

Иванов Алексей Валентинович

**Разработка и исследование алгоритмов прогнозирования
и управления очередями в компьютерных сетях**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации».

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт - Петербург
2001

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном
техническом университете

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ - доктор технических наук,
профессор Заборовский В.С.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор физико-математических наук,
профессор Троицкий В.А.

кандидат технических наук,
Данилов В.Н.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Санкт-Петербургский институт
информатики и автоматизации -
- «СПИИРАН»

Защита диссертации состоится " 20 " декабря 2001 года в ___ часов
на заседании диссертационного Совета Д212.229.18 при Санкт-Петербургском
государственном техническом университете по адресу: 195251, Санкт-
Петербург, Политехническая, 29, 9 корпус, 325 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-
Петербургского государственного технического университета.

Автореферат разослан " _____ " ноября _____ 2001 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.Н. Шашихин

Актуальность темы исследования и состояние ее разработки.

Компьютерные сети, использующие протокол IP, в последнее время стали одними из наиболее популярных и быстро развивающихся компонентов современных информационных технологий. Используемая ими модель межсетевого взаимодействия обеспечивает высокий коэффициент использования сетевых ресурсов, однако создает трудности для передачи определенных видов трафика. У конечного пользователя последствия таких “заторов” сети проявляются в виде неадекватно больших задержек передачи данных и потерь пакетов. Если до появления мультисервисных систем подобные проблемы не вызывали особого беспокойства на фоне всеобщей эйфории по поводу удобства применения компьютерных сетей в различных областях науки и техники, то в последние годы они становятся все более явными.

Происходит это из-за появления новых классов сетевых приложений, которые предъявляют гораздо более высокие требования к качеству соединения. К таким приложениям относятся, например, IP-телефония, видеоконференции, распределенные вычисления, удаленное управление различными устройствами в реальном времени. Если рассматривать приложения, использующие протоколы прикладного уровня - ftp, http и др. , то для успешной их работы достаточно применения развитого транспортного протокола TCP. Действительно, требования, предъявляемые такими сетевыми приложениями к задержке очень невысоки, а потери пакетов успешно компенсируются механизмом подтверждений (посредством увеличения задержки передачи данных). При использовании асинхронных приложений не было настоящей необходимости в детальном анализе и устранении причин, вызывающих “заторы” в сети.

Однако, если, рассматривать приложения, которые предъявляют повышенные требования на качество соединения (изохронные), то условия, предоставляемые для их работы современными глобальными компьютерными сетями никак нельзя назвать удовлетворительными. Действительно, практически любое из таких приложений требует, чтобы задержка не превышала определенной величины или скорость передачи не падала ниже заданного значения.

В некоторых приложениях были сделаны попытки использовать в качестве транспортного протокол без гарантированной доставки UDP. Такой шаг позволяет сократить задержку передачи данных, поскольку не требуется дополнительное время на повторную передачу потерянных пакетов, с учетом то-

го, что большинство современных протоколов передачи аудио и видео данных малочувствительно к небольшому проценту потерь информации. Но все же реализовать такие повышенные требования к качеству соединения только посредством транспортного протокола, с гарантированной доставкой или без, представляется очень затруднительным, поскольку причины, приводящие к большим задержкам, большей частью находятся на сетевом уровне. И, хотя, в сетевом трафике до сих пор преобладает обычная передача файлов с гарантированной доставкой, доля данных, относящихся к новым классам приложений, постоянно растет.

Долгое время считалось, что поведение пакетов в сети, а именно такие присущие им параметры как интервал времени между пакетами, длина пачки пакетов и др., адекватно описываются экспоненциальными распределениями, например Пуассоновским. Такое допущение является верным для сетей небольшого размера и позволяет использовать классические методы теории массового обслуживания для расчета задержек, средних длин очередей и других сетевых параметров. Но с ростом размера сетей, увеличением разнообразия сетевых приложений, появлением новых протоколов передачи данных в поведении трафика стали проявляться свойства и особенности, характеризуемые таким словом как **фрактальность**. Основным моментом в котором проявляется отличие фрактального трафика от обычного является то, что его статистические характеристики (среднее значение, спектральная плотность, автокорреляционная функция и др.) имеют характер спада сильно отличающийся от экспоненциального. Соответственно оказались неверными и требуют корректировки исходные предпосылки, которые делались ранее при разработке многих сетевых устройств.

