

## ОЦЕНКА ДЖИТТЕРА В СИСТЕМЕ G/M/1 НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

*Буранова М.А., Карташевский В.Г., Латыпов Р.Т.*

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ*

*E-mail: mburanova@yandex.ru, kartashevskiy-vg@psuti.ru, msib@psuti.ru*

Анализ параметров функционирования IP-сетей при обработке мультимедийных потоков является весьма важной задачей. Существует множество подходов по оценке параметров качества обслуживания в системе G/G/1. При этом такой анализ часто основывается на допущениях, которые не позволяют определить параметры с необходимой точностью. В работе рассмотрен подход по оценке среднего значения джиттера мультимедийного трафика, зарегистрированного на реальной сети. Приведен анализ джиттера мультимедийного трафика в системе G/M/1. Оценка джиттера основана на аппроксимации системы G/G/1 системой  $H_2/H_2/1$ , имеющей гиперэкспоненциально распределенное время поступления и обслуживания. Для определения параметров гиперэкспоненциального распределения в работе использованы известные подходы, основанные на оценке начальных моментов первого и второго порядка.

**Ключевые слова:** *качество обслуживания (QoS – Quality of Service), джиттер, гиперэкспоненциальный закон распределения, система массового обслуживания*

### Введение

В настоящее время производительность сети является одним из ключевых направлений в исследовании телекоммуникационных сетей. Для анализа производительности сети и повышения качества обслуживания (QoS – Quality of Service) необходима разработка новых методов, основанных на математических моделях реального трафика. Для решения данной задачи, как правило, применяется теория систем массового обслуживания. Однако ввиду отсутствия адекватных моделей современного трафика зачастую для анализа используется пуассоновская модель [1].

Проблемы, связанные с разработкой моделей трафика и сетей обработки трафика, обусловлены разнородностью обрабатываемых потоков, статистической структурой современного трафика, необходимостью учитывать конвергенцию инфокоммуникационных технологий, что может реально влиять на оценки производительности разрабатываемых сетей [2].

Анализ качества обслуживания в инфокоммуникационных сетях, как правило, направлен на оценку задержки. При этом не менее важной характеристикой качества функционирования сети является джиттер. Для некоторых приложений джиттер выступает более значимым параметром, чем задержка. Особенно важно это для мультимедийных потоков. Учитывая, что мультимедийный трафик в современных сетях занимает все большую долю, проблема оценки джиттера становится все актуальней.

Свидетельство сложности трафика проявляется в таких формах, как наличие корреляционных связей, долговременные зависимости или самоподобие, которые обнаруживаются при статистическом анализе реализаций трафика [2–4]. Данные явления изучаются давно, и существуют достаточно убедительные доказательства их значительного влияния на показатели функционирования сетей [5; 6].

Эффект самоподобия во многом определяется характером поведения пользователей, организацией запросов, особенностью работы протокола ТСР. Для характеристик, описывающих интенсивность поступления пакетов, их длительности, более точные оценки показывают статистические модели, основанные на распределениях с тяжелыми хвостами, таких как Парето и Вейбулла.

При этом следует учесть тот факт, что конкретный тип распределения, лежащий в основе математической модели, значительно зависит от конкретной реализации трафика и требует тщательного анализа. Другой проблемой, связанной с использованием распределений с тяжелыми хвостами, является сложность их анализа и использования. В том числе необходимо получить преобразование Лапласа этих распределений, при этом нет удобного выражения для преобразования Лапласа распределений Парето и Вейбулла.

Самоподобный характер современного трафика необходимо учитывать и при оценке джиттера или изменения задержки пакетов. Как правило, такая оценка базируется, как и при оценке задержки, на основе математического аппарата

теории массового обслуживания. Современные системы, обрабатывающие непуассоновский трафик, лучше описываются моделями  $G/G/1$ . В работах [7–9] представлены результаты оценки джиттера с использованием аналитического и имитационного моделирования. Реализуемые в этих работах подходы весьма трудоемки.

Одним из возможных вариантов использования методов классической теории массового обслуживания при обработке самоподобного трафика является вариант аппроксимации системы  $G/G/1$  системой  $H_2/H_2/1$ , имеющей гиперэкспоненциально распределенное время поступления и обслуживания. Развитием такого подхода стало использование аппроксимации системой  $H_K/H_L/1$ . В [10] было установлено, что применение смеси экспоненциальных распределений является теоретически обоснованным подходом к моделированию IP-трафика.

