

ОСОБЕННОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ САМОПОДОБНОГО ТРАФИКА ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-9-13-19

Manuscript received 02 August 2024;
Accepted 30 August 2024

Татарникова Татьяна Михайловна,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, институт
информационных технологий и программирования,
г. Санкт-Петербург, Россия, tm-tatarn@yandex.ru

Ключевые слова: самоподобный трафик,
обслуживание трафика, вычислительные ресурсы,
вероятностно-временные характеристики,
качество обслуживания

Показано, что современные инфокоммуникационные сети обеспечивают мультисервисное обслуживание разнородного трафика, характеризующийся как самоподобный трафик. Приведены свойства самоподобного трафика, характеризующие геометрическое понятие самоподобности в математическом представлении и записи трасс сетевого трафика, демонстрирующие проявление этих свойств у современного сетевого трафика. Обсуждается противоречие, связанное с тем, что простейший поток заявок не обладает свойствами самоподобности, в результате чего анализ экспоненциальных систем массового обслуживания не позволяет дать адекватную оценку вероятностно-временным характеристикам обслуживания сетевого трафика. Рассматривается актуальная задача моделирования инфокоммуникационных сетей и их узлов с обслуживанием самоподобного трафика. Предложена имитационная модель обслуживания сетевого трафика. Эксперимент на имитационной модели по обслуживанию пуассоновского трафика и самоподобного трафика показывает, что для обслуживания самоподобного трафика необходимы вычислительные ресурсы кратно превосходящие объемы ресурсов для обслуживания трафика, представленного простейшим потоком. Имитационная модель представляет собой средство, позволяющее не только оценивать вероятностно-временные характеристики обслуживания сетевого трафика и выполнять сравнительный эксперимент для разных моделей сетевого трафика, но и выполнять настройку параметров модели, таких как интенсивность генерации трафика и время его обслуживания, что позволяет устанавливать требования к сетевому оборудованию.

Информация об авторе:

Татарникова Татьяна Михайловна, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, институт информационных технологий и программирования, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Татарникова Т.М. Особенности имитационного моделирования обслуживания самоподобного трафика инфокоммуникационных сетей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №9. С. 13-19.

For citation:

Tatarnikova T.M. (2024) Features simulation modeling of self-similar traffic service in infocommunication networks. *T-Comm*, vol. 18, no.9, pp. 13-19. (in Russian)

Введение

Исследование процессов, происходящих в инфокоммуникационных сетях как правило основано на компьютерном имитационном моделировании, поскольку имитационное моделирование остается наиболее мощным универсальным методом исследования и оценки эффективности систем, поведение которых зависит от воздействия случайных факторов.

Современные системы имитационного моделирования имеют специализированные средства, реализующие дополнительные возможности по организации модельных экспериментов на компьютере и предоставляют возможность учитывать в моделях фактор времени, то есть строить динамические имитационные модели.

Применительно к инфокоммуникационным сетям имитационная модель позволяет оценить вероятностно-временные характеристики (ВВХ) предоставляемых услуг, планировать объемы ресурсов, выделяемых для предоставляемых услуг с должным уровнем качества, выполнять настройку параметров узлов инфокоммуникационных сетей для эффективного функционирования [1].

Поскольку в 80-х годах прошлого века основной услугой, предоставляемой абонентам инфокоммуникационных сетей, были данные, то трафик описывался простейшим потоком [2]. Современные инфокоммуникационные сети оказывают разнообразные услуги: игровые сервисы, веб-сервисы, передача и хранение мультимедиа контента, что в совокупности характеризуется как к фрактальный (самоподобный) трафик [3].

Характерными особенностями самоподобного трафика являются [4]:

1. Прямая зависимость медленно убывающей дисперсии от продолжительности периода наблюдения.
2. Сохранение явления длительной памяти на любом временном масштабе.

Известно, что простейший поток заявок не обладает такими особенностями. В результате оказывается, что анализ экспоненциальных систем массового обслуживания не позволяет дать адекватную оценку вероятностно-временным характеристикам обслуживания самоподобного трафика [5].

