

Использование симулятора NS-3 для изучения хаотического поведения высокоскоростных сетей СВЯЗИ

А.В. Карпухин, И.Н.Кудрявцев, А.В.Борисов, Д.И. Грицив

Харьковский Национальный Университет имени В.Н. Каразина

kav-102@yandex.ru, arkaim77@mail.ru, dgritsiv@gamil.com

Аннотация. *Появление новых протоколов, приложений и сервисов, таких как GRID, протокола BitTorrent и социальных сетей, которые в значительной мере увеличивают нагрузку на каналы связи и/или предъявляют все более жесткие требования к качеству обслуживания (QoS – Quality of Service). Все эти факторы являются предпосылкой для возникновения перегрузок в компьютерных сетях. Особенно сильно свойства сетевого трафика стали проявляться с появлением технологий высокоскоростной передачи данных. Это связано с тем, что одним из основных показателей качества работы сетей с пакетной передачей является количество потерянных пакетов. Потеря пакетов приводит к дополнительной нагрузке на сеть и, в конечном счете, к «заторам». При больших скоростях передачи данных потери пакетов, выражающиеся в долях процента, приводят к значительным потерям информации. В многочисленных работах, посвященных исследованию сетевого трафика, было показано, что указанные выше явления связаны со свойствами самоподобия трафика, основной причиной которого является поведение протокола TCP. Однако до сих пор не были предложены модели, адекватно описывающие поведение систем связи информационных систем, позволяющие применить весь арсенал классических методов анализа нелинейных динамических систем. В работе предлагается новый подход к анализу поведения сетей связи информационных систем с протоколом TCP – рассмотрение их как нелинейных динамических систем, проявляющих хаотические свойства при определенных значениях параметров. Построены фазовые портреты исследуемой системы, рассчитаны показатели Ляпунова для различных значений основных параметров системы. Предложены рекомендации по проектированию и эксплуатации высокоскоростных оптических сетей связи информационных систем.*

Ключевые слова

Самоподобие, сетевой трафик, хаос, потери пакетов, TCP/IP

1 Введение

Большинство исследователей считают, что основной причиной самоподобия трафика является TCP (основной транспортный протокол Internet). TCP - сервис, ориентированный на соединение, который гарантирует надежную (и в правильной последовательности) доставку потока байтов, освобождая приложения от необходимости «волноваться» о без вести пропавших или повторно заказанных данных. Он включает механизм контроля потока, который гарантирует, что отправитель не переполняет буфер приемника и механизм контроля заторов, который пробует препятствовать попаданию слишком большого объема данных в сеть (что приводит к потерям пакетов).

В то время как размер окна управления потоком данных является статическим, размер окна затора изменяется в течение долгого времени в соответствии с состоянием сети. Существует несколько модификаций реализации протокола TCP (Reno, Vegas, Tahoe). Самой распространенной является, очевидно, TCP Reno [1]. Его механизм управления заторами состоит из двух фаз: (1) медленный старт (slow start) и (2) предотвращение заторов (congestion avoidance).

Изучение перегрузок, возникающих в компьютерных сетях, и методов их предотвращения является очень актуальным вопросом на современном этапе развития компьютерных сетей. Появляются новые приложения и технологии, такие как GRID и распределенные вычисления, которые передают достаточно большое количество

данных по сети; видеоконференции и программы для передачи голоса предъявляют все более жесткие требования к качеству обслуживания QoS. Все эти факторы являются предпосылкой для возникновения перегрузок в компьютерных сетях.

Хорошо изученные и отработанные методы теории вероятности не применимы для описания и предотвращения сетевых перегрузок. Если же одна из реализаций TCP окажется агрессивнее других, то она будет использовать большую часть пропускной способности канала, что будет мешать передаче данных в «соседних» соединениях. Одновременно и излишняя консервативность алгоритма будет отрицательно сказываться на общей производительности протокола.

2 Методика изучения поведения TCP протокола

Для изучения поведения TCP потоков использовался дискретно-временной симулятор с открытым исходным кодом ns-3 (Network Simulator 3). Он предоставляет исследователю набор классов, пользуясь которыми, наследуя и модифицируя которые можно смоделировать широкий спектр протоколов и процессов, происходящих в компьютерных сетях. Также ns-3 использует свой собственный генератор случайных чисел, который создает достаточно «качественную» последовательность, период которой составляет $3,1 \times 10^{57}$ чисел.

Также симулятор позволяет моделировать процессы в реальном времени и интегрировать его с испытательным стендом, делать испытательный стенд частью моделируемой сети и т. д. С помощью данного симулятора создавалась модель сети TCP/IP (см. рис. 1), где все хосты связаны с маршрутизатором соединением типа точка-точка. На хостах-отправителях моделировалась работа приложений, посылающих данные с постоянным битрейтом (bitrate) на хост-получатель, где работало приложение, принимающее данные от обоих хостов. Скорость генерирования данных отправителями (C_i), задержку (d_b) и пропускную способность (C_b) каналов в узком месте, а также задержку (d) и пропускную способность (C) каналов у хостов-отправителей можно было варьировать, задавая для каждого нового численного эксперимента свои параметры.

