

*На правах рукописи*

**ПЕТРОВ Виталий Валерьевич**

**СТРУКТУРА ТЕЛЕТРАФИКА  
И АЛГОРИТМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ  
ПРИ ВЛИЯНИИ ЭФФЕКТА САМОПОДОБИЯ**

05.12.13 – “Системы, сети и устройства телекоммуникаций”

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва, 2005

Работа выполнена на кафедре Радиоприемных устройств Московского энергетического института (Технического университета)

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор  
БОГАТЫРЕВ Евгений Алексеевич.

Официальные оппоненты – заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор  
ШЕЛУХИН Олег Иванович,  
– кандидат технических наук, доцент  
ТОМАШЕВСКИЙ Алексей Иосифович.

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. Карцева М.А.  
(НИИВК), г. Москва.

Защита состоится “ 10 ” февраля 2005 года в “ 15 ” часов “ 30 ” минут на заседании диссертационного совета Д 212.157.05 при Московском энергетическом институте (Техническом университете) по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 17, аудитория А-402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Учёный совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан “ 28 ” декабря 2004 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Курочкина Т. И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** При проектировании, запуске и эксплуатации информационных телекоммуникационных сетей одной из основных проблем является задача обеспечения качества обслуживания (заданных уровней задержек, потерей и пр.) при обработке потока данных - трафика, являющегося следствием информационного обмена между системами.

До недавнего времени теоретическую базу для проектирования систем распределения информации обеспечивала теория телетрафика, которая является одной из ветвей теории массового обслуживания и появилась в результате работ А.К. Эрланга, Т. Энгсета, Г. О'Делла, К. Пальма, А.Я. Хинчина и др. Данная теория хорошо описывает процессы, происходящие в таких системах распределения информации, как телефонные сети, построенных по принципу коммутации каналов. Наиболее распространенной моделью потока вызовов (данных) в теории телетрафика является простейший поток (стационарный ординарный поток без последствия), также называемый стационарным пуассоновским потоком.

Настоящий период бурного развития высоких технологий привел к появлению и повсеместному распространению сетей с пакетной передачей данных, которые постепенно стали вытеснять системы с коммутацией каналов, но, по-прежнему, они проектировались на основе общих положений теории телетрафика.

Однако, в 1993 году группа американских исследователей: W.Leland, M.Taqqu, W.Willinger и D.Wilson опубликовали результаты своей новой работы, которая в корне изменила существующие представления о процессах, происходящих в телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов. Эти исследователи изучили трафик в информационной системе корпорации Bellcore и обнаружили, что потоки в ней нельзя аппроксимировать простейшими. Другими словами эти потоки уже имеют совершенно иную структуру, чем принято в классической теории телетрафика. В частности, было установлено, что трафик такой сети обладает так называемым свойством "самоподобия", т.е. выглядит

качественно одинаково при почти любых масштабах временной оси, имеет память (последствие), а также характеризуется высокой пачечностью<sup>1</sup>.

В результате теоретический расчет параметров системы распределения информации, предназначенной для обработки такого трафика, по классическим формулам дает некорректные и неоправданно оптимистические результаты. Более того, привычные алгоритмы обработки трафика, созданные для работы с простейшими потоками, оказываются недостаточно эффективны для потоков с самоподобием.

Таким образом, сформировалась “проблема самоподобия телетрафика”, которой за последние 11 лет посвящено более тысячи серьезных работ, и которая до сих пор не утратила своей актуальности. Среди зарубежных ученых, активно занимающихся этой проблемой, необходимо выделить уже упоминавшихся авторов, которым принадлежат наиболее фундаментальные труды в этом направлении, а также К. Park, В. Ryu, V. Paxson, R. Mondragon и др. Среди отечественных исследователей необходимо отметить работы В.И. Неймана, Б.С. Цыбакова, Н.Б. Лиханова, О.И. Шелухина, В.С. Заборовского, А.Я. Городецкого и др.

Несмотря на значительную популярность этой тематики и продолжительный (11 лет) период ее активного изучения, приходится констатировать, что до сих пор остается ряд вопросов и нерешенных задач. Перечислим, на наш взгляд, основные из них:

- фактически отсутствует строгая теоретическая база, которая пришла бы на смену классической теории массового обслуживания при проектировании современных систем распределения информации с самоподобным трафиком;
- нет единой общепризнанной модели самоподобного трафика;

---

<sup>1</sup> Коэффициент пачечности (пачечность) для заданного потока соответствует отношению пиковой интенсивности процесса поступления заявок на обслуживание к его среднему значению.

- не существует достоверной и признанной методики расчета параметров и показателей качества систем распределения информации при влиянии эффекта самоподобия;

- отсутствуют алгоритмы и механизмы, обеспечивающие качество обслуживания в условиях самоподобного трафика.

Настоящая диссертация посвящена решению последней из перечисленных, но далеко не последней по степени важности задаче.