Модель  $H_2/H_2/1$  может быть использована в различных подходах описания систем. Например, в [2] приведена методика анализа функционирования сети при обработке самоподобного трафика с использованием гиперэкспоненциального распределения, где первая компонента распределения показывает экспоненциальную составляющую, а вторая описывает поведение тяжелого хвоста. Но данный подход также достаточно трудоемкий для оценки сетевых параметров и требует анализа распределений с тяжелыми хвостами. Более удобными являются подходы с применением аппроксимации с суммой двух экспонент [10].

### Анализ джиттера IP-сети

Под джиттером понимают либо среднюю абсолютную вариацию задержки, либо изменение задержки в потоке от некоторого минимального значения [12]. В соответствии с рекомендацией IETF (Internet Engineering Task Force – Специальная комиссия интернет-разработок) [13] под джиттером понимается случайная переменная  $J_i$ , определяемая как

$$J_{i+1} = |T_{i+1} - T_i|,$$

где  $T_i$  – время задержки  $i$ -го пакета в узле сети, которое определяется в виде  $T_i = W_i + Q_i$ , где  $W_i$  – время ожидания  $i$ -го пакета в очереди и  $Q_i$  – время его обслуживания.

Основываясь на [7–9; 14] и на предположении Линдли [1], заключающемся в том, что  $(i+1)$ -й пакет не будет ждать в очереди при выполнении условия, что интервал времени между приходом  $(i+1)$ -го и  $i$ -го пакета больше, чем время задержки  $i$ -го пакета в узле сети, получим:

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

Исходя из этого, джиттер определим следующим образом:

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

Если предположить случайные величины  $T_i$ ,  $Q_i$  и  $V_i$  независимыми между собой и не коррелированными в структуре каждой последовательности случайной величины, индекс  $i$  у соответствующих плотностей вероятностей можно отбросить и ввести обозначения:  $f_T(x)$  – плотность вероятностей случайной величины  $T$ ,  $f_V(y)$  – плотность вероятностей случайной величины  $V$  и  $f_Q(z)$  – плотность вероятностей случайной величины  $Q$ .

В [7; 9] показано, что среднее значение джиттера определяется в соответствии со следующим выражением:

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

При известных или приближенных функциях плотности вероятностей случайных интервалов времени между поступлениями пакетов, времени обслуживания и времени ожидания пакета в очереди выражение (1) позволяет оценить среднее значение джиттера для системы обслуживания  $G/G/1$ .

В случае когда плотность распределения вероятностей какой-либо реализации либо практически невозможно, либо весьма затруднительно описать конкретным законом распределения, можно описать ее смесью распределений. Для (1) функции  $f_T(x)$ ,  $f_V(y)$  и  $f_Q(z)$  можно представить в виде смеси показательных распределений, которые предпочтительней для описания и моделирования трафика IP-сети [10].

Если произвольную плотность вероятностей в системе  $G/G/1$  обозначить как  $f(x)$ , то задача аппроксимации  $f(x)$  с использованием гиперэкспоненциальных распределений может быть представлена в виде

$$f(x) = H_N(x) = \sum_{i=1}^N p_i h_i(x), \quad (2)$$

где  $h_i(x)$  – функция правдоподобия  $i$ -й компоненты смеси;  $h_i(x) = \alpha_i e^{-\alpha_i x}$ ;  $p_i \geq 0$  – вероят-

ность;  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ . В случае применения модели  $H_2/H_2/1$  выражение (2) можно представить в виде

$$f(x) = p\alpha_1 e^{-\alpha_1 x} + (1-p)\alpha_2 e^{-\alpha_2 x}.$$

Использование гиперэкспоненциального распределения в качестве примера произвольного распределения  $G$  позволяет получить достаточно точные результаты при незначительных вычислительных затратах. При этом необходимо обозначить параметры каждой экспоненциальной составляющей распределения.

