

УДК 621.391

*В статті аналізується функціонування протоколу TCP в транспортній мережі NGN. Розглядаються питання керування процесом повторних передач непідтверджених сегментів даних у з'єднанні TCP і можливість модифікації протоколу TCP*

*Ключові слова: транспортний рівень, TCP, сегмент даних, повторна передача*

*В статье анализируется функционирование протокола TCP в транспортной сети NGN. Рассматриваются вопросы управления процессом повторных передач неподтвержденных сегментов данных в соединении TCP и возможность модификации протокола TCP*

*Ключевые слова: транспортный уровень, TCP, сегмент данных, повторная передача*

*In the article functioning of TCP protocol in a transport network of NGN is analyzed. There are investigated questions of management by the process of the retransmissions of unacknowledged segments of data in TCP connection and possibility of TCP protocol modification*

*Key words: transport layer, TCP, data segment, retransmission*

# ПРОЦЕСС ПОВТОРНЫХ ПЕРЕДАЧ СЕГМЕНТОВ TCP ПО ТАЙМ-АУТУ СОГЛАСНО ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

**А.С. Еременко**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Кафедра телекоммуникационных систем  
Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166  
Контактный тел.: (0572) 62-47-00, 050-218-29-84  
E-mail: alexere@ukr.net

## 1. Введение

Механизм осуществления повторных передач сегментов данных по тайм-ауту протокола TCP (Transmission Control Protocol), который динамически устанавливает верхнюю границу следующего значения времени кругового обращения RTT (Round-Trip Time), имеет важное значение для надежной передачи данных и управления перегрузкой в сетях TCP/IP. Данная статья посвящена теоретическому исследованию управления повторными передачами в каждом раунде функционирования отдельного соединения TCP.

Протокол управления передачей TCP является базовым при передаче данных многих приложений и интересен в первую очередь тем, что протоколы стека TCP/IP формируют основу транспортной сети следующего поколения NGN (Next Generation Network) [1], [2]. Среди главных характеристик TCP выделяют надежную доставку и управление перегрузкой. TCP использует явные подтверждения (ACK) для информирования отправителя об успешных передачах сегментов данных, а соответствующее значение тайм-аута повторной передачи RTO (Retransmission Timeout) ассоциируется с отправленным сегментом. В связи с перегрузками в сети и искажениями сигналов могут быть потеряны и данные, и подтверждения, а, следовательно, некоторые отправленные сегменты не будут подтверждены как приняты. Если модуль TCP отправителя не получает подтверждение в рамках тайм-

аута повторной передачи сегмента, то такой сегмент считается потерянным, уменьшается окно передачи и сегмент передается повторно. Очевидно, что определение значения RTO, адекватного реальной сетевой ситуации, является важным для производительности как отдельных транспортных соединений TCP, так и сети в целом. Если RTO имеет небольшое значение, то могут возникать ложные повторные передачи и критическое снижение производительности соединения. Длительный тайм-аут повторной передачи приведет к медленной реакции модуля TCP на сетевые перегрузки.

На сегодняшний день протокол TCP имеет широкое распространение, а его модернизация может позволить значительно увеличить производительность транспортной сети. Рассмотрим статистику передаваемых данных в сети на основе технологии коммутации пакетов TCP/IP (Интернет) за 15 минутный интервал в одно и то же время суток в течение недели (табл. 1). В качестве примера выбрана линия trans-Pacific (скорость передачи 150 Мбит/с), введенная в эксплуатацию 01.07.2006. Представленные данные взяты из хранилища данных рабочей группы MAWI (Measurement and Analysis on the WIDE Internet) [3], основной целью которой является предоставление возможности открытого использования полученных знаний о реальных сетевых взаимодействиях в Интернете и проведение исследований текущего трафика.

