

## УТОЧНЕНИЕ ТИПА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ОДНОСТОРОННЕЙ ЗАДЕРЖКИ ПАКЕТОВ В ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ

*Виноградов Н.И., Сагатов Е.С., Самойлова Д.В.*

*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара, РФ  
E-mail: ampelos@mail.ru*

Работа посвящена измерению метрик производительности глобальной сети. Приведено описание метода измерения односторонней сетевой задержки с использованием синхронизации времени измерительных узлов с помощью сигналов навигационной системы ГЛОНАСС с микросекундной точностью. Проведены эксперименты по измерению односторонней сетевой задержки, джиттера и доступной пропускной способности сетевого канала с помощью аппаратно-программного комплекса NetTestBox. Предложена математическая модель функции распределения односторонней сетевой задержки в виде суммы экспоненциального и усеченного нормального распределений с весовыми коэффициентами, гипотеза проверена на правдивость на трех сетевых маршрутах с применением критерия Пирсона. Полученная функция распределения позволяет описать поведение односторонней сетевой задержки на реальных сетевых маршрутах на больших временных промежутках. Сделаны выводы о динамике характеристик глобальной сети за последние 10 лет и их соответствии требованиям приложений реального времени.

**Ключевые слова:** глобальная сеть, ГЛОНАСС, GPS, Internet, метрики производительности IP-сетей, односторонняя сетевая задержка, функция распределения односторонней сетевой задержки

### Введение

В современном обществе получают всё большее распространение приложения реального времени: IP-телефония, видеоконференции, онлайн игры, удалённые рабочие столы и др., которые крайне требовательны к качеству связи. С распространением облачных сервисов стало возможным использование удалённых приложений, но при этом необходим качественный канал связи с сервером, на котором они расположены.

Для оценки качества сетевых соединений инженерным центром Internet (IETF) разработаны стандарты, объединённые под общим названием метрик производительности IP-сетей (IP Performance Metrics, IPPM) [1] – это метрики, которые описывают качество и производительность передачи данных в глобальной сети. Основными метриками производительности IP-сетей являются: односторонняя задержка (one-way delay, OWD) [2], двусторонняя задержка (round-trip time, RTT) [3], джиттер (вариация задержки), потери пакетов, доступная пропускная способность [4]. Односторонняя задержка пакетов – задержка при передаче пакета по сети от источника к приемнику – является одной из ключевых метрик производительности IP-сетей и описана в стандарте RFC 7679. Двусторонняя задержка – описывает задержку прохождения пакетов от источника к получателю и обратно.

Исследование задержек пакетов важно для задач математического моделирования передачи трафика по сети, приложений реального време-

ни [5], Internet-телефонии и видеосвязи, а также для исследования характеристик производительности сетей. Для всех вышеперечисленных приложений требуется знать тип распределения задержки пакетов. T. Elteto, S. Molnar провели исследование двусторонней задержки пакетов в локальной сети компании Ericsson [6] и установили, что распределение задержки соответствует усеченному нормальному распределению с некоторыми отклонениями в виде «тяжелых хвостов». Другая группа специалистов провела ряд экспериментов с помощью измерительного сервиса RIPE NCC Test Traffic Measurement [7]. Сбор и обработка большого объема экспериментальных данных об односторонней сетевой задержке на реальных сетевых маршрутах позволили сделать вывод, что для описания задержки пакетов в глобальной сети следует использовать экспоненциальное распределение.

Целью работы является уточнение типа распределения для односторонней сетевой задержки, с достаточной точностью аппроксимирующего экспериментальные данные, полученные в ходе измерений односторонней сетевой задержки между реальными измерительными узлами.

### Метод измерения односторонней задержки

Для измерения метрик производительности IP-сетей использован запущенный в опытную эксплуатацию в 2015 г. аппаратно-программный измерительный комплекс NetTestBox [8], представляющий собой компактный высокопроизво-

длительный одноплатный компьютер со специализированным клиент-серверным программным обеспечением *owring* и встроенной временной синхронизацией.

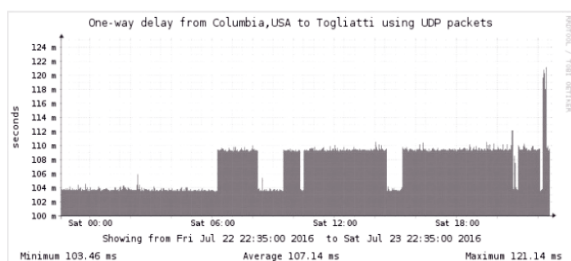
Аппаратная часть комплекса базируется на одноплатном компьютере ARM-архитектуры Raspberry Pi 2 Model B и навигационном приемнике U-blox UBX-M8030 с поддержкой навигационных систем глобального позиционирования ГЛОНАСС/GPS/BeiDou/Galileo. Габаритные размеры измерительного узла составляют  $90 \times 70 \times 25$  мм<sup>3</sup>. На нем запускается адаптированная версия операционной системы Linux – Raspbian. Обмен с сервером хранения и обработки экспериментальных данных осуществляется через Ethernet подключение к Internet.