Интервалы между отсчетами реализации трафика, распределенные по закону  $f_v(y)$ , определяются параметром  $\gamma$ :

$$a(x) = p\gamma_1 e^{-\gamma_1 x} + (1-p)\gamma_2 e^{-\gamma_2 x},$$

время обслуживания –  $f_Q(z)$ , определяется параметром  $\mu$ :

$$b(x) = q\mu_1 e^{-\mu_1 x} + (1-q)\mu_2 e^{-\mu_2 x},$$

транзитное время –  $f_T(x)$ , определяется параметром  $\delta$ :

$$c(x) = g\delta_1 e^{-\delta_1 x} + (1-g)\delta_2 e^{-\delta_2 x}.$$

В [14] показан подход с использованием гиперэкспоненциальной аппроксимации плотностей  $f_v(y)$  для интервалов времени между поступлениями и  $f_Q(z)$  для интервалов времени обслуживания. При этом было принято, что  $f_w(\cdot)$  – показательное распределение, имеющее вид  $f_w(\tau) = \delta e^{-\delta\tau}$ , где параметр  $\delta$  определяется как  $\delta = \mu(1-\xi)$  [1];  $\xi$  – корень уравнения  $\xi = \Lambda_v(\mu - \mu\xi)$ , где  $\Lambda_v$  – преобразование Лапласа плотности  $f_v(\cdot)$ ;  $\mu$  – средняя интенсивность обработки пакета в системе  $G/M/1$ . Следовательно,  $c(x)$  можно записать в виде  $c(x) = \delta e^{-\delta x}$ .

Учитывая вышесказанное, можно принять следующее представление для плотностей  $f_v(\cdot)$  и  $f_Q(\cdot)$ :

$$f_v(\tau) = p\gamma_1 e^{-\gamma_1 \tau} + (1-p)\gamma_2 e^{-\gamma_2 \tau}; \quad (3)$$

$$f_Q(\tau) = q\mu_1 e^{-\mu_1 \tau} + (1-q)\mu_2 e^{-\mu_2 \tau}. \quad (4)$$

Так как для времени задержки пакета в системе  $T_i$  справедливо  $T_i = W_i + Q_i$ , то плотность вероятности  $f_T(\cdot)$  определяется сверткой распределений (при выполнении условия независимости случайных величин  $W$  и  $Q$ ):

$$\begin{aligned} f_T(y) &= \int_0^\infty f_w(u) f_Q(y-u) du = \\ &= \frac{\delta q \mu_1}{|\delta - \mu_1|} e^{-\mu_1 y} + \frac{\delta(1-q)\mu_2}{|\delta - \mu_2|} e^{-\mu_2 y}. \end{aligned}$$

В итоге получены все плотности, входящие в (1), следовательно, можно оценить среднее значение джиттера, учитывая соотношение:

$$\begin{aligned} \int_0^y |z-x| f_T(x) dx &= \int_0^z (z-x) f_T(x) dx + \\ &+ \int_z^y (x-z) f_T(x) dx. \end{aligned}$$

Окончательный результат выражения для расчета джиттера [14]:

$$\begin{aligned} J &= \alpha_1 + \alpha_2(A+B) - \\ &- \frac{A}{\mu_1} \left[ \frac{p\gamma_1}{\mu_1 + \gamma_1} + \frac{(1-p)\gamma_2}{\mu_1 + \gamma_2} \right] - \\ &- \frac{B}{\mu_2} \left[ \frac{p\gamma_1}{\mu_2 + \gamma_1} + \frac{(1-p)\gamma_2}{\mu_2 + \gamma_2} \right] + \\ &+ \frac{2qA}{\mu_1} \left[ \frac{p\gamma_1}{2\mu_1 + \gamma_1} + \frac{(1-p)\gamma_2}{2\mu_1 + \gamma_2} \right] + \\ &+ \frac{2(1-q)B}{\mu_2} \left[ \frac{p\gamma_1}{2\mu_2 + \gamma_1} + \frac{(1-p)\gamma_2}{2\mu_2 + \gamma_2} \right] + \\ &+ 2 \left[ \frac{A(1-q)}{\mu_2} + \frac{Bq}{\mu_1} \right] \times \\ &\times \left[ \frac{p\gamma_1}{\mu_1 + \mu_2 + \gamma_1} + \frac{(1-p)\gamma_2}{\mu_1 + \mu_2 + \gamma_2} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{(\mu_1 - \mu_2)[Bq\mu_1 - A(1-q)\mu_2]}{\mu_1\mu_2(\mu_1 + \mu_2)}, \\ \alpha_2 &= \frac{\mu_1(1-q) + q\mu_2}{\mu_1\mu_2}, \\ A &= \frac{\delta q}{|\delta - \mu_1|}, \quad B = \frac{\delta(1-q)}{|\delta - \mu_2|}. \end{aligned}$$

Для получения значения джиттера, согласно выражению (5), необходимо знание параметров распределений  $f_v(\cdot)$  и  $f_Q(\cdot)$  и  $f_w(\cdot)$ , то есть  $(p, \gamma_1, \gamma_2)$  и  $(q, \mu_1, \mu_2)$  и  $\delta$ . Для определения параметров гиперэкспоненциальных распределений (3) и (4) воспользуемся подходом, показанным в [15; 16], где представлена методика определения параметров по двум моментам (среднее, дисперсия) исходного распределения для независимых случайных величин.

