

УДК 004.7

Система формирования трафика компьютерной сети на основе самоорганизованной критичности

Д.В. Бельков, Е.Н. Едемская

Донецкий национальный технический университет
belkov65@list.ru

Бельков Д.В., Едемская Е.Н. Система формирования трафика компьютерной сети на основе самоорганизованной критичности. Одной из парадигм синергетики является теория самоорганизованной критичности (SOC). В случае подхода SOC фрактальный сигнал является выходным сигналом нелинейной динамической системы, находящейся в критическом состоянии. Выходной сигнал – результат процесса самоорганизации. В данной работе для формирования трафика при дифференцированном обслуживании (DiffServ) предлагается система, основанная на понятии самоорганизованной критичности (Self-Organized Criticality, SOC). Разработана модель SOC BTWIDm, являющаяся модификацией модели Бака-Танга-Вайзенфельда. Предложена структура системы формирования трафика, выполняющая алгоритм BTWIDm. Приведены результаты вычислительного эксперимента при формировании самоподобного трафика. Исследования выполнены в среде Matlab. Самоподобный входной трафик был сглажен с помощью предложенной системы. Коэффициент пачечности выходного потока уменьшился на 20 единиц относительно коэффициента пачечности входного потока.

Ключевые слова: самоподобный трафик, качество обслуживания, дифференциальное обслуживание, система формирования трафика, самоорганизованная критичность, модель Бака-Танга-Вайзенфельда

Введение

В условиях развития телекоммуникаций до уровня сетей следующего поколения NGN (Next Generation Networks), обеспечивающих предоставление неограниченного набора услуг с заданными характеристиками качества обслуживания QoS (Quality of Service), являются актуальными задачи повышения качества обслуживания. Расширение спектра услуг и рост сложности телекоммуникационных систем и сетей требует решения проблемы разработки адекватных методов анализа и синтеза таких систем с целью получения достоверных оценок их характеристик, реализации задач их оптимизации в соответствии с выбранным критерием качества обслуживания и разработки соответствующих алгоритмов управления.

Количественная сторона процессов обслуживания потоков сообщений (трафика) в системах распределения информации (СРИ) является предметом теории трафика. На основе этой теории разрабатываются методы оценки характеристик качества обслуживания. Основным содержанием теории трафика является исследование пропускной способности СРИ, тесно связанное с оценкой QoS.

Теория трафика оперирует не с самими СРИ, а с их математическими моделями.

Многообразие видов сетей и способов выделения сетевого ресурса для обслуживания трафика требует разработки моделей, которые учитывают реальный характер потоков сообщений и детали обслуживания мультисервисного трафика различных коммуникационных приложений. Построить единственную модель, которая бы давала ответы на все вопросы относительно функционирования компьютерных сетей практически невозможно. На основе моделей СРИ разрабатываются методы оценки характеристик QoS, достоверность которых зависит от адекватности модели реальной ситуации, которая может возникнуть при проектировании и эксплуатации. Оценка качества обслуживания трафика является одним из важнейших научных направлений в исследованиях компьютерных сетей. В современных сетях потоки пакетов формируются множеством источников требований на предоставление сетью услуги и сетевых приложений, обеспечивающих услуги передачи информации. Пользователи, создающие потоки пакетов, существенно отличаются между собой значениями удельной интенсивности нагрузки, и поэтому трафик является неоднородным. Он имеет определенные требования к QoS и долгосрочные зависимости в интенсивности, например, из-за повторной передачи неверно принятых пакетов. Передачу

потоков различных служб обеспечивает единая сеть. Поскольку источники каждой службы могут иметь разные скорости передачи информации или изменять ее в процессе сеанса связи, то потокам пакетов свойственна пачечность (burstness). В реализации трафика присутствует некоторое количество больших пульсаций при относительно малом среднем уровне трафика. Пакеты поступают на узел не по отдельности, а пачкой. Это явление ухудшает характеристики (увеличивает потери, задержки, джиттер пакетов) при прохождении трафика через узлы сети. При анализе пачечного трафика может быть использована модель самоподобного (self-similarity) процесса [1-4].

