

СУХОВ Андрей Михайлович

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ИНТЕРНЕТ
ТРАФИКА**

Специальность - 05.13.13 «Телекоммуникационные системы и компьютерные
сети»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара

2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Саксонов Евгений Александрович
доктор физико-математических наук, профессор
Солдатов Алексей Анатольевич
доктор технических наук, профессор
Свиридов Александр Петрович

Ведущая организация:

Федеральное государственное учреждение Государственный научно-исследовательский институт информационных технологий и телекоммуникаций «ИНФОРМИКА»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2007 г.
в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.133.03 при Московском государственном институте электроники и математики (техническом университете) по адресу: 109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., дом 3/12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного института электроники и математики.

Автореферат разослан «___» _____ 2007 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.133.03
кандидат технических наук, доцент

Ю.Л. Леохин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Последнее поколение информационных научно-образовательных технологий требует создания высокоскоростной сетевой инфраструктуры. Подобная инфраструктура объединяет общероссийскую магистральную сеть для науки и образования, региональные сети и локальные сети научно-исследовательских и образовательных организаций, а также учреждений культуры и здравоохранения. Современные приложения и сервисы предъявляют определенные требования к сетевой инфраструктуре, в первую очередь, к качеству соединений и их безопасности.

В настоящей работе основное внимание сосредоточено на разработке научных основ анализа качества интернет трафика для внедрения последнего поколения научно-образовательных приложений. Работа посвящена разработке методологии по определению качества соединений в глобальной сети и методик тестирования на базе предложенной модели трафика.

Вопросы качества являются одними из основополагающих при разработке любых проектов, будь то строительные или промышленные проекты, получение образования или деятельность в сфере информационных технологий. Если во многих отраслях накоплен определенный опыт в области управления качеством продукции и процессов, определены методики оценки качества и стандарты качества, работают различные организации, в том числе и фонд «Европейский центр по качеству», то говорить о распространении каких-то единых стандартов качества в сфере интернет технологий пока преждевременно.

Для создания стандартов качества требуются фундаментальные исследования интернет процессов и протоколов, прежде всего, построение моделей, описывающих различные типы трафика в глобальной сети. Математическая модель интернет трафика на уровне потоков базируется на теории стохастических сетей. Основные положения модели были представлены на конференции АСМ

SIGCOMM в августе 2001 года Ben Fredj, Bonald, Proutiere, Regnie, Roberts; доклад «Statistical Bandwidth Sharing: A Study of Congestion at Flow Level». Коллектив авторов Barakat, Thiran, Iannaccone, Diot, Owezarski исследовал трафик магистральных каналов сети Sprint OC-12 (622 Мбит/с) и усовершенствовал модель. Предложенная модель трафика для не перегруженных участков магистральной сети достаточно проста, и ее можно использовать в целях управления сетью.

В настоящей работе для сравнения качества соединений предложено использовать единственный параметр: среднюю скорость потока (flow). В результате исследований найдено соответствие между возможностью запуска того или иного высокоскоростного приложения и усредненной скоростью потока. Если средняя скорость потока будет выше требуемого предела, то это только необходимое условие для проведения сеанса связи. Достаточные условия для функционирования каждого из интернет приложений свои. В диссертационной работе разработаны критерии качества для ряда высокоскоростных приложений и сетевой инфраструктуры. Они сформулированы в рамках аналитической модели для оценки качества аудиовизуального трафика, аналитической модели, описывающей систему резервирования трафика для повышения эффективности внешнего канала.

В работе Calyam, Sridharan, Mandrawa, Schopis «Performance Measurement and Analysis of H.323 Traffic», PAM2004 качество аудио, видео конференций анализировалось по шкале MOS (Mean Opinion Score), основанной на человеческом восприятии. Качество мультимедийной информации между двумя точками сравнивалось с показателями качества сетевого соединения. Основная проблема, которая была решена в данной диссертации, может быть сформулирована следующим образом: изображение какого качества можно получить после трансляции его по IP сети? Решение этой задачи приводит к практическому применению: определению параметров видео потока (скорость, размер окна, частоту кадров) по параметрам сетевого соединения (потеря пакетов, вариация задержки, свободная полоса).

Актуальность исследований подтверждается также тем, что они выполнялись в рамках работ, проводимых в соответствии с Межведомственной программой "Создание национальной сети компьютерных телекоммуникаций для науки и высшей школы", проект 2.25 – «Создание регионального сегмента компьютерной информационной среды академических и вузовских организаций г. Самары (включая подразделения Самарского научного центра Российской академии наук)». Создание измерительной инфраструктуры для изучения качества Интернет приложений в российском сегменте глобальной сети поддержано грантом РФФИ 06-07-89074а. Следует упомянуть и международные проекты:

- проект ИНТАС (INTAS-IA-003) по созданию Европейской сети для математиков EmNet/NIS/PhaseII. В рамках этого проекта был построен первый в регионе Интернет канал [28].
- инфраструктурный грант НАТО "Самарская региональная сеть для нужд конверсии" (CN.NIG.960542), 1996-1998
- организация семинара "Цифровые сети в Среднем Поволжье" (НАТО CN.ANW 972314), 1998 [40,41]
- Телекоммуникационная поддержка программы USIA, "Project Harmony", 1999-2000
- инфраструктурный грант НАТО "Экспериментальный спутниковый канал для российской провинции" (CN.NIG.975463), 1999-2001 [5,6]

Цели и задачи исследования. Целью данной работы является разработка научных основ анализа качества интернет трафика и последующая систематизация проблем, связанных с качеством предоставляемых сетевых услуг для внедрения последнего поколения информационных технологий. В первую очередь изучались те услуги, которые предоставлялись в Самарской региональной сети для науки и образования.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих основных задач:

1. Разработка теоретических основ для моделирования интернет трафика, опирающегося на понятие потоков

2. Внедрение системы интернет телевидения с использованием результатов моделирования аудиовизуального трафика
3. Анализ систем резервирования трафика с целью оптимизации их работы и поиска оптимального алгоритма резервирования
4. Создание экспериментальной базы, позволяющей определять и анализировать основные параметры сетевых соединений
5. Разработка системы мониторинга и поиск критериев качества на базе построенных аналитических моделей, описывающих различные сервисы глобальной сети
6. Формулировка основных принципов построения для региональных сетей науки и образования
7. Разработка методологии сравнительного анализа интернет сервис провайдеров для определения их стоимости

Методы исследования

Для разработки научных основ анализа качества интернет трафика применялись различные математические методы с последующей экспериментальной проверкой на базе измерительной инфраструктуры, встроенной в действующую сетевую инфраструктуру. В дополнение к стандартным в исследовании сетевых процессов методам теории стохастических процессов и теории массового обслуживания были использованы методы заимствованные из теоретической физики, в частности метод граничных условий для получения нового решения системы уравнений, описывающих процесс резервирования трафика. Для исследования свойств аудиовизуального трафика были применены элементы системного анализа. Широко использовались новые экспериментальные методы, применяемые в современных телекоммуникациях, такие как пассивные и активные измерения, сбор информации о трафике с помощью специально написанных утилит с последующей обработкой данных методами статистического анализа.

Научная новизна, полученная лично автором в процессе проведения исследований, заключается в следующих результатах, выносимых на защиту:

1. Аналитическая модель трафика на участке высокоскоростной сети, согласно которой для сравнения качества соединений в глобальной сети достаточно использовать единственный параметр: среднюю скорость потока (flow).
2. Метод анализа качества интернет каналов, базирующийся на исследовании графической зависимости между загрузкой канала и числом активных потоков в нем.
3. Аналитическая модель для оценки качества аудиовизуального трафика, позволяющее вычислять качество получаемых видео и аудио потоков на основе параметров интернет соединения между двумя точками.
4. Аналитическая модель системы резервирования трафика (proxy cache) с целью повышения эффективности внешнего канала, базирующаяся на новом решении системы уравнений, описывающих процесс резервирования и полученная при помощи метода граничных условий, заимствованного из теоретической физики.
5. Анализ эффективности и методология оценки региональных интернет сервис провайдеров, включая методику и сравнительный анализ эффективности различных транспортных средств, формулировка критериев эффективности инсталляционного процесса, текущей эксплуатации, качества предоставляемой связи.
6. Принципы построения региональной сети для науки и образования, реализованные при создании Самарской региональной сети для науки и образования. Включают следующие положения: основой сети должен быть оптико-волоконный кабель, находящийся в собственности научно-образовательных организаций; доленое строительство с частными телефонными компаниями; максимальное совмещение инфраструктуры научно-образовательных сетей с установившейся инфраструктурой связи; получение доступа к первичной наземной цифровой сети и использование

конкурентной среды; выбор протокола Ethernet в качестве транспортного протокола первичной сети.