Для измерения односторонней задержки пакетов с микросекундной точностью необходимо обеспечить синхронизацию системного времени операционных систем измерительных узлов. Точная синхронизация системного времени в NetTestBox обеспечивается NTP сервером *chrony*, обрабатывающим сигнал PPS от навигационного приемника, фронт которого синхронизирован с началом секунды в UTC с точностью не хуже  $\pm 40$  нс [9]. Для проведения измерений сетевых метрик разработана клиент-серверная программа *owring*.

NetTestBox обеспечивает измерение четырех основных сетевых метрик производительности, накопление статистики и передачу ее на удаленный сервер для дальнейшей обработки данных [8-9].

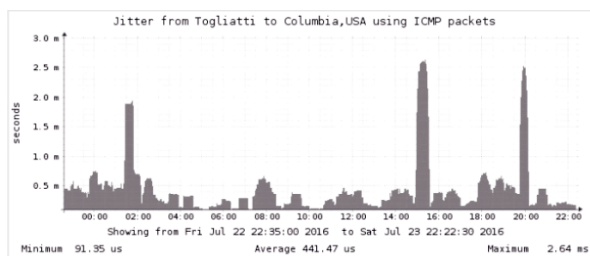
### Динамика характеристик глобальной сети Internet

В 2006 г. при проведении экспериментов по измерению характеристик IP-сетей [11] была предложена шкала GAP (Good, Acceptable, Poor) для оценки качества передачи видеoinформации по IP-сетям. Эти результаты интересно обобщить и сравнить со значениями, измеренными комплексом NetTestBox в 2016 г.



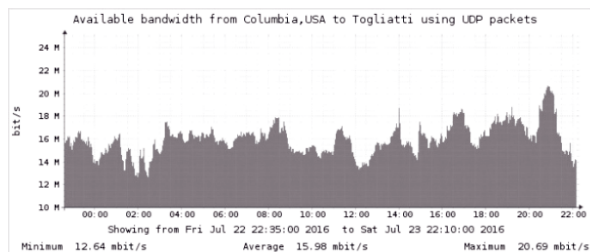
$$D_{\min} = 103,46 \text{ мс}, D_{cp} = 107,14 \text{ мс}, D_{\max} = 121,14 \text{ мс}$$

Рис. 1. График односторонней сетевой задержки на маршруте Колумбия-Тольятти



$$j_{\min} = 0,09 \text{ мс}, j_{cp} = 0,44 \text{ мс}, j_{\max} = 2,64 \text{ мс}$$

Рис. 2. График величины джиттера на маршруте Тольятти-Колумбия



$$V_{\min} = 12,64 \text{ Мбит/с}, V_{cp} = 15,98 \text{ Мбит/с}, V_{\max} = 20,69 \text{ Мбит/с}$$

Рис. 3. График доступной пропускной способности сетевого канала на маршруте Колумбия-Тольятти

На рис. 1-3 приведены графики односторонней сетевой задержки, джиттера и доступной пропускной способности, полученные на реальных сетевых маршрутах с помощью комплекса NetTestBox. Программный инструмент Round-robin Database tool (RRDtool) обеспечил построение графиков производительности. Усредненные результаты измерений показаны в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение метрик производительности

	2006 г.	2016 г.
Джиттер	40-50 мс	< 1 мс
Потери пакетов	1,5-2 %	< 0,1 %
Доступная полоса пропускания	1 Мбит/с	30 Мбит/с

Средние значения для сетевых метрик производительности в 2006 г. определены по приведенным в статье [11] результатам измерений.

Как видно из таблицы 1, характеристики глобальной сети за 10 лет улучшились более чем на порядок.

### Уточнение типа распределения односторонней сетевой задержки

Известно [7], что в односторонней сетевой задержке пакетов  $D$  можно выделить следующие составляющие разной природы:

$$D = D_{\min} + \frac{W}{B} + D_{\text{var}}, \quad (1)$$

где  $D_{\min}$  – минимальное время задержки пакетов;  $W$  – размер пакета;  $B$  – доступная полоса пропускания;  $D_{\text{var}}$  – переменная часть задержки при фиксированном размере пакета.

