

Методы исследования поведения транспортных протоколов в условиях интенсивного сетевого трафика

В.А. Соколов, Д.Ю. Чалый*

Аннотация. В работе рассматриваются транспортные протоколы TCP (Transmission Control Protocol) и ARTCP (Adaptive Rate TCP) в нагруженной сети. Основная цель заключается в изучении поведения этих протоколов в условиях интенсивного сетевого трафика и измерении их производительности. Чтобы добиться этой цели, мы, с помощью раскрашенных сетей Петри, имитируем модели протоколов, измеряем их производительность и анализируем результаты.

1. Введение

Транспортные протоколы играют важную роль в управлении трафиком как в глобальных сетях, так и в локальных и корпоративных сетях. Согласно [1], около 95% всех переданных байтов и 85–95% всех переданных пакетов в Интернете передаются с помощью протокола TCP (Transmission Control Protocol). Этот протокол является основным протоколом транспортного уровня в архитектуре TCP/IP. Главной задачей этого протокола является обеспечение надежной передачи данных через ненадежную среду передачи. В данной работе исследуется поведение сетевого трафика, генерируемого протоколами TCP и ARTCP.

2. Основные определения

2.1. Транспортные протоколы TCP и ARTCP

С точки зрения архитектуры TCP/IP все узлы сети можно разделить на два класса. Первый класс составляют конечные системы, которые генерируют информационный трафик либо являются его потребителями. Например, такими системами могут быть web- или ftp-серверы, а также компьютеры пользователей, которые запрашивают с этих серверов информацию. Второй класс составляют системы, которые являются посредниками в передаче информационного трафика. В роли таких систем чаще всего выступает различное сетевое оборудование, например, маршрутизаторы. Транспортные протоколы, такие как TCP, работают только на конечных системах.

Главной задачей транспортных протоколов является обеспечение надежной и эффективной передачи информационного трафика через ненадежную среду передачи. Так, пакеты информации могут быть потеряны при передаче. При этом потеря пакета может быть либо следствием перегрузки сети, либо тем,

* Ярославский государственный университет.

что ненадежен канал связи, через который осуществлялась передача. Надежность обеспечивается с помощью стратегии подтверждений – получатель должен подтвердить прием данных путем передачи подтверждения отправителю. Если же сегмент был потерян, то он передается заново с помощью механизма повторной передачи. Протокол TCP обеспечивает управление потоком между конечными системами. С момента своей начальной публикации [11] протокол претерпел ряд изменений, целью большинства из которых являлось улучшение механизма управления потоком (см., например, [5, 6]).

С одной стороны, протокол использует алгоритм управления потоком для наиболее эффективного использования сетевых ресурсов, с другой стороны, протокол использует алгоритм скользящего окна для предотвращения перегрузки получателя данных. Реализуется это с помощью двух переменных, SNDWND и CWND, первая из которых содержит оценку свободного места в буфере получателя, а вторая содержит оценку свободной емкости сети (количество байтов данных, которое может передать сеть, не подвергаясь перегрузке). Отправитель может отправить объем данных, который равен минимуму из этих двух переменных.

При установке соединения, SNDWND устанавливается равной количеству свободного места в буфере получателя, а CWND устанавливается равной одному или двум сегментам. При получении каждого нового подтверждения отправитель увеличивает значение CWND в зависимости от состояния, в котором находится алгоритм управления потоком. В состоянии быстрого старта CWND увеличивается на размер одного сегмента при получении каждого нового подтверждения. В состоянии избегания перегрузки CWND линейно увеличивается на один сегмент за время возврата (время передачи сегмента от отправителя получателю и подтверждения обратно).

Исследование поведения протокола, оценка его производительности являются актуальной задачей. Так, известно, что стандартный алгоритм управления потоком TCP имеет следующие недостатки:

- Потеря сегмента расценивается протоколом как наступление перегрузки сети, что в общем случае неверно, т.к. пакет с данными может быть потерян вследствие помех в канале. Это снижает эффективность работы протокола, например, на беспроводных каналах связи.
- Для оценки свободных ресурсов сети стандартный алгоритм управления потоком искусственно создает состояние перегрузки сети.

Остается актуальной задача построения более эффективного алгоритма управления потоком. Одной из работ в этом направлении является, например, [4]. Нами предлагается алгоритм управления потоком ARTCP (Adaptive Rate TCP) [12, 13]. В отличие от стандартного алгоритма управления потоком TCP, определяющего количество информации, которое может передать сеть, алгоритм ARTCP управляет скоростью передачи информации. Управление скоростью передачи информации происходит на основе оценки свободной пропускной способности сети и оценке времени возврата. Алгоритм оценки свободной пропускной способности сети основывается на том, что скорость потока данных, принимаемого получателем, является максимальной скоростью, с которой сеть может осуществлять передачу данных в текущий момент времени

при условии, что отправитель передает данные в сеть с большей скоростью. При разработке протокола ARTCP такая оценка была принята как эвристическое правило. Однако работа [14] показывает, что такая оценка является довольно точной. Это дает основания для использования такой оценки в будущих версиях транспортных протоколов.

