

# АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТИ MPLS ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТОПОЛОГИИ

М.А. Буранова<sup>1\*</sup>, Р.Т. Латыпов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
Самара, 443010, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: buranova-ma@psuti.ru

## Информация о статье

УДК 519.872

Статья поступила в редакцию 15.05.2019

**Ссылка для цитирования:** Буранова М.А., Латыпов Р.Т. Анализ параметров функционирования сети MPLS при изменении топологии // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 6–12. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-3-6-12

**Аннотация:** Оценка вероятностно-временных характеристик функционирования инфокоммуникационных сетей – задача, которая является одной из основных при проектировании сетей. Учитывая, что трафик современных сетей обладает свойствами самоподобия, возникают затруднения при использовании традиционного математического аппарата теории массового обслуживания. В работе представлены результаты имитационного моделирования оценки задержки, джиттера и вероятности потерь при обработке трафика в сети MPLS. В качестве исследуемых потоков использовали реальный мультимедийный трафик и поток on-off с распределением Парето периодов on и off. В результате установлено, что при увеличении загрузки сети или при увеличении масштаба сети джиттер, как правило, снижается, а задержка и вероятность потерь увеличиваются.

**Ключевые слова:** параметры качества обслуживания (QoS), MPLS, корреляция, имитационное моделирование.

## Введение

В условиях функционирования современных инфокоммуникационных сетей большое значение имеет обеспечение качества обслуживания – QoS (от англ. Quality of Service) – для различных типов приложений. Одним из приоритетных в общем объеме трафика, обрабатываемого в глобальной сети, является мультимедийный поток, особенностью обработки которого является требование соблюдения ограничений по параметрам QoS. При этом основное внимание уделяется, как правило, проблеме удержания задержки на определенном уровне, но для мультимедийных потоков не менее важным параметром является джиттер.

Необходимость оценки джиттера привела к тому, что в последние годы данной проблеме уделяется значительное внимание. Так, в [1] получены некоторые результаты, позволяющие определить джиттер для пуассоновского потока, а также для потоков с экспоненциальным распределением длин пакетов и произвольным распределением интервалов времени между пакетами. В [2–4] представлены результаты анализа джиттера в системе

типа G/M/1. Также была проведена оценка джиттера при изменении загрузки сети для трех примеров произвольного распределения интервалов времени между пакетами: экспоненциального, Парето и Вейбулла. Но такие ограничения часто не соответствуют тем характеристикам, которые имеют реальные потоки, которые, как правило, обрабатываются в системе, описываемой математической моделью G/G/1.

Одна из технологий, призванных обеспечить требуемый уровень QoS, это многопротокольная коммутация по меткам – MPLS (от англ. Multiprotocol Label Switching). В работах [5, 6] проведен анализ задержки пуассоновского потока в сети MPLS в зависимости от масштаба сети. Но поскольку современный трафик отличается от простейшего потока, то возникает необходимость исследования поведения непурассоновских потоков в зависимости от масштаба и загрузки сети.

В качестве анализируемых параметров рассмотрим задержку, джиттер и вероятность потерь, так как эти параметры наиболее характерны при оценке качества обслуживания сетей. В качестве

обрабатываемых потоков используем мультимедийный трафик, зарегистрированный на реальной сети и on-off процесс с распределением Парето периодов on и off. Поскольку для мультимедийных потоков наиболее критичным является отклонение от задержки в процессе передачи (о чем упоминалось выше), то особое внимание уделим джиттеру – изменению задержки в потоке от некоторого минимального значения [7].

В соответствии с рекомендацией Специальной комиссии по интернет-разработкам – IETF (от англ. Internet Engineering Task Force) [8] – под джиттером понимается случайная переменная  $J_i$ , определяемая как  $J_{i+1} = |T_{i+1} - T_i|$ , где  $T_i = W_i + Q_i$  – время задержки  $i$ -го пакета в узле сети ( $W_i$  – время ожидания  $i$ -го пакета в очереди,  $Q_i$  – время его обслуживания).