В [15; 16] показано, что для получения аналитических выражений начальных моментов гиперэкспоненциальных распределений до второго порядка, основанный на использовании свойства преобразования Лапласа, и для (3):

$$\bar{\tau}_\gamma = \frac{p}{\gamma_1} + \frac{(1-p)}{\gamma_2}, \quad (6)$$

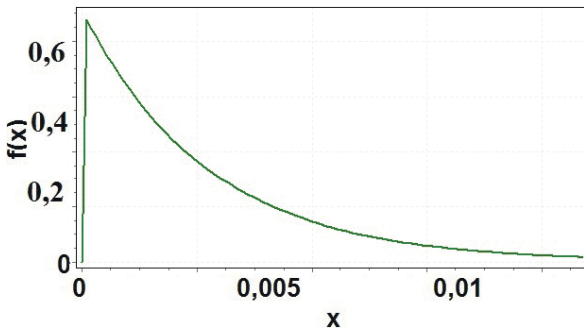


Рисунок 1. Распределение случайных интервалов времени между пакетами (Weibull)

$$\overline{\tau_\gamma^2} = \frac{2p}{\gamma_1^2} + \frac{2(1-p)}{\gamma_2^2}, \quad (7)$$

где  $\overline{\tau_\gamma}$  – среднее значение интервалов между поступлениями пакетов. Учитывая, что для квадрата коэффициента вариации

$$c^2 = \frac{\overline{\tau_\gamma^2} - (\overline{\tau_\gamma})^2}{(\overline{\tau_\gamma})^2}. \quad (8)$$

Параметры распределений вычисляются как

$$\gamma_1 = 2p / \overline{\tau_\gamma}, \quad \gamma_2 = 2(1-p) / \overline{\tau_\gamma}, \quad (9)$$

С учетом выражений (6), (7) и (9) в (8) получено для параметра  $p$ :

$$p = \frac{1}{2} \left( 1 \pm \sqrt{\frac{c_\gamma^2 - 1}{c_\gamma^2 + 1}} \right). \quad (10)$$

Аналогично можно получить значения параметров для выражения (4), но для определения параметров  $(q, \mu_1, \mu_2)$  необходимо использовать выражения для  $\tau_\mu$  – среднее значение времени обслуживания.

Для оценки параметра  $\delta$  воспользуемся известными подходами [15] для системы  $H_2/H_2/1$ . В работе [15] авторы показали, что для системы  $H_2/H_2/1$  для функции плотности времени ожидания преобразование Лапласа имеет вид

$$W^*(s) = \frac{s_1 s_2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}{\mu_1 \mu_2 (s + s_1)(s + s_2)},$$

а среднее время ожидания будет иметь вид

$$T = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}, \quad (11)$$

где  $-s_1$  и  $-s_2$  – отрицательные вещественные части корней кубического уравнения  $s^3 - c_2 s^2 - c_1 s - c_0 = 0$ , для которого коэффициенты:

$$\begin{aligned} c_{\text{uuuu}} &= a b - a b - a (\mu + \mu) + b (\gamma + \gamma), \\ c_{\text{uuuu}} &= -a b - a - b + (\gamma + \gamma)(\mu + \mu)(\gamma + \gamma), \\ c_2 &= \gamma_1 + \gamma_2 - \mu_1 - \mu_2, \end{aligned}$$

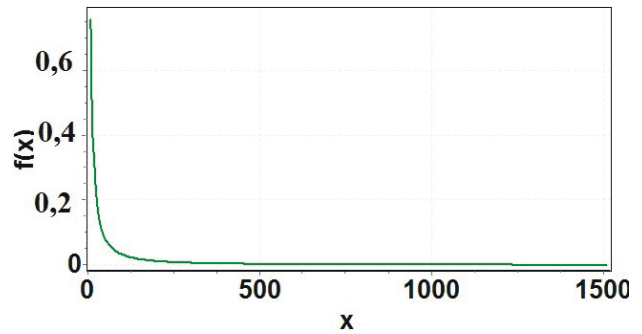


Рисунок 2. Распределение случайных длин пакетов (Pareto)