С другой стороны у фрактальных объектов присуще свойство самоподобия или масштабной инвариантности. Это свойство для сетевых процессов заключается в том, что с увеличением интервала агрегирования временного ряда сохраняется структура нижележащих уровней. Потенциально наличие такого свойства позволяет разработать алгоритмы прогнозирования, которые посредством анализа трафика на относительно небольшом отрезке времени предсказать его поведение на более длительных временных интервалах. Используя такие прогнозы, можно будет создавать более эффективные методы управления пропускной способностью, что позволит сократить задержки передачи данных по сети и потери пакетов.

Ситуация, сложившаяся в современных глобальных компьютерных сетях, наличие большого количества сетевых маршрутов на которых периодически наблюдаются резкие колебания задержки в передаче данных и большой процент потерь пакетов, появление новых взглядов на поведение и природу сетевого трафика, необходимость обеспечения взаимоувязки интересов различных категорий приложений и групп пользователей обусловили **актуальность избранной темы** данного диссертационного исследования, определили его объект, цель и задачи.

Предмет и объекты диссертационного исследования.

Предметом исследования являются высокоскоростные технологии современных компьютерных сетей и методы управления их ресурсами (пропускной способностью, процессорным временем и памятью) на основе прогнозирования поведения фрактального трафика, в условиях глобальной компьютерной сети.

Объектом исследования является сегмент крупнейшей глобальной компьютерной сети Internet, структура которого представлена системой крупных компьютерных сетей различных стран, регионов и организаций, тысячами различных приложений, десятками тысяч промежуточных узлов и маршрутизаторов, сотнями тысяч конечных узлов.

Теоретико-методические основы и методы исследования

Методической основой диссертации являются труды отечественных и зарубежных ученых по использованию методов оптимизации управления сетевыми ресурсами, рассмотрению моделей функционирования сети массового обслуживания с позиций системного анализа, методов адаптивного управления и теории прогнозирования при создании протоколов межсетевого взаимодействия. Существенный вклад в разработку данных проблем внесли: А.А. Ланнэ, А.А. Первозванский, А.Я. Городецкий, В.С. Заборовский и др., а за рубежом: W.Willinger, W.Leland, M.Taqqu, S.Meerkov, M.Crovella, K.Park.

Представленные в диссертации научные результаты, рекомендации и выводы, основанные на использовании этих методов, средств и методологических положений, работ отечественных и зарубежных авторов, вносят свой вклад в развитие теории управления процессами в компьютерных сетях. Это позволяет, исходя из текущих тенденций в развитии современных компьютерных сетей и сетевых приложений, формировать и реализовывать на основе алгоритмов прогнозирования поведения трафика наиболее эффективные и

практически осуществимые методы и алгоритмы управления сетевыми ресурсами.

Научная новизна диссертационной работы состоит в комплексном рассмотрении проблем обеспечения межсетевого взаимодействия с заданными параметрами качества, организации и управления распределением ресурсов сети с учетом влияния фрактальных свойств сетевых процессов, оценке влияния степени проявления фрактальных свойств трафика на работу некоторых механизмов сетевого управления, а именно:

определены типовые параметры модели авторегрессии интегрированного скользящего среднего для сетевых процессов трафика и круговой (Round Trip Time - RTT) задержки, которые показывают, что взятие разности первого порядка для сетевых процессов достаточно для приведения их стационарному виду;

получены оценки влияния степени проявления фрактальных свойств трафика на скорость передачи данных, среднюю длину очереди в буфере маршрутизатора, процент потерь пакетов, которые показывают, что при наличии ярко выраженных фрактальных свойств требуются иные подходы к распределению сетевых ресурсов, т.к. классические методы анализа, использующие экспоненциальные распределения, значительно занижают требования;

предложены алгоритмы прогнозирования сетевых процессов, использующие их фрактальные свойства.

Значение полученных в диссертации результатов для практики

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования при разработке и исследовании систем сетевого управления следующего:

систематизации и сравнительных характеристик основных методик оценки значения фрактального параметра α для сетевых процессов;

определенных на основе большого объема экспериментальных данных характерных свойств сетевых процессов (неоднородности, масштабная инвариантности, основного вида нестационарности – линейный тренда);

разработанной модели сети, обеспечивающей формирование трафика с заданными статистическими (фрактальными) свойствами;

полученных зависимостей, отражающих влияние степени проявления фрактальных свойств трафика на такие сетевые параметры, как скорость передачи, средняя длина очереди, процент потери пакетов;

полученных в диссертации оценок работы алгоритмов прогнозирования сетевых процессов, которые позволяют сформировать комплекс механизмов управления ресурсами сети, обеспечивающих более эффективное их распределение и использование.