Практическая ценность работы и внедрение результатов. Результаты работы легли в основу построения Самарской региональной сети для науки и образования, которая на основе опτικο-волоконной связи объединяет:

- все государственные высшие учебные заведения Самары, включая Самарский государственный аэрокосмический университет, Самарский государственный технический университет, Самарский государственный медицинский университет, Самарский государственный педагогический университет, Самарскую государственную академию путей сообщения, самарскую государственную экономическую академию и др.
- все учреждения российской академии наук, включая Самарский научный центр РАН, ИСОИ РАН, ИПУСС РАН, СФ ФИАН РАН и др.
- большинство частных ВУЗов, например, МИР, образовательную корпорацию XXI век, Муниципальный университет Няяновой и др.
- крупнейшие библиотеки региона, включая СОУНБ
- крупнейшие клиники региона: областная больница им. Калинина, областной кардиологический диспансер, диагностический центр, клиническая больница и др.
- лучшие средние учебные заведения
- органы государственной власти и управления: областную думу, Министерство образования и т.п.
- высокотехнологичные предприятия региона
- самарские филиалы общественных научных сообществ: инженерной академии, академии космонавтики, технологической академии и др.

По объему потребляемого трафика самарская сеть стоит на пятом месте, уступая Москве, С.-Петербургу, Новосибирску и Екатеринбургу. Все задачи, поставленные в работе, вытекали из нужд Самарской региональной сети науки и

образования и давали ответы на наиболее острые моменты по эксплуатации и развитию сети.

Строительство сети осуществлялось в соответствии с теоретически обоснованным набором принципов, сформулированных автором в 1995 году. Следование этим принципам позволило построить Самарскую региональную сеть для науки и образования, где капитальные затраты на инфраструктуру связи в перерасчете на гигабайт передаваемого трафика более чем на порядок меньше, чем у других региональных сетей, сопоставимых по масштабу.

Результаты исследований по внедрению современных научно-образовательных интернет приложений позволили организовать телекоммуникационную поддержку совместных проектов Европейского космического агентства и самарских высокотехнологических предприятий аэрокосмической отрасли. В рамках этих проектов осуществлялась передача телеметрии в режиме реального времени с борта спутников серий «Фотон», «Бион» непосредственно европейским партнерам. На спутнике «Фотон-12» было обеспечено успешное проведение эксперимента «MAGIA» на установке «FluidPack». «Операция по спасению» FluidPack стала превосходной демонстрацией успешного сотрудничества между ESRANGE, ЦУП и ЦСКБ. Надежная сеть передачи данных также стала ключевым элементом успеха (Капельцев Н., Першин А., Миссия «Фотона», Новости космонавтики, №11(202), 1999, с. 8-11).

Сформулированные в результате исследований [9,10,11,38,39] принципы настройки систем резервирования трафика были внесены в набор рекомендаций ведущей в этой области фирмы Measurement-factory, Boulder, Colorado и используются во всем мире при инсталляции и последующем мониторинге таких систем.

Результаты моделирования трафика позволяют описать различные состояния сети. Основанные на этих результатах методы определяют рабочий участок сети и точку перегрузки, что позволяет найти момент, когда данный канал должен быть

расширен. Практический результат заключается в создании специализированного программного обеспечения для мониторинга сети (Corvil, Ирландия).

Начиная с 2004 года, усилия автора были направлены на разработку критериев для оценки качества последнего поколения научно-образовательных приложений, в том числе современных средств аудиовизуальной связи, включая высокоскоростные видеоконференции. Проведенная в этом направлении работа является типичным примером высокотехнологичной разработки, состоящей из аналитического исследования, создания на ее основе новой технологии и последующего внедрения ее в конкретный проект.

Теоретическое и экспериментальное исследование позволило оценить качество аудиовизуальной связи между двумя точками в глобальной сети по данным утилиты Iperf без проведения сеанса связи [20,43,44]. Практическим результатом моделирования стала возможность определять параметры видео потока для существующей инфраструктуры связи [8,16]. Оказалось, что инфраструктура Самарской региональной сети для науки и образования позволяет осуществлять потоковое телевидение. Выбрав в качестве технологической платформы программно-аппаратный комплекс «VIDICOR», разработанный Научно-производственным центром “Vidicor Ltd” на базе исследований Научно-исследовательского центра мультимедиа технологий Института механики и математики Уральского отделения РАН, был запущен проект научно-образовательного интернет телевидения [7,17].

Апробация работы. Основные результаты серии работ, где рассматривались принципы построения сетей, их реализация, давался сравнительный анализ технологий и сетевой инфраструктуры, докладывались на Всероссийской научно-методической конференции «Телематика» в г. Санкт-Петербурге в 1995, 1996, 1998, 1999 и 2006 годах, конференции ассоциации научных и учебных организаций-пользователей сети передачи данных RELARN в 1994, 1995, 1996, 1997, 1999 годах, Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет» в Новороссийске в 1999, 2001, 2003 и 2004 годах, семинаре НАТО

«Цифровые сети в Среднем Поволжье» в 1998 году, в Самаре. Вопросы телекоммуникационного сопровождения спутников по совместной программе с Европейским космическим агентством докладывались на международной конференции «Научные и технологические российские и зарубежные эксперименты на автоматических космических аппаратах «Фотон», «Бион». Результаты, проблемы, перспективы» в Самаре, 2000 году.

Результаты серии работ, посвященных системам резервирования трафика, докладывались на семинарах "Second Web Cache Managers Workshop", организованным TERENA и DESIRE, Budapest, 2000; «Проблемы современных информационно-вычислительных систем» под руководством проф. Васенина В.А. и проф. Корнеева В.В., мехмат МГУ в марте 2004 года; на конференции RELARN 2001 в Петрозаводске; на конференции ассоциации европейских научно-образовательных сетей TERENA 2001 в Анталье. По итогам TERENA2001 доклад вошел в число 10-ти лучших работ и был опубликован в Computer Networks.

Серия работ, посвященных моделированию трафика на участке высокоскоростной сети, докладывалась на семинаре рабочей группы по сетям нового поколения (TF-NGN, TERENA) в октябре 2002 года в Будапеште, на семинаре «Проблемы современных информационно-вычислительных систем» под руководством проф. Васенина В.А. и проф. Корнеева В.В. мехмат МГУ в феврале 2004 года; ирландский соавтор работы Warren Daly сделал постерный доклад на TERENA2004, в июне 2004 в Родосе, Греция.

Доклады, посвященные построению измерительной инфраструктуры российского сегмента сети Интернет и анализу сетевых процессов, были сделаны на конференциях RELARN 2004, III международной конференции «Интернет нового поколения - IPv6» в ИОХ РАН, Москва, ноябрь 2004, а также на TERENA 2005, Познань, июнь 2005. Серия работ по изучению передачи аудиовизуальной информации в глобальной сети докладывалась на семинаре научно-исследовательского центра мультимедиа технологий ИММ УрО РАН в январе 2006 года и на семинаре «Проблемы современных информационно-

вычислительных систем» под руководством проф. Васенина В.А. и проф. Корнеева В.В. мехмат МГУ в марте 2006 года.

