot)] = \mathbf{E} \left\{ \phi_0(X_T) + \int_0^T f_0(s, u(s), \mu(s), X_s) ds \right\} \rightarrow \min_{u(\cdot), \mu(\cdot)}, \quad (2)$$

где $\phi_0(X) = \langle \phi_0, X \rangle$, $f_0(s, u, \mu, X) = \langle f_0(s, u, \mu), X \rangle$ и $\phi_0 \in R^n$,

$$f_0^*(s, u, \mu) = (f_0(s, u, \mu, e_1), \dots, f_0(s, u, \mu, e_n))$$

и каждая $f_0(s, \cdot, \cdot, e_i)$ — функция стоимости, когда марковская цепь находится в состоянии e_i в момент времени $s \in [0, T]$.

Предположение 1. Каждая из функций $f_0(s, \cdot, \cdot, e_i), i = 1 \dots N$, непрерывна на $[0, T] \times [0, 1] \times [\underline{\mu}, \bar{\mu}]$.

Общий подход к решению задачи оптимального управления с помощью метода динамического программирования изложен в работах Эллиота⁴ и Дэвиса⁵. Для общей модели, описываемой матрицей генератора $A(t, u, \mu)$, где $(u, \mu) \in U$, определим функцию цены

$$V(t, X) = \inf_{u(\cdot), \mu(\cdot)} J[u(\cdot), \mu(\cdot) | X_t = X], \quad (3)$$

где

$$J[u(\cdot), \mu(\cdot) | X_t = X] = \mathbf{E} \left\{ \phi_0(X_T) + \int_t^T f_0(s, u(s), \mu(s), X_s) ds \middle| X_t = X \right\} = \langle \phi(t), X \rangle. \quad (4)$$

Функция $\phi(t)$ является единственным решением уравнения динамического программирования

$$\langle \phi'(t), X \rangle + \min_{(u, \mu) \in U} [\langle \phi(t), A(t, u, \mu)X \rangle + \langle f_0(t, u, \mu), X \rangle] = 0 \quad (5)$$

с граничным условием $\phi(T) = \phi_0$.

Следующий результат дает характеристику оптимального управления.

Теорема 1. Пусть $\phi(t)$ — решение системы (5), и существует $(u_0(t, X), \mu_0(t, X)) \in U, (t, X) \in [0, T] \times S$ такое, что для каждой пары $(t, X) \in [0, T] \times S$ величина с правой стороны уравнения $H(\phi, t, u, \mu, X) = \langle \phi, A(t, u, \mu)X \rangle + \langle f_0(t, u, \mu), X \rangle$ и функция $H(\phi(t), t, u, \mu, X)$ достигают минимума в точке $(u_0(t, X), \mu_0(t, X))$. Тогда существует $(\hat{u}(t, X_0^t), \hat{\mu}(t, X_0^t))$ в классе \mathcal{F}_t^X -предсказуемых управлений, являющееся оптимальным управлением, и $V(t, X) = J[\hat{u}(\cdot), \hat{\mu}(\cdot) | X_t = X]$. Это оптимальное управление можно выбрать марковским:

$$(\hat{u}(t, X_0^t), \hat{\mu}(t, X_0^t)) = (u_0(t, X_t), \mu_0(t, X_t)) = \underset{(u, \mu) \in U}{\operatorname{argmin}} H(\phi(t), t, u, \mu, X_t).$$

Критерий качества учитывает среднее время нахождения пакета в очереди, среднее число отраженных пакетов, стоимость обслуживания и штраф за простой ОС [1],[4], которые балансируются коэффициентами k_1, \dots, k_4 ⁶

⁴Elliott R.J., Aggoun L., Moore J.B. Hidden Markov Models. Estimation and Control // NY: Springer Verlag. 1995. 361 p.

⁵Davis M.H.A. Markov Models and Optimization // London: Chapman & Hall. 1993. 308 p.

⁶Miller B.M., Miller G.B., Siemenikhin K.V. Optimal control of Markov chains with constraints // Proceedings of joint 48th IEEE conference on decision and control and 28th Chinese control conference. 2009. P. 512-518.