Достаточно обобщенный и универсальный характер разработанных в диссертации положений позволяют использовать их для решения широкого круга задач сетевого управления.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается предварительным анализом значительного числа отечественных и зарубежных публикаций по исследуемой и смежным проблематикам, использованием методов математического и имитационного моделирования, приведенными в диссертации примерами их реализации в конкретных производственных условиях. Систематизирован значительный объем информации по теории и практике сетевого управления, обобщенный автором за период с 1989 по 2001 годы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 11 таблиц, 47 рисунков. Объем работы - 146 страниц машинописного текста, в том числе список литературы из 59 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, устанавливаются цель и задачи исследования, показана научная новизна, представлены теоретические и методические основы диссертационной работы, основные ее положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** “Управление и организация виртуальных соединений с заданными параметрами качества в современных высокоскоростных компьютерных сетях и постановка задачи исследования” подробно раскрывается современное состояние решения проблемы организации и управления виртуальных соединений с заданными параметрами качества.

Качество услуг включает в себя следующее: минимизацию или поддержание заданного уровня задержки, минимизацию колебаний задержки (джиттера), предоставление гарантированной скорости передачи данных. Также в главе систематизированы и даны определения параметрам, служащим для описания уровня качества услуг: время передачи, джиттер, пропускная способность, потеря пакетов, доступность узла. Выделены основные механизмы

управления соединениями с гарантированным уровнем качества услуг: управление допуском, формирование и контроль трафика, классификация пакетов, маркировка пакетов, механизмы приоритетов и составления расписания, сигнальные протоколы, механизмы буферизации, управления переполнением.

Даны определения основные понятиям, описывающим фрактальные свойства процессов – самоподобие и протяженную зависимость. Рассмотрим функцию временного аргумента $f(t)$, которая описывает свойства некоторого процесса. Если для этой функции на плоскости $(x_1, x_2) = (t, f(t))$ выполняется равенство

$$f(\lambda t) = \lambda^\alpha f(t) \quad (1)$$

то для рассматриваемого процесса имеет место свойство масштабной инвариантности или *самоподобия*. Параметр α называют *фрактальной экспонентой* или *фрактальным параметром*. В главе рассмотрены и систематизированы методы оценки значения степенного фрактального параметра α . На основе большого количества экспериментальных данных показано наличие свойства протяженной зависимости и самоподобия для сетевых процессов. На основе вышеизложенного были сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Целью диссертационной работы является разработка и научное обоснование теоретических положений, практических рекомендаций по методам прогнозирования поведения сетевых процессов и управления пропускной способностью в условиях глобальной компьютерной сети с трафиком, обладающим фрактальными свойствами, посредством реализации принципов системного подхода в организации сетевой структуры, математического моделирования поведения сетевого трафика, имитационного моделирования в решении комплекса задач по оценке влияния степени фрактальности трафика на производительность работы сети и качество прогнозирования.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих **основных задач**:

подробное исследование и анализ свойств сетевых процессов, определение их статистических характеристик;

выбор и обоснование моделей сетевых процессов, объясняющих их характерные свойства, а также позволяющих их использовать для целей управления и прогнозирования;

определение параметров предложенных моделей сетевых процессов для полученных экспериментальных данных;

разработка алгоритмов прогнозирования поведения сетевых процессов на основе предложенных моделей;

исследование и сравнительный анализ работы алгоритмов прогнозирования сетевых процессов;

разработка имитационной модели сети, обеспечивающей формирование трафика с заданными статистическими (фрактальными) свойствами;

на основе варьирования параметров разработанной имитационной модели, определение механизмов сетевого управления, наиболее подверженных влиянию фрактальных свойств трафика, определение степени этого влияния.

Вторая глава “Случайные процессы в компьютерных сетях – статистический анализ и математическая модель” посвящена исследованию свойств и определению статистических характеристик и моделей процессов в компьютерных сетях.

