

УДК 004.7

Система формирования трафика компьютерной сети на основе самоорганизованной критичности

Бельков Д.В., Едемская Е.Н.

Донецкий национальный технический университет
belkov65@list.ru

Бельков Д.В., Едемская Е.Н. «Система формирования трафика компьютерной сети на основе самоорганизованной критичности». 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, которая выполняет алгоритм BTWIDm. Приведены результаты вычислительного эксперимента при формировании самоподобного трафика. Эксперимент выполнен в среде Matlab. Самоподобный входной трафик был сглажен с помощью предложенной системы. Коэффициент пачечности исходного 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), становятся все более 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. По этой теории разрабатываются научно обоснованные методы оценки характеристик качества обслуживания. В первую очередь учитывается стохастический характер трафика. Основным содержанием теории трафика является исследование пропускной способности СРИ, которое тесно связано с оценкой QoS.

Теория трафика оперирует не с самими СРИ, а с их математическими моделями. Многообразие видов и топологии сетей, структур систем 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 (речь, видео, данные). 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 разнородным и с долгосрочными зависимостями в интенсивности (например, из-за повторной передачи неверно принятых пакетов) и с определенными требованиями к QoS. 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].

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.

Теория самоорганизованной критичности, модели BTW1D, BTW1Dm

В нелинейной динамике до настоящего времени 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 [2]. Нужно отметить, что именно такие закономерности экспериментально найдены при исследованиях современного трафика.

В 1988 году американскими учеными П. Баком, Ч. Тангом и К. Вайзенфельдом было введено понятие о самоорганизованной критичности [3]. Базовой моделью теории SOC

является куча песка. Рассмотрим кучу песка, изображенную на рисунке 1.

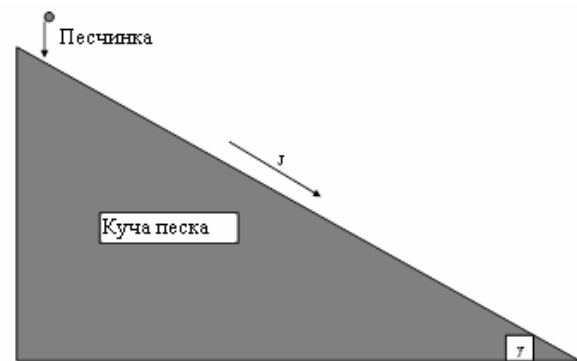


Рисунок 1. – Куча песка

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 [4], показанном на рисунке 2.

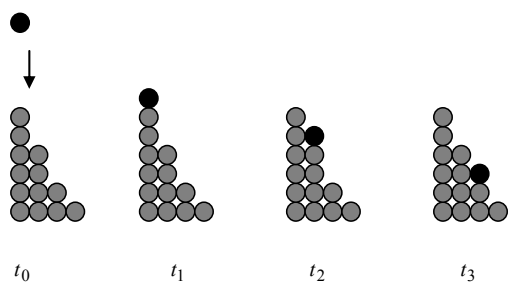


Рисунок 2. – Модель BTW-1D

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, то есть 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 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, значения z_{ci} являются критическими значениями для управляющих параметров. Такая модификация сохраняет самоорганизованную критичность системы.

Разработка системы формирования трафика

Для обеспечения гарантированного качества обслуживания комитет ИЕТР 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, которые не удовлетворяют 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).

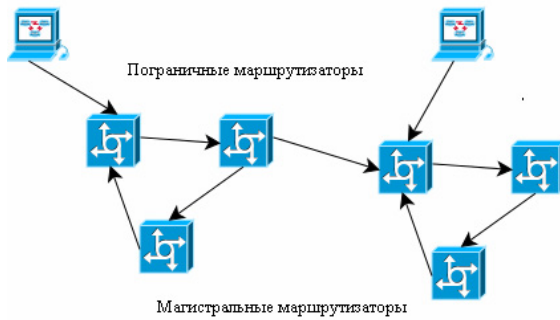


Рисунок 3. – Модель DiffServ

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.

На рисунке 4 показана структура сетевого процессора C5e фирмы Motorola [5]. 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 – stTCM. Он контролирует пиковую (PIR) и выполнимую (CIR) скорость трафика, создает поток зеленых конформных пакетов, поток желтых малоконформных пакетов, поток красных неконформных пакетов.