Основываясь на [1, 2] и используя предположение Линдли [9], что пакет  $(i + 1)$  не будет ждать в очереди при выполнении условия  $V_{i+1} \geq T_i$ , где  $V_{i+1}$  – интервал времени между приходом  $(i + 1)$ -го и  $i$ -го пакета, получим:

$$W_{i+1} = \begin{cases} 0 & \text{при } V_{i+1} \geq T_i \\ W_i + Q_i - V_{i+1} & \text{в др. случае} \end{cases}$$

и поэтому

$$J_{i+1} = \begin{cases} |Q_{i+1} - T_i| & \text{при } V_{i+1} \geq T_i \\ |Q_{i+1} - V_{i+1}| & \text{в др. случае} \end{cases} \quad (1)$$

Считая случайные величины  $T_i$ ,  $Q_i$  и  $V_i$  независимыми и некоррелированными в структуре каждой последовательности, индекс  $i$  у соответствующих плотностей вероятностей можно отбросить и ввести обозначения:  $f_T(x)$ ,  $f_V$  и  $f_Q(z)$ .

В соответствии с (1) можно записать:

$$P(J_{i+1} = \omega) = \iiint_{x,y,z} P(V_{i+1} = y) \cdot P(Q_{i+1} = z) \cdot P(T_i = x) dx dz dy. \quad (2)$$

В (2) учтена независимость случайных величин  $T_i$ ,  $Q_{i+1}$  и  $V_{i+1}$ , а области интегрирования  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  выбираются с учетом возможных значений случайных переменных, которые определяются условием, аналогичным условию (1):

$$\omega = \begin{cases} |z - x| & \text{при } y \geq x \\ |z - y| & \text{в др. случае} \end{cases}$$

Для плотностей вероятностей из выражения (2) следует [8]:

$$f_{J_{i+1}}(\omega) = \int_0^\infty f_{V_{i+1}}(y) \int_0^\infty f_{Q_{i+1}}(z) [f_T(z - \omega)U(y - x) + f_T(z - y)U(x - y)] dz dy,$$

где  $U(x) = \begin{cases} 1 & \text{если } x \geq 0 \\ 0 & \text{в др. случае} \end{cases}$

Знание плотности  $f_{J_{i+1}}(\omega)$  позволяет найти среднее значение  $E(J_{i+1})$ :

$$E(J_{i+1}) = \int_0^\infty \omega f_{J_{i+1}}(\omega) d\omega = \int_0^\infty f_{V_{i+1}}(y) \int_0^\infty f_{Q_{i+1}}(z) \times \int_0^\infty [\omega f_T(z - \omega)U(y - x) + \omega f_T(z - y)U(x - y)] dx. \quad (3)$$

Если учесть, что при  $y \geq x$   $\omega = |z - x|$ , а при  $y < x$   $\omega = |z - y|$ , то интеграл по  $dx$  в (3) можно переписать, опуская индекс  $i$  в виде:

$$\int_0^\infty [\omega f_T(z - \omega)U(y - x) + \omega f_T(z - y)U(x - y)] dx = \int_0^y |z - y| f_T(x) dx + |z - x| \int_y^\infty f_T(x) dx.$$

Теперь для среднего значения джиттера можно окончательно записать:

$$J = E(|T_{i+1} - T_i|) = \int_0^\infty f_V(y) \int_0^\infty f_Q(z) \left[ \int_0^y |z - y| f_T(x) dx + |z - x| \int_y^\infty f_T(x) dx \right] dz \cdot dy. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет рассчитать среднее значение джиттера при известных или приближенных функциях плотности вероятностей случайных интервалов времени между поступлениями пакетов, времени обслуживания и времени ожидания пакета в очереди для системы обслуживания общего вида при обслуживании коррелированного трафика.

Очевидно, что оценка задержки и джиттера в системе  $G/G/1$  связана с большими вычислительными сложностями [1–3]. Для анализа параметров QoS в исследуемой сети предпочтительней воспользоваться имитационным моделированием.