На основе результатов диссертации подготовлены и читается ряд спецкурсов, в том числе и «Принципы построения распределенных IP сетей», «Первичные цифровые сети и телефония». Эти спецкурсы читаются на факультете дополнительного образования Самарской государственной академии путей сообщения для инженеров РАО «Российские железные дороги», которое постепенно переходит на цифровые технологии.

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 50-ти работ, из них 12 [1,3,8,12,13,14,15,20,21,34,35,36 – выделены жирным шрифтом] в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций, и отражающих основные результаты данного исследования. Среди публикаций имеется одна коллективная монография на английском языке [45], четыре работы в других периодических изданиях [29,30,39,45], в том числе и в Computer Networks, ведущем журнале по сетевой тематике издательства Elsevier. В ходе работы над диссертацией было сделано 26 докладов на конференциях (16 статей и 10 тезисов) и подготовлены 2 электронные публикации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, приложений, содержит 232 страницу текста, 23 рисунка. Список цитируемой литературы составляет 129 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемых задач, научная новизна разработанных методов, показана практическая значимость полученных результатов и кратко описано содержание диссертации.

Первая глава содержит обзор научно-исследовательских сетей и основные сведения о Самарской региональной сети науки и образования. В первом параграфе сравнивается состояние телекоммуникационной инфраструктуры науки и образования, включая организацию и состояние сетей, систему

управления, поддержки пользователей, состояние исследований и т.д., в России и Европе. В следующем параграфе делается сравнительный анализ региональных научно-образовательных сетей. В основу анализа положены данные по объему потребленного трафика за март 2004 года, полученные с маршрутизаторов сети RBNet (Russian Backbone Network). Эта сеть управляла большинством магистральных узлов внутри России и отвечала за значительную часть международных каналов.

В результате был составлен оценочный рейтинг российских региональных научно-образовательных сетей (см. Таблицу 1). При составлении рейтинга использовались данные [19], что средний ежемесячный трафик одного рабочего места (ПК в локальной сети) составляет примерно 800-1000 Мб, на одного исследователя (научного сотрудника или преподавателя) приходится 400-500 Мб, на студента 50-100 Мб трафика.

Регион	Число компьютеров в сети	Пользователи	
		Научные сотрудники и преподаватели	Студенты
Новосибирск	15 000	6-12 000	40-80 000
Екатеринбург	10 000	6-10 000	30-60 000
Самара	7 000	3-6 000	20-50 000
Казань	6 000	3-5 000	20-45 000
Ростов	4 000	2-4 000	15-30 000
Ярославль	2 000	1.5 – 3 000	10–15000
Нижний Новгород			
Краснодар			

Таблица 1. Рейтинг регионов (оценка, без Москвы и С. Петербурга)

В третьем параграфе первой главы дается обзор состояния телекоммуникационной отрасли в Самарской области. В нем выделены операторы, предоставляющие услуги магистральной и зонавой связи, телефонные операторы, операторы мобильной связи интернет сервис провайдеры и дано описание их инфраструктуры. Следующие параграфы посвящены принципам построения и описанию структуры Самарской региональной сети для науки и образования. В хронологическом порядке (за 1997-2001 годы, когда автор отвечал

за развитие сети) приведены основные работы по развитию Самарской региональной сети для науки и образования.

Вторая глава посвящена техническим решениям, используемым при построении региональных научно-образовательных сетей и их мониторинге. Сформулированы критерии [35], которые могли бы быть основой для сравнения различных транспортных сред для построения IP сетей. Первая группа оценок касается различных аспектов инсталляции системы, вторая группа описывает процесс последующей эксплуатации, а третья отвечает за качество представляемой связи.

Среди параметров, описывающих инсталляционный процесс, следует выделить стоимость инсталляции системы связи или аренды ее целиком или отдельных ее частей, время, затраченное на инсталляционный процесс и предельную скорость связи, которая может быть достигнута в результате выбранной технологии. Важнейшим вопросом для последующей эксплуатации сети и ее возможного обновления в случае необходимости является вопрос о предельной скорости передачи данных, достигаемых на данном типе кабельной системы.

Для оценки текущих эксплуатационных расходов можно выделить два параметра – расходы на зарплату специалистов по поддержанию работоспособности сети и расходы на аренду кабельной системы, каналов связи, телефонной канализации, помещений, электропитания и т.д., то есть расходы на аренду телекоммуникационной инфраструктуры. Расходы на специалистов и поддержание телекоммуникационной инфраструктуры правильнее оценивать, сопоставляя ежемесячные траты (количество ставок) на Гигабайт переданной информации. Последняя группа параметров оценивает качество связи при помощи двух параметров: ошибки при передаче информации и надежности.

В процессе телекоммуникационного сопровождения полета спутника "ФОТОН-11" выяснилась недостаточная пропускная способность Самарской региональной сети для науки и образования для передачи телеметрической информации зарубежным партнерам [6]. Этот спутник был изготовлен в Самаре и оснащен

оборудованием Европейского космического агентства (ЕКА) для проведения технологических экспериментов. Специалистами ЕКА и Поволжского отделения Российской академии космонавтики был получен грант НАТО (CN.NIG.960542) на создание экспериментального спутникового Интернет канала в Самаре. Автору пришлось руководить технической стороной этого проекта и результаты [32], полученные в ходе организации такого канала, представлены во втором параграфе второй главы.

Результатом наших усилий по созданию телекоммуникационной инфраструктуры для поддержки аэрокосмических проектов явилось создание Центра пользователей систем «Фотон», «Бион» организованном в Самаре. Из этого центра, равно как и из центра ESRANGE, в Кируне, Швеция, персонал ЕКА наблюдает за полетами, из которых хотелось бы отметить миссию «Фотон-12». Из Кируны с помощью оборудования TeleScience велось управление и анализ экспериментов FluidPac. Самара, находясь на прямой связи с Центром управления полетом (ЦУП) в Москве, контролировала состояние спутника и эксперименты, а также руководила операцией по эвакуации спускаемого аппарата после посадки.

Первый после запуска прием телеметрии показал, что все системы работают хорошо. Во второй день полета – 11 сентября в одной из подсистем установки FluidPac возник необъяснимый сбой, который прервал штатное выполнение эксперимента MAGIA. Судя по сообщениям телеметрии, не было правильно выполнено переключение между двумя режимами оптической диагностики, и эксперимент завис на промежуточном этапе. Было высказано предположение, что бортовое программно-временное устройство не смогло сбросить программное запирающее процесса. Московский ЦУП выдал последовательность команд на повторение цикла подачи энергии к системе FluidPac, т.е. перезапустил таймер установки.

Данные телеметрии, полученные Москвой и Самарой на 31-м и 32-м витках, показали, что эксперимент MAGIA возобновился в нормальном темпе. Операция по спасению FluidPac стала превосходной демонстрацией успешного

сотрудничества между ESRANGE, ЦУП и ЦСКБ. Надежная сеть передачи данных также стала ключевым элементом успеха.

В **третьей главе** построена аналитическая модель трафика на основе потоков (flow) [3,4,36,45], которая используется для оценки качества Интернет соединений. Исследовать поведение сети на основе потоковых технологий значительно удобнее, такое исследование требует меньших затрат.

Чади Баракат и др. (Barakat C., Thiran P., Iannaccone G., Diot C., Owezarski P., A flow-based model for Internet backbone traffic, IEEE Transactions on Signal Processing - Special Issue on Signal Processing in Networking, 2003, vol. 51, no. 8, pp. 2111-2124) предложили модель, которая позволяет на основе информации о потоках построить модель суммарного трафика на магистральном участке. В процессе моделирования предполагалось, что наблюдаемый трафик представляет собой суперпозицию большого количества потоков, которые прибывают случайным образом и остаются активными в течение случайного периода времени.

