

УДК 004.7:519.2

А.В. Карпухин<sup>1</sup>, Д.И. Грицив<sup>2</sup>, А.А. Ткаченко<sup>3</sup><sup>1</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков<sup>2</sup> Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков<sup>3</sup> ПАО «Укртелеком», Харьков

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ПРОТОКОЛОМ TCP

*В многочисленных работах, посвященных исследованию сетевого трафика, было показано, что в высокоскоростных сетях возможно возникновение хаотических режимов работы, основной причиной которого является поведение протокола TCP. Наличие таких режимов приводит к значительному уменьшению пропускной способности всей сети, в особенности в т.н. «узких местах». Однако до сих пор не были предложены модели, адекватно описывающие инфокоммуникационные системы и позволяющие применить весь арсенал классических методов анализа нелинейных динамических систем. В работе предлагается новый подход к анализу поведения инфокоммуникационных систем с протоколом TCP – рассмотрение их как нелинейных динамических систем, проявляющих хаотические свойства при определенных значениях параметров. Построены фазовые портреты исследуемых систем, рассчитаны значения максимального показателя Ляпунова для различных значений основных параметров систем. Проведен физический эксперимент в реальной сети. Решена задача оптимизации параметров инфокоммуникационной системы с точки зрения отсутствия нежелательных хаотических режимов.*

**Ключевые слова:** самоподобие, хаос, перегрузка, потеря пакетов, TCP/IP.

### Введение

Двусторонний поток информации между парой смежных систем в сети обеспечивается каналом, связывающим две системы. Основными характеристиками каналов являются скорость информационного потока (пропускная способность) и задержка передачи. В каждой точке подключения маршрутизатора к каналу имеется буфер, в котором организуется очередь данных, ожидающих отправки по этому каналу. Буферное пространство и пропускная способность представляют собой разделяемые ресурсы сети. Если скорость прибытия информации в маршрутизатор превышает максимально возможную скорость ее отправки, то происходит перегрузка сети, выражающаяся в переполнении буферов и потерях информации (пакетов). Перегрузка сети приводит к образованию т.н. заторов (congestions) в некоторых участках сети, называемых «узкими местами» (bottlenecks). Основными параметрами, определяющими поведение ансамбля TCP-соединений в узком месте, являются пропускная способность канала, задержка в канале и размер буфера маршрутизатора.

Протокол транспортного уровня занимает важнейшее положение в любой сетевой архитектуре, в том числе и в TCP/IP, поскольку он обеспечивает надежную и эффективную передачу информации (в виде пакетов) непосредственно между конечными системами сети. Для этого транспортный протокол задает согласованный набор правил поведения для

участников информационного обмена. Эти правила регулируют совместный доступ узлов к разделяемым ресурсам сети, поэтому эффективность транспортного протокола определяет эффективность работы всей сети в целом.

Транспортным протоколом в архитектуре TCP/IP является TCP (Transmission Control Protocol) [1 – 3], который обеспечивает надежную двустороннюю связь с контролем скорости передачи. Для осуществления обмена TCP устанавливает логическое соединение между парой узлов сети, на каждом из которых исполняется алгоритм протокола TCP. Поток сегментов по TCP соединению может проходить через упорядоченную последовательность маршрутизаторов и каналов. Пропускная способность соединения в целом ограничена минимальной из пропускных способностей каналов, через которые проходит соединение. Алгоритм управления потоком, являющийся частью TCP, стремится отправлять данные со скоростью, не превышающей меньшую из пропускных способностей каналов вдоль соединения и скорости потребления информации получателем.

На хосте, отправляющем пакеты, имеется окно передачи (send window, swnd), а на хосте, принимающем пакеты, имеется окно приема (receive window, rwnd) [1 – 3].

TCP осуществляет контроль потока данных. Каждая сторона TCP соединения имеет определенное пространство буфера. TCP на принимающей стороне позволяет удаленной стороне посылать

данные только в том случае, если получатель может поместить их в буфер. Это предотвращает от переполнения буферов медленных хостов быстрыми хостами.

При работе с медленным стартом отправляющему TCP добавляется еще одно окно: окно переполнения, которое называется cwnd (congestion window).

Когда устанавливается новое соединение с хостом, находящимся в другой сети, размер окна переполнения устанавливается равным размеру одного сегмента (размер сегмента объявлен удаленным концом). Каждый раз, когда принимается ACK, окно переполнения увеличивается на один сегмент. Отправитель может передать объем данных величиной до минимального размера окна переполнения и объявленного окна. С помощью окна переполнения отправитель осуществляет управление потоком, тогда как с помощью объявленного окна потоком управляет получатель.

В определенной точке достигается максимум передачи для данного соединения (объединенной сети), в этом случае промежуточный маршрутизатор начинает отбрасывать пакеты. Это говорит о том, что размер окна переполнения отправителя стал слишком большим.

Данная работа актуальна, т.к. наблюдаемые в инфокоммуникационных сетях при определенных значениях их параметров хаотические явления приводят к значительному уменьшению пропускной способности сетей. Поэтому определение значений параметров инфокоммуникационных сетей, при которых возникают (или не возникают) нежелательные хаотические явления, даст возможность проектировать (и сопровождать в течение их жизненного цикла) автономные телекоммуникационные системы с протоколом TCP, в которых будут отсутствовать хаотические явления, что приведет к повышению их пропускной способности.

**Анализ литературных источников.** Появление и широкое распространение компьютерных сетей, а также увеличение количества разнообразных сетевых услуг (WWW, iPhone и т.д.) привело к тому, что сетевой трафик стал более сложным и непредсказуемым. Особенно сильно эти свойства стали проявляться с появлением технологий высокоскоростной передачи данных. Это связано с тем, что одним из основных показателей качества (QoS) работы сетей с пакетной передачей является количество потерянных пакетов. Потеря (отбрасывание) пакетов в случаях невозможности их обработки в силу переполнения буфера маршрутизатора приводит к дополнительной нагрузке на сеть (пакеты остаются в сети и посылаются заново в случае отсутствия ACK) и, в конечном счете, к «заторам» (congestions). При больших скоростях передачи данных потери паке-

тов, выражающиеся в долях процента, приводят к значительным потерям информации.

Применение концепции самоподобия к телекоммуникационным системам впервые предложил Б. Мандельброт [4].

В последние 10 – 15 лет исследованию сетевого трафика было посвящено большое число работ. Их можно условно разделить на две группы. Первая (и самая обширная) включает в себя работы, в которых авторы анализируют сетевой трафик и определяют его статистические характеристики, в частности показатель Херста, характеризующий степень самоподобия трафика. Источником анализируемых данных является либо натуральный эксперимент (например, [5]), либо моделирование с помощью программных средств (например, ns [6], OPNET [7]).

Ко второй группе относятся работы (к сожалению, немногочисленные), в которых авторы рассматривают инфокоммуникационную систему как динамическую систему, в которой самоподобие является внутренним свойством самой системы [8]. В работе [8] авторами использовался метод восстановления многомерных траекторий динамической системы [9], который состоит в использовании смещенных во времени отсчетов значений cwnd для двух TCP-соединений при использовании сетевого симулятора ns-2 [10]. Построенные в работе [8] фазовые портреты, а также вычисленные значения максимального показателя Ляпунова для исследуемой динамической системы убедительно доказывают существование хаотических режимов при определенных значениях параметров системы.

Особенно актуальными исследования в области моделирования трафика в инфокоммуникационных сетях стали в последние годы в связи с бурным развитием, в первую очередь, новых услуг в сети Internet (VoIP и т.д.), а также интенсивным использованием Internet в таких областях, как GRID, Cloud Computing. Общеизвестно, что в проведении крупномасштабных экспериментов в области физики элементарных частиц (адронный коллайдер) участвуют большие группы ученых, находящихся в нескольких центрах (лабораториях), разделенных расстоянием в несколько тысяч километров друг от друга. Например, CERN и Los Alamos National Laboratory (LANL) при проведении совместных экспериментов на адронном коллайдере используют Internet для передачи огромного количества информации (несколько петабайт в месяц, около 15 петабайт в год). Причем объем этих данных неуклонно возрастает. Именно в таких сетях, т.н. Fast Long Distance Networks, неизбежно возникают нежелательные хаотические явления, приводящие к возникновению заторов в таких быстродействующих сетях, построенных на основе современных технологий GRID. Это немаловажно и в таких об-

ластях, как высокопроизводительные вычисления в параллельных и распределенных системах [11].