Для формирования самоподобного трафика согласно определенным требованиям в данной работе предлагается система, основанная на понятии самоорганизованной критичности (Self-Organized Criticality, SOC).

Целью статьи является разработка системы формирования трафика на базе SOC. В работе решаются задачи построения модели SOC BTW1Dm и создания структуры системы формирования трафика, которая выполняет алгоритм BTW1Dm. Показаны результаты вычислительного эксперимента.

Модели BTW1D и BTW1Dm

В нелинейной динамике разработаны три парадигмы. В рамках первой было показано, что во многих открытых нелинейных системах вдали от равновесия происходит самоорганизация. При этом возникают пространственно-неоднородные стационарные структуры, которые И. Р. Пригожин предложил называть диссипативными структурами. Во второй парадигме основное внимание было уделено динамическому хаосу – сложному непериодическому поведению в детерминированных системах, где нет случайных факторов. Основным результатом исследований стало установление факта границ прогнозирования, т.е. существования конечного времени, через которое предсказание поведения системы становится невозможным. В основе этих парадигм лежат представления о самоорганизации и выделении из большого числа переменных, описывающих систему, небольшого числа величин, которые называются параметрами порядка. К ним на больших интервалах времени подстраиваются остальные степени свободы системы.

Третья парадигма связана с теорией самоорганизованной критичности. Эта теория призвана объяснить такие закономерности, как масштабная инвариантность, прерванное равновесие, фликкер-шум [5]. Нужно отметить, что именно такие закономерности

экспериментально найдены при исследованиях современного трафика [6].

В 1988 году американскими учеными П. Баком, Ч. Тангом и К. Вайзенфельдом было введено понятие о самоорганизованной критичности [7]. Базовой моделью теории SOC является куча песка. Рассмотрим кучу песка, изображенную на рисунке 1.

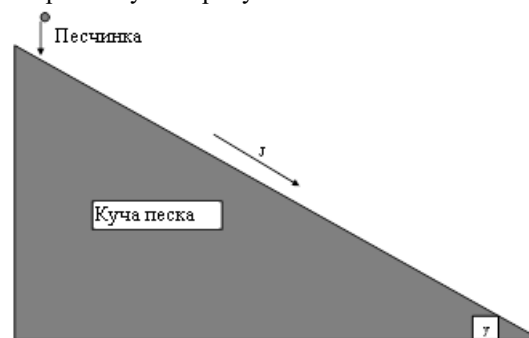


Рисунок 1 – Куча песка

Будем предполагать сцепление между песчинками достаточно большим. При этом возможно лишь поверхностное перемещение песка, причем инерцией его движения можно пренебречь. В таком случае состояние системы полностью определяется наклоном поверхности. В тех местах, где локальный наклон оказывается больше порога устойчивости, происходит осыпание песчинок вниз по склону на соседние участки поверхности. Состояние песка определяется углом наклона поверхности γ . При его изменении происходит фазовый переход от неподвижного состояния к состоянию непрерывного тока песка. При токе, соответствующем добавлению одной песчинки за один шаг, система самоорганизуется в состояние с критическим наклоном $\gamma = \gamma_c$. Если средний наклон поверхности γ меньше чем γ_c , то песок неподвижен. Если наклон превышает значение γ_c , возникает спонтанный ток песка J по поверхности. Возникает фазовый переход, в котором управляющим параметром является наклон γ , а параметром порядка – ток песка J . Критическое значение наклона γ_c разделяет хаотическую ($\gamma < \gamma_c$) и упорядоченную ($\gamma > \gamma_c$) фазы. Обе эти фазы соответствуют состоянию системы устойчивому к малым возмущениям. В хаотической фазе они еще быстро затухают во времени и пространстве, а в упорядоченной – уже не могут существенно влиять на величину тока. И только в критической точке, одна добавленная песчинка может вызывать лавину. В песчаной куче существует много областей неустойчивости, но критическое состояние является устойчивым. Такие характеристики тесно связаны с фракталами.

Самым простым вариантом модели кучи песка является одномерная модель Бака-Танга-Вайзенфельда (BTW-1D). Ее работу рассмотрим на примере [8], показанном на рисунке 2.