Таблица 1

## Анализ среза потоков протокола IP

Дата	Потоки IP		Инкапсулировано протокольных единиц обмена транспортного уровня			
	Па-кеты IPv4, %	Па-кеты IPv6, %	TCP, %	UDP, %	TCPv6, %	UDPv6, %
01.05.2011	99,79	0,21	40,96	54,44	0,11	0,06
02.05.2011	99,55	0,45	52,27	42,37	0,33	0,07
03.05.2011	99,70	0,30	58,95	36,29	0,17	0,08
04.05.2011	99,02	0,98	77,24	16,00	0,80	0,12
05.05.2011	97,90	2,10	76,78	14,62	1,92	0,10
06.05.2011	99,48	0,52	82,59	12,97	0,33	0,08
07.05.2011	98,89	1,11	77,27	14,13	0,91	0,08

Анализ среза потоков протокола IP на магистральной линии Интернета за 15 минутный интервал показал, что в среднем максимальное количество данных переносится посредством транспортного протокола TCP. Однако очевиден значительный разброс между минимальным и максимальным процентным соотношением использования TCP, UDP и других транспортных протоколов. Это связано с разнородностью передаваемого трафика (передачей видео и аудио потоков). Также анализ статистических данных [3] показал, что наибольшее количество сбоев приходится именно на протокол TCP (порядка 87%), даже при практически равном использовании по отношению к UDP. Это также подтверждает необходимость эффективной модификации протокола TCP и механизма повторных передач сегментов данных по тайм-ауту, т.к. они непосредственно связаны с процессом потерь. Для того чтобы тщательно исследовать механизм осуществления повторных передач неподтвержденных сегментов по тайм-ауту в TCP, необходимо проведение теоретического и экспериментального анализа, что в дальнейшем позволит разработать оптимальные стратегии управления повторными передачами.

В настоящее время разрабатываемые и внедряемые новые протоколы, предназначенные для использования в сетях последующего поколения, позволяют оперировать большим количеством информации о сетевой ситуации, что также необходимо учитывать при проектировании транспортной сети.

Вся информация о сети для модулей TCP отправителя и получателя заключена в значении времени кругового обращения RTT – в этом есть ограниченность информации при принятии решений. Таким образом, необходимо разработать такую стратегию управления, которая могла бы оптимально учитывать все неопределенности и являлась бы универсальной для любого типа сетей и передаваемого трафика.

## 2. Современная математическая теория сетевых архитектур: разбиение на уровни как оптимизационная декомпозиция

Сетевые протоколы многоуровневых архитектур исторически разрабатывались как целевые, этот же подход частично сохранился и на сегодняшний день.

Однако стеки сетевых протоколов должны анализироваться в целом и разрабатываться системно как распределенные решения глобальных оптимизационных задач [4].

Понятие разбиения на уровни как оптимизационной декомпозиции подразумевает, что вся коммуникационная сеть моделируется в рамках обобщенной задачи максимизации полезности сети (МПС) [5]. При этом каждому уровню сопоставляется решение определенной подзадачи, а межуровневые интерфейсы рассматриваются как функции соответствующих оптимизационных переменных. В зависимости от архитектуры может существовать множество альтернативных декомпозиций. В настоящее время горизонтальной декомпозиции соответствуют распределенные вычисления, а вертикальной – такие функциональные модули, как управление перегрузкой, маршрутизация, балансировка нагрузки на узлах, случайный доступ, управление питанием, канальное кодирование и т.д. Таким образом, данный подход является обобщающим при рассмотрении сложных сетевых взаимодействий, а также унифицированным подходом разработки сверху вниз различных стеков протоколов.

Управление перегрузкой – это распределенный механизм разделения пропускной способности линий между конкурирующими пользователями. Пусть сеть моделируется как набор  $L$  линий (редкие ресурсы) с конечными пропускными способностями

$c = (c_l, l \in L)$ . Они разделены между множеством  $N$  источников, обозначаемых индексом  $s$ . Каждый источник  $s$  использует множество линий  $L(s) \subseteq L$ . Определим  $S(l) = \{s \in N | l \in L(s)\}$  как множество источников, использующих линию  $l$ . Множества  $\{L(s)\}$  определяют маршрутную матрицу размером  $L \times N$

$$R_{is} = \begin{cases} 1, & \text{если } l \in L(s), \text{ т.е. источник } s \text{ использует} \\ & \text{линию } l; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

С каждым источником  $s$  связана его скорость передачи  $x_s(t)$  в момент времени  $t$  (пакетов в секунду). А с каждой линией  $l$  связана скалярная мера перегрузки  $\lambda_l(t) \geq 0$  в момент времени  $t$ . Величина  $\lambda_l(t)$  является стоимостью линии.