Описаны два основных сетевых процесса – основной процесс трафика или передачи данных по сети и процесс RTT-задержки, который служит для получения информации о состоянии сети методом “черного ящика”, когда через объект наблюдения (компьютерную сеть) пропускается последовательность пакетов, и на основе времени их прохождения до удаленного узла и обратно делаются выводы о загрузке сети. Следует отметить, что трафик принимает *дискретные* значения на *дискретном* времени, а RTT-задержка – *непрерывные* значения на *дискретном* времени.

RTT-задержка определяется следующим образом:

$$T_{RTT} = T^{const} + \Delta T, \quad (2)$$

где $T^{const} = 2 \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^{N-1} T_{ij}^{const}$, т.е. сумма задержек передачи данных между i и j уз-

лами на пути соединения и обратно (предполагается, что маршруты в прямом и обратном направлениях совпадают);

$$\Delta T = \sum_{i=1}^N Q_i, \quad Q_i - \text{задержка пакета в очереди } i\text{-го узла};$$

N - количество промежуточных узлов в маршруте соединения.

Предположим, что для очереди в каждом узле работает модель обслуживания M/M/1. Тогда распределение $P(Q_i > x) = \lim_{t \rightarrow \infty} (Q_i(t) > x)$ имеет вид:

$$P(Q_i > x) = e^{-\gamma_i x}, \quad \gamma_i = \mu_i(1 - r_i)$$

где μ_i – интенсивность обслуживания, γ_i – коэффициент загрузки обслуживающего прибора.

Тогда распределение $\Delta T(P(\Delta T) > x) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(\Delta T(t) > x)$ можно представить в виде:

$$P(\Delta T > x) = \sum_{i=1}^N a_i e^{-\gamma_i x}, \quad (3)$$

$$\text{где } a_i = \prod_{j=1, j \neq i}^N \frac{\gamma_j}{\gamma_j - \gamma_i}, \quad \sum_{i=1}^N a_i = 1.$$

Если исходить из выражения (3), длительность ΔT должна спадать экспоненциально, однако из большого количества экспериментальных данных следует, что ΔT спадает гораздо более медленно. Это находит свое отражение во всех статистических характеристиках, например коэффициенте корреляции (Рис.1).

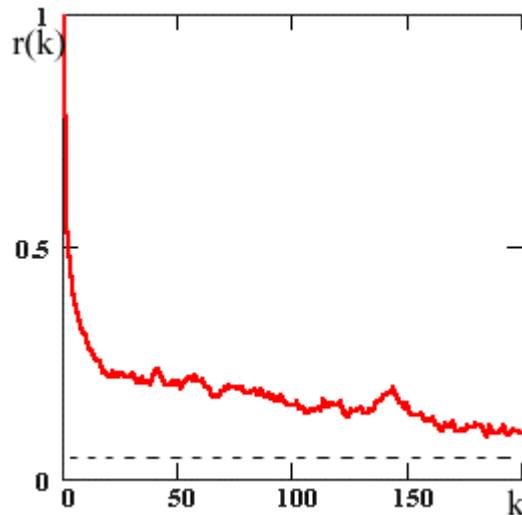


Рис. 1 . Коэффициент корреляции для одной из реализаций процесса RTT-задержки. (пунктиром отмечен уровень значимости для белого шума).

Следовательно, вышеприведенный подход приводит к неверным оценкам в случае глобальных компьютерных сетей. В таблице 1 приведены данные по нескольким выборкам (реализациям) сетевых процессов, которые были проанализированы в диссертационном исследовании. Всего было исследовано около 50 реализаций каждого типа сетевого процесса длительностью от 4500 до 20000 отсчетов в различных точках и структурах сети.

Для 90% реализаций трафика и 95% реализаций RTT-задержки было подтверждено наличие свойства протяженной зависимости и, следовательно, связанного с ним свойства самоподобия (масштабной инвариантности).

Табл. 1 Данные по выборкам, полученным в результате проведения экспериментов по исследованию сетевых процессов.