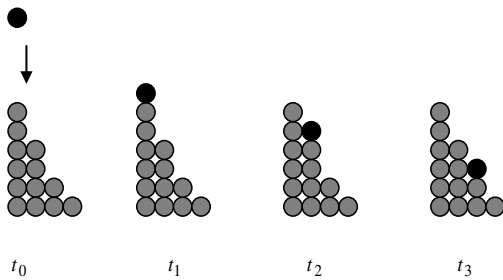


Рисунок 2 – Модель BTW-1D

Пусть задан критический порог $z_c = 2$ и куча песка, имеющая 4 слоя. В начальном состоянии первый слой кучи содержит 6 песчинок, второй – 4, третий – 2 и четвертый слой – 1 песчинку. Уровень песка в каждом слое отличается от уровня предыдущего слоя не больше, чем на величину z_c : $(6-4)=2$, $(4-2)=2$, $(2-1)=1$. По этой причине куча песка находится в устойчивом состоянии (песок неподвижен). Пуск модели выполняется добавлением новой песчинки на вершину. При этом уровень песка в первом слое повышается, и он становится неустойчивым: $(6+1)=7$, $(7-4)=3 > z_c$. В таком случае песчинка не остается на первом слое, а передвигается на второй слой и количество песка в первом слое возвращается к значению 6. Уровень песка во втором слое повышается и он становится неустойчивым: $(4+1)=5$, $(5-2)=3 > z_c$. Поэтому песчинка не останавливается на втором слое, передвигается на третий слой и количество песка во втором слое возвращается к значению 4. Уровень песка в третьем слое повышается, но он остается устойчивым: $(2+1)=3$, $(3-1)=2 = z_c$. Поэтому песчинка останавливается на третьем слое. Первый шаг моделирования завершен. На нем прошла лавина перемещений от первого к третьему слою.

Каждый новый шаг будет начинаться добавлением новой песчинки на вершину. На одном шаге моделирования возможно 3 ситуации: 1) новая песчинка остается на вершине (лавина нет), 2) новая песчинка останавливается на каком-то слое кучи, т.е. лавина не достигает основания кучи, 3) новая песчинка не останавливается ни на одном слое кучи и покидает кучу (лавина достигает основания кучи).

Такой процесс формирования кучи песка является процессом самоорганизации потому, что он идет без внешнего управляющего сигнала. Рост уровня слоев управляется правилами (1),

где z_i – количество песчинок, содержащихся в слое i .

$$\begin{aligned} z_{i+1} &= z_{i+1} + 1, z_i - z_{i+1} > z_c \\ z_i &= z_i + 1, z_i - z_{i+1} \leq z_c \end{aligned} \quad (1)$$

Величины z_i являются управляющими параметрами системы, значение z_c является критическим значением для управляющих параметров. Достижение этого значения качественно изменяет поведение системы. Процесс формирования кучи песка является процессом самоорганизации управляющих параметров в критическое состояние и поэтому система является системой самоорганизованной критичности.

В данной статье для системы формирования сетевого трафика предлагается модифицированная модель BTW-1Dm. Модификация заключается в следующем: 1) каждая песчинка имеет свой объем, т.е. песчинки не являются одинаковыми, 2) каждый слой имеет свой критический уровень (порог), 3) рост уровня слоев управляется правилами (2), где $z_{i,j}$ – количество песчинок, содержащихся в слое i на временном шаге j , x_j – объем песчинки j , z_{ci} – критический порог слоя i . Если добавление песчинки j к слою i приводит к превышению критического порога z_{ci} , то она перемещается на следующий уровень, иначе – песчинка добавляется на уровень i .

$$\begin{aligned} z_{i+1,j} &= z_{i+1,j} + x_j, z_{i,j} + x_j - z_{i,j-1} > z_{ci} \\ z_{i,j} &= z_{i,j} + x_j, z_{i,j} + x_j - z_{i,j-1} \leq z_{ci} \end{aligned} \quad (2)$$

Величины $z_{i,j}$ являются управляющими параметрами системы, значение z_{ci} является критическими значениями для управляющих параметров. Такая модификация сохраняет самоорганизованную критичность системы.