Алгоритм управления перегрузкой состоит из двух компонентов: алгоритма источника, который динамически регулирует его скорость  $x_s(t)$  в соответствии со стоимостью соответствующего пути  $\lambda_l(t)$ , и алгоритма линии, который обновляет, явно или неявно, свою стоимость  $\lambda_l(t)$  и сообщает об этом, явно или неявно, источникам, использующим линию  $l$ .

В сетях TCP/IP алгоритм источника реализован в протоколе TCP, а алгоритм линии – в схемах активного управления очередями AQM (Active Queue Management), таких как DropTail или RED (Random Early Detection). Различные протоколы используют различные метрики для определения перегрузки. Например, TCP Reno и его варианты используют вероятность потери в качестве единицы измерения перегруз-

ки, а TCP Vegas и FAST TCP используют задержку в очередях [5], [6].

Широкий класс алгоритмов управления перегрузкой могут быть интерпретированы как распределенные алгоритмы решения глобальной оптимизационной задачи [4], [5]. А именно, с каждым источником  $s$  связана функция полезности  $U_s(x_s)$  как функция от его скорости  $x_s$ . Тогда, согласно основной задаче МПС [5], необходимо максимизировать  $\sum_s U_s(x_s)$  при условии

$Rx \leq c$ , где  $R, x$  и  $c$  – соответствующие для всех источников и линий матрицы маршрутов, скоростей и пропускных способностей.

### 3. Процесс повторных передач сегментов TCP по тайм-ауту с точки зрения теории управления

Задача управления состоит из следующих элементов:

- объект управления – тайм-аут повторной передачи RTO;
- цель системы – нахождение оптимального значения RTO;
- множество допустимых управлений (или входных воздействий) – основные статистические характеристики значений RTT;
- мера эффективности управляющих воздействий – оптимальное значение RTO, не вызывающее ложных повторных передач.

Постановка задачи управления, формулировка задачи и формализация системы. Пусть имеются модуль TCP отправителя и получателя. Управление повторными передачами неподтвержденных сегментов производится на основе механизмов быстрой повторной передачи и тайм-аута. Значение очередного тайм-аута формируется на основе зафиксированного при получении подтверждения времени кругового обращения, а именно, его оценки и изменчивости, т.е. реализуется управление повторными передачами с обратной связью.

Цель управления состоит в том, чтобы изменить динамику поведения физической системы в соответствии с определенными требованиями. В рассматриваемом случае необходимо выяснить, как на основе имеющихся фиксируемых значений времени кругового обращения определить адекватное значение тайм-аута повторной передачи, близкое к оптимальному. Эта задача состоит из двух подзадач:

Получение математического описания динамических свойств физического объекта, подлежащего управлению (задача моделирования на основе результатов физических экспериментов).

Применение управления на основе оценок, полученных с помощью фильтрации Калмана-Бьюси.

Решение задачи регулирования состоит в определении закона управления, устанавливающего значения управляющих воздействий. Физическая реализация закона управления, регулятор, представляет собой запрограммированный алгоритм действий в протоколе TCP.

### 4. Решение задачи моделирования в результате проведения физических экспериментов

Экспериментальные исследования проводились на участке телекоммуникационной сети, представленном учебно-лабораторной сетью кафедры «Телекоммуникационные системы» Харьковского национального университета радиоэлектроники, и заключались в тестировании класса соединений TCP по передаче данных в рамках внутренней локальной сети и доступа к серверам сети Интернет в условиях разнородного трафика (рис. 1). Для анализа статистических характеристик потока сегментов в соединении TCP использованы величины RTT и RTO. Поскольку в исследовании соединение представлялось как поток флайтов сегментов, то в качестве метода измерения RTT был выбран метод флайтов, при котором временем кругового обращения является время между моментом отправки одного флайта и моментом отправки следующего. При этом размером флайта является количество отправленных, но не подтвержденных сегментов.