Для сравнения исследовались два типа потоков: on-off процесс с распределением Парето периодов on и off (трафик Парето, длина пакетов – 1000 байт) и мультимедийный трафик, зарегистрированный на реальной сети. Для оценивания результатов моделирования с использованием трафика, зарегистрированного на реальной сети, предварительно необходимо проанализировать статистические свойства трафика.

#### Анализ статистических характеристик трафика

Требуется определить законы распределения интервалов времени между пакетами и длин пакетов рассматриваемого трафика, для чего воспользуемся программой Easyfit Professional, позволяющей произвести статистическую проверку гипотез.

Анализ распределения случайных интервалов времени между пакетами показал, что наиболее точным является распределение Вейбулла с параметрами  $\alpha = 0,37$  и  $\beta = 3,5 \cdot 10^{-4}$  (рисунок 1а):

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right),$$

где  $\alpha$  – параметр формы;  $\beta$  – масштабный параметр.

Аналогично при анализе распределения случайных длин пакетов получена наиболее точная аппроксимация распределением Коши с параметрами  $\sigma = 24$  и  $\mu = 1,4 \cdot 10^{-3}$  (рисунок 1б):

$$f(x) = \left(\pi\sigma \left(1 + \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)\right)^{-1},$$

где  $\sigma$  – непрерывный масштабный коэффициент;  $\mu$  – непрерывный параметр формы.

Представленная гистограмма (см. рисунок 1б) имеет три ярко выраженных пика. Основной вклад дают длины пакетов: 475 байт, соответствующие первому пику; 1370 байт, соответствующие второму пику; 1442 байта, соответствующие третьему пику. Очевидно, что в данном случае аппроксимация распределением Коши может быть улучшена использованием аппроксимации суммой трех распределений:

$$f(x) = P_1 \cdot \delta(x - x_0) + P_2 \cdot \delta(x - x_1) + P_3 \cdot \delta(x - x_2),$$

где  $\delta(x - x_0)$  – дельта функция в точке  $x_0$ , соответствующей первому пику;  $\delta(x - x_1)$  – она же в точке  $x_1$ , соответствующей второму пику;  $\delta(x - x_2)$  – она же в точке  $x_2$ , соответствующей третьему пику;  $P_1 = 0,08$ ;  $P_2 = 0,51$ ;  $P_3 = 0,41$ .

Следовательно:

$$f(x) = 0,08 \cdot \delta(x - x_0) + 0,51 \cdot \delta(x - x_1) + 0,41 \times \delta(x - x_2),$$

где  $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ .

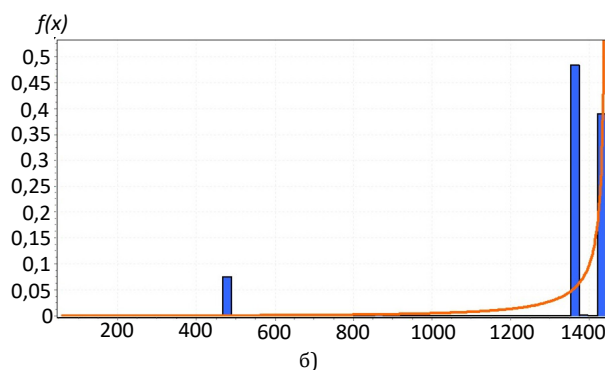
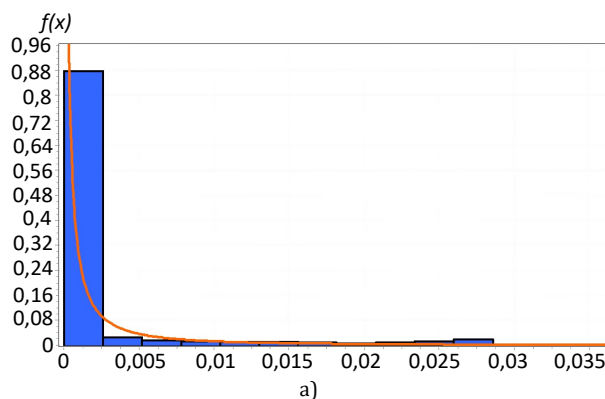


Рис. 1. Гистограмма распределения случайных интервалов времени между пакетами и результат аппроксимации распределением Вейбулла (а) и Коши (б)

Анализ гистограмм и их возможных аппроксимаций на основе критерия Колмогорова – Смирнова, и улучшенных с использованием распределения смеси, показывает, что построение адекватной модели трафика для системы имитационного моделирования с такими параметрами весьма затруднительно.

Для генерируемого программой ns2 потока on-off с распределением Парето периодов on и off анализ гистограмм для интервалов времени между пакетами показал результат аппроксимации, представленный на рисунке 2. Этот анализ, необходимый для более объективной оценки характера и статистической структуры исследуемых потоков, позволил сделать вывод, что наиболее точным является распределение Парето.

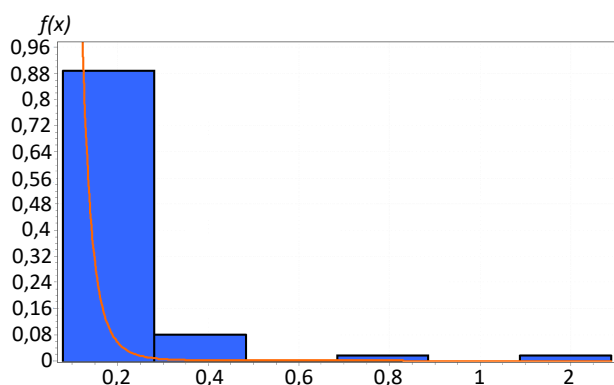


Рис. 2. Гистограмма распределения случайных длин пакетов и результат аппроксимации распределением Pareto

Еще одной важной характеристикой трафика является наличие корреляционных свойств. Для непуассоновских потоков характерна долговременная зависимость между событиями, которая может негативно сказаться на параметрах функционирования систем, обрабатывающих подобный трафик. Случайные процессы могут проявлять свойство долговременной зависимости между событиями через достаточно большие промежутки времени.

Телекоммуникационный трафик, являющийся случайным процессом, обладает долговременной зависимостью, если автокорреляционная функция не суммируема ( $\sum_k R(k) = \infty$ ). Расчет ее выборочной реализации случайного процесса можно провести по формуле [10]:

$$R(k) = \frac{\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2},$$

где  $\bar{X}$  – среднее значение;  $N$  – объем выборки.

График зависимости коэффициентов корреляции  $R(k)$  для последовательностей интервалов времени между пакетами и длинами пакетов для реального мультимедийного трафика приведены на рисунках 3а и 3б, из которых видно, что присутствует значительная корреляционная зависимость в последовательностях этих интервалов.

На рисунке 3в приведены коэффициенты корреляции для последовательностей интервалов времени между пакетами потока on-off с распределением Парето периодов on и off, генерируемого программой ns2.

Аналогично реальному мультимедийному трафику в последовательностях интервалов времени между пакетами для генерируемого on-off процесса с распределением Парето присутствует корреляционная зависимость, которая убывает гораздо медленнее по сравнению с мультимедийным трафиком. Длины пакетов данного потока формируются одним размером 1000 байт, следовательно, корреляция будет значительной и стремиться к максимальной.

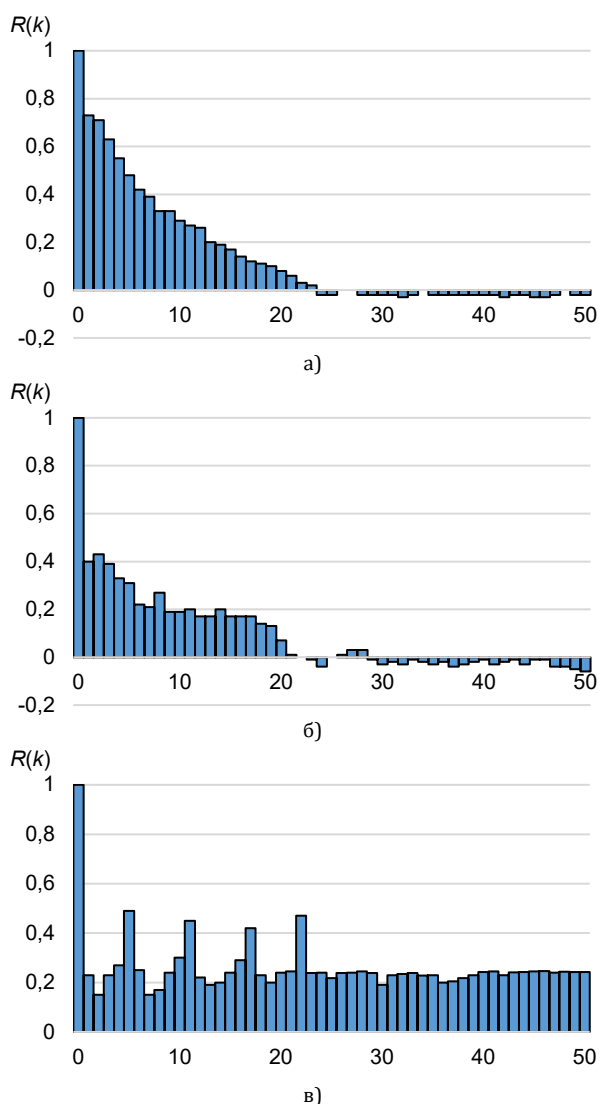


Рис. 3. График зависимости коэффициентов автокорреляции: а) интервалы времени между пакетами; б) размеры пакетов мультимедийного трафика уровня доступа; в) интервалы времени между пакетами трафика по Парето

Анализ статистических характеристик мультимедийного трафика показал, что вероятностный закон распределения случайных интервалов времени между пакетами характеризуется распределением Вейбулла, а длин пакетов – Коши, которое в нашем случае может быть представлено в виде распределения смеси (суммы трех дельта-функций). С учетом установленных корреляционных свойств трафика построение адекватной аналитической модели является затруднительным, что обуславливает разработку имитационной модели с обработкой реального трафика.

### Разработка имитационной модели

Имитационная модель, реализованная в программе ns2, позволяет оценить задержку, джиттер задержки пакетов и вероятность их потерь при обработке различных типов трафика, и в схематичном виде представлена на рисунке 4.

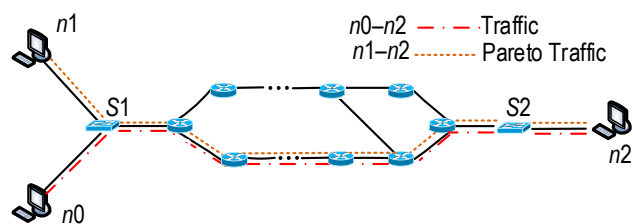


Рис. 4. Схема моделирования в ns2

С использованием разработанной модели было поставлено два эксперимента: 1) исследование зависимости параметров QoS в зависимости от загрузки сети при прохождении трафика через 6 узлов; 2) влияние изменения масштаба сети на параметры QoS (количество узлов варьируется от 5 до 10; коэффициент загрузки  $\rho = 0,4$ ).

Результаты эксперимента при изменении загрузки сети приведены на рисунках 5а, 5в и 5д. Их анализ показывает, что с увеличением загрузки сети задержка увеличивается.

В тоже время джиттер ведет себя не столь однозначно. При увеличении загрузки джиттер реального трафика снижается до величины загрузки  $\rho = 0,4$ , на участке от  $\rho = 0,4$  до  $\rho = 0,7$  появляется явно выраженный локальный максимум; затем при увеличении загрузки джиттер увеличивается. Для on-off процесса с распределением Парето периодов on и off характерно снижение джиттера до  $\rho = 0,6$ , затем он увеличивается. Вероятность потерь увеличивается в обоих случаях. Следует заметить, что для реального трафика анализируемые параметры изменяются более резко в сравнении с трафиком Парето. Но рост задержки у трафика Парето начинается при меньшей загрузке ( $\rho = 0,6$ ). Для сети MPLS такое изменение параметров связано с особенностями реализации технологии и наличием механизмов регуляции перегрузок.

