

## ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ САМОПОДОБНОГО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ТРАФИКА

© 2011 А. В. Благоев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Статья посвящена построению имитационных моделей самоподобного телекоммуникационного трафика. Предлагается реализация математических моделей типа «Input M/G/∞» и «On-off Sources» в среде имитационного моделирования AnyLogic. Рассматривается понятие джиттера в телекоммуникационном трафике. Проводится сравнение характеристик реальных и смоделированных трасс трафика.

*Самоподобный трафик, моделирование трафика, имитационное моделирование, «Input M/G/∞», «On-off Sources», Anylogic, джиттер.*

Современный сетевой трафик обладает свойством самоподобия, т.е. выглядит качественно одинаково почти при любых масштабах временной оси, а также имеет «память» (последствие) [1]. Самоподобие телекоммуникационного трафика является предметом исследований вот уже более полутора десятка лет и пока ещё не утратил своей актуальности. До сих пор нет единой общепризнанной модели самоподобного трафика. Существует несколько известных моделей со своими достоинствами и недостатками. Некоторые из них не дают желаемых результатов, другие имеют очень высокую вычислительную сложность [2]. В статье предлагаются к реализации в имитационной среде моделирования AnyLogic две модели: «Input M/G/∞» и «On-off Sources», описанные подробно в [3, 4]. Рассматриваются характеристики сгенерированного трафика, производится исследование джиттера потока постоянной скорости, конкурирующего за передачу с фоновым потоком от моделей.

### Модели самоподобного трафика «Input M/G/∞» и «On-off Sources»

Обычно в рамках этих моделей сеть связи рассматривается как система с дискретным временем  $t = 0, 1, 2, \dots$ . Промежуток времени  $[t, t + 1]$  называется времен-

ным окном  $t$ .

В модели «Input M/G/∞» на временной оси задан пуассоновский процесс с интенсивностью  $I$ , т.е.  $A = (\dots, A_0, A_1, A_2, \dots)$  – последовательность случайных величин, равных количеству событий этого потока в соответствующем временном окне:

$$\Pr\{A_t = k\} = e^{-I} \frac{I^k}{k!}, k \in Z_+, \quad (1)$$

где  $A_t$  – число новых источников трафика, появившихся в системе во временном окне  $t$ . Каждый появившийся в момент  $t$  источник характеризуется временем работы  $t_{t,i} \in Z_+$ , ( $i = 1, 2, \dots, A_t$ ) и информационной скоростью  $S_{t,i} \in Z_+$  в каждый дискретный момент своей работы (то есть  $S_{t,i}$  – это количество пакетов, производимых источником в каждом временном окне, пока источник работает). Распределение времени работы источника, хорошо приближающий автокорреляционную функцию реального трафика, имеет вид:

$$\Pr\{t = k\} = \begin{cases} y, & k = 1, \\ \frac{A}{(k+x)^{b+2}}, & k = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (2)$$

где

$x$  и  $y$  – подлежащие определению константы,

$A$  – нормировочная константа,

$b$  – параметр, связанный с коэффициентом самоподобия соотношением:  $H=1-b/2$  [3].

Распределение информационной скорости  $S_{t,i}$ , позволяющее приблизить одномерное распределение трафика, определяется по формуле [3]:

$$\Pr\{S = k\} = \frac{\Pr\{Y_t = k\} - \sum_{m=2}^k p_m \Pr\left\{\sum_{n=1}^m S_n = k\right\}}{p_1},$$

где  $p_k = e^{-\Lambda} \frac{\Lambda^k}{k!}$ ,

$$\Lambda = -\ln(\Pr\{Y_t = 0\}),$$

$Y_t$  – трафик, представленный случайным процессом, значение которого в каждом временном окне равно суммарной интенсивности генерации информации всеми находящимися в данный момент в системе источниками.