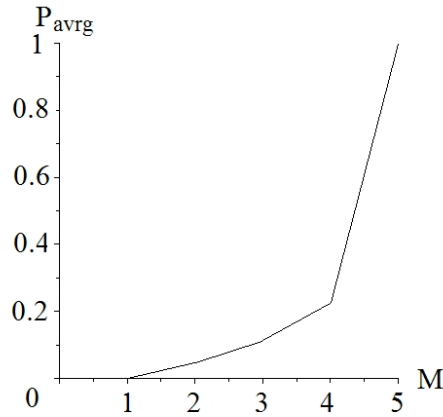


Рис. 4. Средняя по времени вероятность отклонения пакетов P_{avg} в зависимости от загрузки очереди M

Далее были получены аналитические выражения для оптимального управления $\mu_{opt}(t, e_i)$ и $u_{opt}(t, e_i)$ [2],[5]. Подстановка $\mu_{opt}(t, e_i)$ и $u_{opt}(t, e_i)$ в уравнение динамического программирования (5) дает систему обыкновенных дифференциальных уравнений для функции $\phi(t)$, решение которой может быть получено с помощью численных методов.

Для численного моделирования была разработана программа на Maple 12, решающая систему обыкновенных дифференциальных уравнений и находящая оптимальные управления. Ниже приведен пример моделирования для следующего набора параметров и терминальных условий: $\underline{\mu} = 3, \bar{\mu} = 8$ — нижний и верхний пороги скорости обслуживания ОС; $c(t) = 2 + 1.5 \cos(2(2-t))$ — потребность ТС в трафике в зависимости от времени; $k_1 = 0.35, k_2 = 3, k_3 = 1.5, k_4 = 0.5$ — коэффициенты весов интегральных критериев J_1, J_2, J_3, J_4 ; $\lambda_0 = 0.01$ — цена трафика; $M = 5$ — размер очереди.

Были получены следующие зависимости для средней по времени вероятности отклонения пакетов в зависимости от загрузки очереди (Рис. 4), зависимости входного потока пакетов, интенсивности обслуживания и вероятности отклонения пакетов на интервале времени $[0, 10]$ в зависимости от загрузки очереди (Рис. 5)

Далее приведено сравнение предложенной модели динамического управления доступом в очередь и скоростью обслуживания с алгоритмом произвольного раннего обнаружения (RED). Т.к. RED не является марковским и может быть оценен только с помощью моделирования Монте-Карло, то такое сравнение является довольно трудной задачей. Поэтому произведено сравнение полученного оптимального управления с субоптимальным, для которого зададутся законы управления доступом и скоростью обслуживания, основываясь на значениях оптимальных управлений $u(t)$ и $\mu(t)$. Для субоптимального алгоритма вероятность отклонения пакета определяется как среднее значение вероятности доступа для каждого состояния по

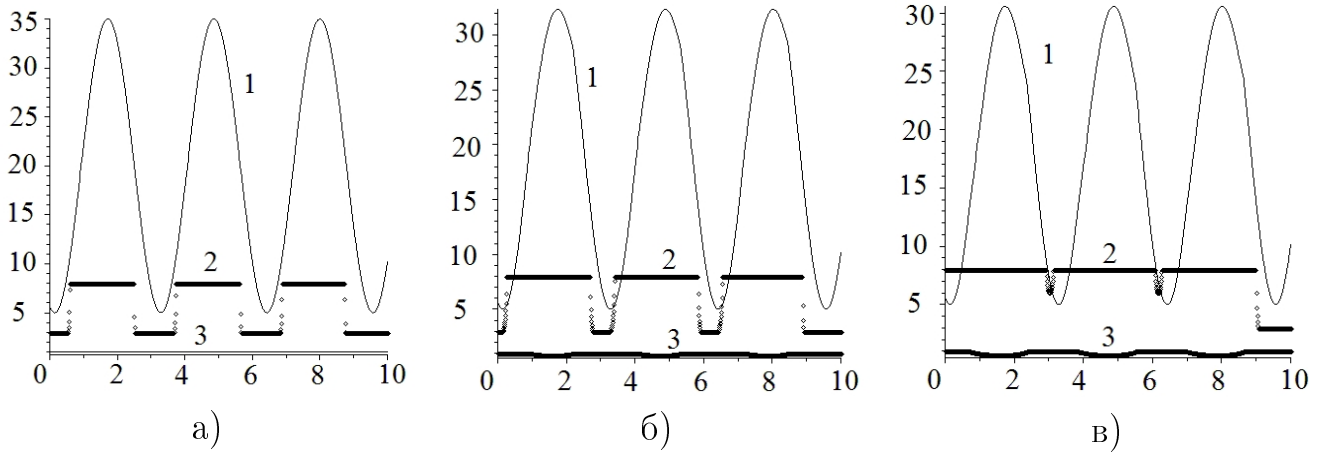


Рис. 5. Состояние с загруженностью ниже среднего (а), со средней загруженностью (б), с загруженностью выше среднего (в), где (1) – входной поток, (2) – интенсивность обслуживания, (3) – вероятность отклонения пакетов

оптимальному алгоритму. А управление скоростью обслуживания выбирается

$$\mu_{RED} = \frac{\mu + \bar{\mu}}{2}. \quad (6)$$

Результаты сравнения показывают, что среднее время нахождения пакета в очереди для оптимального алгоритма в среднем в 1.5 раза меньше, чем для субоптимального алгоритма, а среднее число отклоненных пакетов для оптимального алгоритма в среднем меньше в 1.2 раза меньше, чем для субоптимального алгоритма, что говорит о более высокой эффективности оптимального алгоритма.