Процесс:	Длина (отсчетов)	Среднее	Дисперсия	СКО	Коэффициент вариации (%)
РТТ-задержка (вариант 1)	15809	1192.83 мс	2889916.7	1699.9	142.5%
РТТ-задержка (вариант 2)	5509	1874.76 мс	2507904.9	1583.6	84.5%
График (вариант 1)	8529	35.164 пак./с	161.06	12.69	36%
График (вариант 2)	4669	64.26 пак./с	248.85	15.77	24.6%

Для прогнозирования случайных процессов классически используется модель авторегрессии интегрированного скользящего среднего АРИСС(p,d,q), допускающая обобщение на случай нестационарных процессов. Модель строится на гипотезе о том, что случайную величину y_t можно представить в виде бесконечной линейной комбинации случайных величин

$$y_t = \varepsilon_t + c_1 \varepsilon_{t-1} + c_2 \varepsilon_{t-2} + \dots = \sum_{j=0}^{\infty} c_j \varepsilon_{t-j} = \sum_{j=-\infty}^t c_{t-j} \varepsilon_j \quad (4)$$

где ε_t – дискретный белый шум

c_0, c_1, \dots – весовые коэффициенты.

$$M[\varepsilon_t] = 0, \quad D[\varepsilon_t] = \sigma^2, \quad \text{cov}(\varepsilon_t, \varepsilon_s) = \begin{cases} \sigma^2, & \text{при } t = s \\ 0, & \text{при } t \neq s \end{cases}$$

Впервые эти модели были систематизированы и описаны американскими учеными Боксом и Дженкинсом в 1976 году и изначально предназначались для построения оптимальных в среднеквадратическом смысле прогнозов случайных величин. Параметр модели p – означает порядок авторегрессии, q – порядок скользящего среднего, d – порядок разности. Для стационарных процессов порядок разности $d=0$, в случае нестационарных процессов последовательно берут разности, пока не получают стационарный ряд для которого затем и строится прогноз. После этого производят суммирование в обратном направлении и получают прогноз для исходного ряда.

Для исследуемых реализаций сетевых процессов был оценен порядок разности d и во всех случаях он равен 1. Т.е. для всех сетевых процессов характерно наличие нестационарности в виде линейного тренда.

Особое внимание в главе уделено моделям, учитывающим фрактальные свойства сетевых процессов, а именно ON/OFF модели сетевого трафика и моделированию сетевых процессов при помощи фрактального броуновского движения.

Показано, что в ON/OFF модели для формирования самоподобного трафика необходимо большое количество конкурирующих соединений и достаточно наличие свойства “тяжелого” распределения длин файлов, передаваемых по сети. В качестве примера распределения, обладающего такими свойствами может быть приведено распределение Парето с параметром $K=\beta/\tau_0$:

$$p(\tau) = \begin{cases} K \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-(\beta+1)}, & \tau \geq \tau_0 \\ 0, & \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (5)$$

При $\beta \leq 2$ дисперсия стремится к бесконечности.

Также для описания фрактальных свойств сетевых удобно применять предложенное Мандельбротом понятие обобщенного броуновского движения, которое по определению записывается в форме дробного интеграла

$$B_H(t) = \frac{1}{\Gamma(H + \frac{1}{2})} \int_{-\infty}^t h(t-\tau) dB(\tau) \quad (6)$$

где $dB(\tau)$ – приращение винеровского процесса, $\Gamma(\cdot)$ – гамма функция, H – параметр Херста.

Сетевой процесс RTT задержки моделируется при помощи фрактального броуновского движения. Так, например, для процесса RTT-задержки при известном маршруте соединения можно выделить постоянную минимальную составляющую T_0 , которая обуславливается отсутствием очередей, и случайную составляющую, возникающую из-за задержек в очередях и связанную со случайным поведением сетевого трафика ΔT_i : $T_i = T_0 + \Delta T_i$. Рассматривая выражение $T_i - M\{T_i\}$, где $M\{T_i\} = T_0 + \Delta T_{cp}$, ΔT_{cp} – среднее значение приращения RTT-задержки, в качестве случайного приращения броуновского движения, можно сформировать для момента времени t_n фрактальный броуновский процесс:

$$B_H(t_n) = \sum_{i=1}^n [T_i - (T_0 + \Delta T_{cp})] \quad (7)$$

который обладает свойствами самоподобия.

В третьей главе “Применение методов прогнозирования сетевых процессов для управления виртуальными соединениями с заданными параметрами качества” подробно рассмотрены проблемы управления виртуальными сетевыми соединениями, определены области применения и уровни сетевой модели, в которых эти проблемы могут быть решены при помощи прогнозирования сетевых процессов.