Результаты эксперимента при изменении масштаба сети, а именно при изменении количества узлов в сети показаны на рисунках 5б, 5г и 5е.

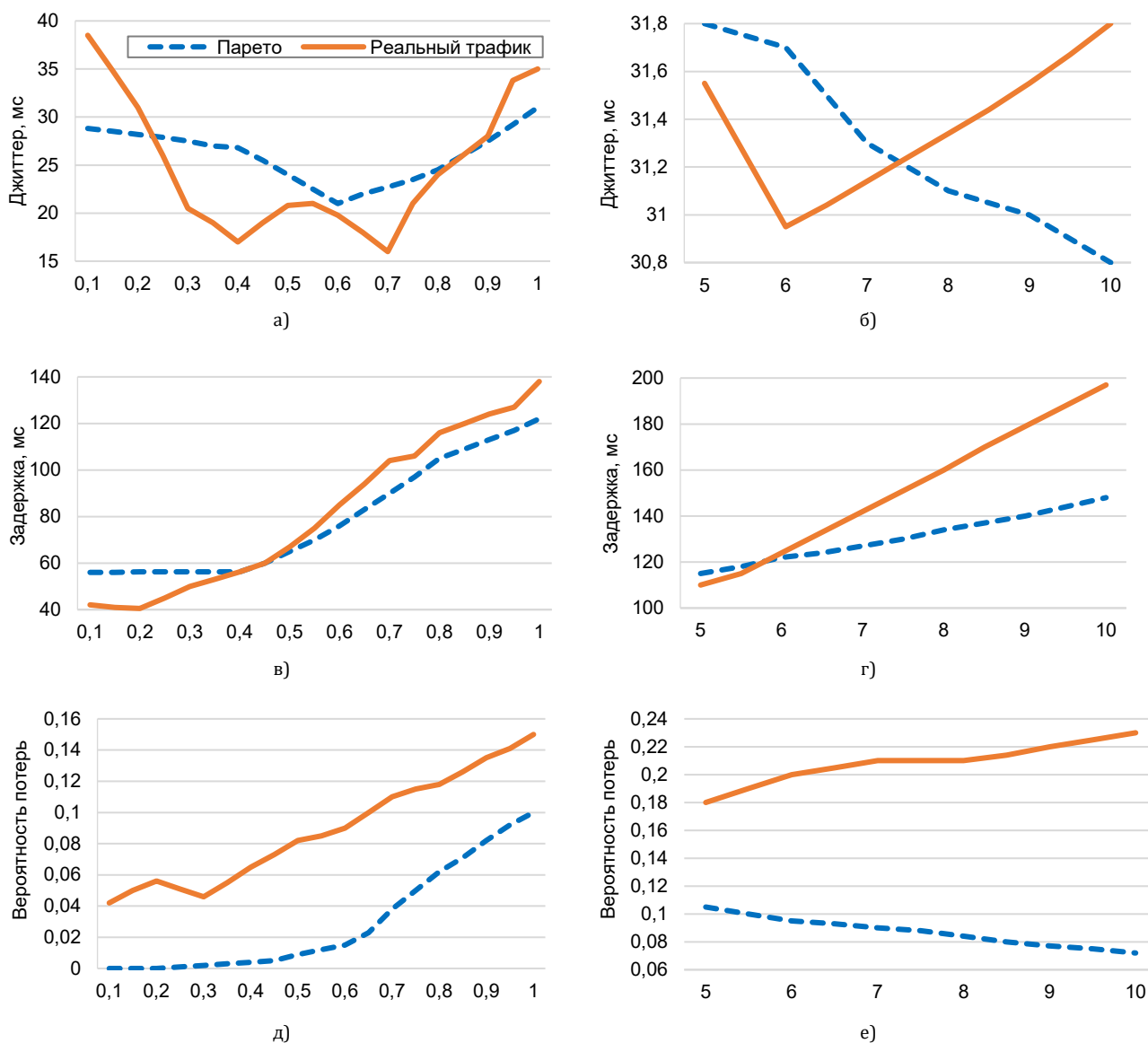


Рис. 5. Изменение джиттера (а, б), задержки (в, г) и вероятности потерь (д, е) в зависимости от загрузки (слева) и количества узлов (справа) в сети MPLS