Основной причиной возникающих хаотических явлений, по мнению многих исследователей, является поведение основного транспортного протокола Internet – TCP [8, 12 – 15].

В работах многих авторов отмечается, что агрегированный сетевой трафик является самоподобным [5, 16]. Показано, что распределение с тяжелыми хвостами (РТХ) размеров файлов, появления пакетов и длительности передачи вносят основной вклад в самоподобную природу агрегированного сетевого трафика.

Для анализа сетевого трафика используются различные методики. Одним из параметров, по которым определяется степень самоподобия, как известно, является параметр Херста.

Очевиден и тот факт, что сам TCP является первичной причиной самоподобия и его поведение может иметь нежелательные последствия в инфокоммуникационных сетях при увеличении пропускной способности глобальных вычислительных сетей (WAN) до значений, выражающихся в нескольких гигабайтах в секунду. В частности, даже если трафик, генерируемый приложениями, имеет параметр Херста  $H = 0,5$  (т.е. является несамоподобным), TCP «модулирует» этот трафик и делает его самоподобным (имеющим параметр Херста  $H = 1,0$ ). Причем все существующие реализации протокола TCP (Reno, Vegas, Tahoe) обладают этим «нежелательным» свойством, что связано с наличием во всех вариантах протокола параметра  $cwnd$ , управляющего количеством пакетов, попадающих в сеть, и который изменяется во времени по нелинейному закону.

### Исследование поведения сетевого трафика реальной сети

Для исследования свойства самоподобия сетевого трафика была создана модельная сеть TCP/IP (рис. 1), в которой все хосты связаны с маршрутизаторами соединением типа точка-точка. Модельная сеть представляет собой ступенчатую структуру из четырех этажей, на каждом из которых устанавливались хосты и маршрутизатор. Такая структура была выбрана, как одна из наиболее используемых для офисов или многоэтажных домов. На всех хостах устанавливалось специальное программное обеспечение, так называемый сниффер, (wireshark), которое захватывало входящий и исходящий сетевой трафик и записывало данные в режиме реального времени. Для соединения хостов с маршрутизаторами (Cisco Catalyst 2960G-48) использовалась среда передачи данных витая пара. Таким образом, максимальная пропускная способность данного участка сети  $C_b = 100\text{Mbps}$ . В свою очередь для соединения маршрутизаторов между собой использова-

лось оптоволокно. В результате, установленное программное обеспечение создавало несколько дампов с данными на одном хосте. Это было сделано для того, чтобы оценить степень нагрузки на модельную сеть в разное время активности пользователей. Время захвата сетевого трафика на хостах составляло 11000 секунд (около 3 часов), что, по нашему мнению, достаточно для комплексного анализа данной части сети. Сохраненные отчеты с данными затем передавались на удаленный компьютер для дальнейшей обработки.

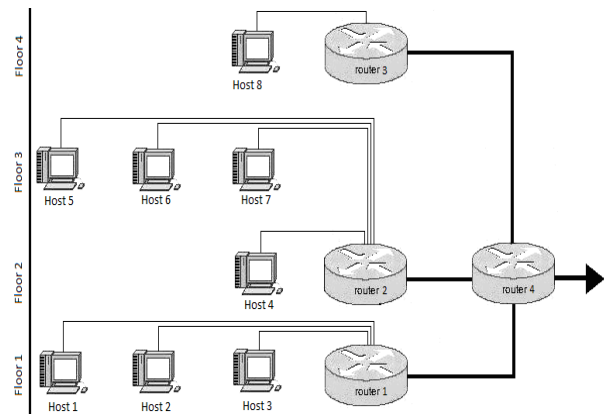


Рис. 1. Топология модельной сети

В качестве инструмента, для захвата сетевого трафика в модельной сети был выбран анализатор сетевого трафика Wireshark [17]. Его задача состоит в том, чтобы перехватывать сетевой трафик и отображать его в детальном виде. Анализатор сетевого трафика можно сравнить с измерительным устройством, которое используется для просмотра того, что происходит внутри сетевого кабеля. В прошлом такие инструменты были очень дорогостоящими и проприетарными. Однако, с момента появления подобного инструмента как Wireshark ситуация изменилась. Wireshark является одним из лучших и доступных анализаторов сетевого трафика на сегодняшний момент, т.к. обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами. Он работает на большинстве современных ОС (Microsoft Windows, Mac OS X, UNIX) и является продуктом с открытым исходным кодом, распространяемый на основании лицензии GPL. Анализатор обладает множеством декодеров таких протоколов как: TELNET, FTP, POP, RLOGIN, ICQ, SMB, MySQL, HTTP, NNTP, X11, NAPSTER, IRC, RIP, BGP, SOCKS 5, IMAP 4, VNC, LDAP, NFS, SNMP, MSN, YMSG и др. Перехват трафика сетевого интерфейса осуществляется в режиме реального времени. Также есть возможность отфильтровать захваченные пакеты по множеству критериев и создавать разнообразную статистику. Wireshark работает на основе библиотеки pcap (Packet Capture), которая позволяет анализировать сетевые данные, поступающие на сетевую карту компьютера. Пере-

захват трафика анализатором предоставляет следующие возможности: перехват трафика различных видов сетевого оборудования (Ethernet, Token Ring, ATM и другие). Прекращение перехвата происходит на основе разных событий: размера перехваченных данных, продолжительность перехвата по времени, количество перехваченных пакетов. Поддерживается показ декодированных пакетов во время перехвата и фильтрация пакетов с целью уменьшить размер перехваченной информации, а также запись дампов в несколько файлов, если перехват продолжается долго.

В процессе захвата трафика в сети отслеживалось значение множества переменных для каждого хоста, поэтому полученные отчеты с данными фильтровались по следующим критериям: IP адрес хоста и TCP протокол передачи данных. Затем отчет сохранялся в формате %время% %TCP трафик%, где время отсчитывалось с момента запуска захвата трафика, а в качестве единиц измерения для времени использовались секунды, и байты для трафика. Для дальнейшего анализа временных рядов необходимо было преобразовать исходные ряды  $\psi = \{\psi(t_1), \psi(t_2), \dots, \psi(t_n)\}$  в эквидистантные, которые обладают постоянным шагом  $\Delta t$  по оси времени. Такую величину  $\Delta t$  можно обозначить как степень агрегации. Для этого был сформирован новый ряд, полученный при помощи операции суммирования каждых исходных значений информации (TCP трафик) в соответствии к заданному временному интервалу  $\Delta t$ . Таким образом, агрегированные значения преобразованного ряда можно представить в таком виде:

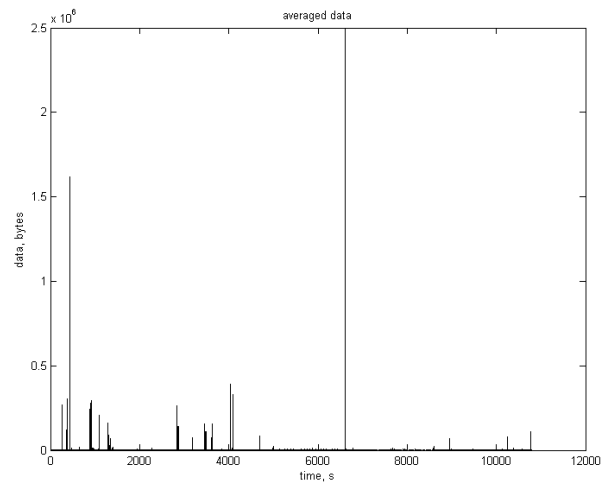
$$X_N = \sum_{i=1}^N \psi(t_i). \quad (1)$$

В результате работы алгоритма получается агрегированная эквидистантная реализация трафика  $X = \{X(\Delta t), X(2\Delta t), \dots, X(N\Delta t)\}$ , содержащая  $N$  элементов [18].