Система формирования трафика

Для обеспечения гарантированного качества обслуживания комитет IETP разработал модель дифференцированного обслуживания разнотипного трафика - DiffServ. Пакеты каждого класса должны обрабатываться в соответствии с определенными для этого класса требованиями качества обслуживания. Модель DiffServ описывает архитектуру сети как совокупность пограничных участков и ядра. Пример сети соответствующий этой модели показан на рисунке 3. Пограничные маршрутизаторы классифицируют и нормализуют трафик. Нормализация трафика предусматривает измерение его параметров, проверку соответствия заданным правилам предоставления услуг, профилирование. При

этом пакеты, не удовлетворяющие установленным правилам, теряются.

Преимущество модели DiffServ заключается в том, что она позволяет разделить весь трафик на небольшое количество классов и не анализировать каждый информационный поток отдельно. Для DiffServ при независимом поведении маршрутизаторов (PHB) определены два варианта обслуживания:

- срочная пересылка пакетов (Expedited Forwarding, EF);
- гарантированная пересылка пакетов (Assured Forwarding, AF).

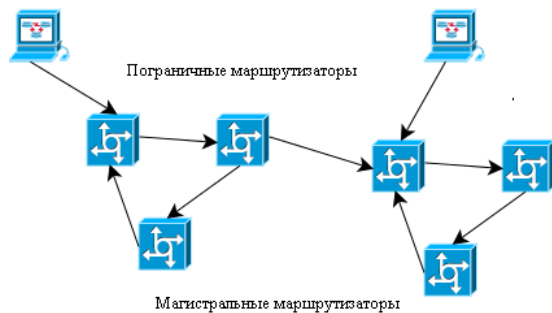


Рисунок 3 – Модель DiffServ

Вариант EF является наивысшим уровнем качества обслуживания. Любой трафик, с интенсивностью превышающей заданный уровень, отбрасывается. Вариант AF предусматривает четыре класса трафика. Трафик, интенсивность которого превышает заданный уровень, доставляется с меньшей вероятностью. Качество его обслуживания может быть снижено.

Механизм обеспечения QoS на уровне сетевого устройства в DiffServ, использует четыре операции. Сначала пакеты классифицируются на основании их заголовков. Потом они маркируются в соответствии с выполненной классификацией (в поле DiffServ). В зависимости от маркировки выбирается алгоритм передачи, позволяющий избежать заторов в сети. Заключительная операция состоит в организации очередей с учетом приоритетов [9].

На рисунке 4 показана структура сетевого процессора C5e фирмы Motorola [10].

На рисунке 4 выделена часть структуры, совпадающая по своему назначению со структурой, которая разрабатывается в статье на базе SOC. В сетевом процессоре C5e используется разновидность алгоритма Token Bucket - srTCM. Он контролирует пиковую (PIR) и выполнимую (CIR) скорость трафика, создает поток зеленых конформных пакетов, поток желтых малоконформных пакетов, поток красных неконформных пакетов.

Diffserv QoS Implementation for Wireless Network Interface (WNI)

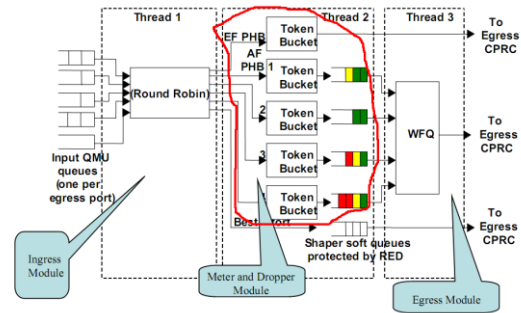


Рисунок 4 – Структура сетевого процессора C5e

Предлагаемая в статье система формирования трафика показана на рисунке 5.