В работах [12, 13] были показаны преимущества работы алгоритма ARTCP над стандартным алгоритмом управления потоком протокола TCP. Однако поведение в “стрессовых” условиях, при высокой загрузке каналов связи оставалось мало изученным.

2.2. Моделирование сетевого трафика

Ряд работ по исследованию сетевого трафика показывают, что этот трафик более качественно моделируется с помощью статистически самоподобных процессов, чем с помощью традиционной Пуассоновской модели.

В работе [3] приводится доказательство фундаментального свойства самоподобия сетевого трафика. В этой работе трафик рассматривается как комбинация источников, которые его генерируют. Каждый источник имеет следующую структуру. Некоторый период времени они могут генерировать пакеты информации (так называемые ON-периоды), при этом внутри одного периода пакеты приходят с одинаковыми интервалами. После ON-периода следует OFF-период, когда источник не генерирует пакеты. Размер ON- и OFF-периодов является случайной величиной, которая, как показано в [2], должна иметь конечное математическое ожидание и бесконечную дисперсию.

В нашей работе длительность ON- и OFF-периодов является случайной величиной, распределенной по Парето по формуле $F(x) = K^a x^{-a}$, $1 < a < 2$.

Элементами трасс самоподобного сетевого трафика являются время прихода пакета и его размер. Для генерации трасс самоподобного трафика может быть выбран параметр $a = 1.4$, что соответствует реальному трафику в сетях Ethernet, согласно [2].

3. Сценарии модельных экспериментов

Наша работа состоит в наиболее полном рассмотрении различных аспектов работы транспортных протоколов, из которых выделяются два – корректность работы и производительность протоколов.

Один из используемых нами подходов состоит в моделировании и анализе транспортных протоколов с помощью раскрашенных сетей Петри. Основные принципы и описание построенной модели протоколов были даны в [9, 10].

Предлагаемый подход состоит в моделировании с помощью этого формализма транспортных протоколов, а также элементов сетевой структуры с целью выполнения (симуляции) и проведения количественного анализа эффективности работы протоколов.

Так, построенная в терминах раскрашенных сетей Петри модель протоколов TCP и ARTCP может быть использована для анализа корректности работы протоколов с помощью метода Model Checking. Простой пример анализа корректности спецификации протокола TCP может быть найден в [9]. Вообще анализ корректности работы транспортных протоколов может быть сведен к

проверке следующего правила: протокол должен передать от отправителя к получателю все требуемые для передачи данные за конечный период времени.

Анализ различных характеристик производительности транспортных протоколов в разных режимах работы является актуальной задачей (см., напр., [7, 8]). Мы выбрали в качестве средства моделирования раскрашенные сети Петри, так как этот формализм является универсальным средством для моделирования и анализа свойств различных систем.

Основной подход работы состоит в создании некоей тестовой сетевой инфраструктуры, нахождения в этой инфраструктуре “узких” мест и использовании самоподобных трасс для моделирования передачи трафика по этим каналам.

Кроме самоподобного трафика, в моделируемой системе могут существовать и потоки, генерируемые с помощью стандартного алгоритма TCP (и/или ARTCP). Нашей целью является сравнительный анализ различных параметров производительности этих протоколов (например, размер средних длин очередей маршрутизаторов, справедливость и эффективность распределения сетевых ресурсов).

Несмотря на то, что в [9] приведен пример того, как можно снимать с модели в терминах раскрашенных сетей Петри различные показатели производительности, мы считаем, что специализированные прикладные пакеты для моделирования работы протоколов подходят гораздо лучше. Наиболее перспективным специализированным пакетом для исследования различных характеристик производительности протоколов является пакет Network Simulator [15] (далее – просто ns). Этот пакет разрабатывается в содружестве ученых из университета Berkley, LBL, USC/ISI и лаборатории Xerox PARC.

Ns позволяет строить модели коммуникационных сетей практически любой сложности. Одной из главных сильных сторон пакета является то, что модели протоколов, реализованные в этом пакете, были представлены либо непосредственными разработчиками протоколов, либо построены под их руководством. Представленные модели протоколов прошли квалифицированную экспертную оценку на соответствие спецификациям и реальным реализациям в операционных системах. Таким образом, эти модели с большой долей вероятности можно считать “эталонными”.

В то же время, протокол ARTCP после своего представления не исследован в достаточной мере с точки зрения его производительности. Первым шагом в решении этой задачи стала реализация модели протокола ARTCP в системе ns. В дальнейшем планируются исследования ряда сценариев работы протокола ARTCP и других транспортных протоколов, в которых важную роль будут играть современные версии протокола TCP, а также его экспериментальные модели. Рассмотрим сценарии, которые могут помочь в решении этой задачи.