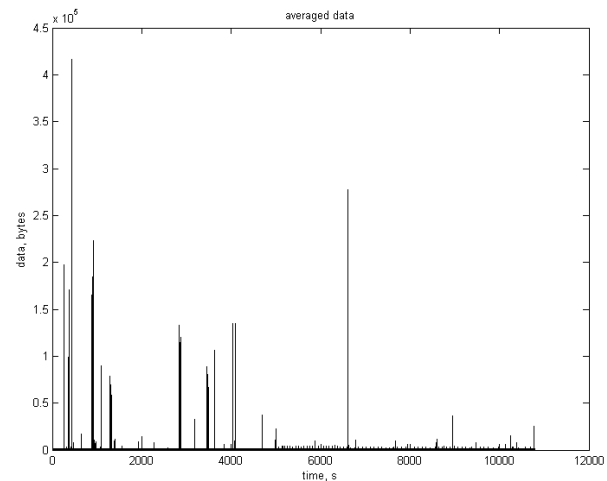
Физический смысл каждого ее элемента является суммарная скорость (байт/сек) на соответствующем интервале  $\Delta t$ . В процессе агрегации временных рядов выбирались разные временные интервалы  $\Delta t = 0,1; 0,5; 1; 2; 5; 10$  с. Ниже приведены график 2 и 3 агрегированного трафика для одинакового уровня агрегации  $\Delta t = 0,1$  с. и  $\Delta t = 1$  с. для различных сессий работы модельной сети. Примечательно, что структура полученных рядов для любого уровня агрегации подобна по структуре между собой.

Как можно видеть на рис. 2, 3 наблюдается периодичность работы TCP протокола, так называемые режимы on/off в модельной сети. Как и ожидалось, сетевой трафик имеет взрывной характер на разных временных участках, а также при разном

шаге агрегирования временной ряд сохраняет свойство инвариантности.



а –  $\Delta t = 0.1$



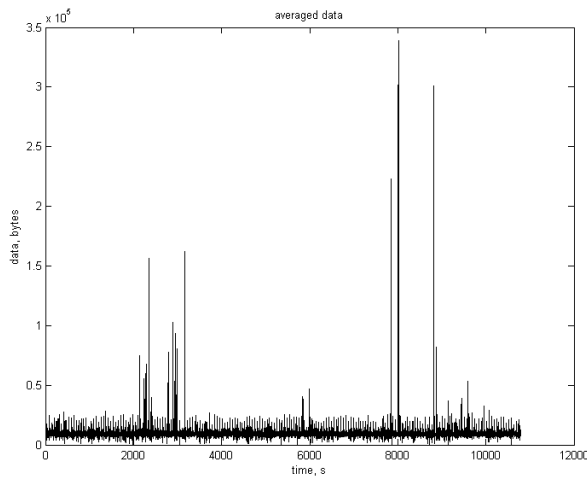
б –  $\Delta t = 1$

Рис. 2. Агрегированный временной ряд (трафик) для хоста 2

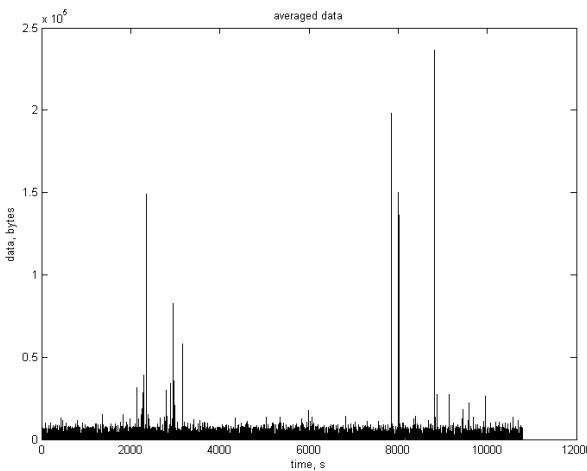
Фракталы – это структуры, которые, при разных масштабах выглядят примерно одинаково [19 – 21]. Мультифракталы – неоднородные фрактальные объекты для полного описания, которых, в отличие от регулярных фракталов, недостаточно введения всего лишь одной фрактальной размерности, а необходим спектр таких размерностей.

Причина этого заключается в том, что наряду с чисто геометрическими характеристиками такие фракталы обладают и некоторыми статистическими свойствами.

Параметр  $H$ ,  $0 < H < 1$ , называемый показателем Херста, представляет собой степень самоподобия. Наряду с этим свойством, показатель  $H$  характеризует меру долгосрочной зависимости стохастического процесса. Эта величина уменьшается, когда задержка между двумя одинаковыми парами значений во временном ряду увеличивается.



а –  $\Delta t = 0.1$



б –  $\Delta t = 1$

Рис. 3. Агрегированный временной ряд (трафик) для хоста 3

Итак, для самоподобного процесса локальные свойства отражаются на глобальных в соответствии с общеизвестным соотношением  $D = n + 1 - H$  между фрактальной размерностью и коэффициентом Херста для самоподобного объекта в  $n$ -мерном пространстве. В нашем случае  $n = 1$  для временного ряда, и, соответственно, фрактальная размерность  $D$  временного ряда связана с показателем степени его фрактальности (показателем Херста)  $H$  формулой  $H = 2 - D$ . Таким образом, параметры самоподобия  $H$  и  $D$  представляют собой меры устойчивости статистического явления или меры длительности долгосрочной зависимости стохастического процесса.

Значения  $H = 0,5$  или  $D = 1,5$  указывает на независимость (отсутствие какой-либо памяти о прошлом) приращений временного ряда. Ряд является случайным, а не фрактальным. Чем ближе значение  $H$  к 1, тем выше степень устойчивости долгосрочной зависимости. Диапазон  $0 < H < 0,5$  соответствует антиперсистентным рядам: если антиперси-

стентный ряд характеризовался ростом в предыдущем периоде, то чем ближе показатель Херста к 0, тем с большей вероятностью в следующем периоде начнется спад. При значениях  $0,5 < H < 1$  ряд демонстрирует персистентное (трендоустойчивое) поведение. Если персистентный ряд возрастал (убывал) в предыдущий период, то чем ближе показатель Херста к 1, тем с большей вероятностью будет сохраняться тенденция поведения этого ряда в течение такого же периода в будущем.

При оценивании параметра  $H$  для самоподобных временных рядов используется метод детрендрованного флуктуационного анализа (ДФА) [22, 23]. В этом случае для исходного временного ряда

$$x(t) \text{ строится кумулятивный ряд } y(t) = \sum_{i=1}^t x(i),$$

который разбивается на  $N$  сегментов длиной  $s$ . Для каждого сегмента  $y(t)$  вычисляется флуктуационная функция

$$F^2(s) = \frac{1}{s} \sum_{t=1}^s (y(t) - Y_m(t))^2, \quad (2)$$

где  $Y_m(t)$  – локальный  $m$  – полиномиальный тренд в пределах данного сегмента.

Функция  $F(s)$  усредняется по всему ряду  $y(t)$ . Такие вычисления повторяются для различных размеров сегментов, чтобы получить зависимость  $F(s)$  в широком диапазоне значений параметра  $s$ . Для процессов с фрактальными свойствами с ростом  $s$  функция  $F(s)$  также возрастает, и линейная зависимость  $\log F(s)$  от  $\log s$  свидетельствует о наличии свойства масштабной инвариантности:

$$F(s) \propto s^H. \quad (3)$$

При исследовании свойств мультифрактальных процессов применяется мультифрактальный флуктуационный анализ (МФДФА) [24]. При проведении МФДФА исследуется зависимость флуктуационной функции  $F_q(s)$  от параметра  $q$  полученной возведением выражения (12) в степень  $q$  и последующим усреднением по всем сегментам

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F^2(s)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{1/q}. \quad (4)$$

Изменяя временную шкалу  $s$  при фиксированном показателе  $q$ , находим зависимость  $F_q(s)$ , представляя её в двойных логарифмических координатах. Если исследуемый ряд сводится к мультифрактальному множеству, проявляющему долгосрочные зависимости, то флуктуационная функция  $F_q(s)$  представляется степенной зависимостью

$$F_q(s) \propto s^{h(q)}, \quad (5)$$

с функцией обобщенного показателя Херста  $h(q)$ . Из определений (2) и (4) следует, что при  $q = 2$  этот показатель сводится к обычному значению  $H$ .

В представленной работе проведено исследование мультифрактальных характеристик агрегированного трафика данных. Оценка обобщенного показателя Херста для реализаций агрегированного трафика для нескольких хостов рассматриваемой модельной сети при одинаковом уровне агрегации  $\Delta t = 0,1$  приведена на рис. 4, 5.