с промежуточными параметрами:

$$\begin{aligned} a_0 &= \gamma_1 \gamma_2, & a_1 &= p \gamma_1 + (1-p) \gamma_2, \\ b_0 &= \mu_1 \mu_2, & b_1 &= q \mu_1 + (1-q) \mu_2. \end{aligned}$$

В итоге параметр  $\delta$  в системе  $G/M/1$  можно определить согласно выражению

$$\delta = \frac{1}{W} = \frac{s_1 s_2 \mu_1 \mu_2}{s_1 \mu_1 \mu_2 + s_1 \mu_1 \mu_2 - \mu_1 s_1 s_2 - \mu_2 s_1 s_2}.$$

Полученные результаты позволяют оценить параметры, характеризующие реальный мультимедийный трафик.

### Анализ статистических характеристик мультимедийного трафика

Рассмотрим реализацию мультимедийного трафика на уровне доступа пользователя сети, описание которого приведено в [11]. Законы распределения интервалов времени между пакетами и длин пакетов данного трафика можно проанализировать на основании статистического критерия Колмогорова – Смирнова. Анализ распределения случайных интервалов времени между пакетами показал, что наиболее точным является распределение Weibull (Вейбулла) с параметрами:  $\alpha = 0,32$ ,  $\beta = 167$ , которое имеет вид

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

где  $\alpha$  – параметр формы;  $\beta$  – масштабный параметр. На рисунке 1 отражены гистограмма и результат ее аппроксимации.

Для длин пакетов получили результат, показанный на рисунке 2, в виде распределения Парето (Pareto) с параметрами:  $\alpha = 0,3$ ;  $\beta = 60$ , которое имеет вид

$$f_R(x) = \begin{cases} \alpha \frac{x_m^\alpha}{x^{\alpha+1}}, & \text{если } x \geq x_m, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где  $x_m$  – масштабный параметр;  $\alpha$  – параметр формы. При определении параметров функции



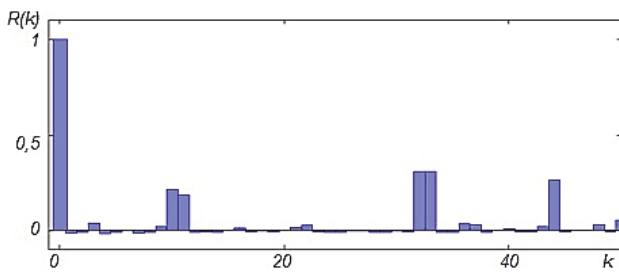


Рисунок 3. График зависимости коэффициентов корреляции  $R(k)$  интервалов времени между пакетами

онирования необходимо учитывать наличие зависимостей между случайными величинами трафика или наличие корреляционных связей между отсчетами реализации трафика.

Расчет автокорреляционной функции выборочной реализации случайного процесса можно провести по формуле

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

где  $\bar{X}$  – среднее значение;  $N$  – объем выборки. Для исследуемых отсчетов рассматриваемого мультимедийного потока были определены зависимости коэффициентов корреляции, показанные на рисунках 3, 4.

Анализ графиков зависимостей коэффициентов корреляции  $R(k)$  для интервалов времени между пакетами реализации мультимедийного трафика свидетельствует, что корреляции практически отсутствуют. Это позволяет при анализе параметров функционирования сделать предположение о независимости рассматриваемых случайных величин. Следует заметить, что отсутствие корреляции наблюдается для исследуемой реализации трафика, но не является характерной особенностью в целом для современных инфокоммуникационных потоков.