Оценки ВВХ являются показателями качества инфокоммуникационной сети по предоставлению услуг и на их основе устанавливаются требования к сетевому оборудованию. С учетом данного обстоятельства, становится актуальным моделирование инфокоммуникационных сетей и их узлов с самоподобным трафиком на входе, что позволяет точнее оценить ВВХ.

Свойства самоподобного трафика

В математическом представлении самоподобность является понятием геометрическим, применительно к сетевому трафику это означает следующее [6]:

- процесс передачи трафика имеет определенный повторяющийся рисунок (геометрию);
- геометрия сохраняется при масштабировании во времени;
- трафик характеризуется свойствами сезонности и цикличности;
- имеются заметные всплески и редкие пики трафика;
- заметен тренд повышения среднего значения.

На рисунке 1 приведены трассы трафика, взятые из открытого источника – сайта японского проекта MAWI (англ. Measurement and Analysis on the WIDE Internet) по измерению, анализу, оценке и обнаружению аномалий сетевого трафика.

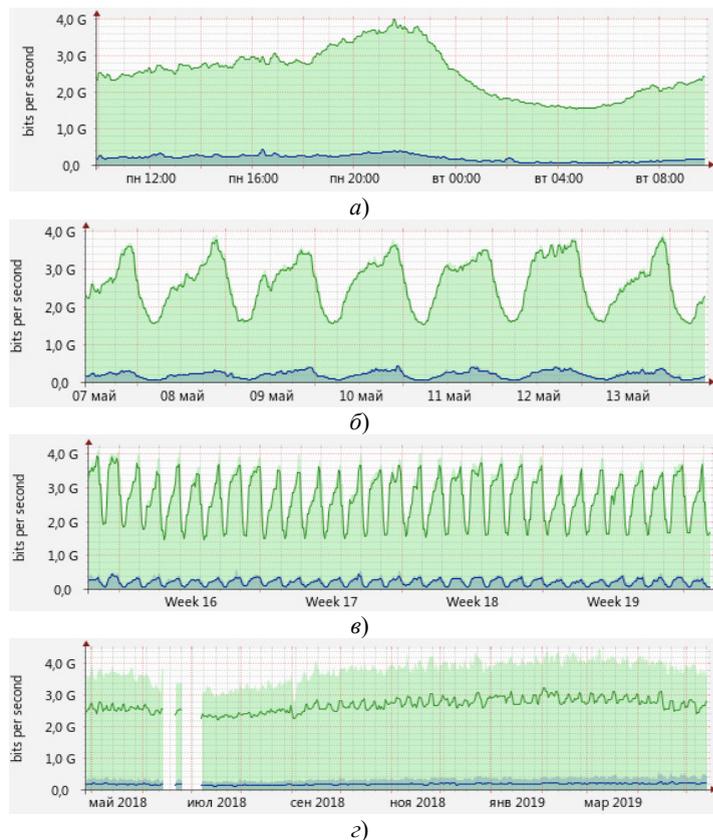


Рис. 1. Записи трасс сетевого трафика XGigabitEthernet: а – за сутки; б – за неделю; в – за месяц; г – за год

Визуальное наблюдение трасс сетевого трафика в разных масштабах времени на рисунке 1 можно сделать вывод о сохранении структуры процесса передачи данных.

Явление длительной памяти проявляется в том, что затухание дисперсии выборочного среднего происходит медленнее, чем задает величина, обратная размеру выборки

$$D(\bar{X}(t)) = \sigma^2 n^{2H-2}, \quad n \rightarrow \infty, \tag{1}$$

где \bar{X} – выборочное среднее выборки X_1, \dots, X_n ; n – размер выборки, применительно к трафику – период наблюдения; σ^2 – выборочная дисперсия; H – показатель Херста.

Показатель H устанавливает степень самоподобия – сохранение геометрии при масштабировании во времени [7].

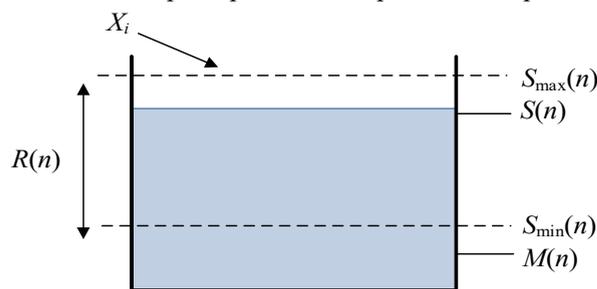


Рис. 2. К расчету показателя Херста

Рисунок 2 демонстрирует колебания уровня воды в резервуаре, позволяющий понять, как может быть найден показатель Херста.