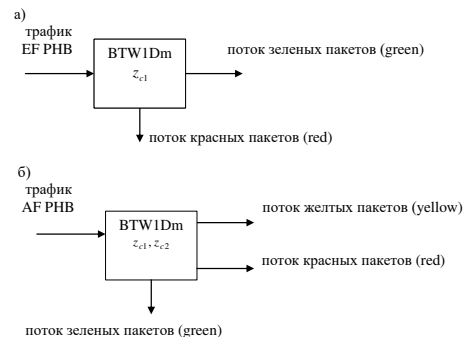


Рисунок 5 – Система формирования трафика на базе SOC

Система выполняет алгоритм BTW1Dm при следующей интерпретации для входного трафика EF PHB: $z_{1,j}$ - уровень скорости выходного потока зеленых конформных пакетов на такте j , $z_{2,j}$ - уровень скорости выходного потока красных неконформных пакетов на такте j , x_j - скорость входного потока на такте j , z_{c1} - заданная достижимая скорость трафика. Система по формулам (2) формирует и маркирует выходные потоки.

Если система применяется для входного трафика AF PHB определенного класса, то используется алгоритм BTW1Dm при следующей интерпретации: $z_{1,j}$ - уровень скорости выходного потока зеленых конформных пакетов на такте j , $z_{2,j}$ - уровень скорости выходного потока желтых малоконформных пакетов на такте j , $z_{3,j}$ - уровень скорости выходного потока красных неконформных пакетов на такте j , x_j - скорость входного потока на такте j , z_{c1} - заданная достижимая скорость трафика z_{c2} - заданная пиковая скорость трафика.

Рассмотрим предложенную систему в сравнении с Token Bucket. Система Token Bucket имеет: входной буфер пакетов, буфер выходных пакетов, буфер жетонов и сервер для сравнения входного потока с потоком жетонов. Жетоны генерируются с заданной интенсивностью и помещаются в очередь. Если буфер жетонов полон, то новый жетон теряется. В случае отсутствия жетонов пакеты должны сохраняться в буфере. Алгоритм Token Bucket основан на сравнении трафика с эталонным потоком, который представлен жетонами. Реализация алгоритма требует наличия счетчика, считающего жетоны. Счетчик увеличивается на N байт через равные интервалы времени и уменьшается при передаче пакета на объем переданного пакета. Когда счетчик уменьшается до нуля, передача пакетов останавливается. В случае обслуживания EF пакет перемещается сервером из входного буфера в выходную очередь зеленых пакетов, если в ведре достаточно жетонов, иначе сервер перемещает пакет в очередь красных пакетов.

Состав системы Token Bucket показан на рисунке 6а. Состав предлагаемой системы показан на рисунке 6б.

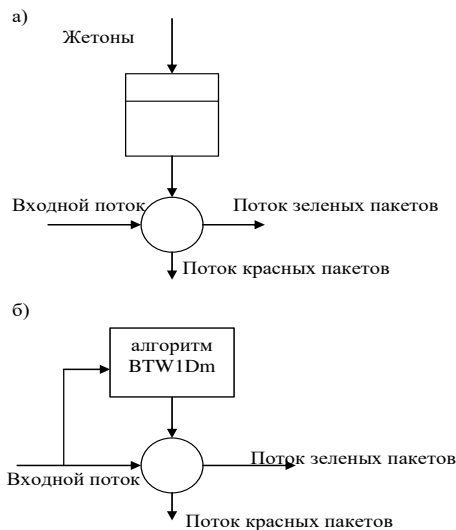


Рисунок 6 – Структуры Token Bucket и BTW1Dm

В предложенной системе входной пакет попадает во входной буфер, его копия поступает в модуль BTW1Dm, который маркирует пакет по формулам (2). Сервер согласно маркировке перемещает пакет в выходную очередь зеленых пакетов или в очередь красных пакетов.

Разработанная система предназначена для достижения того же результата, что и Token Bucket. В данной статье не ставится цель показать преимущества предложенной системы перед Token Bucket. Такая задача нуждается в дополнительных исследованиях. Однако разработанная система имеет принципиальное

отличие от ведра жетонов. Система Token Bucket является организационной (кибернетической) системой. Объект управления (входной пакет) изменяет свое состояние (перемещается из входного буфера в выходную очередь) при поступлении внешнего управляющего сигнала (жетона из ведра жетонов). Предложенная в статье система является самоорганизованной (синергетической) системой. Объект управления (входной пакет) изменяет свое состояние (перемещается из входного буфера в выходную очередь) без внешнего управляющего сигнала. Такое перемещение выполняется при поступлении внутреннего управляющего сигнала (маркированной копии пакета из модуля BTW1Dm).