Состояние очереди	Время опт.	Время субопт.	Откл. опт.	Откл. субопт.
M=0	0.43	0.64	6.89	7.26
M=1	0.46	0.68	7.38	7.72
M=2	0.49	0.73	7.62	8.34
M=3	0.52	0.77	7.44	9.01
M=4	0.54	0.80	8.12	9.71
M=5	0.56	0.82	8.82	10.42

Результаты исследования данной главы опубликованы в [1]-[5].

В четвертой главе исследуется модель управляемых связанных марковских цепей [6] применительно к сетям передачи данных.

Рассматривается упрощенная модель беспроводной сети, аналогичная используемой в главе 3. Но предполагается, что каждая оконечная станция может устанавливать связь с несколькими базовыми станциями. Общее число БС равно d . Подключение к нескольким БС служит для повышения надежности связи и экономии энергии базовой станции. БС могут принадлежать разным провайдерам, соответственно, они могут иметь разные стоимости обслуживания

и предоставлять отличное друг от друга качество связи. Предполагается, что оконечная станция договаривается с каждой из БС о выделении полосы пропускания при передаче трафика между терминальными станциями и оконечной станцией. При этом в случае если пакет поступает в первую очередь, выделенную БС₁, и если он отклоняется с некоторой вероятностью, то повторный пакет посылается в дополнительную очередь, выделенную БС₂ и т.д. Если пакет отклоняется в очереди, выделенной БС_d, то он отклоняется окончательно.

Состояние такой системы может быть описано набором из d соединенных марковских цепей, каждая из которых имеет $M_i, i = 1, \dots, d$ возможных состояний, и представляется набором единичных векторов $X_i \in \mathcal{S}_i = \{e_1, \dots, e_{M_i}\}$, типа $e_i = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ с единичным вектором на i -м месте в пространстве векторов R^M , где $i = 1, \dots, d$. В общем этот набор можно представить тензором порядка d таким, что $\mathbf{X} = \{X_1|X_2|\dots|X_d\}$.

Предполагается, что каждая i -ая управляемая марковская цепь имеет M_i возможных состояний и описывается следующим стохастическим дифференциальным уравнением аналогично Главе 3

$$(X_i)_t = (X_i)_0 + \int_0^t A_i(s, u(s))(X_i)_s ds + (W_i)_t, \quad (7)$$

где $(X_i)_0$ — начальное состояние i марковской цепи.

Задача оптимального управления ставится как и в Главе 2 заменой скалярного произведения на тензорное.

Пусть $\phi(t)$ определена аналогично (3), тогда *уравнение динамического программирования* в отношении $\phi(t)$ имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\langle d\phi(t), \mathbf{X} \rangle}{dt} &= - \min_{u \in U} [\langle \phi(t), A_1(t, u)X_1 \otimes X_2 \otimes \dots \otimes X_d + \\ &+ X_1 \otimes A_2(t, u)X_2 \otimes \dots \otimes X_d + \dots + X_1 \otimes X_2 \otimes \dots \otimes A_d(t, u)X_d \rangle + \langle f_0(t, u), \mathbf{X} \rangle] = \\ &= - \min_{u \in U} H(t, \phi(t), u, \mathbf{X}) \end{aligned} \quad (8)$$

с граничными условиями $\phi(T) = \phi_0$. Т.к. $H(t, \phi, u, \mathbf{X})$ непрерывна на (t, u) и аффинна по ϕ , то $\mathcal{H}(t, \phi, \mathbf{X})$ липшицева в ϕ .

Уравнение (8) имеет единственное решение на $[0, T]$. Аналогично главе 3 получаем характеризацию оптимального управления.