Систематизированы управляющие воздействия с использованием прогноза поведения трафика по каждому исходящему порту маршрутизатора:

- смена порта для отправки пакетов на менее загруженный или отправка через него части пакетов, т.е. изменение маршрута передачи данных;
- перераспределение буферной памяти, с целью избежания потерь пакетов по более загруженным направлениям.
- изменение приоритетов или дисциплины обслуживания очередей, в зависимости от данных прогноза;
- подача сигнала о возможной будущей перегрузке соседним маршрутизаторам.

Проведена сравнительная характеристика и получены численные оценки работы алгоритмов прогнозирования, частично представленные в табл. 2 и 3.

μ и σ - среднее значение и СКО прогнозируемого процесса, $\hat{\mu}$ и $\hat{\sigma}$ - прогноза, отношение $\frac{\hat{\sigma}}{\mu}$ - позволяет оценить точность прогноза.

Табл. 2 Прогнозирование по модели АРИСС.

Реализация процесса	μ	σ	Коэф. вар., %	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$ \mu - \hat{\mu} $	$\frac{\hat{\sigma}}{\mu}, \%$
RTT (вар.1)	1192.83	1699.9	142.5%	1193	1003.8	0.07	84.1%
RTT (вар.2)	1874.76	1583.6	84.5%	1875.67	990.74	0.91	52.82%
Трафик (вар.1)	35.164	12.69	36%	35.15	9.97	0.014	28.36%
Трафик (вар.2)	64.26	15.77	24.6%	64.24	14.2	0.02	22%

Табл. 3 Прогнозирование по модели фрактального броуновского движения.

Реализация процесса	μ	σ	Коэф. вар., %	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$ \mu - \hat{\mu} $	$\frac{\hat{\sigma}}{\mu}, \%$
RTT (вар.1)	1192.83	1699.9	142.5%	1192.87	979.44	0.04	82.11%
RTT (вар.2)	1874.76	1583.6	84.5%	1874.87	971.67	0.11	51.83%
Трафик (вар.1)	35.164	12.69	36%	35.16	10.49	0.004	29.84%
Трафик (вар.2)	64.26	15.77	24.6%	62.263	14.91	0.003	23.2%

Следует отметить, что метод прогнозирования на основе модели АРИСС лучше работает с понижением степени проявления фрактальных свойств. При повышении степени фрактальности гораздо лучший прогноз дает метод фрактального броуновского движения, т.к. он лучше использует глубокие корреляционные связи, которые возрастают со степенью фрактальных свойств.

Из таблиц 2 и 3 также следует отметить, что по среднеквадратической ошибке точность прогнозов невелика, особенно в случае РТТ-задержки. Это объяснимо, т.к. ошибка прогноза определяется дисперсией исходного процесса, а в случае сетевых процессов значение дисперсии растет со степенью фрактальных свойств. Обычно для улучшения качества прогнозирования применяют различные алгоритмы фильтрации или сглаживания исходного процесса. При работе таких алгоритмов убираются или сглаживаются редкие, но большие по величине выбросы в реализациях сетевых процессов как статистически “незначимые”. К сожалению, это очень сильно снижает ценность прогнозирования в случае сетевых процессов, т.к. основной целью сетевого управления как раз и является предсказание и устранение последствий таких выбросов. В этом плане эффективными оказываются методы фильтрации основанной на применении конструктивного анализа, в которых такие выбросы не теряются.

Конструктивный анализ является составной частью конструктивной теории функций, которая по определению С.Н. Бернштейна есть “направление теории функций, которое ставит себе целью дать возможно более простую и удобную основу для качественного изучения и вычисления как эмпирических функций, так и всяких функций, являющихся решениями естественно поставленных задач математического анализа”. Для разработки конструктивного анализа колебательных процессов фундаментальное значение имеет выбор базиса или множества элементов, на которые раскладывается исходный процесс. При этом должна сохраняться информация о законе изменения мгновенных значений процесса. Аналоги таких разложений известны. Во-первых, это разложение Котельникова, где коэффициенты ряда Котельникова есть мгновенные значения процесса. Однако при статистическом усреднении во времени эта информация теряется. Во-вторых, это разложение процесса по собственным выборочным функциям с последующим когерентным накоплением при заранее известных временных интервалах между выборочными функциями. Конструктивный анализ сетевых процессов показал наличие свойства узкопо-

лосности для процесса сетевого трафика, т.е. спектр реальных частот составляет одну октаву.