В модели «On-Off Sources» имеется  $N$  независимых источников трафика. Каждый из них имеет два состояния: состояние активности ( $ON$ ), в котором источником генерируются данные, и состояние молчания ( $OFF$ ), в котором источник ничего не производит. Эти периоды попеременно сменяют друг друга. Вероятность застать индивидуальный источник в активном состоянии и в состоянии молчания определяется следующим образом:

$$P_{ON} = \frac{Mt}{Mt + Mu}, \quad P_{OFF} = \frac{Mu}{Mt + Mu},$$

где

$t$  – длительность  $ON$  периодов источников – является реализацией случайной величины, имеющей распределение (2);

$u$  – длительность  $OFF$  периодов – является реализацией случайной величины, имеющей в данной работе распределение

Пуассона:  $\Pr\{u = k\} = e^{-1} \frac{1^k}{k!}$ ,  $k \in Z_+$ .

Распределение вероятностей для скорости источника похоже на предыдущий случай:

$$\Pr\{S = k\} = \frac{\Pr\{Y_t = k\} - \sum_{m=2}^k p_m \Pr\left\{\sum_{n=1}^m S_n = k\right\}}{p_1}.$$

Такие параметры модели, как и в предыдущем случае, позволяют приблизить одномерное распределение и автокорреляционную функцию.

В результате экспериментальных исследований предложенных моделей в системах с дискретным временем было показано, что искусственно сгенерированный с помощью таких моделей трафик имеет близкие к реальному характеристики, такие, как математическое ожидание, дисперсия, одномерное распределение, степень самоподобия и автокорреляционная функция. При этом модель «Input M/G/∞» больше подходит для генерации трафика глобальных трасс, а модель «On-off Sources» – для локальных [3]. В данной работе исследуется вопрос о том, насколько хорошо сохраняется это свойство при переходе от дискретного времени к непрерывному.

### Имитационная среда AnyLogic для моделирования систем с непрерывным временем

В математических моделях часто используют дискретное время, выбирая определённый шаг дискретизации. В реальности имеются телекоммуникационные сети с непрерывным временем.

В настоящее время существует достаточное количество сред имитационного моделирования. Наиболее популярные из них: AnyLogic, Omnet++, NS-2, GPSS [5-7]. У каждой из них есть определённые особенности, плюсы и минусы. Особенностью программного комплекса AnyLogic является то, что он обладает графической средой пользователя, что, несомненно, является большим плюсом и позволяет использовать язык Java для разработки моделей [5]. Наличие широкого инструментария и библиотек позволяет пользователям системы создавать модели в

большом количестве областей знаний, в том числе в области телекоммуникаций и информационных систем.

Среда AnyLogic позволяет поддерживать подходы как с дискретным, так и непрерывным временем моделирования.

Для перехода в систему с непрерывным временем воспользуемся таким подходом среды AnyLogic, как *системная динамика*.

В данном подходе исследуемые модели «Input M/G/∞» и «On-off Sources» представлены системами потоков и накопителей, являющимися основным инструментарием системной динамики. В модели «On-off Sources» существует  $N$  источников, представленных непрерывно работающими потоками, генерирующими от 0 до  $S_{\max}$  пакетов. В модели «Input M/G/∞» данные потоки возникают и исчезают в течение определённого времени («времени жизни» источника). В системе имеется модельное время, на которое и ориентируются предлагаемые имитационные модели. Кроме того, AnyLogic предоставляет широкий инструментарий для автоматического сбора статистики (рис. 1).

В имитационных моделях, реализованных в среде AnyLogic, объекты, являющиеся источниками трафика, непрерывно генерируют пакеты согласно распределению скоростей источников по моделям «Input M/G/∞» и «On-off Sources» [4]. Время работы (жизни) источников идёт по модельному времени системы и определяется параметрами моделей. В системе все генерируемые источниками пакеты проходят через объект «поток», значение которого, постоянно меняющееся во времени, равно значению телекоммуникационного трафика в сечении сети

в определённый момент времени. Вся генерируемая информация – собственно трафик – собирается в объекте «накопитель». Практически к каждому объекту привязан «объект статистики», либо статистическая информация заложена в его собственных полях. Эта особенность позволяет наблюдать различную статистическую информацию: математическое ожидание, автокорреляционную функцию, одномерное распределение, параметр самopodobия и т.д. в каждый момент времени, полученную по сгенерированным до этого момента данным (рис. 1).