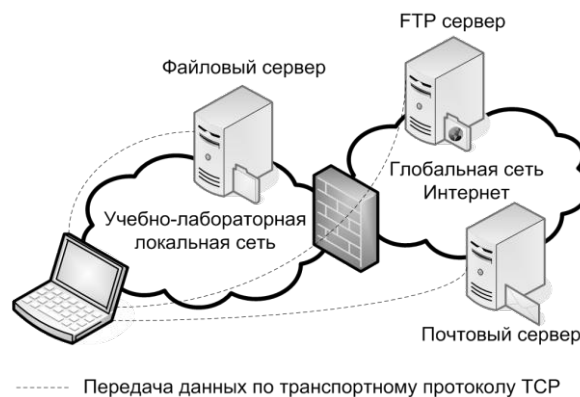


Рис. 1. Обобщенная схема экспериментальных исследований

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований [7] показал, что процесс изменения времени кругового обращения RTT является случайным и изменяется в достаточно широких пределах. Нестационарность этого процесса проявляется при наличии узких мест и перегрузках в сети. Однако на интервалах принятия решений (определения значения тайм-аута повторной передачи) процессы изменения RTT в соединениях TCP и глобальной, и локальной сети, как правило, проявляют себя как стационарные. Учитывая нестационарность процессов в объединенных сетях, в случае наличия скачкообразных изменений времени кругового обращения этот процесс можно считать локально стационарным, т.е. нестационарный случай сводится к стационарному. Анализ полученных статистических данных для выбранного класса соединений [7] показал, что плотность распределения вероятностей значений RTT может быть аппроксимирована Гауссовым законом, а автокорреляционная функция – экспоненциальной характеристикой. Этот же результат подтверждают и другие исследования процессов изменения времени кругового обращения в соединениях TCP и механизма тайм-аута повторной передачи [8].

Таким образом, основными характеристиками процесса изменения RTT являются стационарность (либо локальная стационарность), возможность аппроксимации плотности распределения его значений Гауссовым законом, стремительное убывание автокорреляционной функции по экспоненциальному закону. Однако второе и третье утверждения нельзя обобщить, т.к. аппроксимация плотности распределения Гауссовым законом адекватна только для некоторых классов соединений [7]. При этом соединения TCP значительно отличаются по длительности, передаваемому контенту и другим характеристикам. Что касается автокорреляционной функции, ее характер действительно описывается экспоненциальной функцией, но для различных процессов скорость ее убывания может сильно отличаться.

На практике необходимо ответить на вопрос, в какой степени поведение динамической системы, используемой в качестве модели, совпадает с поведением реального физического объекта.

Конечномерная линейная стационарная система с дискретным временем, описывающая процесс изменения значений времени кругового обращения, эквивалентна системе уравнений:

$$RTT(t+1) = F \cdot RTT(t) + G \cdot U(t), \quad (2)$$

$$y(t) = H \cdot RTT(t), \quad (3)$$

где матрицы  $F$ ,  $G$  и  $H$  константы, а  $t$  – целочисленная переменная, выражающая дискретные моменты времени.

Проведенные исследования времени кругового обращения как случайного процесса позволяют получить значения параметров  $F$  и  $G$  и свидетельствуют о необходимости динамического оценивания RTT в отдельных соединениях TCP. Также полученная таким образом модель позволяет использовать на этапе оценивания процедуру оптимальной линейной фильтрации Калмана-Бьюси.

### 5. Решение задачи регулирования и физическая реализация закона управления

В текущем состоянии системы содержится вся информация, необходимая для определения требуемого управляющего воздействия, поскольку будущее поведение объекта полностью определяется его нынешним состоянием и будущим управляющим воздействием. Управление есть функция состояния. Кроме закона управления регулятор должен содержать элемент, назначение которого состоит в определении состояния системы. Для нахождения состояния объекта необходима информация двух различных видов: структура объекта и действительные входные воздействия и выходные величины объекта.

Найдем вычислительную схему, преобразующую данные этих двух типов для получения хорошей оценки неизвестного текущего состояния объекта. Данные второго типа получаются в результате измерений в реальном масштабе времени в процессе повседневной работы объекта.

Одним из возможных вариантов решения задачи управления тайм-аутом повторной передачи является схема, представленная на рис. 2,

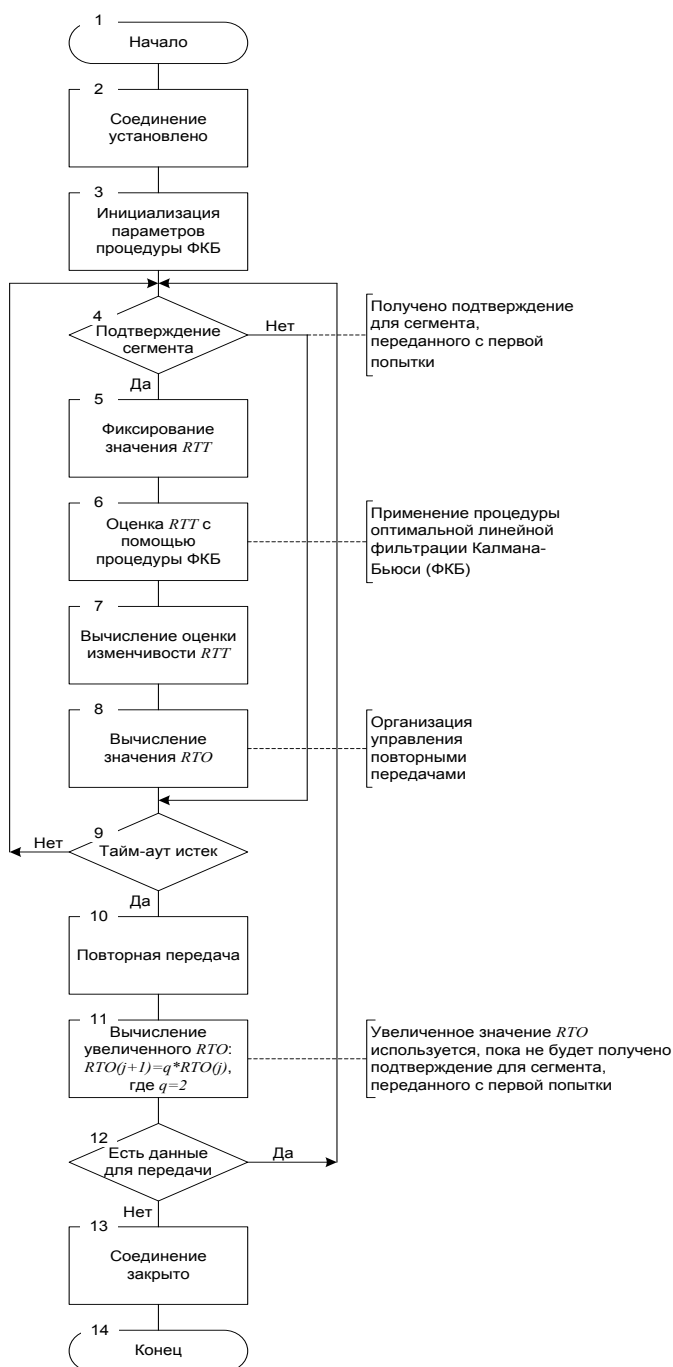


Рис.2. Структурная схема модернизированного метода вычисления RTO

которая может быть описана явными уравнениями (4):

$$\begin{aligned} \hat{R}TT(k) &= \Phi_{RTT}(k, k-1) \cdot \hat{R}TT(k-1) + \\ &+ K_{RTT}(k) \cdot [z(k) - H(k) \cdot \Phi_{RTT}(k, k-1) \cdot \hat{R}TT(k-1)]; \\ E(k+1) &= RTT(k+1) - \hat{R}TT(k); \\ \hat{D}_{RTT}(k+1) &= \hat{D}_{RTT}(k) + h \cdot (|E(k+1)| - \hat{D}_{RTT}(k)); \\ RTO(k+1) &= \hat{R}TT(k+1) + f \cdot \hat{D}_{RTT}(k+1), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\hat{R}TT(k)$  – оценка RTT в момент времени  $k$ ;  $\Phi_{RTT}(k, k-1)$  – величина, характеризующая инерционность системы;  $K_{RTT}(k)$  – коэффициент усиления в момент времени  $k$ ;  $z(k)$  – фиксируемое значение RTT;  $H(k)$  – коэффициент наблюдения ( $H(k)=1$ );  $E(k+1)$  – выборочное линейное отклонение в момент времени  $k+1$ ;  $\hat{D}_{RTT}(k+1)$  – оценка изменчивости RTT в момент времени  $k+1$ ;  $h=0.25$ ,  $f=4$  – масштабные коэффициенты, которые используются в методе Ван Джейкобсона [9], [10].

## 6. Выводы

Задачи управления повторными передачами в локальных сетях не вызывают проблем, поскольку здесь обычно имеется значительный запас сетевого ресурса. Управление RTO необходимо выполнять именно для глобальных сетей, что позволит повысить производительность соединений TCP и уменьшить

количество ложных повторных передач в условиях передачи разнородного трафика.

Проведение физических экспериментов по исследованию случайного процесса изменения значений времени кругового обращения в отдельном соединении TCP позволяет выделить его основные статистические характеристики, а также классифицировать транспортные соединения TCP и получить сведения о их специфических свойствах. Такие данные дают возможность решать задачи моделирования случайных процессов в соединениях TCP, что в свою очередь ведет к решению задач управления. На основании полученных экспериментальных результатов был предложен метод модернизации традиционного механизма управления тайм-аутом повторной передачи с использованием процедуры фильтрации Калмана-Бьюси на шаге оценивания времени кругового обращения. Таким образом, была получена структурная схема регулирования и уравнения, описывающие регулятор.

Полученное решение поставленной задачи управления может быть формализовано в рамках теории сетевых архитектур, а эффективность модернизированного метода определения тайм-аута повторной передачи может быть вычислена на основании сравнения функций полезности по отношению к традиционному методу, в качестве которых могут быть выбраны такие функционалы, как производительность отдельного модуля TCP отправителя и агрегированная производительность множества модулей TCP в рамках транспортной сети NGN.

## Литература

1. ITU-T Y.2007 ITU-T Recommendation Y.2007 (2010), Next Generation Networks – Frameworks and functional architecture models, 2010, 37 p.
2. ITU-T Y.2001. Рекомендация МСЭ-Т Y.2001 (2004), Общий обзор СПП, 2004, 32 с.
3. WIDE MAWI Working Group Traffic Archive [Электронный ресурс] / WIDE Project. – Режим доступа: \www/ URL: http://mawi.wide.ad.jp/mawi/ – 08.05.2011 г. – Загл. с экрана.
4. Meyn, S. Control Techniques for Complex Networks [Text] / S. Meyn. – Cambridge University Press. Pre-publication Press for on-line viewing, 2007. – 615 p.
5. Chiang, M. Layering as Optimization Decomposition: A Mathematical theory of Network Architectures [Text] / M. Chiang, S.H. Low, A.R. Calderbank, J.C. Doyle // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol. 95, No. 1. – pp. 255–312.
6. RFC 4614 Duke M., Braden R., Eddy W., Blanton E. A Roadmap for Transmission Control Protocol (TCP) Specification Documents, 2006. – 33 p.
7. Еременко, А. С. Оптимизация алгоритма установления значений адаптивного тайм-аута повторных передач протокола TCP при помощи фильтрации Калмана [Текст] / А. С. Еременко // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». – 2007. – Выпуск № 148. – с.273–277.
8. Ma, L. Statistical Analysis of TCP's Retransmission Timeout Algorithm [Text] / L. Ma, K. E. Barner, G. R. Arce // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2006. – Vol. 14, Is. 2. – pp. 383–396.
9. Jacobson, V. Congestion Avoidance and Control [Text] / V. Jacobson // Proceedings, ACM SIGCOMM'88, ACM Computer Communication Review. – 1988. – 18 (4) – pp. 314–329.
10. RFC 2988 Paxson V., Allman M. Computing TCP's Retransmission Timer, 2000. – 8 p.
11. Калман, Р. Очерки по математической теории систем [Текст] / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбид. – М.: Издательство «Мир», 1971. – 400 с.