На рисунке 2 приведены следующие обозначения статистических величин, участвующих в оценке показателя Херста [8]:

$M(n)$ – среднее значение объема входящего потока

$$M(n) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2)$$

$S(n)$ – разница объемов входящего и исходящего потоков

$$S(n) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - iM(n)}{n} \quad (3)$$

R – размах значения S , который по сути описывает изменчивость X

$$R(N) = \max_i S - \min_i S, \quad (4)$$

Таким образом, зная значения вышеприведённых статистических показателей, величина показателя H может быть найдена из решения уравнения

$$RS = n/2^H. \quad (5)$$

где RS – коэффициент нормированного размаха.

Величина $H > 0,5$ указывает на самоподобность исследуемого процесса [9].

Случайная величина X описывается функцией распределения с тяжелым «хвостом», например функцией распределения Парето [10,11]

$$F(t) = 1 - \left(\frac{K}{t}\right)^\alpha, \quad t \geq K, \quad (6)$$

где K – задает минимальное значение, которое может принимать случайная величина X ; α – задает форму кривой распределения, $\alpha \in [0,2]$.

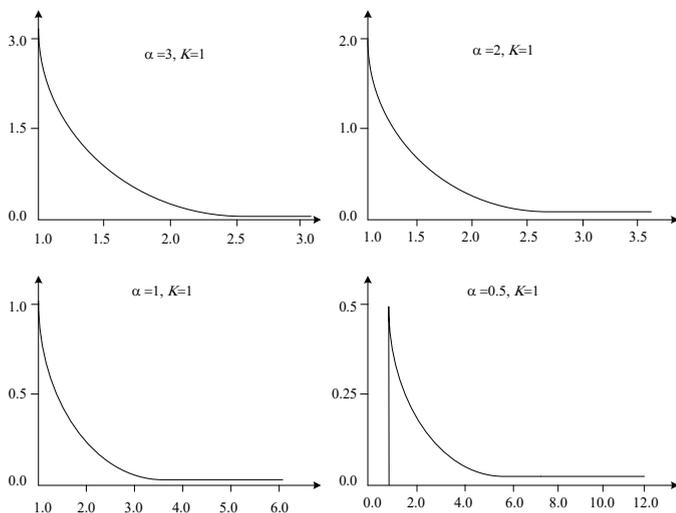


Рис. 3. Примеры кривых Парето

Форма кривых Парето при изменении α меняется медленно, но «хвост» распределения при уменьшении α растет очень быстро (рис. 3).

При любых K, α скорость убывания хвоста распределения Парето степенная. Таким образом, распределение Парето является в точности степенным распределением. В дальнейшем распределение Парето будем обозначать как $P(\alpha, K)$ или просто P .

В качестве модели самоподобного сетевого трафика применяется ON-OFF процесс или модель серии пакетов, где ON – период поступления трафика, OFF – период отсутствия трафика. Продолжительность периода OFF – это случайная переменная с экспоненциальным распределением, а продолжительность периода ON – это случайная переменная с распределением Парето. Периоды ON и OFF являются независимыми, время между переходами из одного периода в другое игнорируется.

Сравнительные характеристики СМО типа $M|M|1$ и $P|M|1$

В общем случае, при сопоставлении самоподобного трафика с пуассоновским, в частности при анализе влияния пульсаций на время ожидания в буферах, поступление обрабатывается как требование, для которого время обслуживания либо интервалы между поступлениями, либо то и другое описывается распределением с тяжелыми хвостами.

Сравним СМО типа $M|M|1$ и $P|M|1$ по основным вероятностно-временным характеристикам, влияющих на качество обслуживания: вероятность отказа в обслуживании трафика – $P_{отк}$, время ожидания – $T_{ож}$, и время обработки – $T_{обр}$ трафика, длина очереди на обслуживание трафика – L . Назначение эксперимента заключается в том чтобы показать, что при обслуживанию самоподобного трафика получаются другие значения ВВХ, чем для трафика, представленного простейшим потоком. С этой целью были разработаны имитационные модели этих СМО в среде AnyLogic.