### Результаты имитационного моделирования

Для проведения экспериментов использовались трассы как глобальных, так и локальных сетей, находящиеся в свободном доступе в интернет. Трассы глобальных сетей представлены трассами часовой записи трафика между Digital Equipment Corporation и остальным интернетом, а также трассами часовой записи трафика между Lawrence Berkeley Laboratory и остальным интернетом [8]. Это трассы dec-pkt-1.tcp, dec-pkt-2.tcp, dec-pkt-3.tcp, dec-pkt-4.tcp., lbl-pkt-4.tcp и lbl-pkt-5.tcp. Трассы локальных сетей представлены трассами часовой записи трафика из коллекции корпорации Bellcore, а именно трассы трафика в опорной магистрали корпоративной локальной сети Bellcore [8].

Характеристики результатов имитационного моделирования исследуемых трасс с измеренными характеристиками трафика реальных трасс приведены в таблице 1.

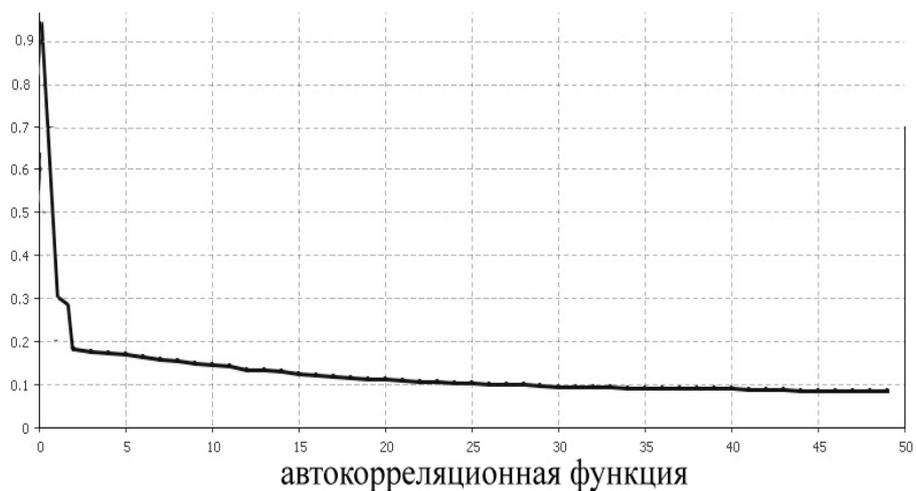
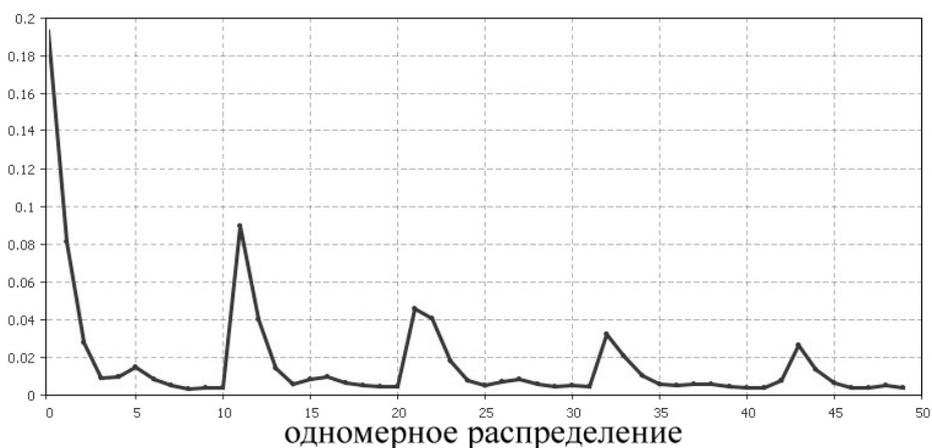
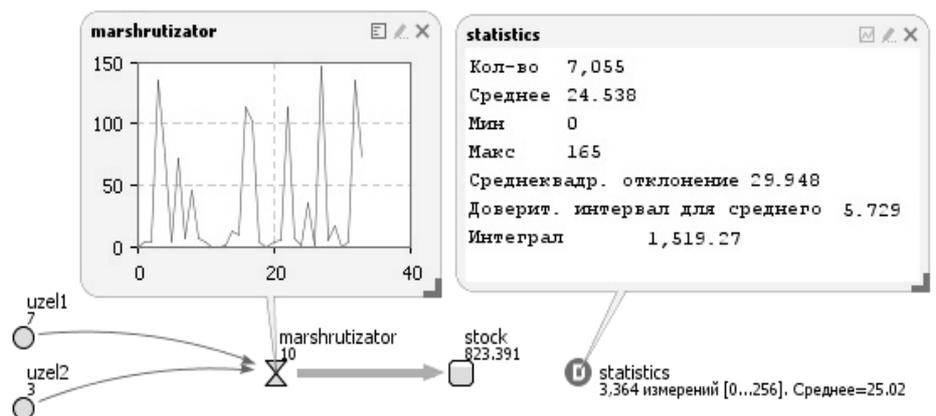