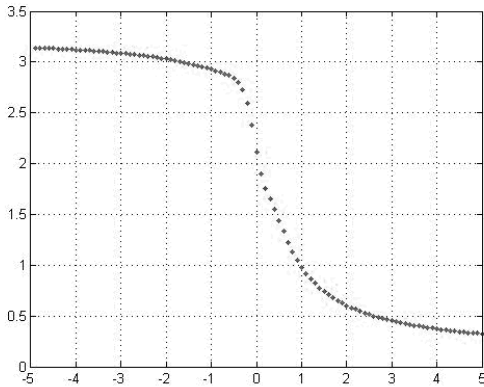


Рис. 4. Функция  $h(q)$  для реализаций временного ряда для хоста 2,  $H = 0,62$

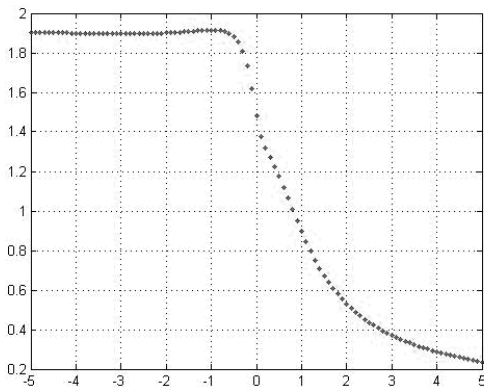


Рис. 5. Функция  $h(q)$  для реализаций временного ряда для хоста 3,  $H = 0,55$

Проведенный анализ показал, что исследуемые реализации трафика обладают явно выраженными мультифрактальными свойствами: диапазон обобщенного показателя Херста  $1,5 \leq \Delta h \leq 4$ , причем мультифрактальная структура рядов существенно изменяется в зависимости от выбора хоста. Показатель Херста  $H$  практически во всех случаях превышает значение 0.5, что говорит о долгосрочной зависимости исследуемых рядов.

Имея агрегированный временной ряд, можно посчитать максимальный показатель Ляпунова (Maximum Lyapunov Exponent, MLE) – величину, которая характеризует скорость разбегания близких тракто-

рий, положительное значение которой обычно принимается как индикатор хаотического поведения системы. Вычисление максимального показателя Ляпунова производилось с помощью пакета утилит TISEAN [25], который предназначенный для анализа временных рядов и основанный на теории нелинейных детерминированных динамических систем или теории хаоса [26]. TISEAN представляет собой реализацию ряда алгоритмов теории хаоса. В данном случае, 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 –  $S(\epsilon, m, \Delta n)$ , который вычисляется таким образом:

$$S(\epsilon, m, \Delta n) = \frac{1}{N} \sum_{n_0=1}^N \ln \left( \frac{1}{|U(S_{n_0})|} \times \sum_{S_n \in U(S_{n_0})} |S_{n_0+\Delta n} - S_{n+\Delta n}| \right), \quad (6)$$

где  $\epsilon$  – окрестность точки  $S_{n_0}$ ,  $m$  – размерность фазового пространства,  $\Delta n$  – время, а  $U(S_{n_0})$  – окрестность точки  $S_{n_0}$  диаметра  $\epsilon$ .

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

Как видно из графиков рис. 6 и 7,  $MLE > 0$ , что говорит о том, что рассматриваемая система проявляет хаотическое поведение. Также был проведен сравнительный анализ между максимальным показателем Ляпунова и уровнем агрегации временных рядов, чтобы оценить, как эти два параметра коррелируют между собой. При разумном изменении шага агрегации временного ряда значение максимального показателя Ляпунова практически не менялось.

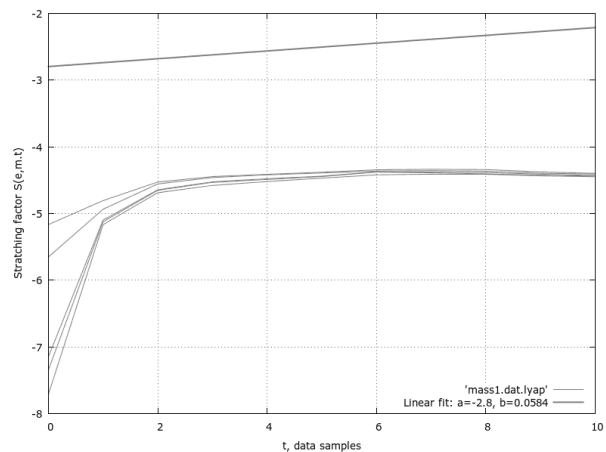


Рис. 6. Вычисление показателя Ляпунова хоста 2 при  $\Delta t = 0,1$ ,  $\lambda \sim 0,0584$

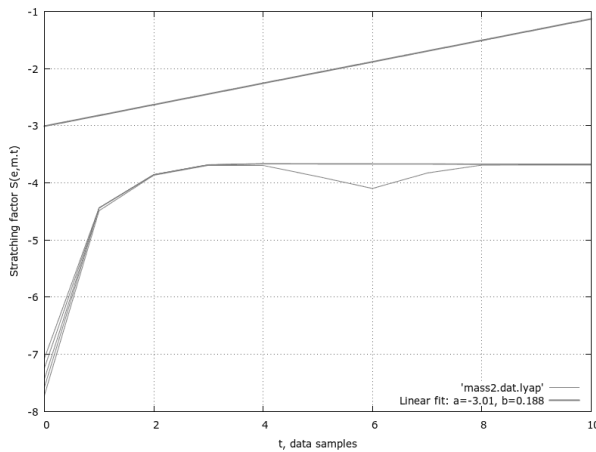


Рис. 7. Вычисление показателя Ляпунова хоста 3 при  $\Delta t = 0.1$ ,  $\lambda \sim 0,188$

### Моделирование работы поведения TCP-соединений средствами симулятора ns-3

Тестовый стенд. В данной работе 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 их, можно смоделировать широкий спектр протоколов и процессов, происходящих в компьютерных сетях. Также симулятор позволяет моделировать процессы в реальном времени и интегрировать его с испытательным стендом (testbed), делать испытательный стенд частью моделируемой сети и т. д. [27]. Симулятор ns-3 содержит множество тестов для всех компонент, что гарантирует достоверность получаемых результатов.

С помощью данного симулятора создавалась модель сети TCP/IP (см. рис. 8), где все компьютеры-хосты связаны с маршрутизатором соединением типа точка-точка.

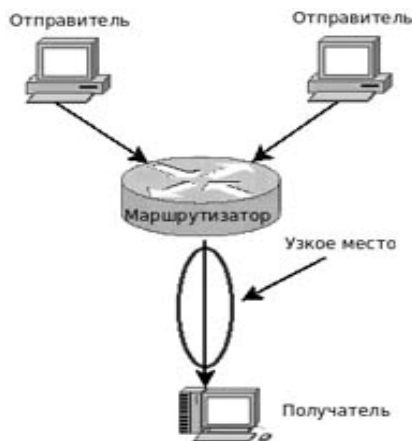


Рис. 8. Тестовый стенд

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 ( $C_f$ ), 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 передачи данных типа Drop Tail Queue ( $Q_s$ ) на сетевом интерфейсе маршрутизатора, соединенном с получателем. Окно принимающего хоста (gwnd) было преднамеренно сделано очень большим, чтобы лимитирующим фактором было только значение окна перегрузки (cwnd).

Очевидно, что состояние перегрузки в такой сети возникнет, когда суммарная скорость, с которой хосты-отправители посылают данные, будет превосходить пропускную способность канала получателя. Причем, ключевыми параметрами, влияющими на возникновение перегрузки, будут  $C_f$ ,  $d_b$ ,  $C_b$ , и  $Q_s$ , так как при достаточной пропускной способности каналов хостов-отправителей и малой задержке они не будут влиять на алгоритм управления перегрузкой протоколом TCP. В дальнейшем, при описании численных экспериментов, будут приводиться значения только этих параметров.

Методика изучения поведения TCP протокола. Даже в такой простой системе с двумя TCP-соединениями количество переменных, характеризующих состояние данной динамической системы, достаточно большое (кроме того, мы не можем точно определить их количество в реальной исследуемой динамической системе). Но можно выбрать соответствующее сечение фазового пространства путем надлежащего выбора этих фазовых переменных. Было выбрано значение окна перегрузки (cwnd), так как оно непосредственно влияет на скорость пересылки данных.

Во время моделирования процесса работы двух TCP-соединений отслеживалось изменение значений cwnd каждого TCP потока от отправителей к получателю. В результате были получены два временных ряда (для двух хостов), которые задают ступенчатую функцию зависимости cwnd от времени.