**Цель и задачи работы.** Целью настоящей диссертационной работы является разработка алгоритма обеспечения качества обслуживания в системах распределения информации с самоподобным трафиком. Создаваемый алгоритм должен обеспечить увеличение эффективности обработки самоподобного телетрафика с точки зрения улучшения таких показателей как задержки, потери пакетов, а также коэффициента использования системы. Для этого требуется провести анализ состояния проблемы и решить следующие основные задачи:

- формирование основных идей и принципа функционирования алгоритма обеспечения качества обслуживания в условиях самоподобного трафика;

- подготовка и проведение эксперимента по сбору трафика, а также выполнение статистического анализа реализаций трафика на предмет выявления его характерных особенностей, которые необходимо учитывать при разработке алгоритма обеспечения качества обслуживания в условиях влияния эффекта самоподобия;

- анализ прогнозируемости сетевого трафика как базовой концепции разрабатываемого алгоритма;

- разработка схемы функционирования и принципов реализации механизма обеспечения качества обслуживания в условиях самоподобного трафика для существующих систем;

- проведение испытаний (имитационное моделирование на ПЭВМ) и оценка эффективности разработанного алгоритма.

**Методы исследования.** Для решения перечисленных задач в работе использованы методы статистической обработки данных, теории нелинейных ди-

намических систем, в том числе, хаотических (раздела реконструкции динамической системы по ее реализации), регрессионного анализа временных рядов, а также имитационное моделирование и расчеты на ПЭВМ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Количественные и качественные характеристики самоподобного сетевого трафика.
2. Результаты анализа трафика в беспроводной сети стандарта IEEE 802.11b.
3. Теоретические предпосылки возможности прогнозирования сетевого трафика.
4. Результаты статистического эксперимента по прогнозированию реализаций сетевого трафика и сравнение возможностей различных предсказателей.
5. Структура предлагаемого алгоритма обеспечения качества обслуживания в условиях самоподобного трафика с помощью прогнозирования, его принципы и схема организации.
6. Результаты имитационного моделирования алгоритма обеспечения качества обслуживания в условиях самоподобного трафика.

**Научная новизна работы.** В диссертации получены следующие новые научные и практические результаты:

1. Разработан новый алгоритм обеспечения качества обслуживания в условиях самоподобного трафика, использующий прогнозирование.
2. Показано, что метод динамического распределения пропускной способности канала, основанный на прогнозировании, дает ощутимый выигрыш в уменьшении потерь и увеличении степени использования канала при самоподобном телетрафике по сравнению со статическим способом распределения при том же самом среднем значении пропускной способности.
3. Впервые аналитически доказана возможность прогнозирования самоподобного трафика.

4. Обнаружены регулярные периодические составляющие в агрегированном сетевом трафике.

5. Впервые показано, что трафик беспроводных сетей передачи данных также обладает свойством самоподобия. Показана актуальность проблемы самоподобия для современных телекоммуникационных систем.

**Практическая ценность работы и её реализация.** Результаты, полученные в ходе выполнения настоящей диссертационной работы, могут быть использованы при разработке алгоритмов функционирования и программного обеспечения узлов телекоммуникационного оборудования с целью повышения качества обслуживания и эффективности обработки трафика, обладающего свойством самоподобия.

Разработанная в диссертации имитационная модель алгоритма динамического распределения пропускной способности с прогнозированием используется в демонстрационной лабораторной работе по дисциплине “Методы и устройства цифровой обработки сигналов” на кафедре РПУ МЭИ (ТУ). Имеется соответствующий Акт об использовании.

Материалы данной работы вошли в НИОКР по теме: «Сопряжение периферийных земных станций спутниковой связи с абонентскими пунктами информационно-коммуникационной системы», целью которой являлось сокращение затрат на аренду частотно-энергетического ресурса спутника-ретранслятора “Ямал-200” при проектировании и построении Ведомственной Технологической Сети Спутниковой Связи для Министерства Российской Федерации по атомной энергии, о чем свидетельствует соответствующий Акт внедрения.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IX и X международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника, энергетика” в 2003 и 2004 годах, научно-технических семинарах кафедры РПУ МЭИ в 2003 и 2004 годах, 58-й научной сессии РНТОРЭС им. А.С. Попова в 2003 году и Международной конференции “Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking (NEW2AN)” в 2004 году.

По теме диссертации автором опубликовано 5 печатных работ.

**Объем и структура работы.** Настоящая диссертация содержит 197 страниц и состоит из введения, четырех глав, заключения и 2 приложений, включая 86 иллюстраций. Список литературы содержит 84 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность выбранной темы, в общем виде формулируются цель работы, а также проблемы и задачи, стоящие перед исследователями в области самоподобного сетевого трафика.

В **Главе 1** на основе анализа известных автору источников обсуждается современное состояние и главные достижения теории самоподобного телетрафика. Даются определения самоподобного процесса и обсуждаются его основные свойства. Подробно рассматриваются и взаимосвязываются в отношении телетрафика такие понятия как самоподобие, фрактальность и хаос, медленно и быстро убывающие зависимости, продолжительная память, коэффициент Хэрста и фрактальная размерность, распределения с “тяжелыми хвостами”, персистентность и антиперсистентность, которые до сих пор во многих работах изучаются в отрыве друг от друга.

Подробно обсуждены известные алгоритмы управления интенсивностью трафика, такие как шейпинг и полисинг. Суть данных алгоритмов, как следует из рис.2, заключается в следующем:

- шейпинг сглаживает трафик и пересылает его с постоянной интенсивностью (согласованной скоростью передачи  $C_{\text{согл}}$ ) путем постановки в очередь (буферизации) пакетов, интенсивность передачи которых превысила заданное значение  $C_{\text{согл}}$ ;
- механизм полисинга, в свою очередь, просто отбрасывает пакеты, интенсивность которых выше согласованной скорости передачи  $C_{\text{согл}}$ .

С одной стороны, поскольку шейпинг не допускает отбрасывания пакетов, то это делает его привлекательным для задач управления передачей информации реального времени (голос, реальное видео). С другой стороны, он



вносит задержки, связанные с буферизацией, что отрицательно сказывается на характеристиках передаваемого трафика. Алгоритм полисинга в отношении высокопачечного трафика также проявляет себя далеко не с лучшей стороны: чтобы достичь приемлемых показателей потерь, необходимо значительно увеличить пропускную способность канала, снизив при этом утилизацию канала.

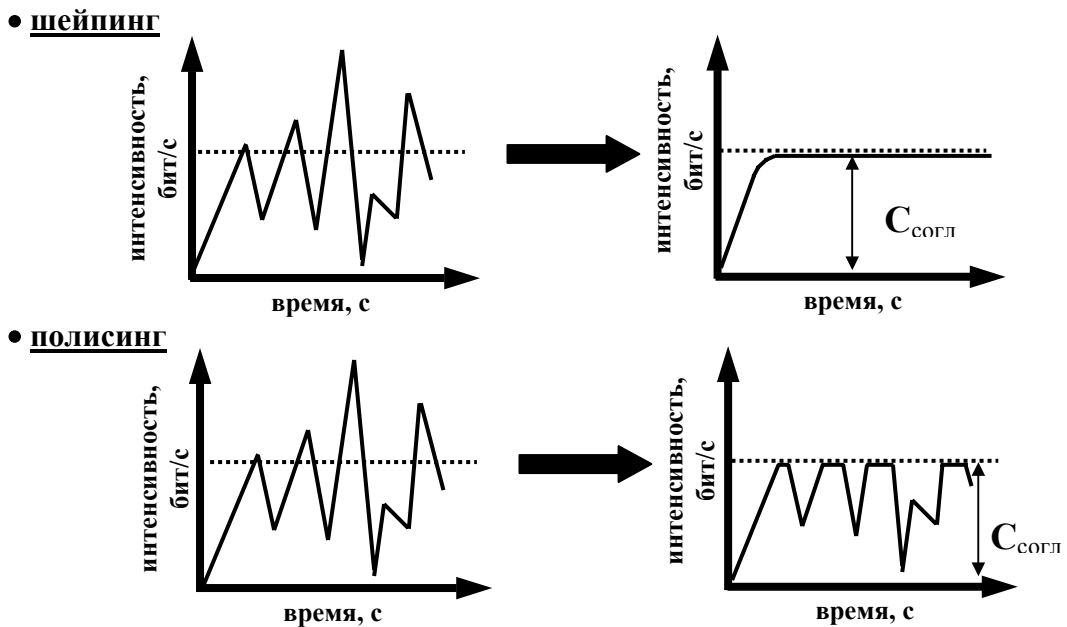


Рис. 2. Принципы функционирования принятых механизмов управления интенсивностью трафика

Для устранения перечисленных выше недостатков указанных алгоритмов автором предлагается реализовать новый алгоритм динамического распределения пропускной способности канала, использующий прогнозирование интенсивности сетевого трафика.

На рис. 3 иллюстрируется идея функционирования данного алгоритма. Очевидно, чем ближе прогнозируемая пропускная способность  $\hat{C}$  к профилю трафика, тем меньше потерь при пропуске такого трафика через канал с прогнозируемой пропускной способностью, тем меньше вносимые задержки пакетов, возникающие из-за буферизации и тем выше утилизация (использование) канала. Иначе говоря, пропускная способность канала теперь меняется динамически, отслеживая профиль трафика. Это основное отличие предложенной нами схемы от статического способа задания пропускной способности с помощью полисинга и шейпинга. Разработка алгоритма обеспечения качества об-

служивания с прогнозированием в условиях самоподобного трафика является главной задачей настоящей диссертационной работы.

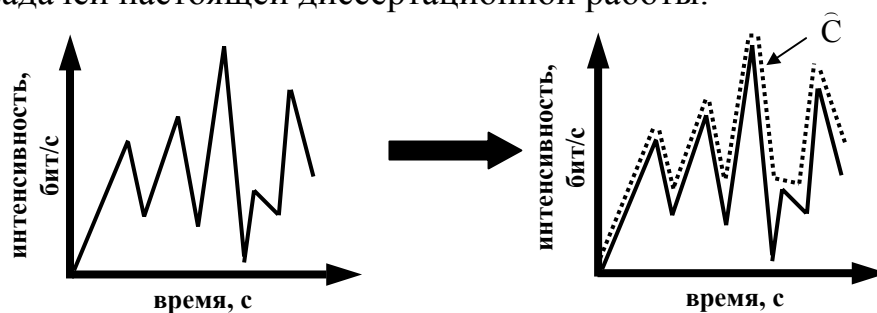


Рис.3. Предлагаемый вариант функционирования алгоритма динамического распределения пропускной способности с прогнозированием

**Глава 2** посвящена подробному анализу реализаций сетевого трафика канального и транспортного уровней модели OSI. Описывается процедура агрегирования (приведения реализаций сетевого трафика к виду, удобному для анализа). Оцениваются основные статистические характеристики временных рядов, соответствующих агрегированным реализациям трафика, такие как среднее значение и дисперсия. Приводятся результаты расчетов плотностей распределения вероятности, автокорреляционных функций, энергетических спектров.

С помощью решения задачи регрессии доказывается, что все исследуемые временные ряды обладают свойством длительной памяти. Анализ гистограмм плотностей распределения вероятности позволяет сделать вывод о том, что исследуемые ряды подчиняются некоторому распределению с так называемым “тяжелым хвостом”, т. е. обладают высокой пачечностью.

Отмечается наличие сильно выраженных локальных гармонических компонент в спектрах. Последнее явление пока не имеет четкого логического объяснения, но может иметь принципиальное значение, поскольку выявляет присутствие регулярной детерминированной составляющей в агрегированном сетевом трафике, что должно быть интересным при решении задач прогнозирования телетрафика.

Произведено измерение показателя Хэрста ( $H$ ) семью методами: анализа дисперсии, нормированного размаха ( $R/S$ ), периодограмм, абсолютных моментов, дисперсии остатков, Эбри-Вейча и Виттла. Подтверждено, что для всех

реализаций сетевого трафика коэффициент  $H > 0.5$ , т.е. трафик относится к классу персистентных процессов. Использование нами разнообразных методов оценки показателя Хэрста преследовало цель получить более достоверные результаты.

Отличительной особенностью настоящей диссертационной работы является применение концепций исследования временных рядов, широко используемых теорией нелинейных динамических систем для анализа и идентификации режимов динамического хаоса. В частности, исследования сетевого трафика проводились методом “ближайших ложных соседей”, использовались так называемые “суррогатные” данные; проводились вычисления и анализ корреляционного интеграла, а также базирующейся на нем BDS-статистики. В результате проведенного исследования отчетливого присутствия режимов динамического хаоса в реализациях трафика выявлено не было. Однако их анализ методами нелинейной динамики позволил сделать следующие важные выводы:

- в результате вычисления BDS- статистики установлено, что гипотеза о статистической независимости членов рядов, соответствующих сетевому трафику, отвергается;
- анализ результатов построения корреляционного интеграла и статистики метода ближайших ложных соседей говорит в пользу классификации сетевого трафика как некоторого процесса, обладающего хоть и слабой, но детерминированной составляющей.

Оба приведенных выше вывода полезны, с точки зрения прогнозирования, поскольку они служат обоснованием принципиальной возможности осуществления предсказаний.

В рамках данной диссертационной работы проведено оригинальное исследование особенностей структуры трафика современной беспроводной сети стандарта IEEE 802.11b. В результате данного исследования был поставлен эксперимент по сбору (записи) трафика в магистральном канале беспроводного Интернет-провайдера масштаба города. Анализ полученных реализаций подтверждает наличие самоподобных свойств в трафике современных телекомму-

никационных сетей, в том числе использующих технологии беспроводного доступа. Таким образом, показано, что “проблема самоподобия” по-прежнему актуальна в отношении современных высокотехнологичных систем распределения информации.

В **Главе 3** рассмотрены свойства самоподобного сетевого трафика, которые обуславливают его прогнозируемость.

Пользуясь известным положением о том, что для любого случайного процесса может быть построен вероятностный прогноз на время, не превышающее интервал корреляции  $\tau_k$ , аналитически доказывается принципиальная прогнозируемость временных рядов, обладающих свойством гиперболически убывающей автокорреляционной функции. При этом для таких рядов получено значение для интервала корреляции:  $\tau_k = \infty$ .

Производится постановка задачи динамического управления пропускной способностью канала с помощью прогнозирования. При этом оценка  $\hat{C}(n)$  пропускной способности канала на  $n$ -ом шаге рассчитывается в виде суммы прогностической оценки трафика на  $n$ -ом шаге  $\hat{x}(n)$  (динамическая составляющая) и некоторого постоянного уровня  $b_s$  (статически заданная составляющая пропускной способности).

Далее в работе изучается и сравнивается эффективность применения следующих вариантов управления пропускной способностью канала на реализациях трафика, изученных ранее в главе 2 диссертации: статическое задание пропускной способности, динамическое распределение пропускной способности с простым предсказателем (по последнему известному значению), динамическое распределение пропускной способности с авторегрессионным предсказателем первого и второго порядка, динамическое распределение пропускной способности с ARMA-предсказателем, динамическое распределение пропускной способности с FARIMA-предсказателем.

Для оценки эффективности метода динамического управления пропускной способностью канала наряду с классической оценкой, характеризующей

соотношение сигнал/шум ( $SNR^{-1}$ ), разрабатываются и вводятся специальные статистики - коэффициент недооценки  $D^+$ , выражающий отношение количества потерянной информации к общему количеству информации, которое нужно было обработать (пропустить через канал), и коэффициент переоценки  $D^-$ , отражающий отношение количества неиспользованной пропускной способности канала к общему количеству информации, которое нужно было пропустить через канал. Чем ближе прогностические оценки  $\hat{C}(k)$  к действительным значениям трафика  $x(k)$ , тем ближе к нулю коэффициенты  $D^+$  и  $D^-$ , тем меньше потери и тем выше эффективность системы динамического управления пропускной способностью.

Для вычисления выигрыша, получаемого от применения алгоритма динамического управления с прогнозированием, все статистики оцениваются относительно аналогичных, полученных для случая с простым статическим распределением пропускной способности при условии, что средняя пропускная способность канала в обоих случаях - одна и та же. При этом по наибольшему выигрышу определяется наиболее подходящий алгоритм прогнозирования. Характерные результаты представлены на рис. 4.

Здесь по оси ординат отложена величина выигрыша ( $-1 \dots 1$ ) в ошибке недооценки  $D^+$  от применения того или иного метода прогнозирования по сравнению со случаем простого статического задания пропускной способности<sup>2</sup>. По оси абсцисс отложена нормированная средняя пропускная способность канала в долях среднего прогнозируемого трафика. Изучая приведенные графики, можно отметить, что все оценки выигрыша больше нуля. Это означает преимущества алгоритмов динамического распределения полосы по сравнению со статическим способом. Вместе с тем, с точки зрения получения наибольшего выигрыша в коэффициентах  $D^+$  и  $D^-$ , лучшие характеристики получаются при прогнозировании с помощью простого предсказателя. С другой стороны, более слож-

---

<sup>2</sup> Выигрыши в ошибках недооценки  $D^+$  и переоценки  $D^-$  для используемых предсказателей равны.

ные модели (ARMA, FARIMA) обеспечивают лучшее соотношение  $SNR^{-1}$ , которое характеризует дисперсию ошибки, и влияет на джиттер.

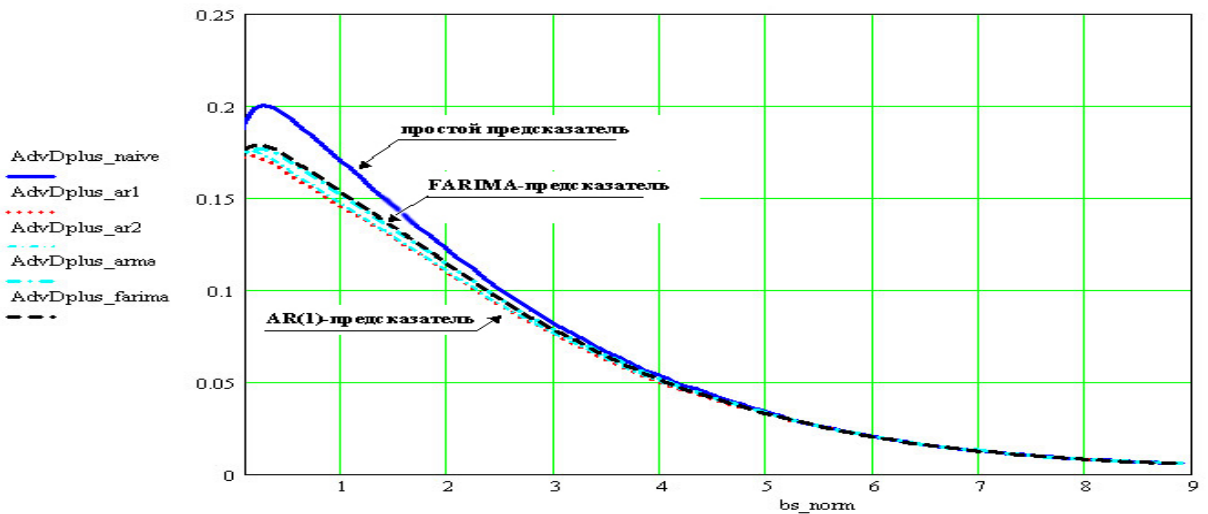


Рис. 4. Выигрыш в ошибке недооценки  $D^+$  при динамическом задании пропускной способности с использованием различных предсказателей

Например, в работе показано, что применение простого предсказателя (для случая реально допустимых значений потерь) позволяет уменьшить потери пакетов и, соответственно, увеличить коэффициент использования канала на  $\sim 10\%$ , а показатель  $SNR^{-1}$ , связанный с величиной джиттера, улучшить на 54-59% по сравнению с методом статического распределения пропускной способности. Исходя из критериев минимизации ресурсов процессора на реализацию предсказаний, а также получения наилучших характеристик  $D^+$  и  $D^-$ , для дальнейшего использования выбирается простой предсказатель.

В **Главе 4** рассматривается способ реализации метода обеспечения качества обслуживания путем динамического распределения пропускной способности канала с помощью прогнозирования в условиях самоподобия телетрафика. Разработанный в настоящей диссертации алгоритм базируется на известном принципе “корзина маркеров” и основанных на нем методов шейпинга и поли-

синга, в которые внедряется модуль (на рис. 5 выделен) прогнозирования сетевого трафика и управления скоростью поступления маркеров<sup>3</sup> в корзину.