Модель опирается на понятие Пуассоновского составного шума (shot noise; P. Bremaud and L. Massoulié // Power spectra of general shot noises and Hawkes point processes with a random excitation, Journal of Applied Probability, 34, 205-222 (2002); D. Daley and D. Vere-Jones // An introduction to the theory of point processes, Springer-Verlag, 1988). С помощью только трех параметров (λ - пуассоновский параметр, характеризующий появление в канале новых потоков, $E[S_n]$ - средний размер n -го потока, $E[S_n^2/D_n]$ среднее значение отношения квадрата размера потока к его длительности) модель предсказывает поведение средней величины загрузки канала и ее вариации за короткие промежутки времени:

- Среднее значение загрузки канала определяется двумя параметрами λ и $E[S_n]$:

$$E[R(t)] = \lambda E[S_n] \quad (3.1)$$

- Вариация загрузки V_R также задается двумя параметрами λ и $E[S_n^2/D_n]$:

$$V_R = \lambda E[S_n^2/D_n] \quad (3.2)$$

Следует отметить, что оба этих уравнения справедливы только для идеального случая, когда исследуемый участок сети имеет неограниченную пропускную способность. На практике они применимы только к слабо загруженным участкам ($p < 0.5\%$).

Одного параметра – скорости передачи данных, для описания загруженной сети недостаточно. Встает вопрос о введении дополнительной переменной для описания состояния сети. Уравнение Литтла, имеющее универсальный характер, дает возможность выбрать дополнительный параметр для оценки состояния в сети которым является число активных потоков.

Состояния сети, описываемые двумя переменными, лучше всего представить графически. Предполагаемая кривая изображена на Рис. 1 и на ней можно выделить три участка, соответствующие качественно различным состояниям сети [36,45].

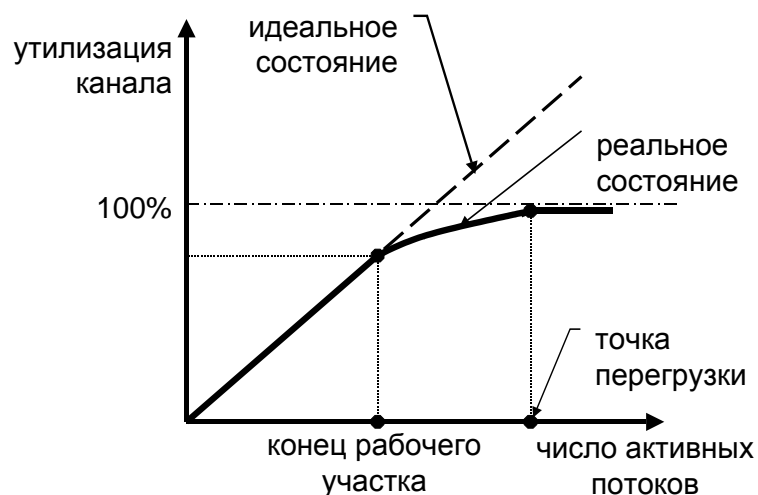


Рисунок 1. Состояния сети в зависимости от нагрузки

Первая часть кривой соответствует рабочему участку сети и характеризуется минимальными потерями IP-пакетов ($p < 0.5\%$). Предполагается, что это прямая

линия, которая заканчивается точкой перегиба. Найти эту точку можно экспериментальным путем, таким образом, определив длину рабочего участка.

Вторая часть кривой соответствует перегруженной сети и характеризуется более существенными потерями пакетов ($0.5\% < p < 5\%$), что приводит к снижению эффективного размера передаваемого сегмента TCP/IP.

Третий участок кривой соответствует полностью неработоспособной сети со значительной потерей пакетов ($p > 5\%$).

Основной недостаток этой модели заключается в том, что переменные λ и $E[S_n]$ не связаны с текущим состоянием сети. Средний размер потока $E[S_n]$ не зависит от конкретной сети, а является универсальной величиной, характеризующей свойства глобальной сети. Параметр λ описывает поведение пользователей сети.

Графическое описание состояния различных сетей, как это можно видеть на Рис.1, будет отличаться углом наклона и длиной рабочего участка. Следовательно, эти параметры и можно использовать для индивидуального описания исследуемой сети. Так как эксплуатация сети всегда рекомендуется только в пределах рабочего участка, то состояние сети может быть описано с помощью угла наклона прямой с Рис. 1. Этот угол наклона представляет собой усредненную скорость одного потока, измеряемую в Кбит/с.

Анализ имеющихся у нас данных, собранных на сетях Самарской региональной сети для науки и образования, российской федеральной научно-образовательной сети RNet, ирландской национальной научно-образовательной сети HEANet, сетей частных операторов связи (СамараТелеком) и т.д. позволяет проанализировать данные о зависимости качества соединений от средней скорости потока.

Ситуация в региональных научно-образовательных сетях по этому основному показателю не улучшается с 2002 года, когда был осуществлен переход на каналы иерархии STM1. Так, средняя скорость потока в Самарской региональной сети для науки и образования была в то время чуть больше 7 Кбит/с, в то время как в

коммерческих сетях она не превышала 1,5 Кбит/с. В настоящее время ситуация коренным образом поменялась. Средняя скорость потока в Самарской научно-образовательной сети понизилась до 3-4 Кбит/с, в то время как в коммерческих сетях она возросла до 10 Кбит/с. Даже для московских научно-образовательных сетей, например FREEnet, в начале 2007 года этот параметр не превышал 6 Кбит/с.

Результаты анализа можно свести в следующую Таблицу:

№ пп	Средняя скорость потока в Кбит/с	Возможность голосовой связи	Возможность низкоскоростных видео конференций	Возможность высокоскоростных видеоконференций от 384 Кбит/с	Возможность грид вычислений
1	1	Нет	Нет	Нет	Нет
2	2	Низкого качества	Нет	Нет	Нет
3	4	Приемлемое качество	Низкого качества на скоростях до 30 Кбит/с	Нет	Нет
4	7	Отличное качество	Приемлемое качество	Низкое качество	Нет
5	15	Отличное качество	Хорошее качество (Q_MOS > 3,9)	Хорошее качество (Q_MOS > 4,0)	Нет
6	> 25	Отличное качество	Хорошее качество (Q_MOS > 3,9)	Отличное качество (Q_MOS > 4,0)	Пользовательский уровень

Таблица 2. Качество сети и возможность внедрения новых интернет сервисов

Следует отметить, что состояния сети на графике с Рис.1 в различные моменты времени будут изображаться отдельными точками. Поскольку суммарная нагрузка исследуемого канала есть результат мультиплексирования большого количества потоков, независимых друг от друга, то согласно классической предельной теореме распределение суммарной нагрузки стремится к нормальному (Гауссову) распределению, то для рабочего участка сети может быть введено понятие доверительного интервала.

Это означает, что величина суммарного трафика лежит в следующих пределах [36,45]

$$E[R(t)] - A(\varepsilon)\sqrt{V_R} \leq R(t) \leq E[R(t)] + A(\varepsilon)\sqrt{V_R}, \quad (3.3)$$

где $A(\varepsilon)$ нормальная квантильная функция. Уравнение (3.3) утверждает, что величина суммарной нагрузки $R(t)$ будет находиться вне указанных пределов только в $100 \times \varepsilon\%$ от общего времени наблюдения.

Используя уравнение Литтла, доверительный интервал для суммарной нагрузки $R(t)$ может быть выражен следующим образом

$$R(t) = k(N \pm A(\varepsilon)\sqrt{N}), \quad (3.4)$$

где величины k , $A(\varepsilon)$ могут быть найдены из анализа экспериментальных данных для рабочего участка кривой с Рис.1, а N - это число активных потоков.

Уравнение (3.4) приводит к следующему критерию поиска проблемных состояний сети: если в результате двух последовательных измерений состояния сети будут лежать вне доверительного интервала ($\varepsilon \leq 0.05$), то сеть испытывает те или иные трудности.