Далее рассматривается модель сети беспроводного доступа, в которой имеется две базовых станции. Т.е. у оконечной станции имеется две очереди, соответствующие каждой из БС. Поток пакетов, поступающих от терминальных станций, сначала попадает в первую очередь, ограниченную

константой M_1 . В случае отклонения пакета, он посылается повторно во вторую очередь M_2 . Входящий поток пакетов является считающим процессом с произвольной интенсивностью $\lambda(t) \geq 0, t \in [0, T]$, зависящей от временных предпочтений пользователей терминальных станций и текущей вероятности отклонения. Оконечная станция использует следующие управления: скорости обслуживания и вероятности доступа.

При критерии качества, учитывающем среднее время нахождения пакета в очереди, среднее количество отклоненных пакетов, стоимость обслуживания и штраф за простой ОС, для уравнения динамического программирования нельзя получить решение задачи минимизации правой части в аналитической форме, поэтому использовались численные методы.

Проведено численное моделирование для системы с $M_1 = M_2 = 3$, и с заданными ограничениями для управлений $u_1 \in [0, 1], u_2 \in [0, 1]$ и $\mu_1 \in [1, 2], \mu_2 \in [3, 6]$. Время наблюдения процесса равно 1, $C(t) = 5 + 4.5 \sin 10t$.

Полученные результаты показывают, что когда $u_1 = 0$ и главная обслуживающая полоса закрыта, входной поток обязательно обрабатывается второй более дорогой полосой.

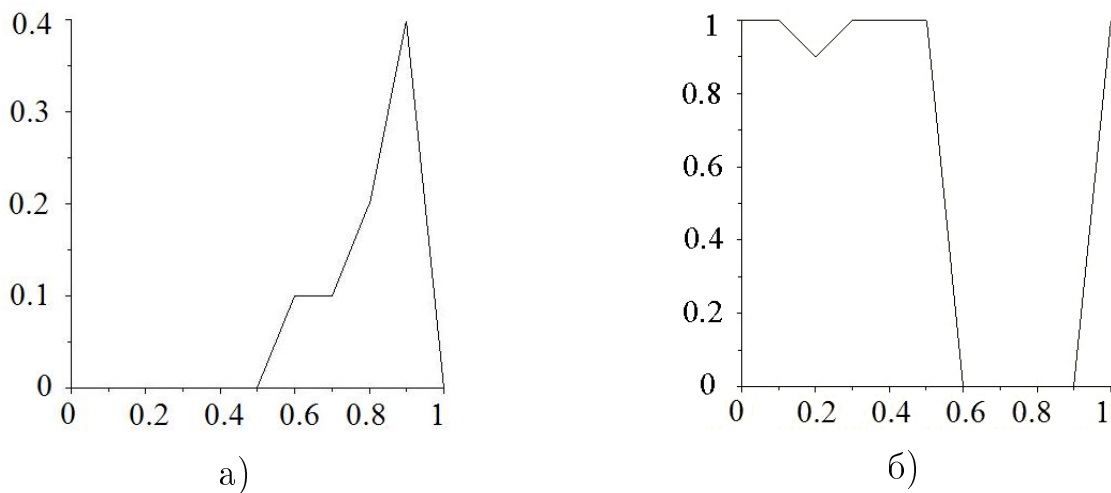


Рис. 6. Управление доступом для состояния $(i = 1, j = 2)$, (а) - u_1 , (б) - u_2

Далее приведено качественное сравнение двух систем передачи данных, где первая система имеет одну полосу пропускания со скоростью обслуживания $\mu_1 \in [\underline{\mu}_1, \overline{\mu}_1]$ и длиной очереди M_1 . Вторая система имеет две полосы пропускания, $\mu'_1 \in [\underline{\mu}'_1, \overline{\mu}'_1]$ с длиной очереди M'_1 и $\mu'_2 \in [\underline{\mu}'_2, \overline{\mu}'_2]$ с длиной очереди M'_2 , при этом $M_1 = M'_1 = M'_2 = 3$. Сравнение приводится по критерию качества, отвечающему за среднее время нахождения пакета в очереди. Проведенное моделирование показывает эффективность использования дополнительной полосы пропускания в состоянии перегрузки.