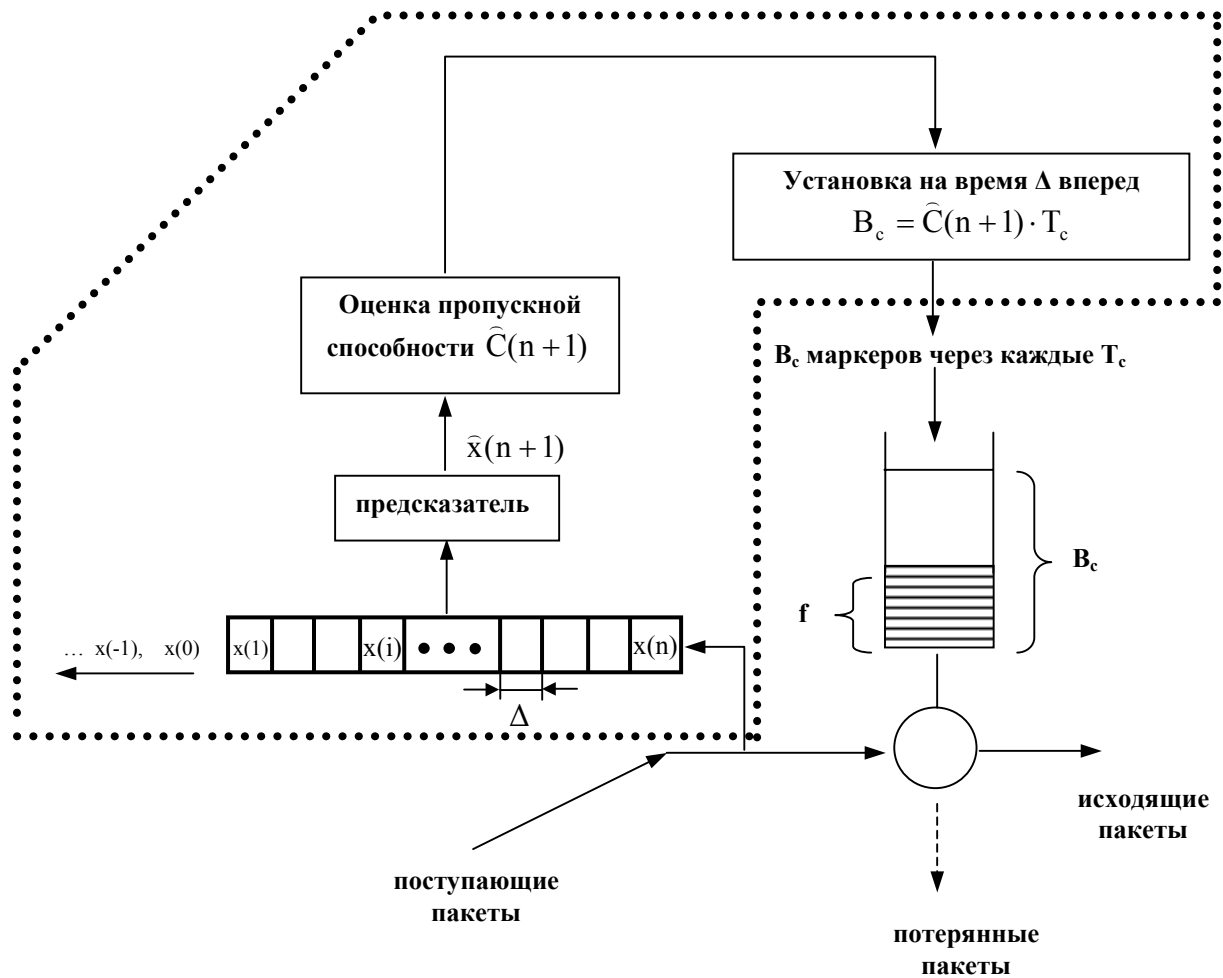


Рис. 5. Алгоритм функционирования механизма динамического управления пропускной способностью с помощью прогнозирования

Особенность схемы состоит в том, что при этом не трафик выравнивается под заданный наперед профиль (как в алгоритмах шейпинга и полисинга), а напротив, пропускная способность системы подстраивается под профиль трафика, уменьшая при этом потери и увеличивая использование выделенных ресурсов.

Согласно данной схеме, входящий поток пакетов одновременно с поступлением в систему попадает на схему агрегирования по временным интервалам  $\Delta$ . После этого  $n$  последних отсчетов получившегося временного ряда поступают на предсказатель, который вырабатывает прогностическую оценку следую-

<sup>3</sup> Под термином "маркер" в данной работе понимается некоторая виртуальная величина, соответствующая объему информации 1 бит, пропускаемой на выход схемы "корзина маркеров".