Будем использовать графический редактор AnyLogic для создания диаграммы процессов и отображения основных ВВХ как в виде среднего значения, так и в виде гистограммы функции распределения. Также воспользуемся разными видами выполнения имитационных экспериментов, такими как «простой эксперимент» – для оценивания ВВХ и «эксперимент с варьированием параметров» – для получения зависимостей ВВХ от параметров обслуживаемого потока и обслуживающего узла.

AnyLogic поддерживает большое количество разных вероятностных распределений [12,13]. Чтобы получить случайное значение, сгенерированное согласно закону вероятностного распределения Парето, нужно вызвать соответствующий метод: $pareto(\alpha, K)$.

Имитационный эксперимент проводился при следующих исходных данных:

- интенсивность поступления трафика $\lambda=25$ пакетов/с;
- среднее время обслуживания трафика на узле $T_{обс}=2 \cdot 10^{-2}$ с;
- $K=10^{-2}$;
- число экспериментов $5 \cdot 10^4$.

Сравнение СМО типа $M|M|1|m$ и $P|M|1|m$ требует применения единого датчика случайных чисел для генерации трафика на входе обслуживающего узла и одинаковой интенсивности поступления трафика λ . Если для СМО типа $M|M|1$ интенсивность λ задается напрямую, то для СМО типа $P|M|1$ аналогичную интенсивность будем получать через определенные формы кривой распределения Парето. Решение уравнения $\frac{1}{\lambda} = \frac{\alpha K}{\alpha - 1}$, где левая часть – математическое ожидание

экспоненциальной функции распределения, правая часть – математическое ожидание функции распределения Парето позволяет найти соответствующий параметр $\alpha = (1 - K\lambda)^{-1}$.

На рисунке 4 приведен окно диаграммы процесса СМО в AnyLogic.

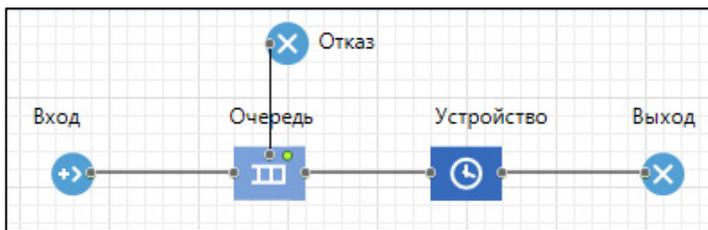
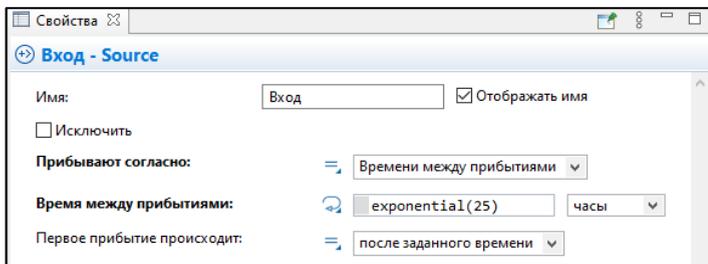
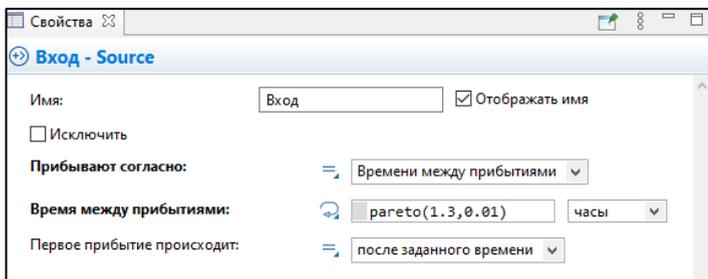


Рис. 4. Окно диаграммы процесса СМО в AnyLogic

Разница диаграммы процесса для $M|M|1|m$ и $P|M|1|m$ заключается только в задании свойств блока *source*, выполняющего функцию источника генерации трафика: для СМО типа $M|M|1|m$ время между прибытиями зададим как экспоненциальную функцию распределения (рис. 5,а); для СМО типа $P|M|1|m$ время между прибытиями зададим как функцию распределения Парето (рис. 5,б).



а)



б)

Рис. 5. Панель свойств блока source для СМО: а – $M|M|1$; б – $P|M|1$

На рисунке 6 приведено окно графического редактора с визуализацией средней длины очереди на обслуживание, коэффициента загрузки обслуживающего узла, а также диаграмм и гистограмм ВВХ обслуживания сетевого трафика.

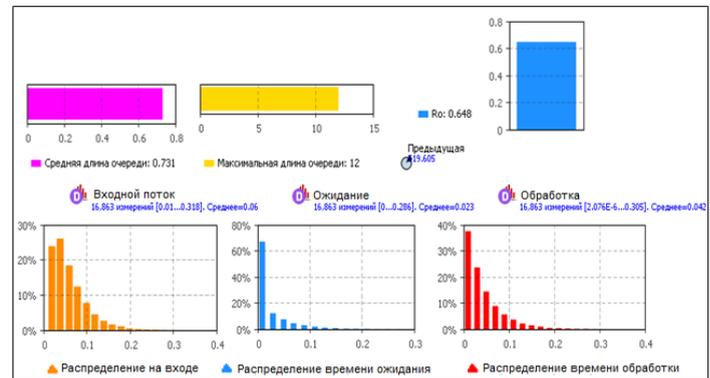


Рис. 6. Окно графического редактора AnyLogic

Результаты имитационного эксперимента показывают, что для обслуживания самоподобного трафика нужно больше ресурсов – сказывается влияние длительной памяти. На рисунке 7 приведена гистограмма влияния ограничений по длине очереди m на вероятность отказа в обслуживании $P_{отк}$.

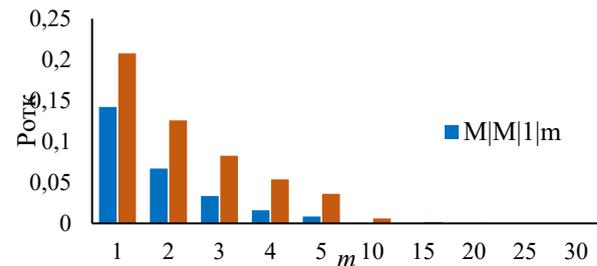


Рис. 7. Зависимость $P_{отк}$ от m

Поскольку буферные накопители (возможность организации очереди) являются ресурсами, обеспечивающими обслуживание, то предположение о пуассоновском потоке, как модели входящего трафика инфокоммуникационных сетей представляется не всегда верным. Данное обстоятельство необходимо учитывать при планировании развития инфокоммуникационных сетей. Для обслуживания самоподобного трафика требуются буферные накопители большего объема нежели для пуассоновского трафика. Аналогичные выводы следуют из анализа отношений $\iota = \bar{L}_P / \bar{L}_E$ и $\delta = \rho_P / \rho_E$ (рис. 8), где индекс в обозначении длины очереди L и коэффициента загрузки ρ указывает на закон генерации трафика: P – Парето, E – экспоненциальный.

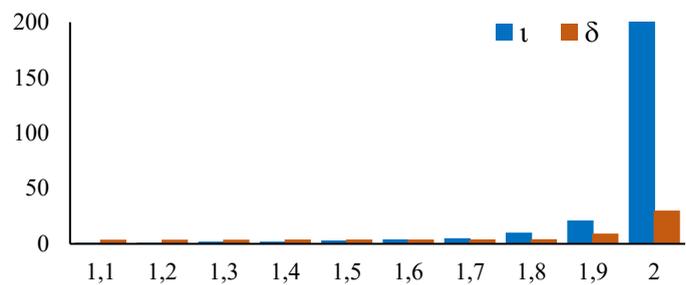


Рис. 7. Зависимость отношений длин очередей и коэффициентов загрузки от параметра α

Сравнение СМО типа $M|M|1|m$ и $P|M|1|m$ по длине очереди и коэффициенту загрузки позволяет сделать следующие выводы:

- с увеличением нагрузки для обслуживания самоподобного трафика при $\alpha=1,3$ требуется двукратное увеличение очереди, при $\alpha=1,5$ – трехкратное, при $\alpha=1,5$ – четырехкратное и при $\alpha>1,7$ кратность растет в геометрической прогрессии;
- с увеличением интенсивности генерации трафика, что соответствует $\alpha \in [1.1, 1.8]$ загрузка узла при самоподобном трафике становится выше в среднем в четыре раза и при $\alpha=2$ превышает уже в 30 раз.