Для уточнения типа распределения переменной компоненты задержки  $D_{\text{var}}$  с помощью комплекса NetTestBox были собраны данные на маршрутах Самара (Россия) – Ростов-на-Дону (Россия), Самара – Колумбия (штат Миссури, США) и Ростов-на-Дону (Россия) – Колумбия (штат Миссури, США).

На основе полученных данных была построена функция распределения для сетевой задержки  $D$ :

$$F(D) = P(x \leq D). \quad (2)$$

В результате построения получено экспериментальное распределение, которое приведено на рис. 4. Для построения теоретической зависимости была выбрана сумма усеченного нормального  $F^u(D)$  и экспоненциального  $F^e(D)$  распределений с весовым коэффициентом  $k = 0,1$ :

$$F(D) = kF^u(D) + (1 - k)F^e(D).$$

Усеченное нормальное распределение описывается следующим выражением:

$$F^u(D) = \begin{cases} 0, & D < D_{\min} \\ \frac{1}{C} \frac{1}{\sqrt{2\pi j}} \int_{D_{\min}}^D e^{-\frac{(x-D_{av})^2}{2j^2}} dx, & D > D_{\min}; \end{cases} \quad (3)$$

$$C = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi j}} \int_{-\infty}^{D_{\min}} e^{-\frac{(x-D_{av})^2}{2j^2}} dx; \quad j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_{i+1} - D_i| -$$

– сетевой джиттер, то есть разница односторонних задержек прохождения двух пакетов [12];  $D_i, D_{i+1}$  – значения односторонних задержек  $i$ -го и  $(i + 1)$ -го пакетов;  $n$  – объем выборки;  $D_{av}$  – среднее значение задержки;  $D_{\min}$  – минимальное значение задержки.

Экспоненциальное распределение описывается выражением:

$$F^e(D) = \begin{cases} 0, & D < D_{av} - j; \\ 1 - e^{-\frac{D - D_{av} + j}{j}}, & D \geq D_{av} - j, \end{cases} \quad (4)$$

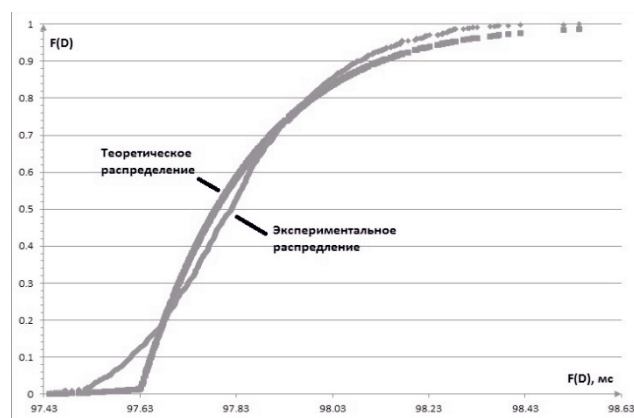
где  $j$  – сетевой джиттер. Ключевым этапом проверки гипотез об аппроксимации экспериментальных данных с помощью рассма-

триваемых функций распределения в данной работе служит критерий Хи-квадрат Пирсона. Результаты расчетов критерия и принятия решения о правдивости гипотезы для исследуемых маршрутов приведены в таблице 2. Графики полученных теоретического и экспериментального распределений приведены на рис. 4.

В результате проведенных тестов установлено, что модернизированное распределение, состоящее из суммы экспоненциального и усеченного нормального распределений с весовыми коэффициентами, можно рассматривать как истинное описание сетевой задержки.

Таблица 2. Расчет критерия Пирсона

Маршрут	Самара – Колумбия	Колумбия – Ростов-на-Дону	Ростов-на-Дону – Самара
Размер выборки, $n$	1078	1079	1079
Число степеней свободы, $N$	11	3	2
Порог $\chi^2_{0,99;N-1}$	23,209	9,210	6,635
Значение статистики $\chi^2_{\text{выб}}$	18,953	3,208	5,840
Принятие гипотезы	Да	Да	Да



$$D_{\text{сред}} = 97,848 \text{ мс}, \quad D_{\min} = 97,441 \text{ мс}, \quad j = 0,216 \text{ мс}$$

Рис. 4. Теоретическое и экспериментальное распределения односторонней задержки пакетов на маршруте Самара-Колумбия

### Заключение

В работе дано описание метода высокоточного измерения односторонней сетевой

задержки с использованием временной синхронизации ГЛОНАСС. На основе экспериментальных данных, полученных с помощью аппаратно-программного комплекса NetTestBox, произведен сравнительный анализ сетевых метрик производительности IP-сетей и сделан вывод, что за 10 лет производительность глобальной сети выросла в десятки раз, в настоящее время ее характеристики соответствуют требованиям приложений реального времени и обеспечивают передачу больших объемов мультимедийной информации.