В работе [9] было предложено использовать усредненные по  $N$  значения временного ряда  $[x_t, x_{t-\delta t}, x_{t-2\delta t}, \dots]$ , как легко измеримую характеристику сложных систем, и было показано, что ее можно использовать для восстановления скрытых многомерных траекторий. Данный метод, примененный к значениям окна перегрузки (cwnd), приводит к соотношениям [8]:

$$x[i] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \text{cwnd}_x[i-j]; \quad y[i] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \text{cwnd}_y[i-j]. \quad (7)$$

Здесь  $x$  и  $y$  обозначают два TCP потока. Величина  $N$  отвечает за масштаб усреднения и чем больше  $N$ , тем больше скрытых размерностей системы может быть восстановлено.

В данном случае функции  $cwnd(t)$  различны для каждого из хостов и зафиксированы только моменты изменения значения этой функции. Поэтому для применения вышеописанного метода и построения фазового портрета необходимо взять значения окна перегрузки в одинаковые моменты времени.

Фазовый портрет. При определенных параметрах тестового стенда рассматриваемая тестовая система проявляет довольно сложное поведение. В частности, ниже приведены графики зависимости  $cwnd(t)$  при  $C_f=5$  Мб/с,  $d_b=10$ мс,  $C_b=5$  Мб/с,  $Q_s=20$  пакетов (1 пакет = 536 байт, во всех проведенных численных экспериментах) (рис. 9) и более жесткий режим при  $Q_s=2$  пакета (рис. 10). На обоих графиках временного ряда можно заметить наличие регулярного «биения», т.е. каждый из TCP-потоков попеременно получает преимущество друг над другом на определенный промежуток времени в попытке захвата доступной полосы пропускания канала.

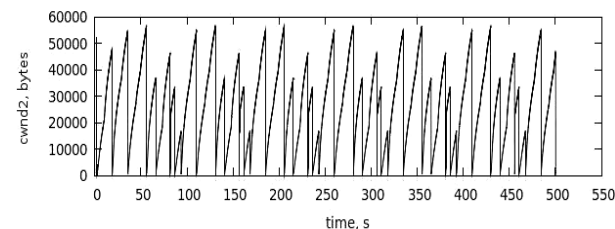
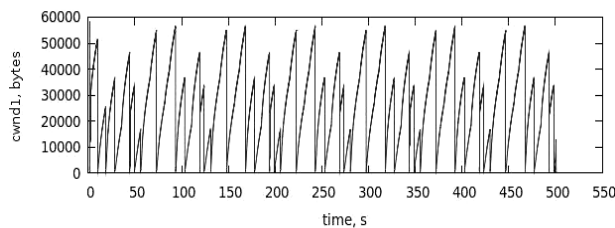


Рис. 9. Зависимость окна перегрузки  $cwnd$  от времени

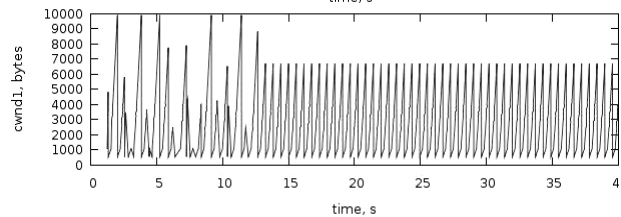
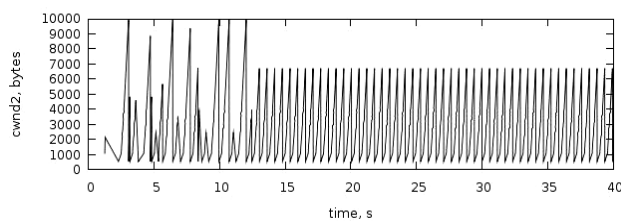


Рис. 10. Зависимость окна перегрузки  $cwnd$  от времени

Фазовые портреты, соответствующие рис. 9, 10, и полученные путем обработки данных, согласно

описанному в предыдущем разделе алгоритму, при  $N=2000$  и  $\delta t=10$ мс приведены на рис. 11 и 12.

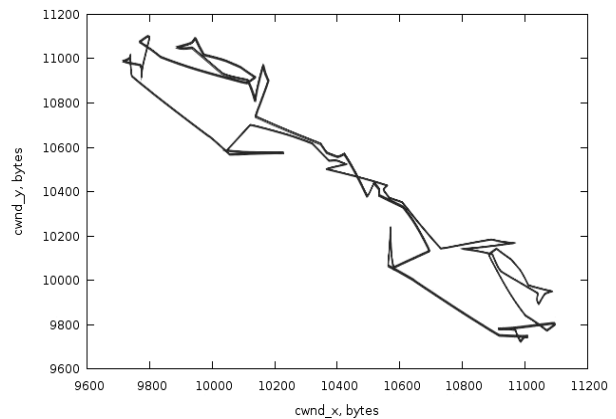


Рис. 11. Фазовый портрет модельной сети

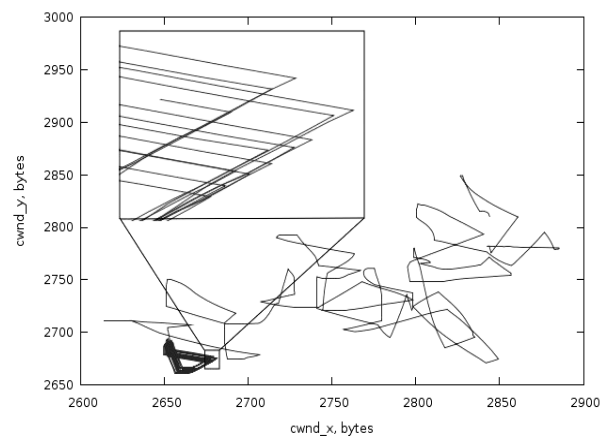


Рис. 12. Фазовый портрет модельной сети

Как можно видеть, фазовые траектории образуют предельный цикл, который имеет довольно тонкую структуру. Причем эта траектория довольно устойчива – при изменении времени старта TCP потоков друг относительно друга изображающая точка после небольшого «блуждания» начинает описывать ту же замкнутую траекторию.

В случае отсутствия перегрузки ( $Q_s=100$  пакетов) значение  $cwnd$  обоих хостов неограниченно растет, а на фазовом портрете нет никаких аномалий.

Максимальный показатель Ляпунова. Фазовые портреты удобны тем, что не только могут наглядно отобразить состояние динамической системы, но и дают возможность рассчитать максимальный показатель Ляпунова  $\lambda$  (Maximum Lyapunov Exponent) – величину, которая характеризует скорость разбегания близких траекторий, положительное значение которой обычно принимается как индикатор хаотического поведения системы. Однако построить фазовый портрет системы удастся только в небольшом количестве случаев. При добавлении одного нового отправителя в моделируемую систему, размерность исследуемого фазового пространства тоже будет увеличиваться на единицу и анализировать полу-



ченные данные будет все сложнее, не говоря о том, что визуализация фазового пространства возможна, только если его размерность меньше 4.

Таким образом, необходим инструмент, который позволит производить анализ получаемых данных независимо от количества имеющихся TCP-сеансов. Для этой цели был выбран пакет утилит TISEAN [25, 26], предназначенный для анализа временных рядов и основанный на теории нелинейных детерминированных динамических систем или теории хаоса. Значение максимального показателя Ляпунова можно вычислить, используя, например, алгоритм Бенеттина [28].

Для подсчета максимального показателя Ляпунова использовалась утилита `lyap_k` из пакета TISEAN.

Ниже представлены результаты, полученные после обработки и визуализации временного ряда `cwnd(t)`, соответствующего рис. 9 (см. рис. 13), с помощью утилиты `lyap_k`. На рисунке изображены кривые  $S(\epsilon, m, \Delta n)$  для пяти различных значений  $\epsilon$  и прямая  $y = a + bx$ , аппроксимирующая линейный участок этих кривых. Таким образом, значение  $b$  численно равно максимальному показателю Ляпунова.

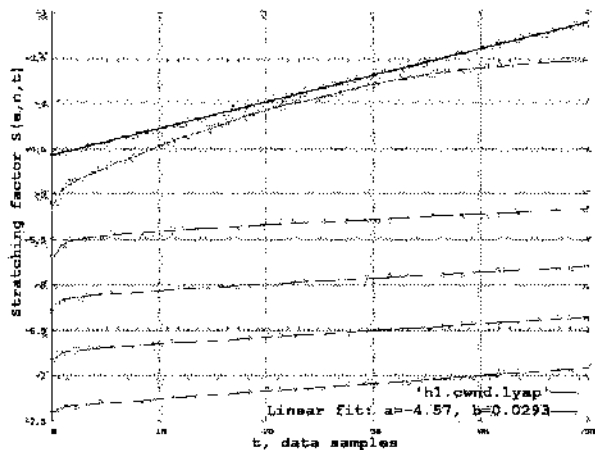


Рис. 13. Вычисление показателя Ляпунова

В случае отсутствия перегрузки показатель Ляпунова  $\lambda < 0$ , а значит, такая система не проявляет хаотического поведения.