### Оценка джиттера для мультимедийного трафика

Анализируя реализацию рассматриваемого мультимедийного трафика, мы определили значения  $\bar{\tau}_\gamma = 20$  мс,  $\bar{\tau}_\mu = 102$  мс. Известно, что коэффициент загрузки системы рассчитывается как  $\rho = \bar{\gamma} / \mu = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\gamma$ , учитывая полученные значения для  $\bar{\tau}_\gamma$  и  $\bar{\tau}_\mu$ , получим  $\rho = 0,19$ . Согласно выражению (8), можно оценить коэффициенты вариации:  $c_\gamma = 7,2$  мс и  $c_\mu = 0,06$  мс. Для параметров гиперэкспоненциальных распределений по выражениям (9) и (10) было получено:

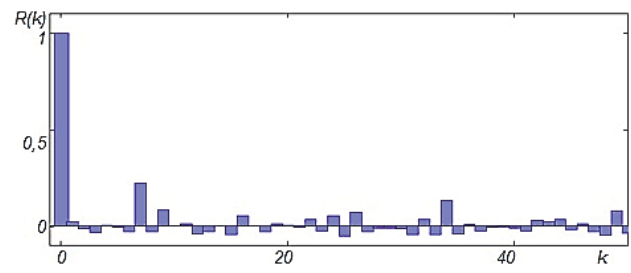


Рисунок 4. График зависимости коэффициентов корреляции  $R(k)$  длин пакетов

–  $p = 0,93$ ,  $\gamma_1 = 800$  мс<sup>-1</sup>,  $\gamma_2 = 58$  мс<sup>-1</sup> – для  $f_V(\tau)$  согласно (3);

–  $q = 0,96$ ,  $\mu_1 = 189$  мс<sup>-1</sup>,  $\mu_2 = 6$  мс<sup>-1</sup> – для  $f_Q(\tau)$  согласно (4).

Используя для расчета  $\delta$  полученные значения параметров, имеем  $\delta = 0,002$  мс<sup>-1</sup>. На основании полученных значений параметров и формулы (5) для джиттера определено:  $J = 8 \cdot 10^{-2}$  мс.

### Заключение

В работе была получена аналитическая оценка джиттера в системе  $G/M/1$  на основе применения системы  $H_2/H_2/1$ . Оценка джиттера произведена с использованием известных подходов, но данные подходы ранее не были применены совместно. Представленная методика анализа джиттера является основой для моделирования системы  $G/G/1$  с использованием  $H_2/H_2/1$ .

При этом сохраняется проблема учета корреляционных свойств потоков.

### Литература

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
2. Feldmann A., Whitt W. Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models // Proceedings IEEE INFOCOM'97. Piscataway: IEEE, 1997. P. 1096–1104.
3. On the self-similar nature of Ethernet traffic / W.E. Leland [et al.] // IEEE. ACM Transactions on Networking. 1994. Vol. 2. № 1. P. 1–15.
4. Montgomery M., Veciana G. On the relevance of time scales in performance oriented traffic characterizations // IEEE INFOCOM'96. 1996. P. 513–520.
5. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы // Телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
6. Kartashevskii V.G., Buranova M.A. Analysis of packet jitter in multiservice network //

- 5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 – Conference Proceedings. 2018. P. 797–802. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632085.
7. Dbira H., Girard A., Sanso B. Calculation of packet jitter for non-Poisson traffic // *Annals of Telecommunications*. 2016. Vol. 71. № 5–6. P. 223–237.
  8. Карташевский В.Г., Буранова М.А. Моделирование джиттера пакетов при передаче по мультисервисной сети // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2019. Т. 17. № 1. С. 34–40.
  9. Латыпов Р.Т., Буранова М.А. Анализ параметров функционирования сети MPLS при изменении топологии // *Труды учебных заведений связи*. 2019. Т. 5. № 3. С. 6–12.
  10. Keilson J., Machihara F. Hyperexponential waiting time structure in hyperexponential  $H_K/H_L/1$  system // *Journal of the Operation Society of Japan*. 1985. № 28 (3). P. 242–250.
  11. *Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов / под ред. А.Л. Бузова, С.А. Букашкина*. М.: Радиотехника, 2017. 448 с.
  12. Demichelis C., Chimento P. IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). Institution IETF, RFC 33934. 2000. 21 p. DOI: 10.17487/RFC3393.
  13. Internet protocol data communication service IP packet transfer and availability performance parameters. ITU-T Recommendation Y. 1540. 2002. 33 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-I.380-199902-S/en> (д.о. 10.11.2019).
  14. Kartashevskiy I., Buranova M. Calculation of packet jitter for correlated traffic // *International Conference on «Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019»*. 2019. Vol. 11660. P. 610–620. (Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham). DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9\_53.
  15. Тарасов В.Н., Карташевский И.В. Определение среднего времени ожидания требований в управляемой системе массового обслуживания  $H_2/H_2/1$  // *Системы управления и информационные технологии*. 2014. № 3 (57). С. 92–96.
  16. Тарасов В.Н., Горелов Г.А., Ушаков Ю.А. Восстановление моментных характеристик распределения интервалов между пакетами входящего трафика // *Инфокоммуникационные технологии*. 2014. № 2. С. 40–44.