Рис. 1. Основные характеристики смоделированной трассы DEC-РКТ-1.ТСР, генерируемой в среде AnyLogic

Таблица 1. Характеристики реального и смоделированного в AnyLogic трафиков

Трафиковая трасса	Н (коэффициент самоподобия)		Математическое ожидание		Дисперсия	
	реальн.	смоделир.	реальн.	смоделир.	реальн.	смоделир.
DEC-PKT-1.TCP	0,735	0,759	26,234	24,538	1080,791	896,882
DEC-PKT-2.TCP	0,755	0,756	49,528	46,786	2384,076	2191,831
DEC-PKT-3.TCP	0,698	0,715	37,644	35,304	1075,980	899,940
DEC-PKT-4.TCP	0,731	0,731	54,089	51,046	1647,057	1436,107
LBL-PKT-4.TCP	0,807	0,805	7,589	7,314	226,412	223,921
LBL-PKT-5.TCP	0,666	0,717	2,017	2,068	30,545	30,404
BC-pAug.TL	0,789	0,789	28,786	24,987	2158,722	1336,853
BC-pOct.TL	0,807	0,798	75,576	75,317	5948,424	5693,004

### Измерение джиттера

Помимо статистических характеристик малых порядков, полученных выше, практически важной характеристикой в телекоммуникациях является *джиттер*.

**Определение:** *джиттер* – это *неравномерность периодов времени, отведённых на доставку пакета. Другими словами это разброс максимального и минимального времени прохождения пакета от среднего* [9].

Джиттер, или так называемая изменчивость задержки пакета, является одним из показателей качества поддержки сетью ряда служб [10]. Таким образом, его изменение может привести к потере качества передачи данных в телекоммуникационных сетях. Сложность определения джиттера аналитическими методами обусловлена тем, что он определяется статистическими характеристиками второго порядка при представлении сетевого оборудования в виде систем массового обслуживания.

Как правило, для определения джиттера используют следующий подход. Некоторый источник постоянной битовой скорости передаёт в сеть периодический поток пакетов, в котором пакеты следуют друг за другом через равные промежутки времени  $T$  (примем  $T=10$  мс). Пакеты этого источника будем называть мечеными. По сети меченые пакеты проходят через один или несколько сетевых узлов,

представляющих из себя статистические мультиплексоры (рис. 2). В мультиплексоре меченые пакеты конкурируют за передачу с пакетами других источников, которые будем называть фоновыми [11]. После выхода из последнего на их пути меченые пакеты могут проходить с определённой задержкой (рис. 3). Промежутки времени между их выходами можно обозначить как  $L_1, L_2, \dots, L_k$ , т.е.  $L_i$ , где  $i \in [1, k]$ . Соответственно джиттером в данном случае можно назвать  $\{L_i - T\}$ .