Также изменялся еще один параметр – размер очереди типа Drop Tail Queue (Q_s) на сетевом интерфейсе маршрутизатора, соединенном с получателем. Окно принимающего хоста (rwnd) было преднамеренно сделано очень большим, чтобы лимитирующим фактором было только значение окна перегрузки (cwnd).

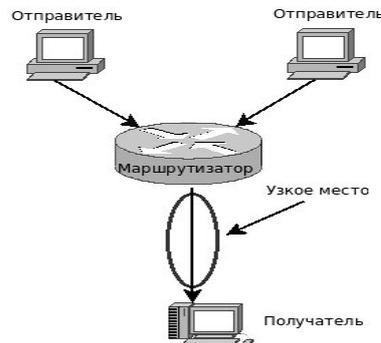


Рис. 1. Топология модельной сети

Очевидно, что состояние перегрузки в такой сети возникнет, когда суммарная скорость, с которой хосты-отправители посылают данные, будет превосходить пропускную способность канала получателя. Во время моделирования процесса работы двух TCP-соединений отслеживалось изменение значений cwnd каждого TCP потока от отправителей к получателю. При каждом изменении значения cwnd новое значение и момент времени, в который произошло это изменение, записывались в файл. В результате были получены два временных ряда (для двух хостов), которые задают ступенчатую функцию зависимости cwnd от времени.

При определенных параметрах тестового стенда такая, казалось бы, довольно простая система проявляет довольно сложное поведение. В частности, ниже приведен график зависимости cwnd(t) при $C_i=5\text{Mbps}$, $d_b=10\text{ms}$, $C_b=5\text{Mbps}$, $Q_s=20$ пакетов¹. На графике можно заметить регулярное биение, причем, каждый из TCP-потоков попеременно получает преимущество друг над другом на определенный промежуток времени.

¹ 1 пакет = 536 байт, во всех проведенных численных экспериментах

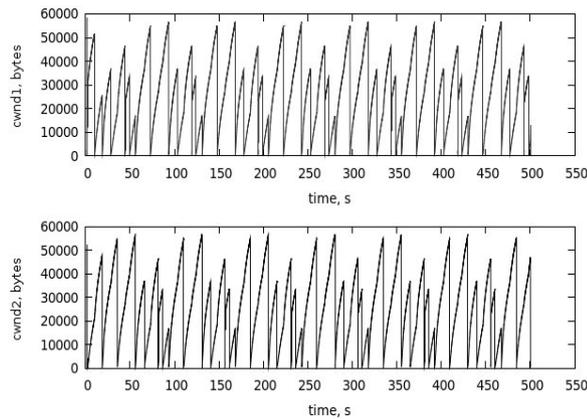


Рис. 2. Зависимость окна перегрузки от времени при $C_f=5\text{Mbps}$, $d_b=10\text{ms}$, $C_b=5\text{Mbps}$, $Q_s=20$

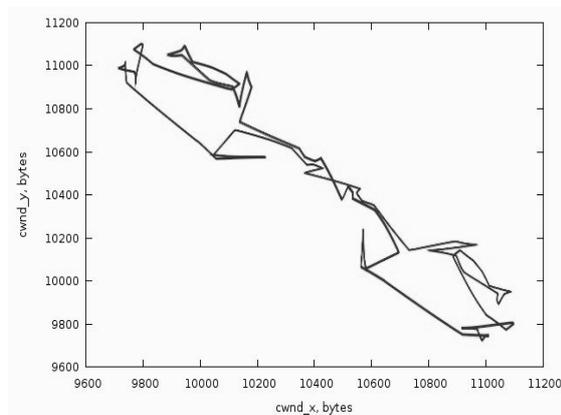


Рис. 3. Фазовый портрет при $C_f=5\text{Mbps}$, $d_b=10\text{ms}$, $C_b=5\text{Mbps}$, $Q_s=20$

3 Максимальный показатель Ляпунова

Фазовые портреты удобны тем, что не только могут наглядно отобразить состояние динамической системы. Имея фазовый портрет, можно подсчитать максимальный показатель Ляпунова² λ величину, которая характеризует скорость разбегания близких траекторий, положительное значение которой обычно принимается как индикатор хаотического поведения системы.

Для подсчета максимального показателя Ляпунова использовалась утилита `lyap_k` из пакета TISEAN. Результатом ее работы является набор данных, представляющих собой зависимость логарифма коэффициента разбегания траекторий от времени $S(\varepsilon, m, \Delta n)$ [6], который вычисляется следующим образом:

$$S(\varepsilon, m, \Delta n) = \frac{1}{N} \sum_{n_0=1}^N \ln \left(\frac{1}{|U(s_{n_0})|} \times \sum_{s_n \in U(s_{n_0})} |s_{n_0+\Delta n} - s_{n+\Delta n}| \right) \quad (1)$$

Если величина $S(\varepsilon, m, \Delta n)$ проявляет линейный рост с одинаковым уклоном в разумном диапазоне значений ε , тогда тангенс угла наклона прямой, аппроксимирующей этот участок, можно полагать приближенно равным максимальному показателю Ляпунова.