На рис. 9 приведена зависимость времени ожидания в очереди на обслуживание $T_{ож}$ от загрузки узла обработки трафика ρ . Зависимость для времени обработки трафика от загрузки узла получается аналогичной рисунку 9 с учетом добавления времени обслуживания трафика на узле $T_{обс}$. Существенное время ожидания обслуживания самоподобного трафика в сравнении с пуассоновским трафиком объясняется пачечным характером трафика – появление частных всплесков нагрузки.

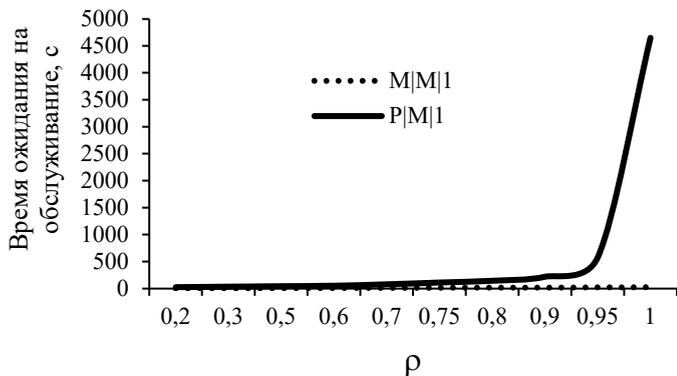
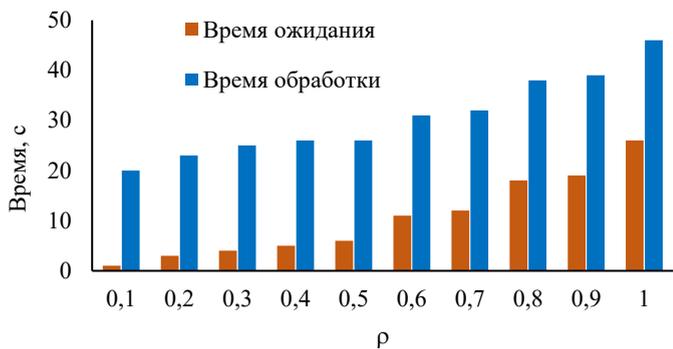
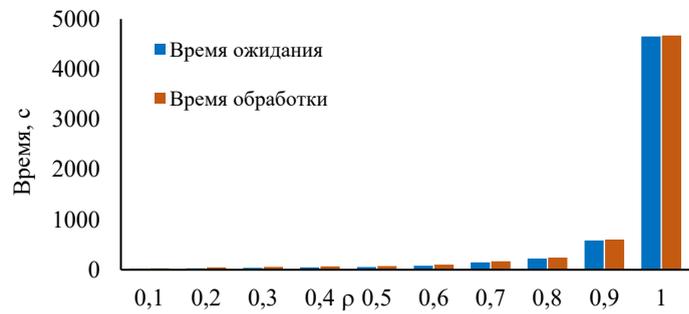


Рис. 9. Зависимость времени ожидания на обслуживание от загрузки узла обработки трафика

На рисунке 10 приведены зависимости времени ожидания в очереди на обслуживание $T_{ож}$ и времени обработки $T_{обр} = T_{ож} + T_{обс}$ для пуассоновского трафика и самоподобного трафика. С увеличением загрузки узла обслуживания время ожидания и обработки пуассоновского трафика растет пропорционально увеличению очереди (рис. 10,а) в то время как для самоподобного трафика при $\rho>0,7$ время ожидания сходится к времени обработки трафика из-за лавинообразного роста очереди (рис. 10,б).



а)



б)

Рис. 10. Зависимость времени ожидания и обработки от загрузки узла обслуживания для: а – пуассоновского трафика; б – самоподобного трафика

При сравнении СМО типа $M|M|1|m$ и $P|M|1|m$ стал понятен порядок разницы между полученными оценками времени обработки с увеличением нагрузки. Так, при коэффициенте загрузки $\rho=1$, для обслуживания самоподобного трафика требуется время в 1000 раз больше, чем для обслуживания пуассоновского трафика.

Заключение

Современные инфокоммуникационные сети обеспечивают мультисервисное обслуживание разнородного трафика, источником которого являются игровые и веб сервисы, мультимедиа контент. Смесь разнородного трафика характеризуется как самоподобный трафик для обслуживания которого требуются вычислительные ресурсы, а также модели, позволяющие оценить объем этих ресурсов.

В работе предложена имитационная модель обслуживания сетевого трафика в среде AnyLogic. В окне диаграммы процессов можно наблюдать за динамикой основных вероятностно-временных характеристик как в виде среднего значения, так и в виде гистограммы плотности вероятности функции распределения.

На имитационной модели проведен сравнительный эксперимент по оцениванию объемов вычислительных ресурсов при обслуживании пуассоновского трафика и при обслуживании самоподобного трафика. Результаты эксперимента на модели показали, что для обслуживания самоподобного трафика необходимы вычислительные ресурсы, кратно превосходящие объемы ресурсов для обслуживания трафика, представленного простейшим потоком. Для проведения сравнительного эксперимента найдено отношение, устанавливающее зависимость между параметрами экспоненциальной функции распределения, имитирующей пуассоновский поток и функцией распределения Парето, имитирующей самоподобный трафик.

Разработанная имитационная модель представляет собой средство, позволяющее оценивать вероятностно-временные характеристики обслуживания сетевого трафика. В свою очередь вероятностно-временные характеристики определяют качество предоставляемых инфокоммуникационных услуг. Управление такими параметрами модели, как интенсивность генерации трафика, время его обслуживания позволяет обобщать требования к сетевому оборудованию.

Литература

1. Куликов А.И., Бекенёва Я.А. Среда имитационного моделирования систем мониторинга для анализа объема передаваемого трафика // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. №9. С. 42-47.
2. Bogatyrev, V.A., Bogatyrev, S.V., Bogatyrev A.V. Model and Interaction Efficiency of Computer Nodes Based on Transfer Reservation at Multipath Routing // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2019. P. 8840647. doi: 10.1109/WECONF.2019.8840647
3. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
4. Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. Ed. by K. Park and W. Willinger New York: Wiley, 2000.
5. Geoff Boeing. Visual Analysis of Nonlinear Dynamical Systems: Chaos, Fractals, Self-Similarity and the Limits of Prediction // Systems, vol. 4, 2016, pp. 37-54. DOI: 10.3390/systems4040037
6. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. Model of a self-similar traffic generator and evaluation of buffer storage for classical and fractal queuing system // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings 1, 2018, pp. 1-3.
7. Jones O., Shen Y. Estimating the Hurst Index of a Self-Similar Process via the Crossing Tree // IEEE Signal Processing Letters, vol. 11, no. 4, pp. 416–419, Apr. 2004.
8. Zwart A.P. Queueing Systems with Heavy Tails. Eindhoven University of Technology, 2001. 227 p.
9. Kutuzov O., Tatarnikova T. Evaluation and Comparison of Classical and Fractal Queuing Systems // 2016 15th International Symposium on Problems of Redundancy in Information and Control Systems, REDUNDANCY 2016 15, 2016, pp. 155-157.
10. Одоевский С.М., Бусыгин А.В. Аналитическая модель обслуживания мультимедийного трафика с распределением Парето на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1 С. 74-108. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10104
11. Tatarnikova T.M., Volskiy A.V. Estimation of probabilistic-temporal characteristics of network nodes with traffic differentiation // Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy, vol. 3, pp. 54-60, 2018. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2018.3.54
12. Ушанев К.В. Аналитико-имитационная модель функционального преобразования трафика сложной структуры // Информационные технологии моделирования и управления. 2015. № 2. С. 263-272.
13. Рыжиков Ю.И. Алгоритмический подход к задачам массового обслуживания: монография. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. 496 с.