### Математическое моделирование работы множества TCP-соединений

Процесс передачи пакетов в соответствии с протоколом TCP можно представить в виде колебательного процесса, частота которого определяется длиной пространственного интервала (или временем распространения сигнала) между двумя точками информационного сигнала. На время передачи информации оказывает влияние время задержки передачи подтверждений ACK, связанное с воздействием одного протокола на другой. Чем больше время

задержки, тем ближе поведение колебательного процесса к поведению физического маятника вблизи сепаратрисы [29]. На сепаратрисе маятник может задерживаться достаточно долго, что в рассматриваемом процессе связано со временем ожидания квитанции в условиях конкуренции различных независимых протоколов. Поскольку поведение маятника вблизи сепаратрисы имеет нелинейный характер, то в условиях, когда протоколы влияют друг на друга, рассматривается условие взаимодействия нелинейных маятников. Таким образом, одиночные протоколы описываются математическими маятниками, а когда протоколы влияют друг на друга, то наблюдается поведение нелинейного маятника вблизи сепаратрисы.

Набор соединений транспортного протокола TCP, разделяющих общий канал, представляет собой сложную самоорганизующуюся систему в смысле Г. Хакена [30]. Поведение каждого из объектов протокола в этой системе определяется алгоритмом протокола, однако, поведение всей системы, как целого, вообще говоря, не описывается совокупностью действий ее компонентов. Каждый объект протокола стремится максимально эффективно адаптироваться к доступным ресурсам сети в условиях кооперации с другими объектами этого протокола. В случае работы нескольких TCP-сессий по одному каналу неизбежно происходит взаимодействие соседних TCP-соединений, что позволяет рассматривать их как ансамбль макроскопических нелинейных систем.

С точки зрения передачи информации в каждом TCP-соединении происходит следующее: отправитель передает получателю сформированные им сегменты, а в ответ получает подтверждение получения сегмента (т.н. ACK, acknowledgement). С физической точки зрения в первом приближении этот процесс можно представить, как колебания некоторого математического маятника. Таким образом, каждое TCP-соединение может быть представлено в виде нелинейной колебательной системы.

В работе предлагается математическая модель взаимодействующих TCP-соединений в виде ансамбля нелинейных математических маятников, в котором каждое TCP-соединение выступает в роли такого маятника [31 – 33].

В этом случае  $n$  TCP-соединений можно описать следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} x_1'' + \omega_1^2 \sin x_1 &= \Phi_1(t, x_2, x_3, \dots, x_n); \\ x_2'' + \omega_2^2 \sin x_2 &= \Phi_2(t, x_1, x_3, \dots, x_n); \\ x_i'' + \omega_i^2 \sin x_i &= \Phi_i(t, x_1, x_3, \dots, x_n); \\ &\dots \\ x_n'' + \omega_n^2 \sin x_n &= \Phi_n(t, x_1, x_2, x_3, \dots), \end{aligned} \tag{8}$$

где  $x_i(t)$  – количество пакетов в  $i$ -м ТСП-соединении в момент времени  $t$ ,  $\Phi_n$  – функция, зависящая от битрейта (bitrate) каждого ТСП-соединения и, кроме того, определяющая взаимное влияние ТСП-соединений друг на друга,  $\omega_i^2$  – “собственная частота” ТСП-соединения, которая зависит, в первую очередь, от размера буфера, пропускной способности и задержки канала, в котором взаимодействуют все  $n$  ТСП-соединений.

Исходя из физических соображений, начальные условия должны быть заданы в виде

$$\begin{aligned} (x_1)_{t=0} &= x_1^0, & (x_2)_{t=0} &= x_2^0, \dots \\ (x_i)_{t=0} &= x_i^0, & \dots &, (x_n)_{t=0} = x_n^0; \\ (x'_1)_{t=0} &= 0, & (x'_2)_{t=0} &= 0, \dots \\ (x'_i)_{t=0} &= 0, & \dots &, (x'_n)_{t=0} = 0, \end{aligned}$$

где  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_i^0, \dots, x_n^0$  – начальные значения независимых переменных.

Характер движений маятника существенно зависит от начальной энергии (начальной амплитуды) колебаний (т.е. скорости генерации трафика в отдельных ТСП-соединениях).

Очевидно, что при тех значениях параметров колебательной системы, при которых наблюдаются хаотические явления, начальные значения должны быть выбраны достаточно большими, т.е. соответствующими нахождению изображающей точки вблизи сепаратрисы, являющейся границей раздела колебательных и вращательных движений каждого из маятников [29].

В первом приближении можно считать, что все  $\omega_i$  равны, т.к. все ТСП-соединения совместно используют линию связи и буфер маршрутизатора. Отличие состоит в фазе колебаний маятников, описывающих отдельные ТСП-соединения. Хотя в действительности эти частоты различаются, т.к. отдельные ТСП-соединения имеют различные значения RTT (Round Trip Time).

Взаимодействие соседних ТСП-соединений можно описать в виде функции

$$\alpha_i \prod_1^n x_k,$$

где в каждом произведении для  $i$ -го соединения отсутствует член с номером  $i$ , а  $\alpha_i$  определяет степень влияния различных ТСП-соединений на  $i$ -е соединение. В первом приближении можно считать эту величину одинаковой для всех ТСП-соединений, но в действительности эта величина также, очевидно, зависит от RTT различных ТСП-соединений.

Усредненный трафик в каждый момент времени в данной конфигурации сети можно вычислить как

$$\hat{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t), \tag{9}$$

где  $x_i(t)$  определяются в результате решения системы уравнений (1).

«Собственная частота» ТСП-соединения может быть определена как

$$\omega_i^2 \frac{C_{fi} \cdot B}{d_b}, \tag{10}$$

где обозначения параметров совпадают с ранее введенными:

$C_{fi}$  – скорость передачи в  $i$ -м соединении, Мб/с,

$d_b$  – задержка канала, мс),

вместо  $Q_s$  используется параметр  $B$  – минимальный размер буфера в узком месте (в пакетах).

Функции  $\Phi_i$  имеют вид, в котором содержится член, учитывающий взаимодействие связанных нелинейных маятников [34]:

$$\begin{aligned} \Phi_i(t, x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) &= A_i \sin(\Omega_i t) + \\ &\alpha_i \prod_{k=1}^n x_k, \quad k \neq i, \end{aligned} \tag{11}$$

где первый член представляет собой гармоническую возмущающую силу с постоянной амплитудой  $A_i$ , зависящей от битрейта (bitrate) каждого  $i$ -го ТСП-соединения, и частотой  $\Omega_i$ , а второй определяет влияние соседних ТСП-соединений на  $i$ -е ТСП-соединение,  $\alpha_i$  – коэффициент связи  $i$ -го ТСП-соединения с остальными соединениями.

Тогда система уравнений (8) принимает следующий вид

$$\begin{aligned} x_1'' + \omega_1^2 \sin x_1 &= A_1 \sin(\Omega_1 t) + \alpha_1 \prod_{k=2}^n x_k; \\ x_2'' + \omega_2^2 \sin x_2 &= A_2 \sin(\Omega_2 t) + \alpha_2 \prod_{k=1, k \neq 2}^n x_k; \\ x_i'' + \omega_i^2 \sin x_i &= A_i \sin(\Omega_i t) + \alpha_i \prod_{k=1, k \neq i}^n x_k; \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \tag{12}$$

$$x_n'' + \omega_n^2 \sin x_n = A_n \sin(\Omega_n t) + \alpha_n \prod_{k=1}^{n-1} x_k,$$

Фазовый портрет для любых двух ТСП-соединений может быть построен в результате решения системы (12), т.е. фазовые траектории определяются, как кривые в параметрической форме  $x_k(t), x_i(t)$ .

В этом случае будет учтено влияние остальных TCP-соединений на два соединения, выбранных для построения фазового портрета.

Для проверки адекватности модели (12) было проведено моделирование для тестового стенда (рис. 8) [35] с целью сравнения его результатов с результатами, полученными при использовании симулятора ns-3.