² Например, используя алгоритм Бенеттина [7]

Здесь представлен результат, полученный после обработки и визуализации временных рядов $cwnd(t)$, соответствующих рисункам 2, 3 (см. рис 4), с помощью утилиты `lyap_k`. На рисунках изображены кривые $S(\varepsilon, m, \Delta n)$ для пяти различных значений ε и прямая $y = a + bx$, аппроксимирующая линейный участок этих кривых. Таким образом, значение b численно равно максимальному показателю Ляпунова.

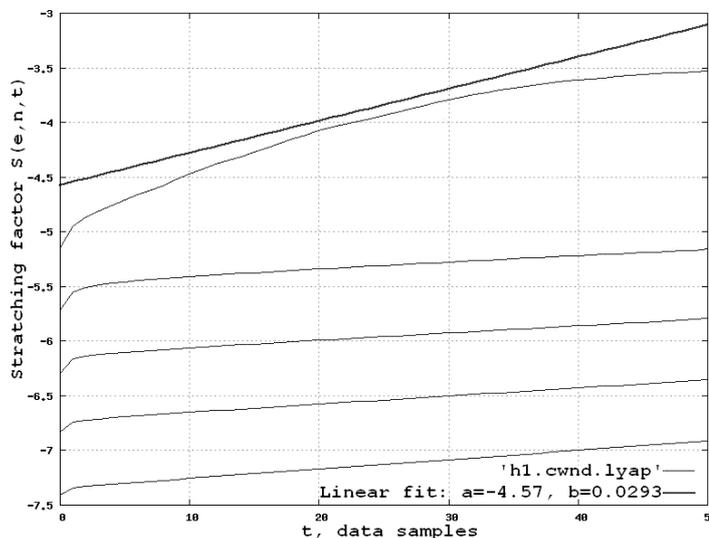


Рис. 4. Вычисление показателя Ляпунова при $C_f=5\text{Mbps}$, $d_b=10\text{ms}$, $C_b=5\text{Mbps}$, $Q_s=20$, $\lambda \sim 0.029$

Также были проанализированы данные, полученные при моделировании работы сети в отсутствие перегрузки. Для этого случая, $\lambda < 0$, а значит, такая система не проявляет хаотического поведения, как и предполагалось, исходя из постановки эксперимента.

4 Выводы и направления дальнейших исследований

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что размер буфера маршрутизатора является одним из ключевых параметров, влияющих на работу протокола TCP.

Дальнейший путь, на наш взгляд, состоит в том, чтобы описывать сети связи информационных систем, использующие протокол TCP, как нелинейные динамические системы. В этом случае есть возможность применить весь арсенал классических методов анализа поведения таких систем, разработанный Пуанкаре, Ляпуновым, Биркгофом и т.д.

Речь идет о качественном анализе поведения динамических систем в фазовом пространстве, что дает возможность определить все возможные режимы движения (работы) системы, а также определить значения параметров, при которых в системе наблюдаются нежелательные хаотические явления (потери пакетов, снижение производительности). Эти вопросы являются актуальными в первую очередь для ISP (провайдеров Internet), которые, к сожалению, до сих пор не обращают на них должного внимания.

В глобальном масштабе всей сети Internet решить проблему заторов и потерь пакетов, очевидно, не представляется возможным в связи с тем, что перестроить всю сеть нельзя в силу технических и экономических причин. Однако, в ограниченных по размерам сетях (даже довольно больших) возможно дать рекомендации по проектированию (и дальнейшей эксплуатации) таких сетей, которые позволят свести к минимуму отрицательные явления хаотизации.

Литература

- [1] V. Jacobson. Congestion Avoidance and Control. // *In Proceedings of the SIGCOMM'88 Symposium*, pp. 314-332, 1988.
- [2] N. H. Packard, J. P. Crutchfield, J. D. Farmer and R. S. Shaw, *Geometry from a Time Series*, Phys.Rev.Lett., 45 (1980) 712-716.
- [3] Veres A, Boda V. The chaotic nature of TCP congestion control // *In Proc. IEEE INFOCOM*. – 2000. – P. 1715 – 1723.

- [4] Willinger W., Taqqu M.S., Erramilli A. A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks // *Stochastic Networks: Theory and Applications, Royal Statistical Society Lecture Notes Series.* – 1996. – Vol. 4. – P. 339 – 366
- [5] Mandelbrot B.B. Self-similar error clusters in communications systems and the concept of conditional systems and the concept of conditional stationarity // *IEEE Transactions on Communications Technology.* – 1965. – Vol. 13, issue 1. – P. 71 - 90.
- [6] R. Hegger, H. Kantz, and T. Schreiber, *Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package*, CHAOS 9, 413 (1999).
- [7] Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.M., 'Lyapunov characteristic exponents for smooth Dynamical systems; a method for computing all of them'. P a ~ 1: Theory; Part 2: Numerical application, Meccanica March 1980.
- [8] Пакет программ TISEAN и сопутствующая документация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mpiyks-dresden.mpg.de/~tisean/>.