Анализ результатов второго эксперимента показал, что джиттер пакетов реального трафика, как и при увеличении загрузки сети, снижается до определенного уровня  $n = 6$ , затем начинает увеличиваться. Для трафика Парето (on-off процесс) джиттер с увеличением количества узлов снижается. Задержка ожидаемо увеличивается, но увеличение незначительно. Изменение вероятности потерь пакетов реального трафика незначительно увеличивается, в тоже время для трафика Парето снижается. При этом эти изменения лежат в пределах 0,05.

Обратим внимание, что оцениваемые параметры QoS ведут себя более предсказуемо, кривые более гладкие для трафика Парето. При этом корреляционные связи для интервалов времени между пакетами и длин пакетов у этого трафика выше, чем рассматриваемого мультимедийного потока. Отсюда следует, что при увеличении коэффициента корреляции для статистик трафика (интервалов времени между пакетами и длин пакетов) параметры QoS улучшаются и становятся более предсказуемыми без локальных максимумов.

### Заключение

Определены вероятностные законы распределения случайных моментов поступления пакетов на обслуживание (распределение Вейбулла) и длин пакетов (распределение Коши) для мультимедийного трафика; полученные распределения относятся к классу распределений с «тяжелыми хвостами».

Получены оценки задержки, джиттера и вероятности потерь при изменениях загрузки сети и мас-

штаба сети. В результате серии проведенных экспериментов с имитационной моделью обработки трафика установлены следующие зависимости.

Во-первых, при увеличении уровня загрузки сети MPLS:

- задержка и вероятность потерь также увеличиваются;

- джиттер имеет тенденцию к снижению до  $\rho = 0,4$ , на участке от  $\rho = 0,4$  до  $\rho = 0,7$  появляется явно выраженный локальный максимум, затем наблюдается тенденция к росту.

Во-вторых, при увеличении количества узлов сети MPLS:

- задержка увеличивается;

- джиттер имеет тенденцию к снижению до  $n = 6$ , затем наблюдается тенденция к росту;

- вероятность потерь увеличивается для реального трафика, а для on-off процесса с распределением Парето периодов on и off – снижается.

Предложенная в работе модель может быть использована при оценке параметров функционирования сети MPLS в условиях обработки различных типов трафика, в том числе при обработке реальных потоков. При этом можно определить наиболее эффективные условия обработки потоков различного типа при изменении топологии и характера функционирования сети.

В развитие данной темы предполагается разработка аналитической модели с учетом наличия в трафике самоподобных свойств, в том числе корреляционных зависимостей. Такая модель может быть построена с использованием аппроксимации моделью  $H_l/H_k/1$ .

### Список используемых источников

1. Dahmouni H., Girard A., Sansò B. An analytical model for jitter in IP networks // Annals of telecommunications – annales des telecommunications. 2012. Vol. 67. Iss. 1-2. PP. 81–90. DOI:10.1007/s12243-011-0254-y
2. Dbira H., Girard A., Sansò B. Calculation of packet jitter for non-poisson traffic // Annals of telecommunications. 2016. Vol. 71. Iss. 5-6. PP. 223–237. DOI:10.1007/s12243-016-0492-0
3. Kartashevskiy V., Buranova M. Analysis of Packet Jitter in Multiservice Network // 5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T, Kharkiv, Ukraine, 9–12 October 2018). Piscataway, NJ: IEEE, 2018. DOI:10.1109/INFOCOMMST.2018.8632085
4. Буранова М.А. Карташевский В.Г., Латыпов Р.Т. Анализ джиттера мультисервисной сети // XX Международная научно-техническая конференция, XVI Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях» (Уфа, Россия, 20–22 ноября 2018). Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2018. Том 1. С. 117–119.
5. Kartashevskiy V.G., Buranova M.A. Research of tunneling effect in MPLS network // Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T, Kharkiv, Ukraine, 10–13 October 2017). Piscataway, NJ: IEEE, 2017. DOI:10.1109/INFOCOMMST.2017.8246391
6. Гольдштейн А.В. Механизм эффективного туннелирования в сети MPLS // Вестник связи. 2004. № 2. С. 48–54.
7. Rec. ITU-T Y.1540 (07/16). Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters.
8. RFC 33934. Demichelis C, Chimento P. IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). 2000. DOI:10.17487/RFC3393
9. Kleinrock L. Queueing Systems. Volume 1: Theory. New York: Wiley-Interscience, 1975. 417 p.
10. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. М.: Радиотехника, 2003. 480 с.