Произведено модифицирование функции распределения односторонней сетевой задержки путем комбинирования усеченного нормального распределения и экспоненциального распределения с весовым коэффициентом  $k = 0,1$ . Используемые ранее в литературе функции распределения позволяли описывать одностороннюю сетевую задержку только на коротких временных промежутках не более 30 мин.

Исходная гипотеза о функции распределения сетевой задержки была подтверждена применением критерия Хи-квадрат Пирсона. Полученная функция распределения позволяет описать поведение односторонней сетевой задержки на реальных сетевых маршрутах на большие временные промежутки. Отметим, что временной интервал, в течение которого собирались данные, равен 9 ч.

### Литература

1. Paxson V., Mahdavi J., Mathis M., Almes G. Framework for IP performance metrics // IETF RFC 2330, 1998. – 40 p.
2. Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M., Morton A. RFC 7679: A one-way delay metric for IPPM // Internet Society, January 2016. – 20 p.

3. Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M. RFC 2681: A round-trip delay metric for IPPM // Internet Society, September 1999. – 20 p.
4. Chimento P., Ishac J. RFC 5136: Defining Network Capacity // IETF Network Working Group, February 2008. – 14 p.
5. Calyam P., Lee C.G. Characterizing voice and video traffic behavior over the Internet // International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS), 2005. – 12 p.
6. Eltetö T., Molnar S. On the distribution of round-trip delays in TCP/IP networks // Conference on Local Computer Networks 1999 (LCN'99). IEEE, 1999. – P. 172-181.
7. Сухов А.М., Кузнецова Н.Ю., Первицкий А.К., Гальцев А.А. Функция распределения задержки пакетов в глобальной сети для задач теории управления // Телекоммуникации. №12, 2010. – С. 10-16.
8. Vinogradov N.I., Sagatov E.S., Sukhov A.M. Device for measuring one-way network delay with microsecond accuracy // 23rd Telecommunications Forum TELFOR 2015. IEEE, 2015. – P. 133-136.
9. Виноградов Н.И., Сагатов Е.С. Методика измерения односторонней сетевой задержки пакетов с синхронизацией ГЛОНАСС // Телекоммуникации. №4, 2016. – С. 16 - 23.
10. Calyam P., Sridharan M., Mandrawa W., Schopis P. Performance measurement and analysis of H. 323 traffic // Proceedings of the 5th International Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2004), 2004. – P. 137-146.

*Получено 07.02.2017*

**Виноградов Никита Игоревич**, аспирант Кафедры суперкомпьютеров и общей информатики (СКОИ) Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королева (Самарский университет – СУ). Тел. 8-927-783-31-31. E-mail: ampelos@mail.ru

**Сагатов Евгений Собинович**, к.т.н., доцент Кафедры СКОИ СУ. Тел. 8-987-974-44-77. E-mail: sagatov@ya.ru

**Самойлова Дарья Вячеславовна**, магистр Кафедры СКОИ СУ. E-mail: dasha9409@inbox.ru

---

## REFINEMENT OF DISTRIBUTION TYPE FOR ONE-WAY DELAY IN THE GLOBAL NETWORK

Vinogradov N.I., Sagatov E.S., SamoiloVA D.V.  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation  
E-mail: ampelos@mail.ru

The paper investigates the measure of the IP performance metrics (IPPM). The description of measurement methods for one-way delay using satellite time synchronization system is given. Synchronization time of measuring units is achieved by using GLONASS navigation system signals with microsecond precision. Experiments to measure the one-way delay, jitter and available bandwidth are carried via hardware and software complex called NetTestBox. A mathematical model of the cumulative distribution function (CDF) for a one-way network delay is proposed as a weighted sum of exponential distribution and truncated normal distribution. This hypothesis tested for truthfulness on three network routes with the use of Pearson's test. The resulting distribution function describes the behavior of one-way network delay on the real network routes over long time intervals. The paper suggests the conclusions about the dynamics of the global network characteristics over the past 10 years and their compliance with the requirements of real-time applications.

**Keywords:** distribution function, Internet, IP performance metrics, global network, GLONASS, GPS, one-way delay

**DOI:** 10.18469/ikt.2017.15.2.07

**Vinogradov Nikita Igorevich**, Samara National Research University, Moskovskoe shosse, 34, room 120, