

На правах рукописи

ДУНАЙЦЕВ
Роман Альбертович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ
СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ
ПО ПРОТОКОЛУ ТСР**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2005

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кучерявый А.Е.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Степанов С.Н.
кандидат технических наук
Парамонов А.И.

Ведущая организация: ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ СПб»

Защита состоится «___» _____ 2005 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета К.219.004.01 при государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича по адресу: 191186 Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 61, ауд. 413.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2005 г.

Ученый секретарь совета,
к.т.н., доц.

В.Х. Харитонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Согласно последним исследованиям, протокол управления передачей (Transmission Control Protocol, TCP) является доминирующим протоколом транспортного уровня в Интернет. Такие востребованные пользователями службы как World Wide Web (WWW), служба передачи файлов, электронная почта (E-mail) и многие другие используют для надежной передачи данных протокол TCP. Столь широкое применение протокола TCP в Интернет определило пристальное внимание к нему со стороны специалистов, занимающихся проблемами обеспечения качества обслуживания (Quality of Service, QoS) в Интернет. Помимо традиционных измерений и имитационного моделирования, в последнее десятилетие значительное число исследовательских работ было адресовано разработке математических моделей функционирования протокола TCP. Вопросы математического моделирования функционирования протокола TCP рассматривались в работах К.Авраченкова, М.Mathis, J.Padhye, N.Cardwell, B.Sikdar и ряда других авторов.

В настоящее время предполагается, что одну из основных составляющих трафика Интернет в ближайшем будущем будут создавать услуги передачи мультимедийной информации: потоковое видео, аудио-трансляции и т.п. В ряде работ было доказано, что для большинства мультимедийных услуг приоритетными параметрами, влияющими на качество предоставляемой услуги, являются задержка доставки пакета и дисперсия этой задержки (джиттер), в то время как трафик, создаваемый услугами потокового типа, является (в определенных пределах) устойчивым к потерям. В основном это объясняется тем, что услуги потокового типа ориентированы на передачу аудио/видеоинформации и ее незамедлительное воспроизведение, в результате чего конечный пользователь и является той системой, которая оценивает качество предоставляемой услуги. В связи с этим применение протокола передачи пользовательских дейтаграмм (User Datagram Protocol, UDP) для потокового мультимедийного трафика предпочтительнее, чем протокола TCP, так как реализованная в протоколе TCP функция управления перегрузкой с резким уменьшением скорости передачи при обнаружении потери может существенно ухудшить качество предоставляемой услуги за счет увеличения задержки доставки данных и дисперсии этой задержки. Однако отсутствие каких-либо алгоритмов управления перегрузкой в протоколе UDP может привести к ухудшению условий функционирования параллельных соединений TCP (т.е. соединений TCP, использующих общий каналный ресурс совместно с потоками UDP), а также к перегрузке сети.

В последние годы был предложен ряд механизмов, позволяющих осуществлять адаптивное управление трафиком, создаваемым, в том числе, и потоками UDP. Протокол дружественного TCP управления скоростью передачи данных (TCP Friendly Rate Control, TFRC), определенный в документе RFC 3448, является одним из наиболее проработанных и перспективных механизмов для адаптивного управления скоростью передачи данных и реализации функции управления перегрузкой при использовании протокола UDP для передачи потокового мультимедийного трафика. Протокол TFRC позволяет прикладному процессу передавать данные примерно с той же скоростью, что и протокол TCP в аналогичных условиях, но при этом избегая резкого уменьшения скорости передачи данных в случае потери пакетов. При использовании указанного протокола приемник TFRC сообщает передатчику информацию о потерях, а передатчик TFRC рассчитывает скорость передачи данных на основе полученной информации, времени обращения пакета и формулы, определяющей среднюю скорость передачи данных по протоколу TCP в аналогичных условиях.

Данная формула была получена в работе J.Padhye, V.Firoiu, D.Towsley и J.Kurose (и широко известна как PFTK-модель) на основе математического моделирования передачи данных по протоколу TCP Reno в длительном соединении в условиях пачечного процесса потерь, возникающим при использовании в маршрутизаторах алгоритма усечения хвоста очереди (Tail-Drop) с дисциплиной обслуживания FIFO (First In, First Out). В то же время детальный анализ показывает, что используемое в PFTK-модели упрощенное представление таких алгоритмов, как быстрая повторная передача и быстрое восстановление, а также отсутствие рассмотрения фазы медленного запуска после таймаута может приводить к существенно завышенной оценке средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno в условиях пачечного процесса потерь.

Необходимо отметить, что указанная модель является одной из важнейших в области математического моделирования функционирования протокола TCP. Результирующая формула, полученная в данной работе, часто применяется для проверки адекватности новых математических моделей, а также используется в различных исследовательских работах и книгах. Как следствие, неточность данной формулы может приводить к неверным результатам или некорректным выводам. Следовательно, представляется необходимой разработка метода оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno с более полным учетом алгоритмов, используемых в этом протоколе.

Более того, согласно исследованиям, наиболее распространенной на сегодняшний день реализацией протокола TCP является TCP NewReno. Анализ опубликованных исследований показывает, что недостаточное внимание было уделено математическому моделированию передачи данных по протоколу TCP NewReno. Соответственно, важной задачей является разработка и метода оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno для последующего использования в протоколе TFRC.

Таким образом, теоретическая и практическая значимость решаемых в диссертационной работе задач определяет ее актуальность.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является разработка методов оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP. С учетом вышесказанного, в качестве рассматриваемых реализаций протокола TCP были выбраны следующие реализации: TCP Reno и TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady). При этом поставленная цель достигается путем решения следующих основных задач:

1. Анализ основных алгоритмов, используемых в протоколе TCP для обеспечения гарантированной доставки данных, управления потоком данных и реакции на перегрузку сети.
2. Анализ существующих методов оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP. Определение возможных подходов к разработке метода оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP и недостатков существующих методов.
3. Разработка метода оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno в длительном соединении в условиях пачечного процесса потерь.
4. Разработка метода оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady) в длительном соединении в условиях пачечного процесса потерь.

5. Анализ точности оценки средней скорости передачи данных по протоколам TCP Reno и TCP NewReno согласно разработанным методам. Сравнение разработанных методов с существующими на основе результатов имитационного моделирования.

Методы исследования. Проведенные в диссертационной работе исследования основываются на теории вероятностей, теории восстановления, математической статистике и высшей математике.

Для проведения численных расчетов и статистического анализа в диссертационной работе использовался пакет программ Mathcad 2000 Professional. Для проверки адекватности разработанных методов оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP использовался программный продукт моделирования сетей связи ns-2. Для анализа и обработки данных, полученных в результате имитационного моделирования, использовались утилиты awk и Windows Grep.

Научная новизна. Основными результатами диссертационной работы, обладающими научной новизной, являются:

- метод оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno в длительном соединении в условиях пачечного процесса потерь;
- метод оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady) в длительном соединении в условиях пачечного процесса потерь.

Практическая ценность. Основным результатом диссертационной работы, обладающим практической ценностью, являются методы оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno и TCP NewReno в длительном соединении в условиях пачечного процесса потерь.

Использование результатов работы в протоколе TFRC для адаптивного управления скоростью передачи потокового мультимедийного трафика по протоколу UDP позволит обеспечить совместимость с соединениями TCP, где, согласно документу RFC 2309, TCP-совместимым потоком является поток, реагирующий на сообщения о перегрузке и средняя скорость передачи которого в установившемся состоянии не превышает среднюю скорость передачи данных в соединении TCP в аналогичных условиях.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертационной работы были представлены в форме докладов на следующих научно-технических конференциях:

1. 56-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 26-30 января, 2004 г.
2. 57-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 24-28 января, 2005 г.
3. 8-я международная конференция «Internet, Multimedia Systems and Applications», Кауаи (США), 16-18 августа, 2004 г.
4. 3-й международный семинар «Internet Performance, Simulation, Monitoring and Measurements», Варшава (Польша), Технологический Университет Варшавы, 14-15 марта, 2005 г.

5. 3-я международная конференция «Wired/Wireless Internet Communications», Ксанти (Греция), 11-13 мая, 2005 г.

Основные положения, выносимые на защиту:

- новые аналитические результаты функционирования протокола TCP в условиях пачечного процесса потерь;
- метод оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno в длительном соединении в условиях пачечного процесса потерь;
- метод оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady) в длительном соединении в условиях пачечного процесса потерь;
- численные оценки средней скорости передачи данных по протоколам TCP Reno и TCP NewReno, которые позволяют доказать необходимость учета алгоритмов быстрой повторной передачи, быстрого восстановления и медленного запуска в условиях пачечного процесса потерь.

Личный вклад автора. Основные положения, теоретические выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертационной работе, получены автором самостоятельно.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в 9 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа содержит 155 страниц машинописного текста, включая 37 рисунков, список литературы из 125 наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, перечислены основные полученные результаты диссертации, определена практическая ценность и область использования полученных результатов. Приведены сведения об апробации работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится аналитический обзор алгоритмов, определенных в документах RFC и используемых в протоколе TCP. Анализ проводится с целью выявления основных алгоритмов, которые должны быть учтены в разрабатываемых методах оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP.

Проведенный анализ показал, что основными алгоритмами, используемыми в протоколе TCP для обеспечения гарантированной доставки данных, управления потоком данных и реакции на перегрузку сети, и, соответственно, которые должны учитываться при разработке методов оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP, являются следующие: алгоритм определения времени обращения сегмента, алгоритм управления таймером повторной передачи и алгоритм Карна, алгоритм скользящего окна, алгоритм анонса окна приемника, алгоритм подтверждения

с задержкой, алгоритмы медленного запуска и предотвращения перегрузки, алгоритмы быстрой повторной передачи и быстрого восстановления, алгоритм реакции на получение частичного подтверждения (в TCP NewReno). При этом основное отличие между реализациями TCP Reno и TCP NewReno состоит в использовании алгоритмов быстрого восстановления и реакции на получение частичного подтверждения.

Во второй главе проводится анализ существующих методов оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP с целью выявления основных подходов к разработке метода оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP для последующего использования в протоколе TFRC.

В данной главе были рассмотрены математическая модель, представленная в работе M.Mathis и др., а также математическая модель, представленная в работе J.Padhye, V.Firoiu, D.Towsley и J.Kurose (PFTK-модель).

Проведенный анализ показал, что среднее значение скорости передачи данных может быть получено на основе теории восстановления как

$$B = M[Y]/M[A], \quad (1)$$

где B – средняя скорость передачи данных по протоколу TCP;

$M[Y]$ – математическое ожидание числа сегментов данных, переданных в течение цикла;

$M[A]$ – математическое ожидание длительности цикла.

При этом метод оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP основан на использовании следующей функциональной зависимости:

$$B = f\left(p, \overline{RTT}, \overline{RTO}, b, W_{\max}\right), \quad (2)$$

где p – вероятность потери сегмента данных;

\overline{RTT} – среднее время обращения сегмента (Round Trip Time, RTT);

\overline{RTO} – средняя длительность таймаута повторной передачи (Retransmission Time-Out, RTO);

b – число сегментов данных, подтверждаемых одним сегментом подтверждения;

W_{\max} – максимальное значение окна приемника.

Также было доказано, что рассмотренные математические модели имеют ряд существенных недостатков. В частности, данные математические модели не учитывают алгоритмы быстрой повторной передачи, быстрого восстановления и медленного запуска, рассматривая в качестве цикла лишь фазу предотвращения перегрузки между обнаружениями потерь сегментов данных.

Проведенный анализ показал, что если при передаче окна, состоящего из W сегментов данных и потере последовательности сегментов данных, вероятность того, что будет потеряно δ сегментов, имеет равномерное распределение от 1 до W , то при использовании реализации TCP Reno и обнаружении потери первого сегмента данных (из числа потерянных) в результате получения трех повторных подтверждений, будет иметь место следующая последовательность действий:

- получение трех повторных подтверждений;
- инициирование алгоритмов быстрой повторной передачи и быстрого восстановления, повторная передача первого потерянного сегмента данных;
- ожидание истечения таймера повторной передачи, установленного после подтверждения приема повторно переданного сегмента данных;
- инициирование алгоритма медленного запуска.

Так как при этом происходит существенное снижение скорости передачи данных, то неучет фаз быстрой повторной передачи, быстрого восстановления и медленного запуска может приводить к завышенной оценке средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno в условиях пачечного процесса потерь.

В третьей главе разработаны методы оценки средней скорости передачи данных по протоколам TCP Reno и TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady) в условиях пачечного процесса потерь.

При разработке методов оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP функционирование передатчика TCP рассматривается с точки зрения «раундов». Под раундом понимается интервал времени, который начинается с передачей первого сегмента данных в соответствии с текущим значением скользящего окна и завершается с получением первого подтверждения для одного из переданных в данном окне сегментов данных.

При разработке методов были введены следующие основные предположения, аналогичные принятым в PFTK-модели и ряде других работ.

Предполагается, что в течение всего соединения размер передаваемых сегментов данных является постоянным и равным максимально разрешенному (Maximum Segment Size, MSS), который определяется на этапе установления соединения TCP. Значение размера окна приемника также предполагается постоянным. Предполагается, что время, необходимое для передачи всех сегментов данных в скользящем окне, значительно меньше RTT, а величина RTT и вероятность потери сегмента данных не зависят величины скользящего окна. Процесс потерь сегментов предполагается пачечным, т.е. предполагается, что потери в различных раундах независимы, в то же время вероятность потери сегментов данных коррелирована в пределах одного раунда. При этом потери происходят только в направлении от передатчика к приемнику.

Аналогично PFTK-модели, разработка методов оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP осуществляется поэтапно. На первом этапе определяется средняя скорость передачи данных исходя из предположения, что обнаружение потери первого из числа потерянных в одном раунде сегментов данных происходит исключительно в результате получения трех повторных подтверждений. На втором этапе рассматривается случай с обнаружением потери первого из числа потерянных в одном раунде сегментов данных как в результате получения трех повторных подтверждений, так и в результате истечения таймаута повторной передачи, и определяется влияние последовательности таймаутов на среднюю скорость передачи данных. При этом в обоих случаях предполагается, что величина скользящего окна (и, соответственно, скорость передачи данных) определяется лишь значением окна перегрузки. На заключительном этапе рассматривается случай с ограничением

величины скользящего окна (и, соответственно, скорости передачи данных) со стороны приемника.

Для случая передачи данных по протоколу TCP Reno получены следующие результаты.

На основе анализа, проведенного во второй главе, в качестве цикла определен процесс передачи сегментов данных в интервале времени между двумя таймаутами, при этом цикл состоит из следующих фаз: медленного запуска (slow start, SS), предотвращения перегрузки (congestion avoidance, CA), быстрой повторной передачи и быстрого восстановления (fast retransmit/fast recovery, FR) и одного таймаута (рис. 1).

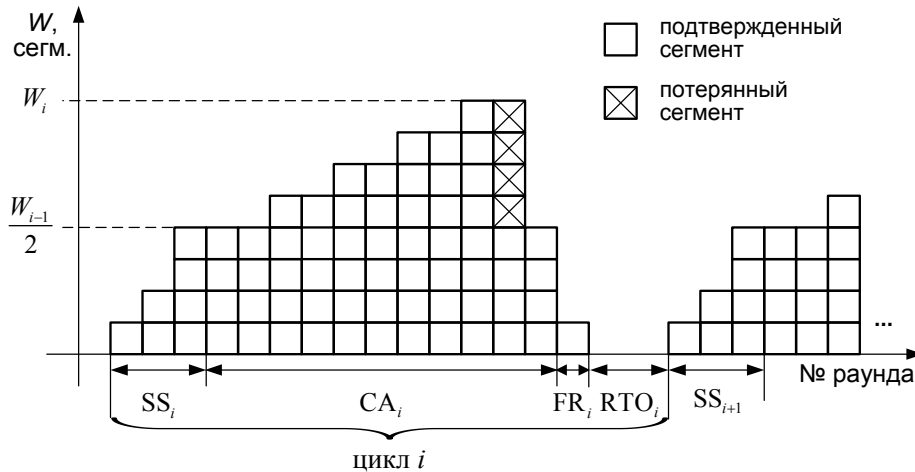


Рис. 1. Процесс передачи сегментов данных в течение i -го цикла ($i = 1, 2, \dots$).

Тогда, полагая, что обнаружение потери первого из числа потерянных в одном раунде сегментов данных происходит исключительно в результате получения трех повторных подтверждений, процесс передачи сегментов данных может быть представлен как последовательность циклов (рис. 2).

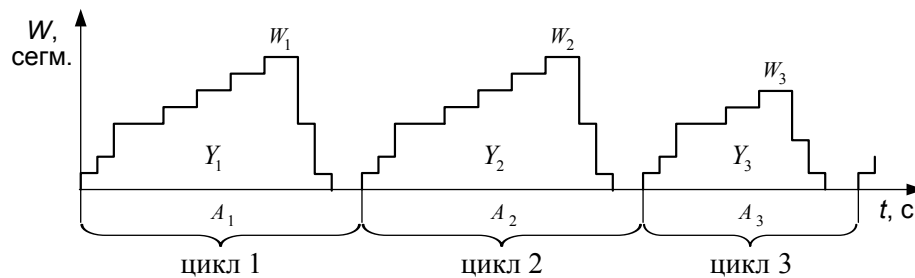


Рис. 2. Процесс передачи сегментов данных при обнаружении потери первого сегмента данных в результате получения трех повторных подтверждений.

Следовательно, согласно (1) и (2), средняя скорость передачи данных может быть определена как

$$B = \frac{\frac{1}{p} + M[W]}{\overline{RTT} \left(\max(\log_2 M[W], 2) + b \cdot \left(\frac{M[W]}{2} + 1 \right) + 2 \right) + \overline{RTO}}, \quad (3)$$

где p – вероятность потери сегмента данных при условии, что он является либо первым в раунде, либо предыдущий сегмент в данном раунде был успешно передан;

$M[W]$ – математическое ожидание значения окна (W) в конце фазы предотвращения перегрузки:

$$M[W] = -\left(\frac{2+3\cdot b}{3\cdot b}\right) + \sqrt{\frac{8+4\cdot p}{3\cdot b\cdot p} + \left(\frac{2+3\cdot b}{3\cdot b}\right)^2}. \quad (4)$$

На втором этапе, учитывая, что обнаружение потери первого из числа потерянных в одном раунде сегментов данных может происходить как в результате получения трех повторных подтверждений, так и в результате истечения таймаута повторной передачи, аналогично PFTK-модели, рассмотрим процесс передачи сегментов данных как последовательность сверхциклов, где i -й сверхцикл ($i=1,2,\dots$) состоит из j циклов ($j=1,\dots,n_i$) с обнаружением потери первого потерянного сегмента данных в результате получения трех повторных подтверждений в первых (n_i-1) циклах и цикла с обнаружением потери первого потерянного сегмента данных в результате истечения таймаута повторной передачи, сопровождающегося последовательностью таймаутов (рис. 3).

Тогда средняя скорость передачи может быть определена как

$$B = M[M]/M[S], \quad (5)$$

где $M[M]$ – математическое ожидание числа сегментов данных, переданных в течение сверхцикла;

$M[S]$ – математическое ожидание длительности сверхцикла.

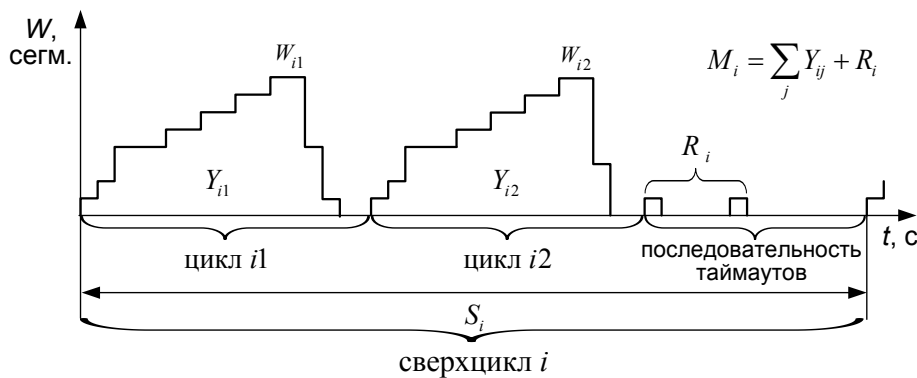


Рис. 3. Процесс передачи сегментов данных в течение i -го сверхцикла, где R_i – число сегментов данных, переданных в течение последовательности таймаутов.

Тогда, согласно (5), средняя скорость передачи данных может быть определена как

$$B = \frac{\frac{1}{p} + M[W] + \hat{Q}(M[W])\frac{p}{1-p}}{\overline{RTT} \left(\max(\log_2 M[W], 2) + b \left(\frac{M[W]}{2} + 1 \right) + 2 \right) + \overline{RTO} + \hat{Q}(M[W]) \left(\frac{\overline{RTO} \cdot f(p)}{1-p} - \overline{RTT} \right)}, \quad (6)$$

где $M[W]$ определяется согласно (4);

$f(p)$ определяется как

$$f(p) = 2 \cdot p + 2 \cdot p^2 + 4 \cdot p^3 + 8 \cdot p^4 + 16 \cdot p^5 + 32 \cdot p^6; \quad (7)$$

$\hat{Q}(M[W])$ – значение вероятности обнаружения потери первого сегмента данных из числа потерянных в одном раунде в результате истечения таймаута повторной передачи. Согласно PFTK-модели $\hat{Q}(M[W])$ определяется как

$$\hat{Q}(M[W]) = \min \left(1, \frac{\left((1 - (1 - p)^3) \cdot \left(1 + (1 - p)^3 \cdot (1 - (1 - p)^{M[W]-3} \right) \right) \right)}{1 - (1 - p)^{M[W]}} \right). \quad (8)$$

На заключительном этапе определим среднюю скорость передачи данных для случая с ограничением величины скользящего окна W со стороны приемника (рис. 4), где W_{\max} – значение окна приемника, выраженное в сегментах данных.

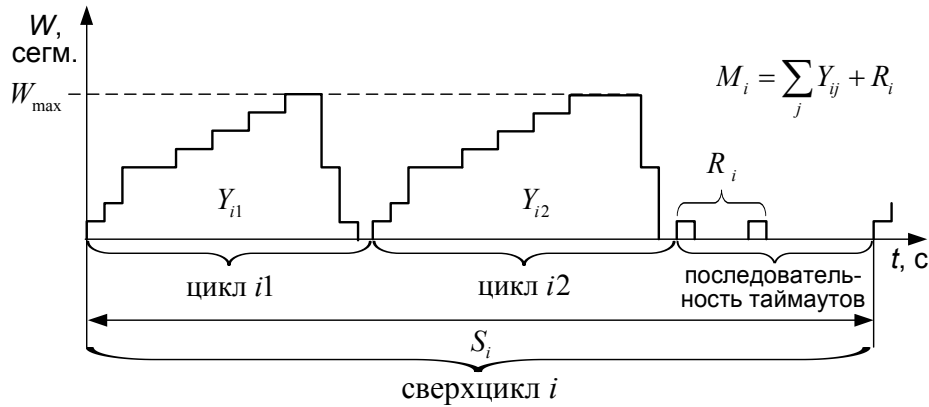


Рис. 4. Процесс передачи сегментов данных в течение i -го сверхцикла с ограничением величины скользящего окна со стороны приемника.

При $W_{\max} > M[W]$ влияние величины окна приемника на скорость передачи данных в длительном соединении предполагается минимальным и, следовательно, средняя скорость передачи данных может быть определена согласно (6). Для случая $W_{\max} \leq M[W]$ используем приближение $M[W] \approx W_{\max}$. Тогда средняя скорость передачи данных может быть определена как

$$B = \frac{\frac{1}{p} + W_{\max} + \hat{Q}(W_{\max}) \frac{p}{1-p}}{\overline{RTT} \left(\max(\log_2 W_{\max}, 2) + \frac{bW_{\max}}{8} + \frac{4 + bpW_{\max} + 2p}{4pW_{\max}} + \frac{3}{2} \right) + \overline{RTO} + \hat{Q}(W_{\max}) \left(\overline{RTO} \frac{f(p)}{1-p} - \overline{RTT} \right)}, \quad (9)$$

где $\hat{Q}(W_{\max})$ определяется согласно (8) с заменой $M[W]$ на W_{\max} .

Объединяя (6) и (9), запишем результирующее выражение, определяющее среднюю скорость передачи данных по протоколу TCP Reno:

$$B = \begin{cases} \frac{\frac{1}{p} + M[W] + \hat{Q}(M[W]) \frac{p}{1-p}}{\overline{RTT} \left(\max(\log_2 M[W], 2) + b \left(\frac{M[W]}{2} + 1 \right) + 2 \right) + \overline{RTO} + \hat{Q}(M[W]) \left(\frac{\overline{RTO} f(p)}{1-p} - \overline{RTT} \right)}, & W_{\max} > M[W]; \\ \frac{\frac{1}{p} + W_{\max} + \hat{Q}(W_{\max}) \frac{p}{1-p}}{\overline{RTT} \left(\max(\log_2 W_{\max}, 2) + \frac{bW_{\max}}{8} + \frac{4 + bpW_{\max} + 2p}{4pW_{\max}} + \frac{3}{2} \right) + \overline{RTO} + \hat{Q}(W_{\max}) \left(\frac{\overline{RTO} f(p)}{1-p} - \overline{RTT} \right)}, & W_{\max} \leq M[W], \end{cases} \quad (10)$$

где $M[W]$ определяется согласно (4);

$f(p)$ определяется согласно (7);

$\hat{Q}(M[W])$ и $\hat{Q}(W_{\max})$ определяются согласно (8).

Для случая передачи данных по протоколу TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady) получены следующие результаты.

На основе проведенного анализа, в качестве цикла определен процесс передачи сегментов данных в интервале времени между двумя обнаружениями потери сегмента данных в результате получения трех повторных подтверждений, при этом цикл состоит из фазы быстрой повторной передачи и быстрого восстановления (fast retransmit/fast recovery, FR) и фазы предотвращения перегрузки (congestion avoidance, CA) (рис. 5).

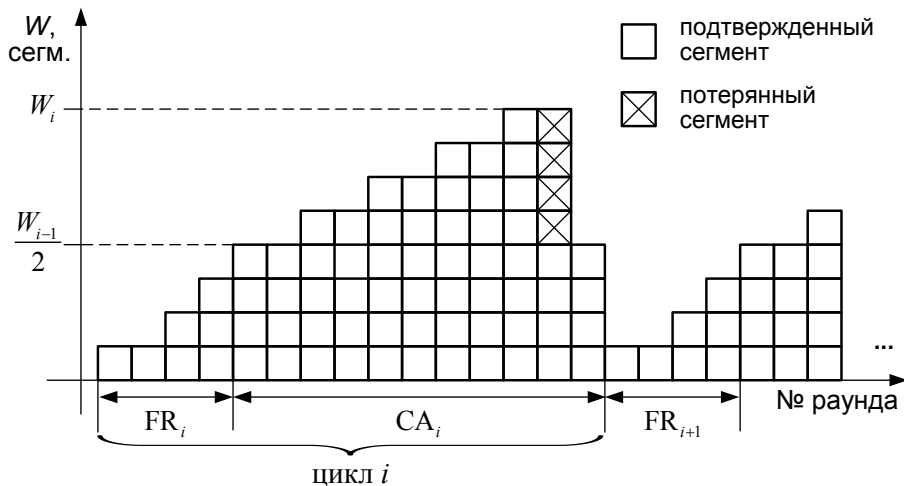


Рис. 5. Процесс передачи сегментов данных в течение i -го цикла ($i = 1, 2, \dots$).

Если обнаружение потери первого из числа потерянных в одном раунде сегментов данных происходит исключительно в результате получения трех повторных подтверждений, процесс передачи сегментов может быть представлен как последовательность циклов (рис. 6).

Тогда, согласно (1) и (2), средняя скорость передачи данных может быть определена как

$$B = \frac{\frac{1-p}{p} + M[W]}{\overline{RTT} \left(\frac{M[W]}{2} + b \cdot \left(\frac{M[W]}{2} + 1 \right) + \frac{3}{2} \right)}, \quad (11)$$

где p – вероятность потери сегмента данных при условии, что он является либо первым в раунде, либо предыдущий сегмент в данном раунде был успешно передан;

$M[W]$ – математическое ожидание значения окна (W) в конце фазы предотвращения перегрузки:

$$M[W] = -\left(\frac{3 \cdot b - 2}{3 \cdot b + 1} \right) + \sqrt{\frac{8 - 11 \cdot p}{3 \cdot b \cdot p + p} + \left(\frac{3 \cdot b - 2}{3 \cdot b + 1} \right)^2}, \quad p \leq \frac{8}{11}. \quad (12)$$

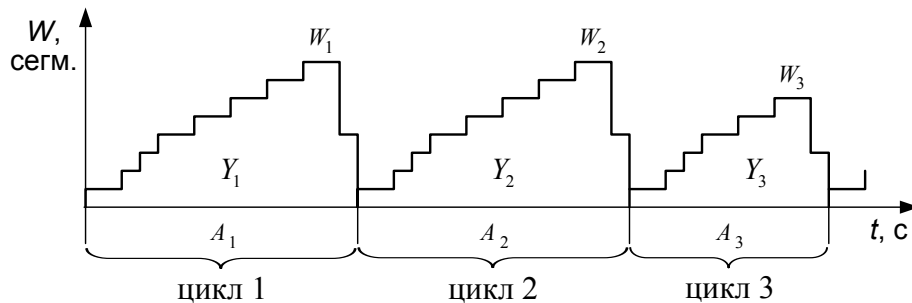


Рис. 6. Процесс передачи сегментов данных при обнаружении потери первого сегмента данных в результате получения трех повторных подтверждений.

На втором этапе, учитывая, что обнаружение потери первого из числа потерянных в одном раунде сегментов данных может происходить как в результате получения трех повторных подтверждений, так и в результате истечения таймаута повторной передачи, аналогично PFTK-модели, рассмотрим процесс передачи сегментов данных как последовательность сверхциклов, где i -й сверхцикл ($i=1,2,\dots$) состоит из j циклов ($j=1,\dots,n_i$) с обнаружением потери первого потерянного сегмента данных в результате получения трех повторных подтверждений в первых $(n_i - 1)$ циклах и цикла с обнаружением потери первого потерянного сегмента данных в результате истечения таймаута повторной передачи, сопровождающегося последовательностью таймаутов (рис. 7).

Отсюда, согласно (5), средняя скорость передачи данных может быть определена как

$$B = \frac{\frac{1-p}{p} + M[W] + \hat{Q}(M[W]) \left(\frac{1}{1-p} + M[W] - 2 - \frac{(M[W])^2 - 1}{8} \right)}{\overline{RTT} \left(\frac{M[W]}{2} + b \left(\frac{M[W]}{2} + 1 \right) + \frac{3}{2} \right) + \hat{Q}(M[W]) \left(\frac{RTO \cdot f(p)}{1-p} + \overline{RTT} \left(\max(\log_2 M[W], 2) - \frac{M[W] + 1}{2} \right) \right)}, \quad (13)$$

где $M[W]$ определяется согласно (12);

$f(p)$ определяется как

$$f(p) = 1 + p + 2 \cdot p^2 + 4 \cdot p^3 + 8 \cdot p^4 + 16 \cdot p^5 + 32 \cdot p^6; \quad (14)$$

$\hat{Q}(M[W])$ определяется согласно (8).

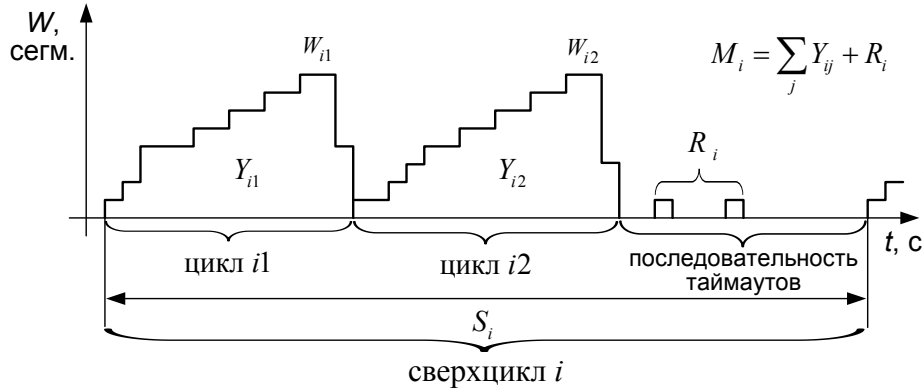


Рис. 7. Процесс передачи сегментов данных в течение i -го сверхцикла, где R_i - число сегментов данных, переданных в течение последовательности таймаутов.

На заключительном этапе определим среднюю скорость передачи данных для случая с ограничением величины скользящего окна W со стороны приемника (рис. 8), где W_{\max} - значение окна приемника, выраженное в сегментах данных.

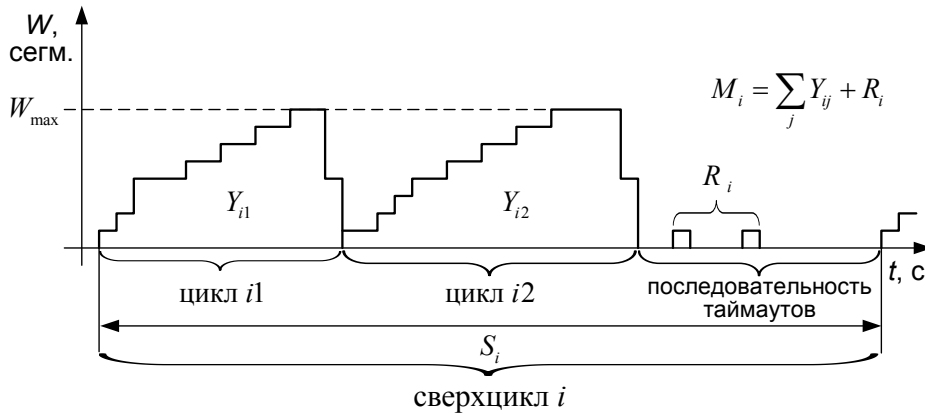


Рис. 8. Процесс передачи сегментов данных в течение i -го сверхцикла с ограничением величины скользящего окна со стороны приемника.

При $W_{\max} > M[W]$ влияние величины окна приемника на скорость передачи данных в длительном соединении предполагается минимальным и, следовательно, средняя скорость передачи данных может быть определена согласно (13). Для случая $W_{\max} \leq M[W]$ используем приближение $M[W] \approx W_{\max}$. Тогда средняя скорость передачи данных может быть определена как

$$B = \frac{\frac{1-p}{p} + W_{\max} + \hat{Q}(W_{\max}) \left(\frac{1}{1-p} + W_{\max} - 2 - \frac{(W_{\max})^2 - 1}{8} \right)}{RTT \left(\frac{(3+b) \cdot W_{\max}}{8} + \frac{8-11p+2bpW_{\max}}{8pW_{\max}} + 2 \right) + \hat{Q}(W_{\max}) \left(\frac{RTO \cdot f(p)}{1-p} + RTT \left(\max(\log_2 W_{\max}, 2) - \frac{W_{\max} + 1}{2} \right) \right)}, \quad (15)$$

где $\hat{Q}(W_{\max})$ определяется согласно (8) с заменой $M[W]$ на W_{\max} .

Объединяя (13) и (15), запишем результирующее выражение, определяющее среднюю скорость передачи данных по протоколу TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady):

$$B = \begin{cases} \frac{\frac{1-p}{p} + M[W] + \hat{Q}(M[W]) \left(\frac{1}{1-p} + M[W] - 2 - \frac{(M[W])^2 - 1}{8} \right)}{\overline{RTT} \left(\frac{M[W]}{2} + b \left(\frac{M[W]}{2} + 1 \right) + \frac{3}{2} \right) + \hat{Q}(M[W]) \left(\frac{\overline{RTO} \cdot f(p)}{1-p} + \overline{RTT} \left(\max(\log_2 M[W], 2) - \frac{M[W] + 1}{2} \right) \right)}, & W_{\max} > M[W]; \\ \frac{\frac{1-p}{p} + W_{\max} + \hat{Q}(W_{\max}) \left(\frac{1}{1-p} + W_{\max} - 2 - \frac{(W_{\max})^2 - 1}{8} \right)}{\overline{RTT} \left(\frac{W_{\max}(3+b)}{8} + \frac{8-11p+2bpW_{\max}}{8pW_{\max}} + 2 \right) + \hat{Q}(W_{\max}) \left(\frac{\overline{RTO} \cdot f(p)}{1-p} + \overline{RTT} \left(\max(\log_2 W_{\max}, 2) - \frac{W_{\max} + 1}{2} \right) \right)}, & W_{\max} \leq M[W], \end{cases} \quad (16)$$

где $M[W]$ определяется согласно (12);

$f(p)$ определяется согласно (14);

$\hat{Q}(M[W])$ и $\hat{Q}(W_{\max})$ определяются согласно (8).

В четвертой главе проводится анализ точности оценки средней скорости передачи данных по протоколам TCP Reno и TCP NewReno согласно разработанным методам на основе результатов имитационного моделирования, а также сравнение с PFTK-моделью и формулой, используемой в протоколе TFRC.

Имитационное моделирование проводилось с использованием программного продукта имитационного моделирования сетей связи ns-2. В качестве конкурирующего трафика использовался трафик, создаваемый ON/OFF источниками UDP. Для изменения условий функционирования рассматриваемого соединения TCP число источников UDP варьировалось с шагом в 10 источников. На каждом шаге было проведено 20 испытаний (запусков имитационного моделирования), каждое из которых имело длительность равную одному часу по внутреннему времени ns-2.

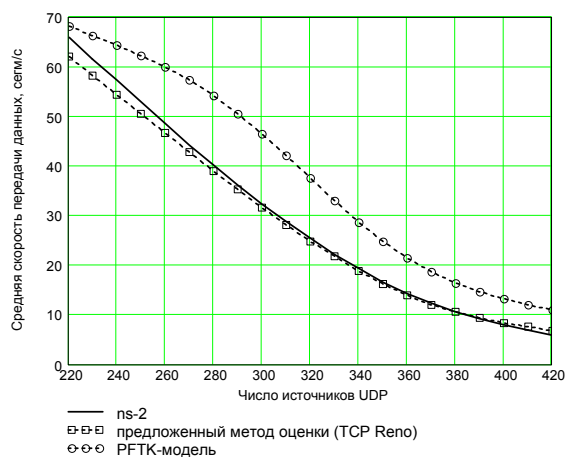
Для расчета погрешности оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP использовалась следующая формула:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{|B_i^{\text{расч.}} - B_i^{\text{измер.}}|}{B_i^{\text{измер.}}} \right), \quad (17)$$

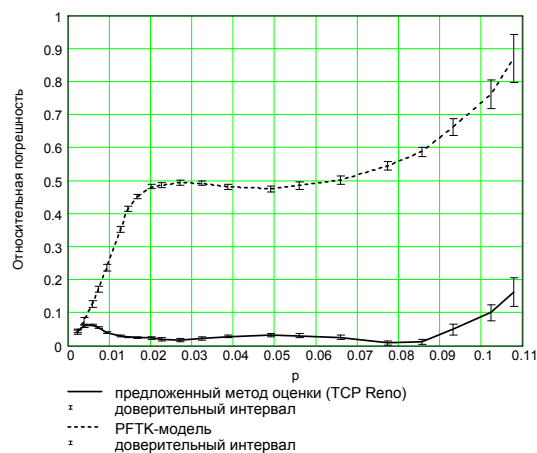
где n – число испытаний.

На рис. 10 представлено сравнение значений средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno, определяемых согласно результатам имитационного моделирования, PFTK-модели и разработанному методу оценки, а также сравнение погрешности оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno PFTK-модели и разработанного метода.

Анализ показывает, что разработанный метод оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno хорошо согласуется с результатами имитационного моделирования в диапазоне значений p от 0,001 до 0,1, в то время как PFTK-модель существенно переоценивает значение средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno во всем диапазоне значений параметра p , за исключением случая, когда $p \rightarrow 0$. При этом погрешность оценки средней скорости передачи данных согласно разработанному методу составляет в среднем менее 5% в диапазоне значений p от 0,002 до 0,095, тогда как погрешность PFTK-модели в указанном диапазоне составляет в среднем 50% и уменьшается лишь при $p \rightarrow 0$.



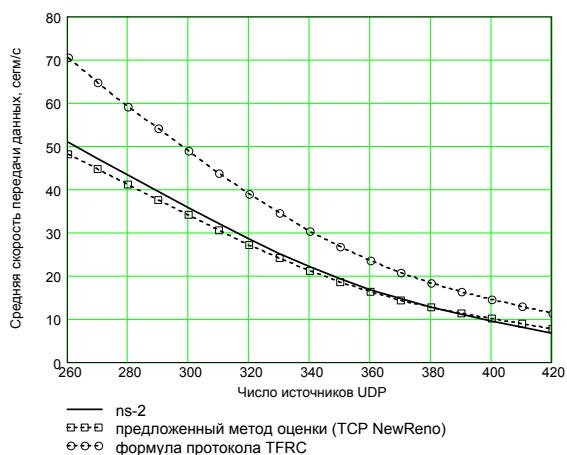
а)



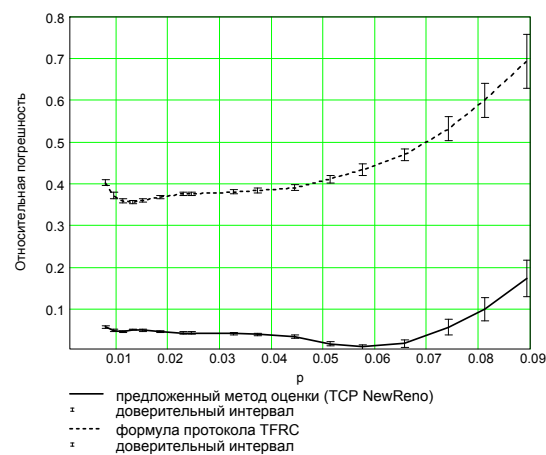
б)

Рис. 10. Сравнение а) измеренных и расчетных значений средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno и б) погрешности оценки.

На рис. 11 представлено сравнение значений средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady), определяемых согласно результатам имитационного моделирования, формуле, используемой в протоколе TFRC, и разработанному методу оценки, а также сравнение погрешности оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno указанной формулы и разработанного метода.



а)



б)

Рис. 11. Сравнение а) измеренных и расчетных значений средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno и б) погрешности оценки.

Анализ показывает, что разработанный метод оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady) хорошо согласуется с результатами имитационного моделирования в диапазоне значений p от 0,008 до 0,09, в то время как формула, используемая в протоколе TFRC, существенно переоценивает значение средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno во всем диапазоне значений параметра p . При этом погрешность оценки разработанного метода составляет в среднем 5% в диапазоне значений p от 0,008 до 0,075, тогда как погрешность оценки указанной формулы в данном диапазоне составляет в среднем 40%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных в диссертационной работе исследований получены следующие основные результаты:

1. Проведен аналитический обзор основных алгоритмов, используемых в протоколе TCP для обеспечения гарантированной доставки данных, управления потоком данных и реакции на перегрузку сети, на основе которого определены алгоритмы, которые должны быть учтены в разрабатываемых методах оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP.
2. Проведен анализ функционирования протокола TCP Reno в условиях пачечного процесса потерь, на основе которого сделан вывод о необходимости учета алгоритмов быстрой повторной передачи, быстрого восстановления и медленного запуска при разработке метода оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno.
3. Разработан метод оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP Reno в длительном соединении в условиях пачечного процесса потерь.
4. Проведен анализ функционирования протокола TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady) в условиях пачечного процесса потерь, на основе которого сделан вывод о необходимости учета алгоритмов быстрой повторной передачи, быстрого восстановления и медленного запуска при разработке метода оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady).
5. Разработан метод оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP NewReno (вариант Slow-but-Steady) в длительном соединении в условиях пачечного процесса потерь.
6. Проведено имитационное моделирование передачи данных по протоколам TCP Reno и TCP NewReno в присутствии конкурирующего трафика, создаваемого ON/OFF источниками UDP.
7. Проведенные исследования доказывают, что разработанные методы оценки средней скорости передачи данных по протоколу TCP имеют погрешность в среднем 5% в большом диапазоне значений вероятности потери сегмента данных, в то время как PFTK-модель и формула, используемая в протоколе TFRC, существенно переоценивают значение средней скорости передачи данных по протоколам TCP Reno и TCP NewReno (погрешность указанных методов оценки составляет в среднем 50% и 40% соответственно). Использование разработанных методов в протоколе TFRC для адаптивного управления скоростью передачи потокового мультимедийного трафика по протоколу UDP позволит обеспечить совместимость

данных потоков с соединениями TCP в соответствии с требованиями документа RFC 2309.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дунайцев, Р.А. Улучшенная и дополненная PFTK-модель для протокола TCP Reno / Р.А.Дунайцев, Е.А.Кучерявый // Электросвязь.– 2005.– № 3.– С. 27-31.
2. Дунайцев, Р.А. Анализ WWW-трафика различных типов пользователей / Р.А.Дунайцев // 56 научн.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, СПб. 2004: Тез. докл.– ГУТ, СПб., 2004.– С. 20.
3. Дунайцев, Р.А. Анализ основных подходов к математическому моделированию протокола TCP / Р.А.Дунайцев, Е.А.Кучерявый // 57 научн.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, СПб. 2005: Тез. докл.– ГУТ, СПб., 2005.– С. 15-16.
4. Дунайцев, Р.А. Влияние сетевой асимметрии на характеристики протокола TCP / Р.А.Дунайцев, Е.А.Кучерявый // Телемультимедиа.– 2004.– № 1.– С. 19-23.
5. Дунайцев, Р.А. Методы ускорения для коротких передач данных / Р.А.Дунайцев, Е.А.Кучерявый // Телемультимедиа.– 2004.– № 2.– С. 14-18.
6. Дунайцев, Р.А. Оценка объема Web-трафика создаваемого пользователями домашней сети / Р.А.Дунайцев, Е.А.Кучерявый // Телемультимедиа.– 2004.– № 4.– С. 10-14.
7. Dunaytsev, R. Estimation of WWW-traffic generated by users in home networks / R.Dunaytsev, Y.Koucheryavy, J.Harju // IASTED IMSA. 2004: Proceedings.– 2004.– pp. 120-125.
8. Dunaytsev, R. The impact of RTT and delayed ACK timeout ratio on the initial slow start phase / R.Dunaytsev, Y.Koucheryavy, J.Harju // IPS MoMe. 2005: Proceedings.– 2005.– pp. 171-176.
9. Dunaytsev, R. Refined PFTK-model of TCP Reno throughput in the presence of correlated losses / R.Dunaytsev, Y.Koucheryavy, J.Harju // WWIC. 2005: Proceedings.– 2005.– pp. 42-53.

Подписано к печати 25.04.2005

Объем 1 печ. л. Тир. 80 экз.

Тип. СПбГУТ. 191186 СПб, наб. р. Мойки, 61