Для решения системы (12) использовался метод Рунге-Кутты в пакете MATLAB.

Для «жесткого» режима работы (наличие переполнения буфера и возникновения заторов) исходные данные для расчетов были следующие:

скорость генерирования данных  $C_{fi} = 5$  Мб/с;

задержка канала  $d_b = 10$ мс;

пропускная способность канала  $C_b = 5$  Мб/с;

объем буфера маршрутизатора

$$B = 2p = 10,72 \cdot 10^{-4} \text{ Мб}$$

(размер пакета  $p=536$  байт).

Временной ряд, полученный в результате решения системы (12), исследовался с помощью пакета TISEAN. Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 14 (фазовый портрет) и рис. 15 (максимальный показатель Ляпунова).

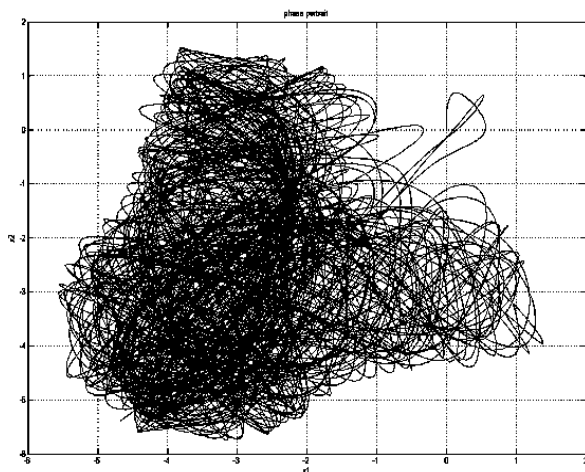


Рис. 14. Фазовый портрет

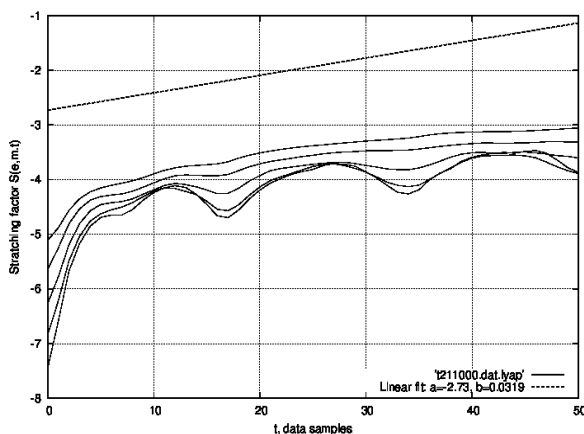


Рис. 15. Показатель Ляпунова  $\lambda = 0.0319$

Из анализа результатов (рис.14, 15) следует, что при приведенных значениях параметров рассматриваемая динамическая система находится в хаотическом режиме (значение показателя Ляпунова положительное).

Полученные данные говорят о наличии хаотического режима работы тестового стенда, что хорошо согласуется с результатами, полученными при моделировании работы стенда с помощью симулятора ns-3 (см. рис. 11, 13). Для вычисления показателя Ляпунова в этом случае также использовался пакет TISEAN.

В то же время для других параметров тестового стенда ( $B=100$  пакетов) система не проявляет хаотических свойств.

Некоторые расхождения в значениях максимального показателя Ляпунова для двух описанных методов моделирования связаны как с некоторой неопределенностью в самом методе расчета показателя Ляпунова в пакете TISEAN, так и с различием используемых математических моделей.

Кроме того, при построении фазового портрета в одном случае в качестве фазовых переменных использовались значения трафика (в пакетах), а в другом – значения окна перегрузки (swnd в байтах). Важен тот факт, что оба способа моделирования дают качественно один и тот же результат: в случае наличия хаотического режима в обоих случаях значение максимального показателя Ляпунова положительное, а при отсутствии хаотического режима – отрицательное.

Это подтверждает адекватность предложенной математической модели множества TCP-соединений, как ансамбля математических маятников и дает возможность использовать данную модель при моделировании реальных компьютерных сетей с протоколом TCP.

Было проведено моделирование тестовой сети с  $n$  отправителями ( $n=32$ ), т.е. в случае, когда 32 TCP-соединения работают одновременно в одном канале (т.н. «узкое место», bottleneck). В результате решения системы (12) был построен фазовый портрет для двух выбранных TCP-соединений, а также вычислен максимальный показатель Ляпунова. Результаты подтвердили адекватность модели (12).

Для той же тестовой сети с такими же параметрами был проведен физический эксперимент. Характер полученного временного ряда подтвердил вывод о наличии хаотического режима работы тестовой сети.

Результаты физического эксперимента качественно подтверждают результаты математического моделирования: при наличии хаотического режима работы сети наблюдается характерный вид временного ряда для трафика.

## Выводы и направления дальнейших исследований

В работе предложен новый подход к моделированию компьютерных сетей с протоколом TCP. Несколько TCP-соединений, сосуществующих в одном канале, представляются как ансамбль нелинейных математических маятников, описываемых системой дифференциальных уравнений вида (12). Приведено сравнение результатов, полученных при решении этой системы, с результатами имитационного моделирования с использованием сетевого симулятора ns-3. Обработка временных рядов (вычисление максимального показателя Ляпунова) в обоих случаях проводилась с помощью пакета анализа временных рядов TISEAN. Сравнение результатов, полученных указанными способами, показало их хорошее совпадение, что позволяет сделать вывод об адекватности предложенной модели ансамбля нелинейных математических маятников для описания поведения множества TCP-соединений в одном канале.

Основные результаты, полученные авторами в результате проведенных исследований:

- впервые разработана математическая модель множества TCP-соединений в одном физическом канале в виде ансамбля связанных нелинейных колебательных систем, использование которой позволило адекватно описать механизм и условия возникновения заторов, уменьшающих производительность компьютерных сетей, использующих транспортный протокол TCP;

- впервые разработан метод анализа поведения нескольких соседних TCP-соединений с использованием фазовых портретов и показателя Ляпунова, что позволяет исследовать хаотические режимы компьютерных сетей при различных значениях наиболее информативных параметров;

- впервые разработан метод анализа поведения компьютерных сетей при наличии перегрузок, позволяющий найти потенциально узкие места, в которых возможно образование (возникновение) заторов; применение данного метода дает возможность сформулировать рекомендации относительно выбора параметров сети при ее проектировании и дальнейшей эксплуатации в течение жизненного цикла.

Полученные результаты позволяют построить инженерную методику поиска «узких» мест в инфокоммуникационных сетях с протоколом TCP и дать рекомендации по уменьшению (устранению) их влияния на производительность сети.

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 автономных системах), возможно дать рекомендации по проектированию (и дальнейшей эксплуатации) таких сетей, которые позволят свести к минимуму отрицательные явления хаотизации.