Предлагаемая в статье система формирования трафика выполняет алгоритм BTWIDm 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.

Diffserv QoS Implementation for Wireless Network Interface (WNI)

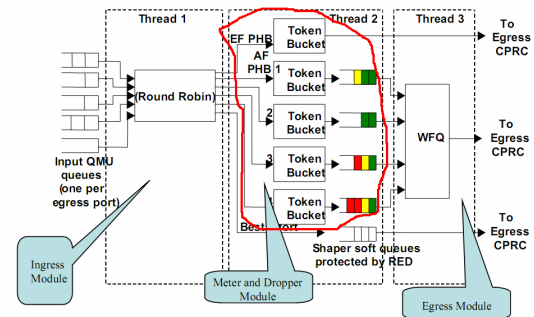


Рисунок 4. – Структура сетевого процессора C5e

Если система применяется для входного трафика AF PHB определенного класса, то используется алгоритм BTWIDm 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 5а.

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). Состав системы показан на рисунке 5б.

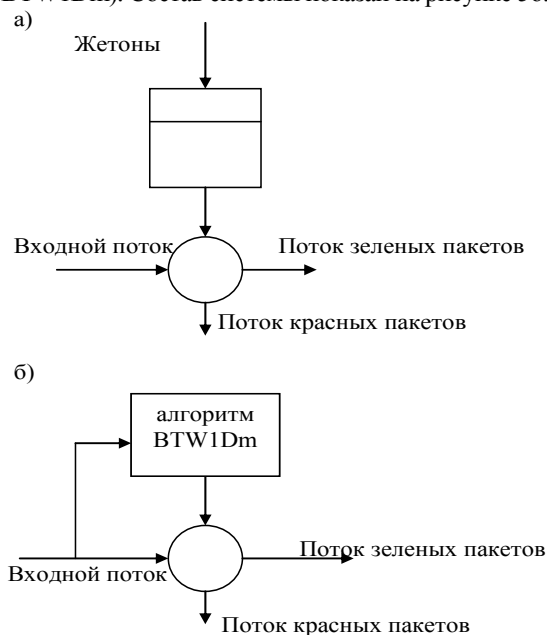


Рисунок 5. – Структуры Token Bucket и BTW1Dm

Для проверки работы предложенной системы выполнен вычислительный эксперимент в среде Matlab. Входной трафик показан на рисунке 6. Это временной ряд скорости (Мбайт/с.) пакетов беспроводной сети доступа [6]. Работа системы исследовалась для случая передачи в режиме AF PHB при $z_{c1} = 3$ Мбайт/с. (CIR) и $z_{c2} = 3,5$ Мбайт/с. (PIR). Результаты эксперимента показаны на рисунках 6 – 9.

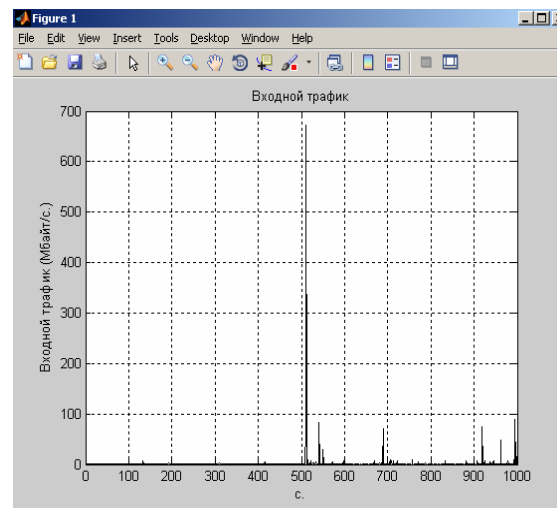


Рисунок 6. – Входной трафик

Система сформировала выходной поток зеленых пакетов, который является сглаженным потоком по отношению ко входному трафику. Были сформированы желтый поток малоформных 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. 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: $b_{yellow} = 229,274$, $b_{red} = 295,868$.