FEATURES SIMULATION MODELING OF SELF-SIMILAR TRAFFIC SERVICE IN INFOCOMMUNICATION NETWORKS

Tatyana M. Tatarnikova, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Institute of Information Technology and Programming, St. Petersburg, Russia, tm-tatarn@yandex.ru

Abstract

It is shown that modern infocommunication networks provide multiservice maintenance of heterogeneous traffic characterized as self-similar traffic. The contradiction associated with the fact that the simplest flow of requests does not have the properties of self-similarity is discussed, as a result of which it turns out that the analysis of exponential queueing systems does not allow an adequate assessment of the probabilistic-temporal characteristics of self-similar traffic maintenance. The properties of self-similar traffic and the current problem of modeling infocommunication networks and their nodes with self-similar traffic maintenance are considered. A simulation model of network traffic maintenance is proposed. The simulation model is a tool that allows not only to estimate the probabilistic-temporal characteristics of network traffic maintenance, but also to adjust the model parameters, such as the intensity of traffic generation and the time of its maintenance, which allows setting requirements for network equipment.

Keywords: self-similar traffic, traffic serving, computing resources, probabilistic-temporal characteristics, quality of service.

References

- [1] A.I. Kulikov, Ya.A. Bekeneva, "An environment for simulation modeling of monitoring systems for analyzing the volume of transmitted traffic", *LETI transactions on electrical engineering & computer science*, 2021, no. 9, pp.42-47. (In Russian)
- [2] V.A. Bogatyrev, S.V. Bogatyrev, A.V. Bogatyrev, "Model and Interaction Efficiency of Computer Nodes Based on Transfer Reservation at Multipath Routing", *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2019, p. 8840647. DOI: 10.1109/WECONF.2019.8840647. (In Russian)
- [3] O.I. Shelukhin, A.V. Osin, S.M. Smolsky, "Self-similarity and fractals. Telecommunications applications," Moscow: Fizmatlit, 2008, 368 p. (In Russian)
- [4] Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. Ed. by K. Park and W. Willinger New York: Wiley, 2000.
- [5] Geoff Boeing, "Visual Analysis of Nonlinear Dynamical Systems: Chaos, Fractals, Self-Similarity and the Limits of Prediction", *Systems*, vol. 4, 2016, pp. 37-54. DOI: 10.3390/systems4040037
- [6] O.I. Kutuzov, T.M. Tatarnikova, "Model of a self-similar traffic generator and evaluation of buffer storage for classical and fractal queuing system", *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 - Proceedings 1*, 2018, pp. 1-3. (In Russian)
- [7] O. Jones and Y. Shen, "Estimating the Hurst Index of a Self-Similar Process via the Crossing Tree", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 416-419, Apr. 2004.
- [8] A.P. Zwart, "ueueing Systems with Heavy Tails," Eindhoven Uneversty of Technology, 2001, 227 p.
- [9] O. Kutuzov, T. Tatarnikova, "Evaluation and Comparison of Classical and Fractal Queuing Systems", *15th International Symposium on Problems of Redundancy in Information and Control Systems, REDUNDANCY*, 2016, pp. 155-157. (In Russian)
- [10] S.M. Odoevsky, A.V. Busygin, "Approximation of statistical characteristics of the multimedia traffic service process based on the pareto distribution", *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no.1, pp. 74-108. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10104. (In Russian)
- [11] T.M. Tatarnikova, A.V. Volskiy, "Estimation of probabilistic-temporal characteristics of network nodes with traffic differentiation", *Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy*, 2018, vol. 3, pp. 54-60. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2018.3.54. (In Russian)
- [12] K.V. Ushanev, S.I. Makarenko, "Analytical- Simulation Model of Functional Conversion of Complex Traffic", *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 2, pp. 263-272. (In Russian)
- [13] Yu.I. Ryzhikov, "Algorithmic approach to mass service problems: monograph," St. Petersburg: VKA im. A.F. Mozhaisky, 2013, 496 p. (In Russian)

Information about authors:

Tatyana M. Tatarnikova, Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Institute of Information Technology and Programming, St. Petersburg, Russia