Для проверки работы предложенной системы выполнен вычислительный эксперимент в среде Matlab. Входной трафик показан на рисунке 7.

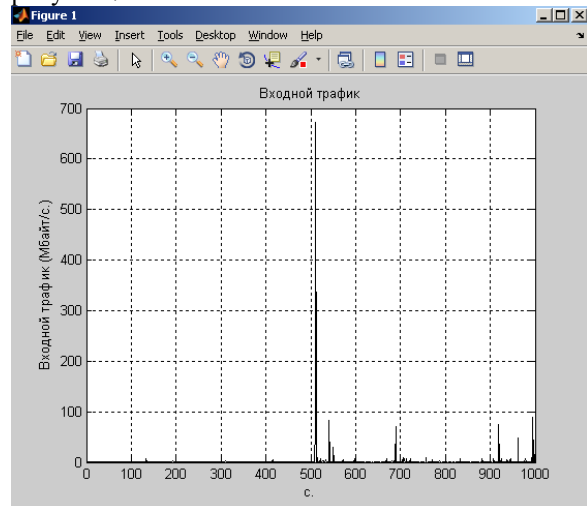


Рисунок 7 – Входной трафик

Это временной ряд скорости (Мбайт/с.) пакетов беспроводной сети доступа [11]. В первом варианте эксперимента работа системы исследовалась для случая передачи в режиме AF PNB при Мбайт/с. (CIR) и Мбайт/с. (PIR). Результаты эксперимента показаны на рисунках 8-10.

Система сформировала выходной поток зеленых пакетов, который является сглаженным потоком по отношению ко входному трафику. Были сформированы желтый поток малоконформных пакетов, который составляют более скоростные пакеты и красный поток пакетов, имеющих недопустимо большую скорость.

Максимальная скорость входного трафика превышает 6 Мбайт/с., максимальная скорость желтого трафика превышает 3 Мбайт/с., а максимальная скорость зеленого трафика не достигает 3 Мбайт/с. Скорость красного трафика находится в пределах от 4,5 до 6,3 Мбайт/с.