Поскольку точность прогнозов невелика, то была предложена несколько другая оценка эффективности работы алгоритмов прогнозирования. Как уже упоминалось выше, с точки зрения управления виртуальными соединениями важно определить моменты времени, в которые уровень сетевого процесса начинает превышать некоторое пороговое значение. Следует отметить, что для сетевых процессов это пороговое значение определяется эмпирически и зависит от конфигурации конкретной сети и работы алгоритмов управления очередями, степени заполнения очередей в конкретных маршрутизаторах. В простейшем случае это максимально допустимый уровень трафика, выше которого произойдет переполнение очереди и, соответственно, начнутся потери пакетов или минимально допустимый, ниже которого очередь будет постепенно пустеть и следовательно можно использовать зарезервированную для нее память для хранения пакетов, которые передаются в более загруженных направлениях.

Соответственно был произведен сравнительный анализ алгоритмов прогнозирования с точки зрения обнаружения редких выбросов, результат которого нашел отражение в табл. 4. В качестве порога использовался $\mu \pm 2 \cdot \sigma$, где μ - среднее значение прогнозируемого процесса, σ - его среднеквадратическое отклонение. При таком выборе порога выбросы будут достаточно редкими событиями, но и при этом их будет достаточно для сравнительной оценки качества работы алгоритмов прогнозирования.

Табл. 4 Сравнительные данные по обнаруженным выбросам и ложным тревогам.

Реализация процесса:	RTT (вар.1)	RTT (вар.2)	Трафик (вар.1)	Трафик (вар.2)
Всего выбросов:	860 (5% выборки)	326 (6% выб.)	357 (4% выб.)	197 (4% выб.)
Обнаружено (АРИСС)	493	179	11	0
Обнаружено (Фр.бр.дв.)	539	174	11	0
Ложных тревог (АРИСС)	147	76	13	0
Ложных тревог (Фр. бр. дв.)	76	22	14	0

Для реализации процесса RTT N1: АРИСС – 57%, фрактальное броуновское движение – 63%. Ложных тревог по сравнению с обнаруженными выбросами: АРИСС – 29.8%, фрактальное броуновское движение – 14%. Для реализации процесса RTT N2: АРИСС – 55%, фрактальное броуновское движение – 55%. Ложных тревог по сравнению с обнаруженными выбросами: АРИСС –

42.5%, фрактальное броуновское движение – 12.6%. Следовательно, модель фрактального броуновского движения дает гораздо более лучшие результаты как по обнаруженным выбросам, так и по количеству ложных тревог.

Четвертая глава “Анализ влияния свойства самоподобия сетевого трафика на производительность работы сети” посвящена проблеме оценки степени влияния фрактальных свойств сетевых процессов на работу механизмов управления виртуальными соединениями.

На основе описанной во второй главе ON/OFF модели сети предложен механизм формирования трафика с заданными фрактальными свойствами. Основным свойством этой модели является “тяжелое” распределение длин файлов, хранящихся на серверах сети. “Тяжелое” распределение означает ненулевую вероятность передачи сверхдлинных файлов, что подтверждается экспериментальными исследованиями. В модели в качестве такого распределения используется распределение Парето (5). Определена связь между фрактальным параметром α и параметром формы β распределения Парето:

$$\alpha=2-\beta$$

С использованием предложенной модели в среде имитационного моделирования Network Simulator показано, что фрактальные свойства оказывают значительное влияние на работу механизмов сетевого управления, которое растет со степенью фрактальных свойств трафика.

Получены оценки зависимости роста средней длины очереди от степени фрактальных свойств трафика (рис. 2).

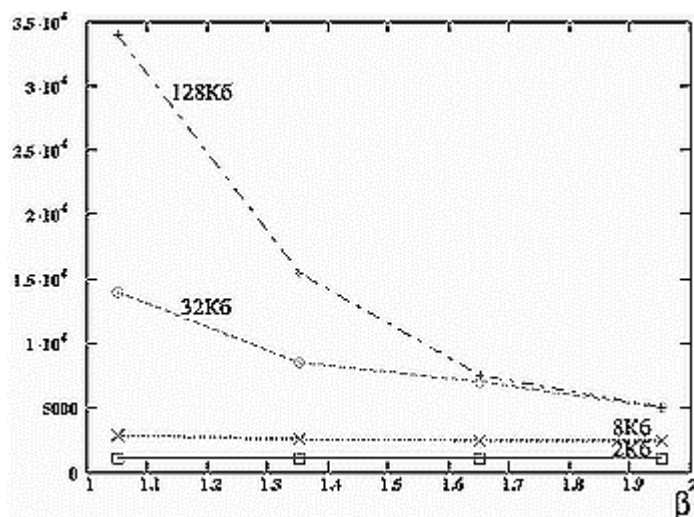


Рис. 2. Средняя длина очереди для четырех значений объема буфера.