В работах [12, 13], приводились некоторые результаты анализа работы протокола ARTCP по сравнению с протоколом TCP. Основной акцент в этих работах ставился на исследовании работы этих протоколов для непрерывной передачи больших массивов данных за один сеанс. В реальных сетях, например, в Интернете, такому режиму соответствует, в частности, передача файлов с помощью протокола FTP. Однако, не были исследованы другие важные режимы, которые моделируют, скажем, интерактивный трафик. Такая ситуация возникает, например, тогда, когда с помощью транспортного протокола передается

html-страница от web-сервера клиенту, который обычно представлен браузером. Такая страница может содержать изображения, которые передаются с помощью отдельных транспортных соединений. В совокупности при передаче такой страницы образуется несколько транспортных потоков, по каждому из которых передается относительно небольшое количество информации. Так, в [7] было показано, что передача такого вида данных создает значительно большую нагрузку на коммуникационную сеть (например, на буферы маршрутизаторов), чем передача небольшого количества объемных файлов того же размера. Таким образом, при анализе производительности коммуникационных транспортных протоколов необходимо обязательно учитывать то, как ведет себя приложение, использующее сервис транспортного уровня.

Другим полезным средством является использование трасс трафика, причем, как синтетических, так и реальных. Синтетические трассы могут быть получены, например, с помощью средств самого Ns. Несмотря на то, что ns позволяет моделировать сети, состоящие из нескольких тысяч узлов, использование трасс помогает избежать моделирования одновременной работы большого количества информационных потоков в коммуникационных сетях. Кроме того, система Ns позволяет использовать при анализе моделей трассы, которые были получены с помощью измерения реального трафика.

Современные коммуникационные сети являются в большей части гетерогенными – в них работают различные протоколы, в том числе, и транспортные. Более того, практически невозможно обеспечить переход сразу всей сетевой инфраструктуры для использования более новой версии какого-либо транспортного протокола. Поэтому большой интерес представляет исследование производительности транспортных протоколов в средах, где работают различные версии протоколов. Это необходимо для того, чтобы быть уверенным, что внедрение нового транспортного протокола или его версии не создаст проблем в сети.

Список литературы

- [1] Thompson K., Miller G.J., Wilder R. Wide-area Internet traffic patterns and characteristics // IEEE Networks, November. – 1997.
- [2] Leland W., Taqqu M., Willinger W., Wilson D. On the self-similar nature of Ethernet traffic // IEEE/ACM. Transactions on Networking. – 1994, February. – Vol. 2(1). – P. 1–15.
- [3] Taqqu M., Willinger W., Sherman R. Proof of a fundamental result in self-similar traffic modeling // Computer Communication Review. – 1997. – № 4.
- [4] Floyd S., Handley M., Padhye J, Widmer J. TCP friendly rate control (TFRC): Protocol Specification. – January, 2003. – RFC3448.
- [5] Allman M., Balakrishnan H., Floyd S. Enhancing TCP's loss recovery using limited transmit. – January, 2001. – RFC3042.
- [6] Floyd S., Mahdavi J., Mathis M., Podolsky M. An extension to the selective acknowledgement (SACK): Option for TCP. – July, 2000. – RFC2883.
- [7] Youngmi Joo, Ribeiro V., Feldmann A., Gilbert A., Willinger W. TCP/IP traffic dynamics and network performance: A lesson in workload modeling, flow control,

- and trace-driven simulations // ACM Computer Communication Review. – April, 2001.
- [8] Mathis M., Semke J., Mahdavi J., Ott T. The macroscopic behaviour of the TCP congestion control algorithm // ACM Computer Communication Review. – July, 1997.
- [9] Chaly D.Ju., Sokolov V.A. An extensible coloured petri net model of a transport protocol for packet switched networks // Proc. of PaCT'2003. Lecture Notes in Computer Science / Ed. V. Malyskin. – Springer-Verlag, 2003.
- [10] Соколов В.А., Тимофеев Е.А., Чалый Д.Ю. Моделирование, оптимизация и верификация транспортных протоколов // Тр. первой Всерос. научн. конф. МСО-2003 / Под ред. Л. Н. Королева. – М.: МГУ, 2003.
- [11] Postel J. Transmission Control Protocol. – 1980. – RFC793.
- [12] Alekseev I.V., Sokolov V.A. Modeling and traffic analysis of the adaptive rate transport protocol // Future Generation Computer Systems. – 2002. – Vol. 18, № 6. – P. 813–827.
- [13] Alekseev I.V., Sokolov V.A. ARTCP: Efficient algorithm for transport protocol for packet switched networks // Proc. of PaCT'2001. Lecture Notes in Computer Science / Ed. V. Malyskin. – Springer-Verlag, 2001. – Vol. 2127. – P. 159–174.
- [14] Jain M., Dovrolis K. End-to-end available bandwidth: measurement, dynamics, and relation with TCP throughput // ACM SIGCOMM'2002. – August, 2002. – P. 295–309.
- [15] Network Simulator. – <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.