\* \* \*

# MPLS NETWORK PARAMETERS ANALYSIS WHEN CHANGING THE TOPOLOGY

M. Buranova<sup>1</sup> , R. Latypov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,  
Samara, 443096, Russian Federation

## Article info

The article was received 15 May 2019

**For citation:** Buranova M., Latypov R. MPLS Network Parameters Analysis when Changing the Topology. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(3):6–12. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-3-6-12>

**Abstract:** *One of the main tasks in network design is to evaluate the probability-time characteristics of the functioning of information and communication networks. Considering that the traffic of modern networks possesses the properties of self-similarity, we observe the difficulties while using the traditional mathematical apparatus of public serve theory. This paper presents us the results of jitter simulation estimating the delay, the probability of traffic loss when traffic processing in MPLS network. It was taken the real multimedia traffic and an on-off flow with a distribution of Pareto periods on and off as the researched flows. As the result, we discovered that when the network load increases or network size increases, jitter usually decreases, while the delay and loss probability increase.*

**Keywords:** *parameters of quality of service (QoS), MPLS, correlation, simulation.*

## References

1. Dahmouni H., Girard A., Sansò B. An analytical model for jitter in IP networks. *Annals of telecommunications – annales des telecommunications*. 2012;67(1-2):81–90. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12243-011-0254-y>
2. Dbira H., Girard A., Sansò B. Calculation of packet jitter for non-poisson traffic. *Annals of telecommunications*. 2016;71(5-6):223–237. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12243-016-0492-0>
3. Kartashevskiy V., Buranova, M. Analysis of Packet Jitter in Multiservice Network. *5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S&T, 9–12 October 2018, Kharkiv, Ukraine*. Piscataway, NJ: IEEE; 2018. Available from: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632085>
4. Buranova M.A., Kartashevskiy V.G., Latipov R.T. Jitter analysis in multiservice network. *XXth Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, XVIth Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Problemy tekhniki i tekhnologii telekommunikatsii. Opticheskie tekhnologii v telekommunikatsiiakh", 20–22 November 2018, Ufa, Russia*. [Proceedings of the XXth International Scientific and Technical Conference, the XVIth International Scientific and Technical Conference "Problems of Engineering and Telecommunications Technology. Optical Technologies in Telecommunications", 20–22 November 2018, Ufa, Russia]. Ufa: Ufa State Aviation Technical University Publ.; 2018. vol.1. p.117–119. (in Russ.)
5. Kartashevskiy V.G., Buranova M.A. Research of tunneling effect in MPLS network. *Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S&T, 10–13 October 2017, Kharkiv, Ukraine*. Piscataway, NJ: IEEE; 2017. Available from: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246391>
6. Goldshtein A.V. Mekhanizm effektivnogo tunnelirovaniia v seti MPLS [Effective Tunneling Mechanism in an MPLS Network]. *Vestnik svyazi*. 2004;2:48–54. (in Russ.)
7. Rec. ITU-T Y.1540. *Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters*. July 2016.
8. RFC 33934. Demichelis C, Chimento P. *IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)*. 2000. Available from: <https://10.17487/RFC3393>
9. Kleinrock L. *Queueing Systems. Volume 1: Theory*. New York: Wiley-Interscience; 1975. 417 p.
10. Shelukhin O.I., Teniakshev A.M., Osin A.V. *Fraktalnye protsessy v telekommunikatsiiakh* [Fractal Processes in Telecommunications]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2003. 480 p. (in Russ.)