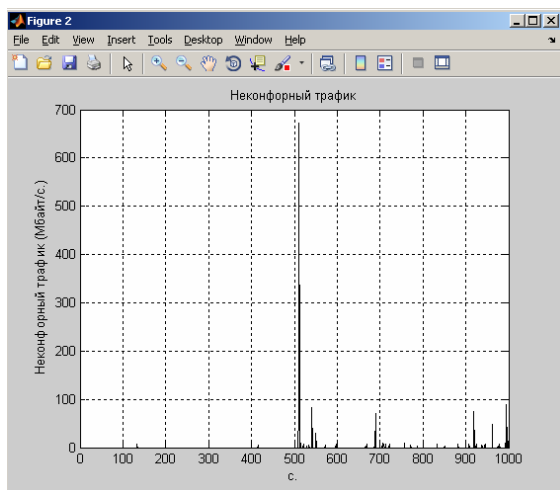


Рисунок 7. – Режим AF PNB. Неконформный трафик

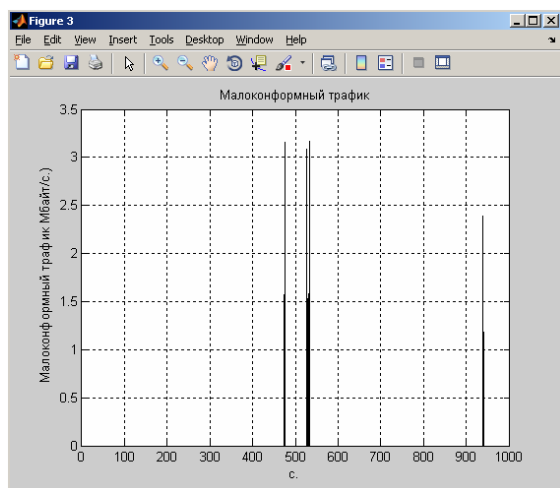


Рисунок 8. – Режим AF PNB. Малоконформный трафик

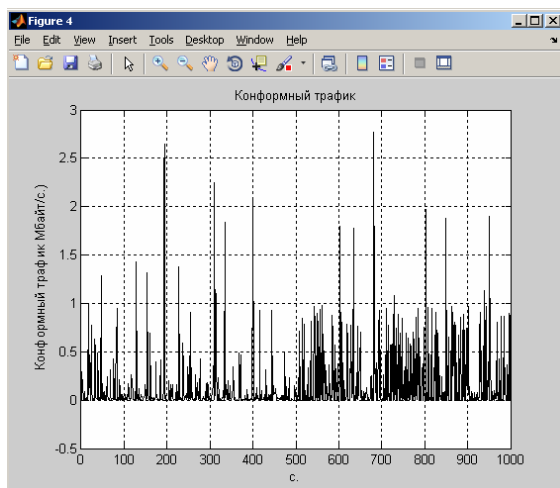


Рисунок 9. – Режим AF PNB. Конформный трафик

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 10.

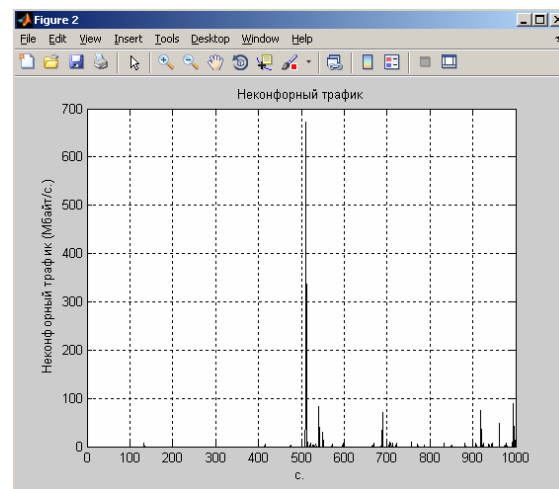


Рисунок 10. – Режим EF PNB. Неконформный трафик

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 BTW1Dm, которая является модификацией модели Бака-Танга-Вайзенфельда.
2. Разработана структура системы формирования трафика, выполняющая алгоритм BTW1Dm.
3. В среде Matlab выполнен вычислительный эксперимент, при котором самоподобный входной трафик был сглажен с помощью предложенной системы. Коэффициент пачечности исходного потока уменьшился на 20 единиц относительно коэффициента пачечности входного потока. Перспективным направлением является исследование разработанной модели при анализе систем обеспечения качества обслуживания в компьютерных сетях.

Список литературы

1. Ложковський А.Г. Аналіз і синтез систем розподілу інформації в умовах мультисервісного трафіка. Автореферат дисертації / Ложковський А.Г. – Одеса, 2010. – 38 с.
2. Подлазов А.В. Теория самоорганизованной критичности – наука о сложности. 2008. – Электр. ресурс, URL: <http://www.nonlin.ru/articles/podlazov/soc> (05.05.15).
3. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // Physical review, Vol 38, № 1, 1988. – pp. 364 – 375.
4. Aschwanden M. Self-organized criticality in astrophysics, 2012. – Электр. ресурс, URL: <http://ua.bookfi.org/book/1076440> (13.05.15).
5. C-5e Network Processor, 2012. – Электр. ресурс, URL: http://www.freescale.com/files/netcomm/doc/data_sheet/C5ENPA1-DS.pdf (17.05.15).
6. DieselNet Fall 2007 – AP Connectivity, Электр. ресурс, URL: <http://traces.cs.umass.edu/index.php/Network/Network> (17.05.15).

References

1. Lozkovsky A.G. Analysis and synthesis of the systems of distributing of information in the conditions of multiservice traffic. Abstract of thesis of the dissertation. / Lozkovsky A.G. Odessa, 2010. – 38 p.
2. Podlazov A.V. The Self-Organized Criticality theory is the science of complexity. – Electr. resurs. URL: <http://www.nonlin.ru/articles/podlazov/soc> (05.05.15).
3. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // Physical review, Vol 38, no.1, 1988. – pp. 364 – 375.
4. Aschwanden M. Self-organized criticality in astrophysics. Electr. resurs, URL: <http://ua.bookfi.org/book/1076440> (13.05.15).
5. C-5e Network Processor. – Electr. resurs, URL: http://www.freescale.com/files/netcomm/doc/data_sheet/C5ENPA1-DS.pdf (17.05.15).
6. DieselNet Fall 2007 – AP Connectivity. Electr. resurs, URL: <http://traces.cs.umass.edu/index.php/Network/Network> (17.05.15).

Бельков Д.В., Едемська Є.М. “Система формування трафіку комп’ютерної мережі на основі самоорганізованої критичності”. У даній роботі для формування трафіку при диференційованому обслуговуванні (DiffServ) пропонується система, яка заснована на понятті самоорганізованої критичності (Self-Organized Criticality, SOC). Розроблена модель SOC BTWIDm, що є модифікацією моделі Бака-Танга-Вайзенфельда. Розроблена структура системи формування трафіку, яка виконує алгоритм BTWIDm. Показані результати обчислювального експерименту при формуванні самоподібного трафіку. Експеримент виконано у середовищі Matlab.

Ключові слова: самоподібний трафік, якість обслуговування, диференційне обслуговування, система формування трафіку, самоорганізована критичність, модель Бака-Танга-Вайзенфельда.

Belkov D.V., Edemskaya E.N. “The traffic from a computer network formed system based self-organized criticality”. Recent studies of real traffic in modern computer networks have shown that traffic exhibits self-similar (or fractal) properties over a wide range of time scales. The use of traditional models in networks characterized by self-similar processes can lead to incorrect conclusions about the performance of analyzed networks. One of the most important tasks of network research is to construct adequate models for the concerned traffic flows. Known area in the network traffic studies is using the methods of nonlinear analysis (chaos theory) for its parameter modeling and prediction. This theory is one of the synergetic paradigms. Another synergetic paradigm is the theory of self-organized criticality (SOC). It has been used to model phenomena as diverse as the dynamics of granular materials, evolution, earthquakes, forest fires, landscape formation, solar flares, river networks, mountain ranges, volcanic activity and the spreading of epidemics, to mention just a few. SOC is a group of models that are related to each other via formal analogy. 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. The organization process is process of the control parameters exact tuning for the order parameters setting in the necessary values. In case SOC, the self-organization process is process of the order parameters robust setting in the necessary values, which causes the control parameters tuning. In this article the traffic formed system based self-organized criticality (SOC) is present for the difference service (DiffServ). The SOC model BTWIDm is design. It is the modification of the Bak–Tang–Wiesenfeld (BTW-1D) model. The system structure to run the BTWIDm algorithm is design. The results of the calculating experiments for self-similar traffic formed is present. An experiment was executed in the Matlab environment.

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

Статья поступила в редакцию 20.06.2015
Рекомендована к публикации д-ром техн. наук С.Г. Ехилевским