Для проверки работы исследуемых моделей «Input M/G/∞» и «On-off Sources» на джиттер представим в одном случае исходный трафик, а в другом смоделированный трафик фоновым потоком. И введем в обоих случаях источник постоянной скорости (рис. 2).

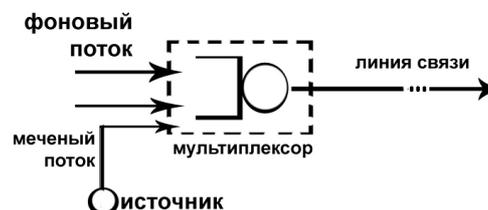


Рис. 2. Система с фоновым и меченым потоками



Рис. 3. Изменение временного периода между пакетами меченого потока

Пусть интенсивность выходного потока в системе (скорость обслуживания)

$$s_p = r n,$$

где

$n$  равно количеству информации в усреднённом пакете, умноженному на математическое ожидание исследуемого трафика во временное окно данной трассы;

$r$  – коэффициент интенсивности.

В результате создания в среде AnyLogic системы с единичным меченым и фоновым потоками получим значения

джиттера. Для сравнения джиттера в реальном и смоделированном трафиках построим его нормализованное одномерное распределение. В результате ряда экспериментов над трафиком глобальных трасс, смоделированных по модели «Input M/G/∞», и локальных трасс, смоделированных по модели «On-off Sources», можно сделать предположение об адекватности данных моделей по статистическим характеристикам высоких порядков, таким, как джиттер (рис. 4, 5).

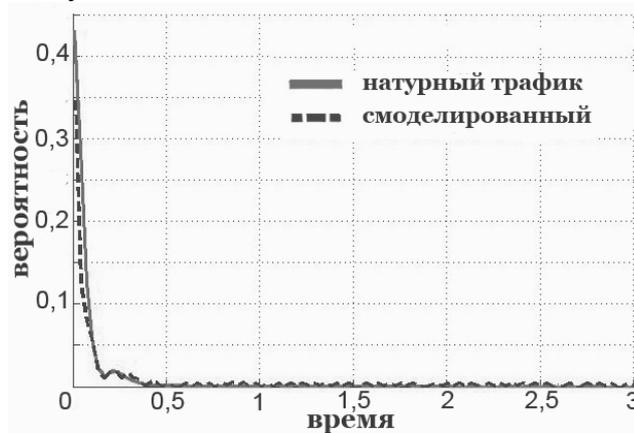


Рис. 4. Распределение джиттера в реальном и смоделированном трафиках трассы DEC-PKT-1.TCP с коэффициентом интенсивности обслуживания  $\Gamma = 0.8$

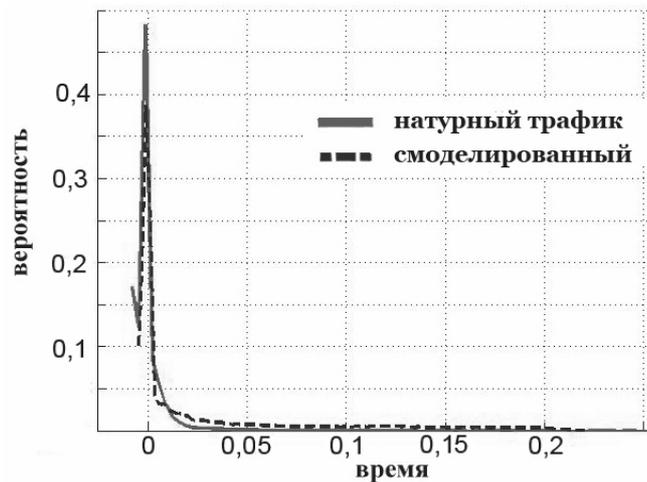


Рис. 5. Распределение джиттера в реальном и смоделированном трафиках трассы VC-pAug.TL с коэффициентом интенсивности обслуживания  $\Gamma = 0.4$

### Выводы

Приведённые выше результаты исследований показывают, что имитационные модели телекоммуникационного сетевого трафика, построенные в среде AnyLogic, позволяют получать трафик,

близкий к реальному по ряду важнейших характеристик как малых порядков, таких как математическое ожидание, одномерное распределение, автокорреляционная функция, степень самоподобия, так и более высоких порядков, таких, как джиттер.