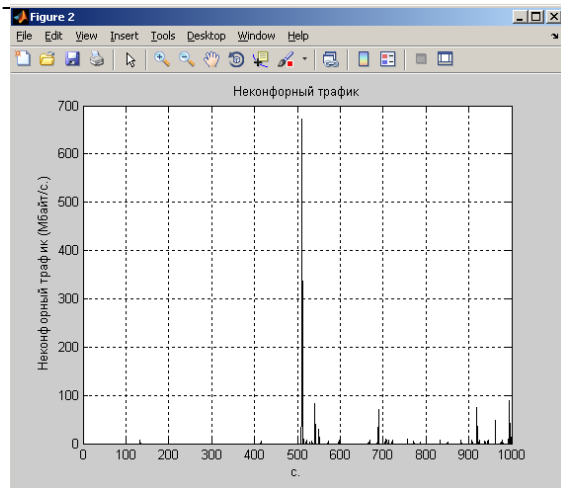


Рисунок 8 – Режим AF PNB. Неконформный трафик

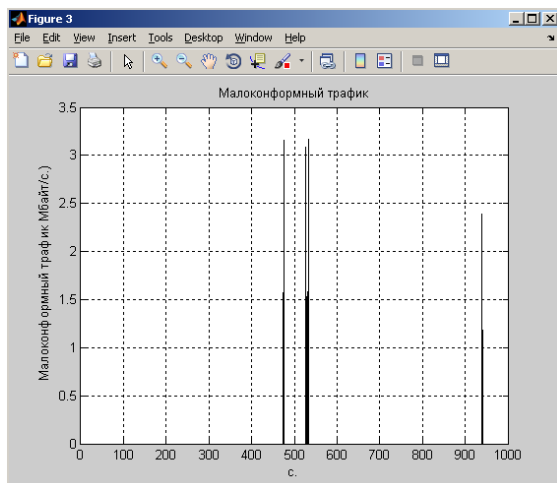


Рисунок 9 – Режим AF PNB. Малоконформный трафик

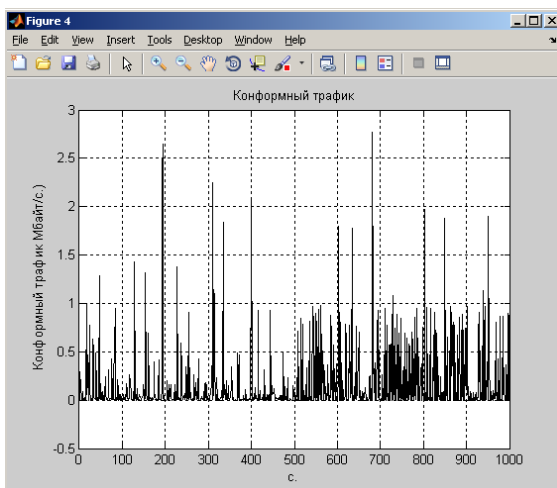


Рисунок 10 – Режим AF PNB. Конформный трафик

Входной трафик имеет показатель Херста $H_{input} = 0,419$, коэффициент пачечности

$b_{input} = 50,632$. Выходной зеленый трафик имеет показатель Херста $H_{green} = 0,463$, коэффициент пачечности $b_{green} = 27,037$. Таким образом, коэффициент пачечности зеленого трафика был снижен по отношению ко входному трафику. Коэффициенты пачечности желтого и красного трафика выросли относительно входного трафика и составили соответственно: $b_{yellow} = 229,274$, $b_{red} = 295,868$.

Во втором варианте эксперимента работа системы исследовалась для случая передачи в режиме EF PNB при $z_{c1} = 3,5$ Мбайт/с. Входной трафик не изменился. Результат эксперимента показан на рисунке 11.

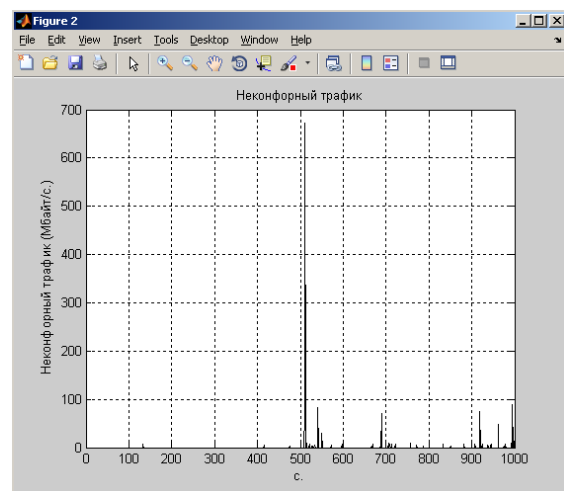


Рисунок 11 – Режим EF PNB. Неконформный трафик

Система сформировала выходной поток зеленых пакетов, который является сглаженным потоком относительно входного трафика. Был сформирован красный поток пакетов, имеющих сверхбольшую скорость. Максимальная скорость зеленого трафика достигает 3,2 Мбайт/с. Скорость красного трафика находится в пределах от 4,5 до 6,3 Мбайт/с. Выходной зеленый трафик имеет показатель Херста $H_{green} = 0,328$, коэффициент пачечности $b_{green} = 30,344$.

Таким образом, коэффициент пачечности зеленого трафика снижен по отношению ко входному трафику. Коэффициент пачечности красного трафика не изменился по сравнению с первым экспериментом: $b_{red} = 295,868$.

Выводы

В работе получены следующие результаты:

1. Разработана модель BTWIDm, которая является модификацией модели Бака-Танга-Вайзенфельда.

2. Разработана структура системы формирования трафика, выполняющая алгоритм BTW1Dm.

3. В ходе вычислительного эксперимента с помощью предложенной системы коэффициент пачечности исходного потока уменьшился на 20 единиц.