щего отсчета  $\hat{x}(n+1)$  агрегированного ряда  $x$  на время  $\Delta$  вперед. Исходя из требований к величине возможных потерь, оценивается пропускная способность системы  $\hat{C}(n+1)$ . В результате размер буфера маркеров устанавливается равным  $V_c = \hat{C}(n+1) \cdot T_c$  на время  $\Delta$  вперед. Таким образом, значение  $V_c$  (а вместе с ним и пропускная способность системы) будет меняться каждый интервал  $\Delta$ , отслеживая динамику изменения интенсивности трафика. Как было показано выше, при той же самой (в среднем) пропускной способности системы в режиме динамического управления пропускной способностью с прогнозированием удастся достичь лучших показателей потерь и степени использования канала, нежели в случае реализации обычного полисинга.

Для проверки полученных в настоящей диссертационной работе результатов с помощью имитационного моделирования на ПЭВМ был поставлен эксперимент по анализу эффективности алгоритма динамического управления пропускной способностью с прогнозированием в условиях самоподобного телетрафика. Моделирование производилось в среде популярного сетевого эмулятора ns-2. Схема сценария представлена на рис. 6.

Источником самоподобного трафика в данном эксперименте являлась одна из реализаций реального сетевого трафика, изученная в главах 2 и 3 настоящей диссертации, которая подавалась на узел N5. Посредством узла N5 полученный таким образом самоподобный поток упаковывался в UDP-пакеты и передавался в сторону получателя N4.

Кроме того, на схеме также имеется еще один (вспомогательный) источник трафика N0, генерирующий и транслирующий поток UDP-пакетов в направлении получателя N4. В целях данного эксперимента для оценки потенциальных возможностей алгоритма был выбран источник с постоянной интенсивностью ( $S$  бит/с) генерирования пакетов (так называемый, CBR-источник). Трафики обоих источников (самоподобного и CBR) имеют в составе своего пути к получателю N4 один общий участок, одновременно являющийся “узким” местом сети – канал N3-N4 с пропускной способностью  $S$  бит/с. В дан-



ном случае возникает задача эффективного разделения ресурсов канала N3-N4 (его пропускной способности) между трафиками обоих источников N5 и N0.

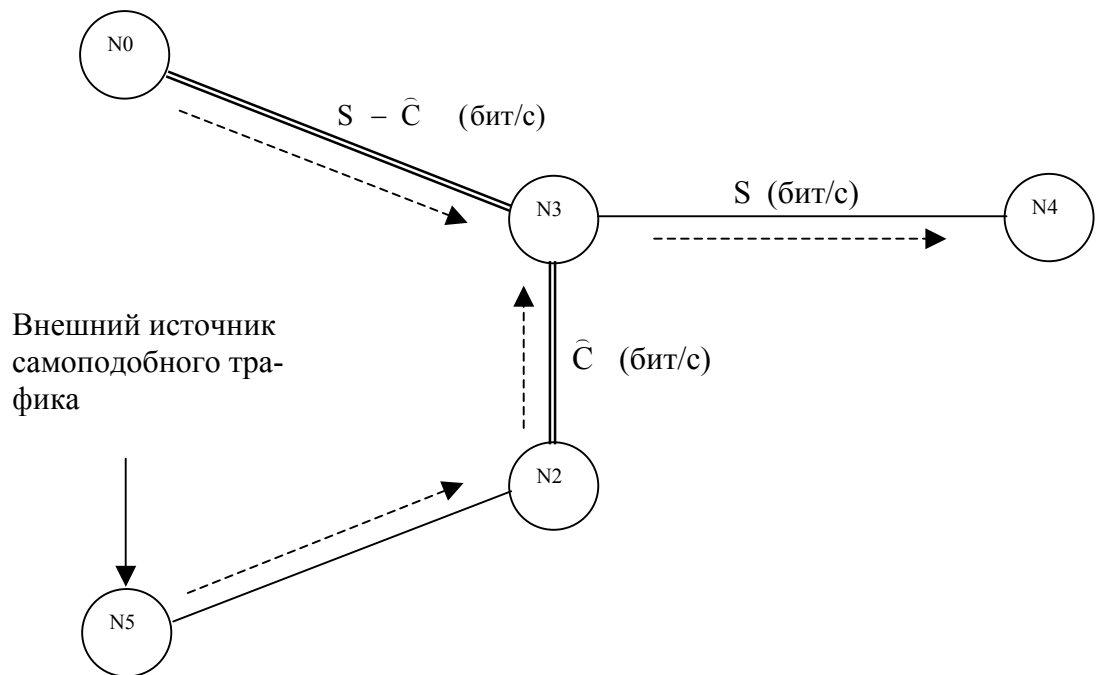


Рис. 6. Схема эксперимента по моделированию статического и динамического режимов управления пропускной способностью канала

В процессе проведения эксперимента система рис. 9 изучалась в двух режимах:

- в режиме статического разделения пропускной способности канала N3-N4 между самоподобным и CBR трафиками. При этом некоторый ресурс этой пропускной способности  $C < S$  (бит/с) закрепляется постоянно за самоподобным трафиком, а оставшаяся пропускная способность  $S - C$  (бит/с) выделяется под трафик CBR. Однако, как уже отмечалось выше, такой способ малоэффективен вследствие высокой пачечности трафика источника N5;

- в режиме динамического перераспределения пропускной способности канала N3-N4 между самоподобным и CBR трафиками при помощи прогнозирования. В этом случае на основе информации, полученной в процессе мониторинга интенсивности самоподобного трафика в канале N5-N2 в момент времени  $i$ , делается прогноз потребностей потока источника N5 в пропускной способности  $\hat{C}$  (бит/с) на участке N3-N4 в последующий интервал времени  $i + \Delta$ . На основании такой прогностической оценки самоподобному трафику в ка-

нале N3-N4 выделяется требуемый ресурс  $\hat{C}$  (бит/с), а CBR-трафику, соответственно оставшийся ресурс  $S - \hat{C}$  (бит/с) пропускной способности на время  $\Delta$ .