В заключении обобщаются результаты диссертационного исследования, обладающие признаками научной новизны, характеризуется теоретическая и практическая значимость работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Полученные в диссертационной работе результаты вносят ряд поправок и изменений в современные подходы к организации управления ресурсами высокоскоростных компьютерных сетей и позволяют сформировать новый класс алгоритмов управления, использующих в своей работе методы прогнозирования поведения различных сетевых процессов. На основе полученных в четырех главах диссертации выводов могут быть сформулированы следующие основные результаты:

1. Обобщены и систематизированы основные современные тенденции развития методов управления виртуальными соединениями с заданными параметрами качества в дейтаграмных сетях. Определены основные понятия, используемые для описания параметров виртуального соединения и исследования механизмов управления сетевыми ресурсами.

2. На основе большого объема экспериментальных данных проанализированы и исследованы особенности поведения реальных сетевых процессов. Выделены два наиболее важных сетевых процесса – трафика и RTT-задержки. Определены их свойства и основные статистические характеристики.

3. Исследован комплекс математических моделей, описывающих случайные процессы передачи данных в компьютерных сетях. Рассмотрены модели, учитывающие фрактальные свойства сетевых процессов и определены их основные параметры для экспериментально полученных данных.

4. Определены причины, обеспечивающие генерацию фрактального трафика в компьютерной сети:

- наличие большого количества конкурирующих между собой соединений;
- “тяжелое” распределение длин файлов, хранящихся на узлах глобальной компьютерной сети.

Разработана модель, обеспечивающая получение трафика с заданными статистическими свойствами.

5. На основе имитационного моделирования определены механизмы сетевого управления наиболее подверженные влиянию фрактальных свойств трафика, а именно механизм буферизации. Разработана методология оценива-

ния влияния степени проявления фрактальных свойств на эффективную производительность работы компьютерной сети и получены численные оценки.

6. Проведен сравнительный анализ алгоритмов прогнозирования сетевых процессов и получены оценки качества прогнозирования для всех предложенных методов. Определены области и границы применения каждого алгоритма прогнозирования. При высокой степени фрактальных свойств (степень протяженной зависимости, характеризуемая параметром Херста, $H > 0.8$) хорошо работает метод прогнозирования, основанный на моделировании сетевого трафика фрактальным броуновским движением. Достоинством этого метода является возможность обнаружения значительной доли (до 60%) редких, но больших по величине выбросов в наблюдаемых сетевых процессах.

Предложенные в диссертации алгоритмы прогнозирования и методики оценки фрактального параметра α сетевых процессов, а также данные о влиянии фрактальных свойств на механизмы управления виртуальными соединениями были использованы при разработке программного обеспечения многофункционального сетевого процессора в ЦНИИ РТК и в разработках НИЦ “КРИСТАЛЛ”.

Основные публикации автора по теме диссертации.

1. Сетевые технологии в управлении робототехническими системами. //Тезисы доклада к первой международной конференции “Мехатроника и робототехника”.-Санкт-Петербург: НПО Омега, 2000.-0.3п.л. (в соавт.)

2. Процессы передачи данных в мультиагентных системах. // Тезисы доклада к первой международной конференции “Мехатроника и робототехника”.-Санкт-Петербург: НПО Омега, 2000.-0.4п.л. (в соавт.)

3. Динамика процессов передачи данных в компьютерных сетях. // Тезисы доклада к IV Всероссийской научно-технической конференции “Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем”.-Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та, 2001.-0.2п.л. (в соавт.)

4. Фрактальный трафик и его влияние на производительность работы сети.//Тезисы доклада к второй Всероссийской научно-технической конференции “Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий”.-г.Улан-Удэ: ВСГТУ, 2001.-0.5п.л.

5. Фрактальные процессы в компьютерных сетях: методы идентификации моделей трафика.//Научно-технические ведомости СПбГТУ.-СПб:СПбГТУ,2001, №3.-0.5п.л.