*Получено 31.01.2020*

**Буранова Марина Анатольевна**, к.т.н., доцент кафедры информационной безопасности (ИБ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-67. E-mail: buranova-ma@psuti.ru

**Карташевский Вячеслав Григорьевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ИБ ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-53-50. E-mail: kartashevskiy-vg@psuti.ru

**Латыпов Руслан Танисович**, аспирант кафедры ИБ ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-67. E-mail: msibs@psuti.ru

## ESTIMATE JITTER IN THE G/M/1 SYSTEM BASED ON HYPEREXPONENTIAL DISTRIBUTIONS

*Buranova M.A., Kartashevskiy V.G., Latypov R.T.*

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation  
E-mail: buranova-ma@psuti.ru, kartashevskiy-vg@psuti.ru, msib@psuti.ru*

Analysis of the parameters of the functioning of IP-networks in the processing of multimedia streams is a very important task. There are many approaches to assessing the quality of service parameters in the  $G/G/1$  system. But such an analysis is often based on assumptions that do not allow determining the parameters with the necessary accuracy. The paper considers an approach to assess the average value of jitter of multimedia traffic recorded on a real network. The analysis of jitter of multimedia traffic in the  $G/M/1$  system is given. Jitter estimation is based on the  $G/G/1$  system approximation by the system, which has a hyperexponentially distributed arrival and servicing time. To determine

the hyperexponential distribution parameters, well-known approaches based on the assessment of the initial moments of the first and second order have been used.

**Keywords:** *quality of service, jitter, hyperexponential distribution law, queuing system*

**DOI:** 10.18469/ikt.2020.18.1.02

**Buranova Marina Anatolievna**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD in Technical Sciences, Associate Professor. Tel. +7 846 339-11-67. E-mail: buranova-ma@psuti.ru

**Kartashevskiy Vyacheslav Grigorievich**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 846 333-53-50. E-mail: kartashevskiy-vg@psuti.ru

**Latypov Ruslan Tanisovich**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD Student. Tel. +7 846 339-11-67. E-mail: msib@psuti.ru

## References

1. Kleinrock L. *Queueing Systems: Volume I, Theory*. New York: Wiley Interscience, 1975, 417 p.
2. Feldmann A., Whitt W. Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models. *Proceedings IEEE INFOCOM'97*. Piscataway: IEEE, 1997, pp. 1096–1104.
3. Leland W.E. et al. On the self-similar nature of Ethernet traffic. *IEEE. ACM Transactions on Networking*, 1994, vol. 2, no. 1, pp. 1–15.
4. Montgomery M., Veciana G. On the relevance of time scales in performance oriented traffic characterizations. *IEEE INFOCOM'96*, 1996, pp. 513–520.
5. Sheluhin O.I., Osin A.V., Smol'skiy S.M. Samopodobie i fraktaly [Self-Similarity and Fractals]. *Telekommunikacionnye prilozheniya*. Moscow: Fizmatlit, 2008, 368 p. (In Russian).
6. Kartashevskii V.G., Buranova M.A. Analysis of packet jitter in multiservice network. *5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 – Conference Proceedings*, 2018, pp. 797–802. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632085.
7. Dbira H., Girard A., Sanso B. Calculation of packet jitter for non-Poisson traffic. *Annals of telecommunications*, 2016, vol. 71, no. 5–6, pp. 223–237.
8. Kartashevskii G., Buranova, M.A. Modelirovanie dzhittera paketov pri peredache po mul'tiservisnoj seti [Simulation of packet jitter in multi-service network transmission]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 34–40. (In Russian).
9. Latypov R.T., Buranova, M.A. Analiz parametrov funkcionirovaniya seti MPLS pri izmenenii topologii [Analysis of the parameters of the functioning of the MPLS network with a change in topology]. *Trudy uchebnyh zavedenij svyazi*, 2019, vol. 5, no. 3, pp. 6–12. (In Russian).
10. Keilson J., Machihara F. Hyperexponential waiting time structure in hyperexponential  $H_K/H_L/1$  system. *Journal of the Operation Society of Japan*, 1985, no. 28 (3), pp. 242–250.
11. *Spetsial'naya radiosvyaz'. Razvitie i modernizatsiya oborudovaniya i ob'ektov / pod red. A.L. Buzova, S.A. Bukashkina* [Special Radio Communication. Development and Modernization of Equipment and Facilities. Ed. by A.L. Buzov, S.A. Bukashkin]. Moscow: Radiotekhnika, 2017, pp. 323–386. (In Russian).
12. Demichelis C., Chimento P. *IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)*. Institution IETF, RFC 33934, 2000, 21 p. DOI: 10.17487/RFC3393.
13. *Internet protocol data communication service IP packet transfer and availability performance parameters*, ITU-T Recommendation Y. 1540, 2002, 33 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-I.380-199902-S/en>.

14. Kartashevskiy I., Buranova M. Calculation of packet jitter for correlated traffic. *International Conference on «Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019»*, 2019, vol. 11660, p. 610–620. (Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham). DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9\_53.
15. Tarasov V.N., Kartashevskij I.V. Opredelenie srednego vremeni ozhidaniya trebovanij v upravly-aemoj sisteme massovogo obsluzhivaniya  $H_2/H_2/1$  [Determination of the average waiting time for requirements in a managed mass service system  $H_2/H_2/1$ ]. *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii*, 2014, no. 3 (57), pp. 92–96. (In Russian).
16. Tarasov V.N., Gorelov G.A., Ushakov Y.A. Vosstanovlenie momentnyh harakteristik raspredeleniya intervalov mezhdru paketami vkhodyashchego trafika [Recovery of moment characteristics of the distribution of intervals between packets of incoming traffic]. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2014, no. 2, pp. 40–44. (In Russian).

*Received 31.01.2020*

УДК 621.315

## УДАЛЕННОЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, СЕТЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЯЗИ И ИНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОАО «РЖД» НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ POF

*Белоногов А.С., Шорохов Н.С.*

*Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, РФ*

*E-mail: abelonogov@rambler.ru*

Статья описывает способ и систему передачи энергии лазерного излучения высокой мощности по оптоволокну для электроснабжения удаленных от основных источников питания электронных устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, оптических сетей и узлов на основе технологии Power-over-Fiber с использованием специального волоконно-оптического кабеля и лазерной системы высокой мощности. Причем используемые кабели обеспечивают возможность передачи энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния, и эти расстояния и уровни передаваемой мощности ранее считались недостижимыми. Стоит отметить, что этого удалось добиться за счет особой многослойной структуры кабеля, а в спектральной характеристике лазерного излучения – отсутствия спектра частот, на котором возникают явления вынужденного рамановского рассеяния, что позволило достичь приведенных в работе теоретических и экспериментальных результатов. Кроме того, предполагается, что конструкция кабелей будет выдерживать суровые атмосферные условия эксплуатации. Приведены результаты эксперимента, которые показали возможность передачи пиковой вводимой мощности лазера 5 кВт на расстояние 2 км по оптическому кабелю с получением на выходе системы 51 % исходной вводимой мощности.

**Ключевые слова:** *Power-over-Fiber, передача энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния, оптическое волокно, вынужденное комбинационное рассеяние, вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна, вынужденное рамановское рассеяние, стоксовы и антистоксовы компоненты, QВН-коннектор, коллиматор, удаленное электроснабжение оптических сетей, узлов и прочих электроустройств посредством волоконно-оптического кабеля*

### Введение

Кратко опишем смысл технологии Power-over-Fiber (PoF): **подразумевается, что мощность, необходимая для питания удаленного устройства, передается по оптоволокну в виде оптического излучения, генерируемого лазерным источником, с величиной оптической мощности порядка сотен мВт–десятков Вт, что значительно превышает значения, используемые в телекоммуникациях.** На стороне питаемого устройства находится полупроводниковый фотоприемник особой

конструкции, называемый фотовольтаическим преобразователем, чаще всего многослойной структуры, показывающий высокую эффективность преобразования мощности на рабочей длине волны (более 25 %).

Преобразователь не имеет внешнего питания, генерация носителей заряда происходит исключительно за счет подводимой оптической мощности. При подключении преобразователя в цепь питаемого устройства преобразователь начинает работать как источник постоянного тока. Он пре-