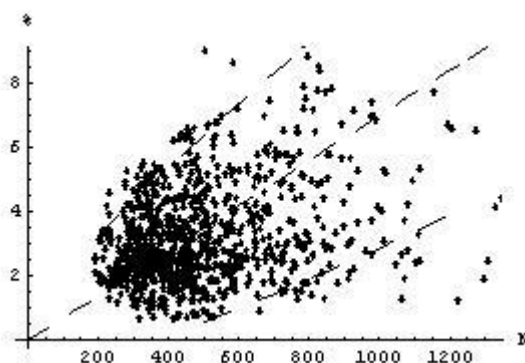


Рисунок 2. Доверительный интервал сети HEAnet

Для того чтобы проверить высказанные предположения о структуре трафика и его свойствах были проведены измерения на маршрутизаторах, обслуживающих внешние каналы крупных сетей – ЗАО «СамараТелеком» в Самаре и ирландской научно-образовательной сети HEAnet. Каждый из исследуемых маршрутизаторов обслуживал несколько каналов – внешних и внутренних. Скорости данных подключений составляли 622 и 155 Mbps для HEAnet и 8 Mbps для СамараТелеком. Среднесуточная загрузка каналов варьировалась от 5% до 60%.

Средняя скорость потока в сети NEAnet равняется 15 Kbps, что на порядок больше, чем у СамараТелеком, что дает возможность передавать не только голос, но и качественное видеоизображение.

В **четвертой главе** описываются ключевые идеи аналитической модели аудиовизуальных потоков данных. Основная исследуемая проблема формулируется следующим образом: изображение какого качества можно получить после трансляции его по IP сети? Решение этой задачи приводит к практическому применению: определению параметров видео потока (скорость, размер окна, частоту кадров) по параметрам сетевого соединения (потеря пакетов, вариация задержки, свободная полоса).

Три основных фактора, влияющих на качество связи:

- фактор оборудования VVoIP систем (Voice and Video over IP), определяющий структуру передаваемого и получаемого сигналов
- качество сети передачи данных, используемой в качестве среды передачи
- человеческое восприятие, служащее основой для оценки качества аудио и видео приложений

Ранее проводимые исследования ограничивались сравнительным анализом действия двух компонент из вышеупомянутого списка. Так, в работе P. Calyam, M. Sridharan, W. Mandrawa, P. Schopis, Performance Measurement and Analysis of H.323 Traffic, PAM2004 качество аудио, видео конференций анализировалось по шкале MOS (Mean Opinion Score), основанной на человеческом восприятии. Качество мультимедийной информации между двумя точками сравнивалось с показателями качества сетевого соединения.

Для того чтобы понять взаимоотношения трех основных факторов, влияющих на качество связи можно выделить основные этапы передачи аудиовизуальной информации через сеть на основе IP протокола. Непрерывный видеоряд, поступающий от наблюдаемого объекта, преобразуется сначала в дискретный ряд, то есть последовательность отдельных изображений, а затем кодируется в цифровую последовательность и разбивается на пакеты при помощи

специализированного оборудования. Пакетный поток передается через сеть, испытывая искажения, связанные с вариацией задержки и потерями пакетов. Для устранения искажений, связанных с вариацией задержки пакетов (сетевым джиттером), применяется схема буферизации, после которой происходит декодирование полученной последовательности пакетов.

Проведенные нами эксперименты можно разделить на две основные группы:

Разрешение изображения	Скорость, <i>Kbps</i>	Среднее значение межпакетного интервала, <i>ms</i>	Среднее значение размера пакета, <i>байт</i>
QCIF, CIF	128	70-100	600-800
CIF, 4CIF	384	20-30	900-1100
CIF, 4CIF	512	17-25	1000-1200
CIF, 4CIF	768	12-20	1000-1200
CIF, 4CIF	1024	10-18	1000-1300
4CIF	1472	8-15	1000-1300
4CIF	1920	5-10	1100-1300

Таблица 3. Параметры распределений для исходного сигнала

1) *Установление характеристик исходного сигнала:* видеоконференция проводилась между двумя точками в локальной сети. В ходе тестов использовалось оборудование от различных производителей, наилучший набор оборудования для видеоконференций был предоставлен HEAnet.

В процессе проведения эксперимента скорость видео потока варьировалась, ее значения составляли 128, 384, 512, 768, 1024, 1472, 1920 Kbps. Данные обо всех IP пакетах фиксировались при помощи пакета Ethereal, далее, используя встроенные фильтры Ethereal, выделялись только те RTP пакеты, которые несли информацию о видео.

В результате тестирования стало возможным получить данные о параметрах распределений (среднее значение, межквартильная широта и т.д.) для

межпакетного интервала исходного сигнала и для размера пакетов. Эти данные сведены в Таблицу 3.

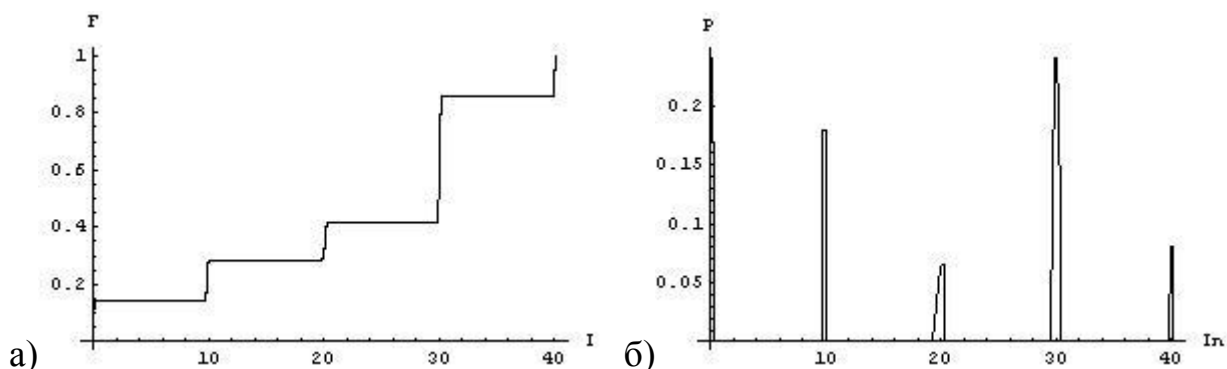


Рисунок 3. Функция распределения [а)] и плотность распределения [б)] для межпакетного интервала исходного сигнала на скорости 512 Kbps

Типичный вид функции распределения F и ее плотности p для межпакетного интервала исходного сигнала приведены на графиках (Рис. 3а и 3б).

2) *Поиск параметров, описывающих сетевой фактор:* Как уже упоминалось выше, при передаче по сети первоначальный аудиовизуальный поток данных искажается. Вторая серия экспериментов нацелена на то, чтобы найти численные характеристики такого искажения.

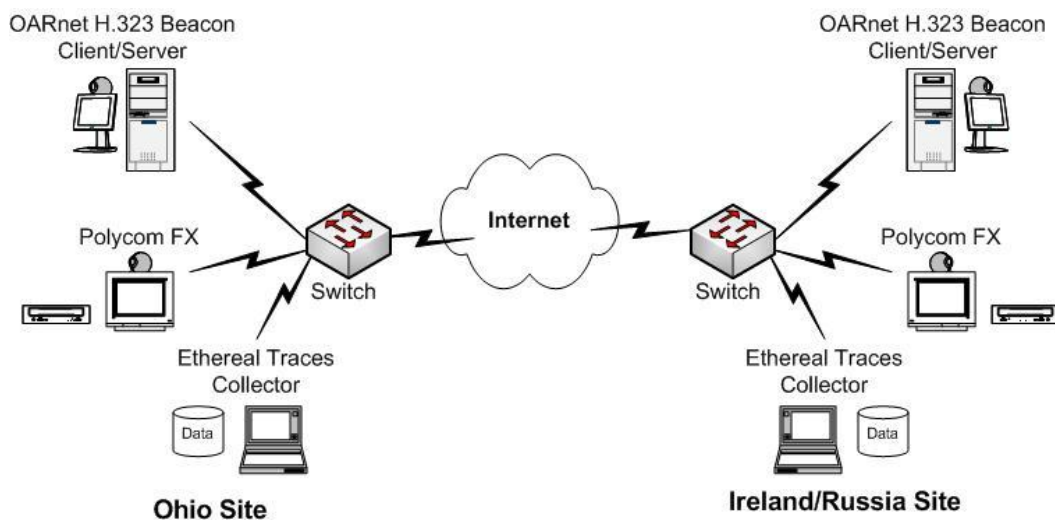


Рисунок 4. Схема эксперимента в глобальной сети.

Для этого проводится видеоконференция между двумя удаленными точками в глобальной сети, например, между Самарой и Колумбусом или Москвой и Дублином, как это показано на Рис. 4. При этом данные обо всех RTP (H.261,

G.722) пакетах записываются в обеих конечных точках с синхронизированной временной отметкой. Разбивая эти данные на входящий и исходящий видео потоки, можно получить данные о сетевом факторе и факторе оборудования, включая сведения о порядке следования пакетов. Дополнительное программное обеспечение (H.323 Weason) позволяет оценить качество получаемого изображения по шкале *MOS*.

Данные эксперимента и анализ процесса передачи информации позволяют сформулировать основные положения модели:

- Исходный видео поток рассматривается как последовательность RTP (UDP, TCP) пакетов, которая описывается средними величинами и межквартильной шириной для размера пакетов и межпакетных интервалов
- Искажения, вносимые сетью, описываются джитером и процентом потери пакетов
- Основной фактор, влияющий на качество связи, это потери пакетов. Они обусловлены двумя эффектами, заключающихся в прямых потерях в сети и потерях из-за переполнения буфера.

При равных сетевых условиях с ростом скорости видео потока потеря качества изображения происходит быстрее. В результате многочисленных экспериментов в глобальной сети были получены следующие выражения, позволяющие оценить степень ухудшения качества сигнала вследствие искажений, вызванных прохождением сигнала по глобальной сети. Для голоса разницу между качеством аудио сигнала в точках передачи и приема можно выразить как

$$\Delta Q_{MOS}^{voice} = 0.012\sigma(D_{n+1} - D_n) + 0.24p, \quad (4.1)$$

где $\sigma(D_{n+1} - D_n)$ - вариация задержки пакетов (средне квадратичное значение),

p - процент потери пакетов, Q_{MOS} - качество звука по шкале MOS. Для нахождения этих параметров (σ, p) можно использовать специализированный

пакет **iperf**, который представит точные значения вариации задержки и потерь пакетов. В крайнем случае, параметры можно взять из данных обычной утилиты **ping**. Например, если в результате команды **ping** будет получено среднее квадратичное в 40 ms , а потери пакетов составят 1%, то качество звука будет ухудшено на 0.72 балла по шкале *MOS*.

Для оценки качества видеоконференции в точке приема видео сигнала применяется более сложное выражение:

$$Q_{MOS}^{video} = 4.5 - 0.015J - 0.008I + 0.00006JI, \quad (4.2)$$

где $J = \sigma(D_{n+1} - D_n) + 0.2p$ - обобщенный параметр, описывающий сетевой фактор. Для описания сетевого влияния будет использоваться единая переменная, описывающая процесс потери пакетов, вызванный прямыми потерями в сети и потерями из-за задержек пакетов, превысившими время буферизации.

Ниже даны некоторые дополнительные пояснения по выражению для оценки качества видео потоков в сети. В процессе обработки сигнала происходит аппаратное преобразование и последующее кодирование непрерывного сигнала в дискретный, что обуславливает снижение качества аппаратного изображения по сравнению с естественным. Поэтому даже при прочих идеальных условиях максимальное значение Q_{MOS} в уравнении (4.2) не превысит 4.5.

При уменьшении скорости передачи качество преобразованного сигнала также должно падать, и этот эффект описывает слагаемое $-0.008I$, где I представляет собой среднее значение межпакетного интервала исходного сигнала.

Равные сетевые помехи, описываемые переменной J , должны ухудшать качество связи, осуществляемой на высоких скоростях, сильнее, чем качество передачи при малых скоростях, поэтому в уравнении (4.2) для Q_{MOS} введен дополнительный член второго порядка JI , который учитывает такое поведение.

Для демонстрации нашего подхода рассчитаем ниже оценку качества видео сигнала, которое будет получаться на скорости 384 Kbps, если среднее

квадратичная вариации задержки равна 60 ms , процент потери пакетов 2% . Параметр I равен 30 ms (см. Таблицу 3), а итоговое качество видео соединения может быть оценено как 2.94 , что достаточно критично.

Приведенные нами значения рассчитаны для кодеков Polycom и дают представления о величинах универсальных коэффициентов $Q_{ideal}, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ уравнения (4.3) для произвольных кодеков.

$$Q_{MOS}^{video} = Q_{ideal} - \alpha J - \beta I + \gamma II, \quad J = \sigma(D_{n+1} - D_n) + \delta p \quad (4.3)$$

Пятая глава посвящена обсуждению путей повышения эффективности использования каналов, ведущих к вышестоящим операторам при помощи систем резервирования трафика (проху cache). Система резервирования трафика стала необходимой ввиду того, что на рубеже веков произошла задержка с переходом общероссийской научно-образовательной инфраструктуры на каналы цифровой иерархии SDH. С 1997 по 2001 год пропускная способность канала на Москву была ограничена 2 Mbps (E1). Начиная с 2000 года, была поставлена под угрозу даже доставка электронной почты. Единственным выходом для увеличения пропускной способности сети и ее администрированию была инсталляция системы резервирования трафика (проху cache, пакет SQUID).

Исходя из практических нужд по эксплуатации системы резервирования трафика были сформулированы основные цели данного исследования: оценка верхней границы эффективности системы, нахождение параметров настройки системы для достижения максимальной производительности при минимальных ее размерах, разработка методики эксперимента по определению параметров системы, выявление структуры системы и нахождение взаимосвязи между отдельными ее элементами, уточнение принципов построения системы резервирования, введение в модель и алгоритм резервирования поправок, учитывающих эффект обновления документов в глобальной сети. Подробные ответы на все поставленные вопросы можно найти в пятой главе диссертации.

Следует отметить, что при построении данной модели сначала было найдено теоретическое решение, которое впоследствии было экспериментально подтверждено. Все выводы и рекомендации, содержащиеся в данной главе, исходят из этого теоретического решения.

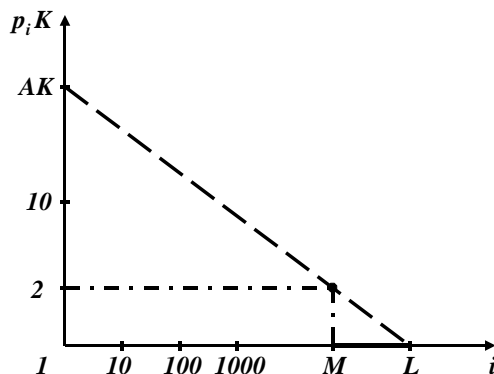


Рисунок 5. Особые точки распределения Зипфа

Моделирование интернет процессов находится в настоящее время на этапе становления, поэтому, часто даже самые простые методы, особенно заимствованные из других областей дают эффективные решения. В основе представленной модели системы резервирования трафика лежит метод граничных условий, заимствованный из теоретической физики. В качестве одномерной границы использованы особые точки графического представления обобщенного распределения Зипфа, описывающего работу такой системы.

Два типа соотношений могут претендовать на роль фундаментальных законов, описывающих поведение систем резервирования:

- Обобщенный закон Зипфа,
- Нормировочные соотношения.

Оба этих закона применимы к любым точкам графического представления обобщенного закона Зипфа, как это показано на Рис. 5.

Для построения аналитической модели будут использованы две особые точки с координатами $(M, 2)$ и $(L, 1)$, см. Рис. 5. Обобщенный закон Зипфа, записанный для каждой из этих точек имеет вид:

$$\frac{AK}{M^\alpha} = 2, \quad (5.1)$$

$$\frac{AK}{L^\alpha} = 1 \quad (5.2)$$

Нормировочное условие для точки $(M,2)$:

$$M \int_1^M \frac{A}{x^\alpha} dx = H_{\max} \quad (5.3)$$

Для реальных систем

$$H = \int_1^{S_k} \frac{A}{x^\alpha} dx, \quad (5.4)$$

где S_k число документов в описываемой системе резервирования.

Выбирая в качестве одномерной границы точку $(M,2)$, получаем замкнутую систему, состоящую из уравнений (5.1) и (5.3), что дает следующее решение

$$M = \frac{(1-\alpha)H_{\max}}{2} K, \quad (5.5)$$

которое говорит о том, что для реальных потоков запросов с $\alpha = 0.8$ и $H_{\max} = 0.45$ только каждый пятнадцатый документ должен быть сохранен в кэш-системе. Эта система позволяет найти базовые решения, модификация ее и внесение поправок позволяет описать различные эффекты более высокого порядка, например, эффект обновления документов в глобальной сети.

Особое внимание уделяется вопросу, как изменяется производительность системы резервирования с ростом размера дискового пространства, выделяемого для хранения резервируемой информации. Ряд исследователей (V. Almeida, A. Bestavros, M. Crovella, and A. De Oliveira // Characterizing reference locality in the WWW, in: IEEE International Conference in Parallel and Distributed Information Systems, Miami Beach, Florida, USA, December, 1996; L. Breslau, P. Cao, L. Fan, G. Phillips, S. Shenker // Web Caching and Zipf-like Distribution: Evidence and

Implications, in: IEEE Infocom, vol. XX, no. V, 1999, p. 1-9; A. Wolman, G. Voelker, N. Sharma, N. Cardwell, A. Karlin, H. Levy // On the scale and performance of cooperative Web proxy caching, Operating Systems Review, 34(5), Dec.1999, p.16-31) предполагали, что зависимость носит логарифмический характер (log-like fashion). Однако, выражение (3.4) для производительности кэш-системы дает следующую зависимость

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{1-\alpha}, \quad (5.6)$$

что говорит о степенной зависимости, что и подтвердили проведенные нами эксперименты [10, 13], результат которых приведен на Рис.6.

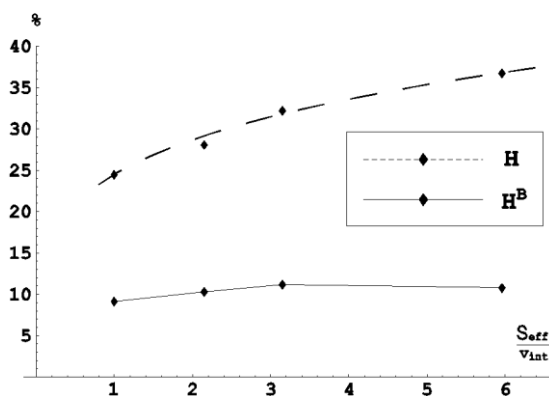


Рисунок 6. Зависимость производительности системы резервирования от ее размера

Дизайн первых кэш-систем во многом повторял алгоритмы и архитектуру резервирования для процессов в базах данных и операционных системах. Первоначальные алгоритмы были позднее уточнены, однако эти усилия были ограничены первоначальным дизайном. Проведенные нами эксперименты показали, что пространство, отведенное под хранение данных, используется неэффективно, так как время хранения в системе популярных и непопулярных документов совпадает. При этом число непопулярных документов приблизительно в полтора раза больше.

Предложенная в диссертации новая архитектура кэш системы и новые алгоритмы резервирования на основе метрики замещения, базирующейся на распределении

Зипфа, устраняют эти недостатки, а также позволяет добиться повышения производительности системы, по меньшей мере, на несколько процентов. Этот эффект достигается за счет увеличения ядра системы. Особенно актуально применение данного алгоритма в одноранговых сетях (peer-to-peer), где пользователи могут испытывать дефицит дисковых пространств, выделенных для управления сетью.

Предложено описывать эффект обновления документов в сети Интернет обобщенным распределением Зипфа с меньшим степенным показателем.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена крупная научно-техническая проблема – разработаны научные основы анализа качества интернет трафика и на их основе создана методология сетевых измерений, позволяющая оценить состояние сети для внедрения последнего поколения научно-образовательных предложений. Эта проблема имеет важное социально-культурное и хозяйственное значение для развития телекоммуникационных систем и компьютерных сетей и, прежде всего, для внедрения грид технологий и технологий распределенных вычислений, приложений на базе потокового видео, включая интернет телевидение, других высокоскоростных приложений.

1. Разработана аналитическая модель трафика на участке высокоскоростной сети, согласно которой для сравнения качества соединений в глобальной сети достаточно использовать единственный параметр: среднюю скорость потока (flow).
2. Найдено соответствие между возможностью запуска того или иного высокоскоростного приложения и средней скоростью потока.
3. Построена аналитическая модель для оценки качества аудиовизуального трафика, позволяющее вычислять качество получаемых видео и аудио сигналов на основе параметров интернет соединения между двумя точками.

4. Разработана аналитическая модель системы резервирования трафика (проху cache) с целью повышения эффективности внешнего канала, базирующаяся на новом решении системы уравнений, описывающих процесс резервирования и полученная при помощи метода граничных условий, заимствованного из теоретической физики.
5. Предложен анализ эффективности и методология оценки региональных интернет сервис провайдеров, включая методику и сравнительный анализ эффективности различных транспортных средств, формулировка критериев эффективности инсталляционного процесса, текущей эксплуатации, качества предоставляемой связи.
6. Сформулированы принципы построения региональной сети для науки и образования и методика составления рейтинга региональных сетей. Эти принципы, реализованные при создании Самарской региональной сети для науки и образования, включают следующие положения: основой сети должен быть оптико-волоконный кабель, находящийся в собственности научно-образовательных организаций; доленое строительство с частными телефонными компаниями; максимальное совмещение инфраструктуры научно-образовательных сетей с установившейся инфраструктурой связи; получение доступа к первичной наземной цифровой сети и использование конкурентной среды; выбор протокола Ethernet в качестве транспортного протокола первичной сети.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Астафьев В.И., Зинченко В.Н., Соловов А.В., Камаев В.П., Фридман Л.М., Сухов А.М., Санников А.Л., Чумаков Л.В. Проект создания единого информационного пространства Самарской области в сфере науки, образования, культуры, здравоохранения и социального обеспечения // Вестник Самарского государственного университета – 1995 - с. 198-204
2. Астафьев В.И., Санников А.Л., Сухов А.М. Информационно-аналитический центр перспективных исследований при Самарском госуниверситете // Тезисы докладов, Телематика 95

3. **Афанасьев Ф.В., Петров А.В., Сухов А.М. Проверка качества каналов Интернет // Сети и системы связи –2003 - №6(98) - с. 92-94**
4. Афанасьев Ф., Петров А., Daly W., Сухов А. Анализ Интернет трафика на основе потоковых технологий // Семинар «Проблемы современных информационно-вычислительных систем» под руководством проф. Васенина В.А. и проф. Корнеева В.В. - мехмат МГУ, февраль 2004 - <http://onager.s2s.msu.ru/seminar.html>
5. Балакин В.А., Белоконов И.В., Симановский Е.А., Сухов А.М. Поддержка высокотехнологических предприятий Самарской научно-образовательной сетью // Тезисы докладов, Телематика 99
6. Балакин В.А., Белоконов И.В., Симановский Е.А., Сухов А.М. Телекоммуникационная поддержка международных аэрокосмических проектов // Тезисы докладов конференции "Научный сервис в сети Интернет" - Новороссийск, 1999, из-во МГУ - с. 70-72
7. Бондарев И.Н., Еремин А.Л., Платонов А.П., Стрижов М.В., Сухов А.М. Научно-образовательное интернет - телевидение // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет: технологии параллельного программирования» - Новороссийск, 2006, из-во МГУ - с. 193-195
8. **Бондарев И.Н., Платонов А.П., Сухов А.М. Технологии цифрового телевидения в сети интернет и сотовых сетях// Телекоммуникации - 2006 - №10 - с. 30-33**
9. Долгих Д.Г., Симановский Е.А., Сухов А.М. Оптимизация систем кэширования трафика // Труды X Всероссийской научно-методической конференции «Телематика 2003» - С.Петербург, 2003 - том 1, с. 278-279
10. Долгих Д.Г., Сухов А.М. Повышение эффективности внешних каналов // VIII конференция представителей региональных научно-образовательных сетей "RELARN 2001", Материалы конференции - Петрозаводск 2001 - с.29-35
11. Долгих Д.Г., Сухов А.М. Системы резервирования трафика в Интернет // VI рабочее совещание по электронным публикациям "El-Pub2001", 25-27 апреля 2001 г., - Новосибирск, Академгородок - <http://www.ict.nsc.ru/ws/elpub2001/1859/>
12. Долгих Д.Г., Сухов А.М. Системы резервирования трафика. Аналитическая модель // Телекоммуникации - 2007 - № 3 - с. 8-11
13. Долгих Д.Г., Сухов А.М. Системы резервирования трафика. Экспериментальные данные и их обработка // Телекоммуникации - 2007 - № 4 - с. 22-24
14. Долгих Д.Г., Сухов А.М. Системы резервирования трафика. Архитектура и алгоритмы // Телекоммуникации - 2007 - № 4 - с. 24-27
15. Долгих Д.Г., Сухов А.М. Системы резервирования трафика. Эффект изменения документов в глобальной сети // Телекоммуникации - 2007 - № 5 - с. 29-31

16. Еремин А.Л., Долгих Д.Г., Ильин А.Ю., Платонов А.П., Стрижов М.В., Сухов А.М. Система измерений для внедрения мультикастинговой рассылки мультимедийных сообщений // материалы XIII конференции представителей научно-образовательных сетей "RELARN 2006" - Барнаул, 2006 - с. 26-28
17. Еремин А.Л., Платонов А.П., Стрижов М.В., Сухов А.М. Научно-образовательное интернет-телевидение на базе Самарской региональной сети науки и образования // Труды XIII Всероссийской научно-методической конференции «Телематика 2006» - С.Петербург, 2006 - том 1, с. 214-215
18. Ильин А., Сухов А. Создание измерительной инфраструктуры для российского сегмента Интернет // XI конференция представителей региональных научно-образовательных сетей «RELARN 2004», Тезисы докладов - Самара-Волгоград-Астрахань, 2004 - с.39-44
19. Ильин А., Платонов А., Сухов А. Сравнительный анализ региональных научно-образовательных сетей // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет» - Новороссийск, 2004, изво МГУ - с.14-17
- 20. Ильин А.Ю., Платонов А.П., Сухов А.М. Видеоконференции в Интернет // Телекоммуникации – 2005 - № 12 - с. 24 – 28**
- 21. Платонов А.П., Сухов А.М., Методики оценки Интернет-аудитории в регионах России // Сети и Системы Связи - 11 мая 2006 - специальный выпуск "Связь 2006" для выставки "Связь--Экспоком--2006" - с.14**
22. Симановский Е.А., Сухов А.М., Бездверный В.В. Нагрузочные характеристики локальной сети СГАУ // Сборник докладов RELARN 1996 – Москва, 1996 - с. 16-17
23. Сойфер В.А., Симановский Е.А., Сухов А.М. Информационное пространство и локальная сеть СГАУ // Тезисы докладов, Телематика 96 – С. Петербург, 1996 - с.48
24. Сойфер В.А., Симановский Е.А., Сухов А.М. Самарский городской сегмент информационного пространства науки и высшей школы // Сборник докладов, RELARN 1997 – Москва, 1997 - с. 38-40
25. Сойфер В.А., Симановский Е.А., Сухов А.М. Опорная сеть АТМ как основа Самарского регионального информационного пространства науки и высшей школы // Тезисы докладов, Телематика 98 - С. Петербург, 1998 - с.44
26. Сойфер В.А., Кузьмичев В.С., Симановский Е.А., Сухов А.М. Создание регионального сегмента компьютерно-информационной среды академических и вузовских организаций в Самарском регионе // Сборник докладов, RELARN 1999
27. Сухов А.М. Информационное обеспечение учебного процесса и научных исследований // Сборник докладов, RELARN 1994 – Москва, 1994 - с. 46

28. Сухов А.М. Проект EmNet/NIS/PhaseII на физико-математическом факультете Самарского пединститута // Доклады ежегодной научной конференции - Физмат СГПИ, 1996 - с. 3
29. Сухов А.М. Обзор состояния рынка телекоммуникаций в Самарской области // Компас (Компьютерный путеводитель Самары) – 1998 - №4 - с. 12-13
30. Сухов А.М. Подключение к Интернет // Компас (Компьютерный путеводитель Самары) – 1999 - №2 - с. 26-28
31. Сухов А.М. Обзор состояния научно-образовательных сетей в Европе (по итогам конференции TERENA-2001) // Тезисы докладов конференции "Научный сервис в сети Интернет" - Новороссийск, 2001, из-во МГУ - с. 35-37
32. Сухов А.М. Экспериментальный спутниковый канал для Российской провинции // Тезисы докладов конференции "Научный сервис в сети Интернет" - Новороссийск, 2001, из-во МГУ - с. 37-41
33. Сухов А.М. Сравнительный обзор состояния телекоммуникационной инфраструктуры науки и образования в Европе и России // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет» - Новороссийск, 2003, из-во МГУ - с.40-43
34. Сухов А.М. Телекоммуникации в Самарской области // Сети и системы связи –2003- №13(105) - с. 50-55
35. Сухов А.М. Эффективность региональных операторов связи // Сети и системы связи- 2004 - №7(113) - с. 18-22
36. Сухов А.М. Моделирование нагрузки на участке высокоскоростной сети // Телекоммуникации – 2006 - №2 - с.23-29
37. Balakin V.L., Belokonov I.V., Sukhov A.M., Simanovsky Ye.A., Kozlov V.D., Legros J.C. Decentralized Control System of International Aerospace Projects on the Basis of Satellite Information Technologies // Proceedings of the International Conference, "Scientific and Technological Experiments on Russian Foton/Bion Recoverable Satellites: Results, Problems and Outlooks" - Samara, 2000 - p. 282–285
38. Dolgikh D.G., Shavaldin A.A., Sukhov A.M. Cost benefit analysis // Reports, "Second Web Cache Managers Workshop" - TERENA and DESIRE, Budapest, 2000
39. Dolgikh D., Sukhov A. Parameters of cache systems based on a Zipf-like distribution // Computer Networks – 2001 - 37(6) - p.711-716
40. Symanovsky E.A., Sukhov A.M., Yumashev V.L. Samara segment of regional telecommunication network // Reports, Advanced NATO Workshop “Digital Networking in Middle Volga Region” - Samara, May 1998 - p. 11-16
41. Sukhov A. Review of telecommunications in Samara Region // Reports, Advanced NATO Workshop “Digital Networking in Middle Volga Region”, Samara, May 1998, p. 19-21

42. Sukhov A. Flow measurement // 9th TF-NGN Meeting (TERENA) - Budapest, Hungary October 17-18, 2002
43. Sukhov A., Calyam P., Daly W., Iliin A. Network requirements for high-speed real-time multimedia data streams // Book of abstracts, Internet. New Generation - IPv6 - Moscow, 2004 - pp. 28-33
44. Sukhov A., Calyam P., Daly W., Iliin A. Towards an Analytical Model for characterizing behavior of High-Speed VVoIP applications // Selected paper from TERENA Networking Conference 2005, "The world of pervasive networking", Poznan', Poland, ISBN 9077559094, опубликована в Computational Methods in Science and Technology – 2005 - 11(2) - p. 161-167
45. Sukhov A., Daly W., Afanasiev F., Petrov A. Flow-based analysis of Internet traffic // In Computer Networking and Networks - ISBN: 1-59454-830-7, Nova Science Publ., 2006 - pp. 99 – 113