В обоих исследуемых режимах оценивались коэффициенты недооценки и переоценки интенсивности самоподобного трафика, а также общее количество информации, переданное источником N0 и достигшее получателя N4. Для прогнозирования использовался алгоритм с простым предсказателем.

Полученные результаты подтверждают выводы, сделанные ранее в главе 3 диссертации, о безусловном повышении эффективности системы вследствие применения метода динамического распределения пропускной способности с помощью прогнозирования: при том же самом объеме информации, полученной узлом N4 от источника N0, потерь в самоподобном трафике заметно (на 8-10 %) меньше, а соотношение  $SNR^{-1}$  улучшается примерно на 54% при использовании алгоритма динамического распределения пропускной способности с прогнозированием.

В **Заключении** сформулированы основные новые результаты работы, которые состоят в следующем.

1. Подробно рассмотрено современное состояние и главные понятия теории самоподобного телетрафика. Базовые концепции самоподобного телетрафика, такие как фрактальность, самоподобие, коэффициент Хэрста, хаос, продолжительная память и распределения с тяжелыми хвостами, изучены с точки зрения возможностей его прогнозирования.

2. Проведено статистическое исследование сетевого трафика. Исследованы его количественные и качественные характеристики. Обнаружена детерминированная составляющая трафика.

3. С помощью проведения оригинального эксперимента по сбору и анализу трафика в реальной действующей сети беспроводного интернет-провайдера масштаба города показана актуальность проблемы самоподобия для современных систем. Полученные реализации трафика выложены для публичного пользования в Интернет на сайте [www.teletraffic.ru](http://www.teletraffic.ru).

4. Показано, что существующие популярные методы управления интенсивностью трафика, шейпинг и полисинг – малоэффективны при обработке самоподобного телетрафика.

5. Для улучшения показателей обработки самоподобного сетевого трафика (уменьшения потерь и повышения утилизации) предлагается использовать алгоритм динамического распределения с прогнозированием требуемой пропускной способности канала.

6. Для самоподобных процессов (обладающих гиперболически убывающей автокорреляционной функцией), найдено выражение для интервала корреляции, которое служит принципиальным основанием и обеспечением их хорошей прогнозируемости.

7. С помощью статистических исследований проанализирована эффективность различных предсказательных алгоритмов для прогнозирования самоподобного сетевого трафика.

8. Разработан алгоритм обеспечения качества обслуживания в условиях самоподобного трафика, использующий динамическое распределение пропускной способности канала и прогнозирование. Алгоритм основывается на базе известного принципа “корзина маркеров”, в который внедрен предсказывающий модуль. Экспериментально показано, что предлагаемый механизм даже в случае простого предсказателя дает ощутимый выигрыш (8-10%) в уменьшении потерь и увеличении использовании канала, а также в величине показателя  $SNR^{-1}$  (~54%), характеризующего джиттер, при самоподобном трафике по сравнению со статическим способом распределения пропускной способности.

9. С помощью имитационного моделирования исследовано функционирование и подтверждена эффективность предлагаемого алгоритма.

**В Приложения** вынесены распечатки листингов разработанных программ (пакеты Ох, ns-2).

## Список публикаций по теме диссертации

1. Петров В.В., Платов В.В. Исследование самоподобной структуры телетрафика беспроводной сети // Радиотехнические тетради. – 2004. – № 30. – С. 58 – 62.
2. Петров В.В. Самоподобный сетевой трафик: от хаоса и фракталов к прогнозированию и качеству обслуживания // Конф. NEW2AN: Сборник трудов. – СПб., 2004. – С.110-118. (На английском языке).
3. Петров В.В., Богатырев Е.А. Статистический анализ сетевого трафика // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Тез. докл. Десятой Междунар. научно-техн. конференции студентов и аспирантов. Том 1. – М: Издательство МЭИ, 2-3 марта 2004.
4. Петров В.В. Самоподобие в сетевом трафике // 58-я Научная сессия РНТОРЭС им. А.С. Попова: Сборник трудов. Том 2. – М., 14-15 мая 2003. – С. 126.
5. Петров В.В., Богатырев Е.А. О самоподобном сетевом трафике // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Тез. докл. Девятой Междунар. научно-техн. конференции студентов и аспирантов. Том 1. – М: Издательство МЭИ, 4-5 марта 2003. – С. 53 – 54.

Печ. л.

Тираж

Заказ

---

Типография МЭИ (ТУ), Красноказарменная ул., д. 13