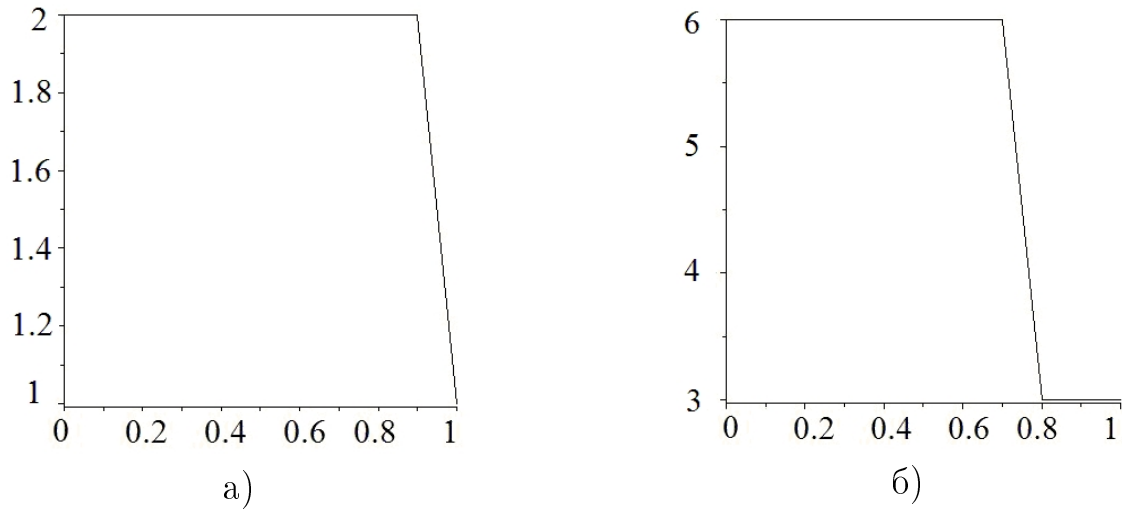


Рис. 7. Управление скоростью обслуживания для состояния ($i = 1, j = 2$), (а) - μ_1 , (б) - μ_2

Полоса 1	Полоса 2	Среднее время в очереди
$\mu_1 \in [1, 2]$	$\mu_2 \in [0.5, 1]$	0.15
$\mu_1 \in [1, 2]$	$\mu_2 \in [1, 2]$	0.10
$\mu_1 \in [1, 2]$	$\mu_2 \in [2, 5]$	0.09
$\mu_1 \in [1, 2]$	$\mu_2 \in [4, 10]$	0.07
$\mu_1 \in [1, 2]$	$\mu_2 \in [10, 20]$	0.06

Результаты исследования данной главы опубликованы в [6].
В заключении приводятся выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Построена детерминированная модель стационарного управления потоками пакетов в системе передачи данных. Модель учитывает активное поведение пользователей и состояние маршрутизатора.
2. Проведен сравнительный анализ метода предварительного ограничения входящего потока пакетов для нескольких наборов вероятностей отклонения пакетов, устанавливаемых маршрутизатором.
3. На основе теории управляемых марковских цепей построена стохастическая модель управления потоками пакетов для беспроводной сети передачи данных. Модель учитывает активное поведение терминальных станций, генерирующих потоки пакетов, посылаемых на конечную станцию с одной полосой пропускания.
4. Получено оптимальное управление доступом в очередь конечной станции и скоростью обслуживания с учетом естественных критериев, характеризующих функционирование сети.

5. Показана эффективность нестационарного оптимального управления по сравнению со стационарным управлением, использующим алгоритм произвольного раннего обнаружения.
6. Построена стохастическая модель управления потоками пакетов для беспроводной сети передачи данных, в которой оконечная станция может устанавливать связь с несколькими базовыми станциями. Предложено описание такой системы в терминах связанных марковских цепей, а также получено представление для состояния и уравнения динамического программирования в тензорной форме.
7. Проведен анализ эффективности использования оконечной станции с двумя полосами пропускания (по аналогии с беспроводной сетью широкополосного радиодоступа).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Miller A.V. Dynamic access control in the presence of active users // Journal of communications technology and electronics. 2010. V. 55, № 12. P. 1432–1441.
2. Миллер А.Б. Предотвращение перегрузок в сетях передачи данных с помощью методов стохастического управления // Автоматика и телемеханика. 2010. № 9. С. 70-82.
3. Миллер А.Б. Динамическое управление доступом к ресурсам и скоростью обслуживания при активных пользователях // Труды 52-й научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”. Часть 1. Радиотехника и кибернетика. М.: МФТИ. 2009. Т. 1. С.118-122.
4. Миллер А.Б. Динамическое управление доступом и скоростью обслуживания при активных пользователях // Сборник трудов конференции “Информационные технологии и системы” (ИТиС). М.: ИППИ. 2009. С. 436-442.
5. Miller A.V., Miller V.M. Congestion avoidance with the aid of stochastic control // Proceedings of the 49th IEEE CDC. 2010. P. 552-558.
6. Miller A.V., Miller V.M. Control of connected Markov chains. Application to congestion avoidance in the Internet // Proceedings of the 50th IEEE CDC. 2011. P. 7242-7248.