Сама же среда имитационного моделирования AnyLogic является удобным и практичным инструментом для построения имитационных моделей самоподобного трафика.

#### Библиографический список

1. Шелухин, О. И. Фрактальные процессы в телекоммуникациях [Текст] / О. И. Шелухин, А. М. Тенякшев, А. В. Осин. // М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.
2. Melamed, B. An overview of TES process and modeling methodology [Текст] / B. Melamed, L. Donatiello and R. Nelson // Models and techniques for Performance Evaluation of Computer and Communications Systems. – Springer Verlag, New-York, 1993. – С. 359 – 393.
3. Privalov, A. Some Models Parameters Calculation for Simulation of Network Traffic Marginal Distribution and Self-similarity [Текст] / A. Privalov, A. Blagov. // ECMS. 23rd European conference of modeling and simulation, June 2009. С. 51 – 60.
4. Благов, А.В. Модификации моделей типа «входная  $M/G/\infty$ » и «On-Off источники» для имитационного моделирования самоподобного телекоммуникационного трафика [Электронный ресурс] / А.В. Благов, А.Ю. Привалов. // Труды МАИ: электронный научный журнал, №39, 2010. – URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/publiched.php?ID=14802>. – 0,94 п.л.
5. Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 [Текст] / Ю. Г. Карпов // Спб: изд-во БХВ-Петербург. – 2005. – 403 с.
6. Varga, A. Using the Omnet++ discrete event simulation system in education [Текст] / A. Varga. // IEEE Transaction on Education. University of New Mexico. 1999. – 11 с.
7. Кудрявцев, Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем [Текст] / Е.М. Кудрявцев. // М.: ДМК Пресс. – 2003. – 320 с.
8. Internet Traffic Archive [электронный ресурс]. URL: <http://ita.ee.lbl.gov/>.
9. Данн, Д. Джиттер. Теория. Часть 1. [электронный ресурс] / Д. Данн // URL: <http://iXBT.com/>. 2006.
10. Привалов, А. Ю. Двухточечный джиттер в сети периодических потоков в условиях максимальной нагрузки [Текст] / А. Ю. Привалов. // М.: «Проблемы передачи информации», том 36. – 2000. С. 96 – 111.
11. Привалов, А. Ю. Сглаживание джиттера потока постоянной битовой скорости после одного или нескольких узлов [Текст] / А. Ю. Привалов, К. Сораби. // М.: «Проблемы передачи информации», том 43. – 2007. – С. 85 – 111.

## CONSTRUCTING SIMULATION MODELS OF SELF-SIMILAR TELECOMMUNICATION TRAFFIC

© 2011 A. V. Blagov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper describes the construction of simulation models of telecommunication traffic. We present the realization of such mathematical models as «Input  $M/G/\infty$ » and «On-Off Sources» in the AnyLogic simulation modeling environment. The concept of jitter in telecommunication traffic is described. Characteristics of real traffic routes are compared with those of simulated ones.

*Self-similar traffic, traffic simulation, simulation modeling, «Input  $M/G/\infty$ », «On-Off Sources», AnyLogic, jitter.*

### **Информация об авторах**

**Благов Александр Владимирович**, аспирант кафедры технической кибернетики. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: математическое моделирование и телекоммуникации. E-mail: [alex\\_ssauprof@mail.ru](mailto:alex_ssauprof@mail.ru).

**Blagov Alexander Vladimirovitch**, post-graduate student of the technical cybernetics department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), [alex\\_ssauprof@mail.ru](mailto:alex_ssauprof@mail.ru). Area of research: mathematical modeling and telecommunications.