Литература

1. Park K. Self-Similar Network Traffic: An Overview. [Электронный ресурс], 2003. – Режим доступа: <http://pi.314159.ru/park1.pdf>
2. Willinger W., Taqqu M.S., Errimilli A. A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks. [Электронный ресурс], 2001. – Режим доступа: <http://linkage.rockefeller.edu/wli/reading/taqqu96.pdf>
3. Hae-Duck Joshua Jeong. Modeling of self-similar teletraffic for simulation. University of Canterbury, 2002. – 297 p.
4. Ложковський А.Г. Аналіз і синтез систем розподілу інформації в умовах мультисервісного трафіка. Автореферат дисертації. Одеса. - 2010. – 38 с.
5. Подлазов А.В. Теория самоорганизованной критичности – наука о сложности. [Электронный ресурс], 2008. – Режим доступа: <http://www.nonlin.ru/articles/podlazov/soc>
6. Городецкий А.Я., Заборовский В.С. Информатика. Фрактальные процессы в компьютерных сетях. — СПб.: СПбГТУ, 2000. – 102 с.
7. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality. //Physical review, Vol 38, № 1, 1988. p. 364-375.
8. Aschwanden M. Self-organized criticality in astrophysics. [Электронный ресурс], 2012. – Режим доступа: <http://ua.bookfi.org/book/1076440>
9. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. - СПб: Питер, 2010. – 944 с.
10. C-5e Network Processor. [Электронный ресурс], 2012. – Режим доступа: http://www.freescale.com/files/netcomm/doc/data_sheet/C5ENPA1-DS.pdf
11. DieselNet Fall 2007 - AP Connectivity. [Электронный ресурс], 2007. – Режим доступа: <http://traces.cs.umass.edu/index.php/Network/Network>

Бельков Д.В., Едемская Е.Н. Система формирования трафика компьютерной сети на основе самоорганизованной критичности. Одной из парадигм синергетики является теория самоорганизованной критичности (SOC). В случае подхода SOC фрактальный сигнал является выходным сигналом нелинейной динамической системы, находящейся в критическом состоянии. Выходной сигнал – результат процесса самоорганизации. В данной работе для формирования трафика при дифференцированном обслуживании (DiffServ) предлагается система, основанная на понятии самоорганизованной критичности (Self-Organized Criticality, SOC). Разработана модель SOC BTW1Dm, являющаяся модификацией модели Бака-Танга-Вайзенфельда. Предложена структура системы формирования трафика, которая выполняет алгоритм BTW1Dm. Приведены результаты вычислительного эксперимента при формировании самоподобного трафика. Эксперимент выполнен в среде Matlab. Самоподобный входной трафик был сглажен с помощью предложенной системы. Коэффициент пачечности выходного потока уменьшился на 20 единиц относительно коэффициента пачечности входного потока.

Ключевые слова: самоподобный трафик, качество обслуживания, дифференциальное обслуживание, система формирования трафика, самоорганизованная критичность, модель Бака-Танга-Вайзенфельда

Belkov D.V., Edemskaya E.N. The traffic formed system based self-organized criticality. One of the synergetic paradigms is the theory of self-organized criticality (SOC). In case SOC approach, fractal signal is the output signal of the nonlinear dynamic system, but this system is in the critical state. The output signal is the result of the self-organization (synergetic) process.. In this article the traffic formed system based self-organized criticality (SOC) is present for the difference service (DiffServ). The SOC model BTW1Dm is design. It is the modification of the Bak–Tang–Wiesenfeld (BTW-1D) model. The system structure to run the BTW1Dm algorithm is design. The results of the calculating experiments for self-similar traffic formed is present. An experiment was executed in the Matlab environment. Output self-similar traffic was smoothed out by the present system. The burst coefficient job output stream diminished on 20 units in relation to the burst coefficient of input stream.

Keywords: self-similar traffic, quality of service, differential service, traffic formed system, Self-Organized Criticality, Bak–Tang–Wiesenfeld model.

Статья поступила в редакцию 20.11.2016

Рекомендована к публикации д-ром техн. наук В.Н. Павлышом