## Список литературы

1. Postel J. *Transmission Control Protocol [Text]* / J. Postel // RFC793 (STD7). – 1981.
2. Braden R.T. *Requirements for Internet Hosts – Communication Layers [Text]* / R.T. Braden // RFC1122. – 1989.
3. Jacobson V. *TCP Extensions for High Performance [Text]* / V. Jacobson, R. Braden, D. Borman // RFC1323. – 1992.
4. Mandelbrot B. *Self-similar error clusters in communications systems and the concept of conditional systems and the concept of conditional stationarity [Text]* / B. Mandelbrot // *IEEE Transactions on Communications Technology*. – 1965. – Vol.13. – P. 71-90.
5. Leland W.E. *On the self-similar nature of ethernet traffic [Text]* / W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson // *IEEE/ACM Transactions of Networking*. – 1994. – Vol.2, Issue 1. – P. 10-15.
6. Floyd. S. *Simulator tests [Electronic resource]* – Available in <ftp://ftp.ee.lbl.gov/papers/simtests.ps>. Z ns is available at <http://www-nrg.ee.lbl.gov/>, 1995.
7. Zhu C. *A comparison of active queue management algorithms using the OPNET Modeler [Text]* / C. Zhu, O.W.W. Yang, J. Aweya, M. Oullete, D.Y. Montuno // *IEEE Communication Magazine*. – 2002. – Vol. 40, Issue 6. – P. 158-167.
8. Veres A. *The chaotic nature of TCP congestion control [Text]* / A. Veres, V. Boda // *In Proc. IEEE INFOCOM*. – 2000.
9. Packard N.H. *Geometry from a Time Series* / N.H. Packard, J.P. Crutchfield, J.D. Farmer, R.S. Shaw // *Phys.Rev.Lett.* – 1980. – Vol.45. – P. 712-716.
10. *NS software and documentation is available at the following site: <http://www-mash.CS.Berkeley.EDU/ns>.*
11. Карпунин А.В. *Использование симулятора NS-3 для изучения хаотического поведения высокоскоростных сетей связи [Текст]* / А.В. Карпунин, И.Н. Кудрявцев, А.В. Борисов, Д.И. Груцив // *Proc.of International Conference “Parallel and Distributed Computing Systems” PDSC 2013*. – 2013. – P. 152-156.
12. Fowlerand H. *Local Area Network Traffic Characteristics, with Implications for Broadband Network Congestion Management [Text]* / H. Fowlerand, W.E. Leland // *IEEEJSAC*. – 1991. – Vol. 9, Issue 7. – P. 1139-1149.
13. Feng W. *The Adverse Impact of the TCP Congestion-Control Mechanism in Distibuted Systems [Text]* / W. Feng, P. Tinnakornsrishupap // *In Proceedings of International Conference on Parallel Processing (ICPP'00)*. – 2000.
14. Veres A. *On the propagation of long-range dependence in the internet [Text]* / A. Veres, Zs. Kenesi, S. Molnar, G. Vattay // *In Proceedings of SIGCOMM2000*. – 2000.
15. Feng W. *The failure of TCP in High-Performance Computational Grids [Text]* / W. Feng, P. Tinnakornsrishupap // *In Proceedings of International Conference on Parallel Processing (ICPP'00)*. – 2000.
16. Paxson Vern. *Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling [Text]* / Vern Paxson, Sally Floyd // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 1995. – Vol. 3, No. 3. – P. 226-244.
17. *Wireshark [Electronic resource]*. – Available in: <http://www.wireshark.org/>.

18. Петров В.В. Статистический анализ сетевого трафика [Текст] / В.В. Петров. – МЭИ, ИПЭ, Москва, – 2003.

19. Feder J. *Fractals* / J. Feder. – New York, 1988.

20. Mandelbrot B.B. *The fractal geometry of nature* / B.B. Mandelbrot. – San Francisco: W.H. Freeman. – 1982.

21. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая [Текст] / М. Шредер. – Ижевск: Регулярная и хаотическая. – 2005.

22. Kantelhardt J.W. Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis [Text] / J.W. Kantelhardt, E. Koscielny-Bunde, H.H.A. Rego, S. Havlin, A. Bunde // *Physica A*. – 2001. – Vol. 295. – P. 441-454.

23. Kantelhardt J.W. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series [Text] / J.W. Kantelhardt, S.A. Zschiegner, A. Bunde, S. Havlin, E. Koscielny-Bunde, H.E. Stanley // *Physica A*. – 2002. – Vol. 316. – P. 87-114.

24. Kantelhardt J.W. *Fractal and Multifractal Time Series*. *Encyclopedia of Complexity and Systems, Science* (ed. R. A. Meyers) / J.W. Kantelhardt. – New York: Springer. – 2009. – P. 3754-3779.

25. TISEAN [Electronic resource]. – Available in: <http://www.mpi-pks-dresden.mpg.de/~tisean/>.

26. Kantz H. *Nonlinear Time Series Analysis* / H. Kantz, T. Schreiber. – 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge. – 2003. – 388 p.

27. Simulator NS-3 and concomitant documentation [Electronic resource]. – Available in: <http://nssnam.org>.

28. Benettin G. Lyapunov characteristic exponents for smooth Dynamical systems; a method for computing all of them. Part 1: Theory [Text] / G. Benettin, L. Galgani, A. Giorgilli, J.M. Strelcyn // *Meccanica. An International Journal of Theoretical and Applied Mechanics AIMETA*. – 1980. – Vol. 15, Issue 1. – P. 9-20.

29. Динамика движения нелинейного маятника под воздействием внешней периодической силы [Текст] / В.А. Ба-

лакирев, В.А. Буц, Ю.П. Мачехин, А.П. Толстолужский // *Письма в ЖТФ*. – 1983. – Т. 9, Вып. 23. – С. 1428-1431.

30. Haken H. *Synergetics. An Introduction*. [Text] / H. Haken. – Springer Ser. *Synergetics* (Springer, Berlin, Heidelberg). 1983. – Vol.1, 3rd ed.

31. Карпухин А.В. Математическое моделирование хаотических явлений в высокоскоростных сетевых информационных системах с протоколом TCP [Текст] / А.В. Карпухин // *Системи обробки інформації: зб.наук.пр.* – X.: XV ПС, 2009. – Вип. 4(78). – С. 64-69.

32. Карпухин А.В. Анализ поведения информационных систем с большой нелинейностью [Текст] / А.В. Карпухин, Ю.П. Мачехин // *Материалы междунауч. конф. ISDMCI'2008, 18-23 мая 2008 г. Евпатория; ред. кол. В.И. Литвиненко (ред.)*. Т. 3. – Херсон: ХНТУ, 2008. – С. 141-162.

33. Карпухин А.В. Математическое моделирование сильнонелинейных информационных систем [Текст] / А.В. Карпухин, Л.О. Кириченко, Ю.П. Мачехин, Т.А. Радишова // *Материалы 1-й междунауч. научн. конф. «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития, 30 сентября – 3 октября 2008г. Судак / ред. кол.: Н.И. Слипченко*. – X.: ХНУРЭ. – 2008. – С. 326-329.

34. Рабинович М.И. Введение в теорию колебаний и волн. / М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 560 с.

35. Haengmuk Cho. *Computer Simulation of Chaotic Phenomena in High-Speed Communication Networks* [Text] / Cho Haengmuk, A.V. Karpukhin A.V., I.N. Kudryavtsev, A.V. Borisov, D.I. Gritsiv // *Journal of Korean Institute of Information Technology*. – 2013. – Vol.11, No.3. – P. 113-122.

Поступила в редколлегию 3.11.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.Г. Удовенко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### МОДЕЛЮВАННЯ ХАОТИЧНИХ ЯВИЩ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З ПРОТОКОЛОМ TCP

О.В. Карпухин, Д.І. Гриців, О.А. Ткаченко

У численних роботах, присвячених дослідженню мережевого трафіку, було показано, що в високошвидкісних мережах можливе виникнення хаотичних режимів роботи, основною причиною якого є поведінка протоколу TCP. Наявність таких режимів призводить до значного зменшення пропускної здатності всієї мережі, особливо в так званих «вузьких місцях». Проте, до цих пір, не були запропоновані моделі, які адекватно описують інфокомунікаційні системи і дозволяють застосувати весь арсенал класичних методів аналізу нелінійних динамічних систем. У роботі пропонується новий підхід до аналізу поведінки інфокомунікаційних систем з протоколом TCP - розгляд їх як нелінійних динамічних систем, які проявляють хаотичні властивості при певних значеннях параметрів. Побудовано фазові портрети досліджуваних систем, розраховані значення максимального показника Ляпунова для різних значень основних параметрів систем. Проведено фізичний експеримент в реальній мережі. Вирішена задача оптимізації параметрів інфокомунікаційної системи з точки зору відсутності небажаних хаотичних режимів.

**Ключові слова:** самоподоба, хаос, перевантаження, втрата пакетів, TCP / IP.

### CHAOTIC PHENOMENA MODELING IN INFOCOMMUNICATION SYSTEMS WITH TCP PROTOCOL

A.V. Karpukhin, D.I. Gritsiv, A.A. Tkachenko

It was shown in the numerous papers devoted to the study of network traffic that chaotic operation modes are possible to occur in high-speed networks, which is the main reason of TCP protocol behaviour. The presence of such modes leads to a significant decrease in throughput of the network, especially in so-called "bottlenecks". However, there hasn't been suggested the models adequately describe the infocommunication systems and allow us to apply the whole arsenal of the classical methods of analysis of nonlinear dynamical systems so far. The paper suggests a new approach to the analysis of the behavior of infocommunication systems with the TCP protocol - considering them as nonlinear dynamical systems that manifest chaotic properties for certain values of the parameters. The phase portraits of the systems were studied and there were calculated the values of the maximum Lyapunov exponent for different values of the main parameters of the systems. An experiment was conducted in a real physical network. The problem of optimizing the parameters of infocommunication systems was solved in terms of lack of undesired chaotic modes.

**Keywords:** self-similarity, chaos, congestions, loss of packets, TCP / IP.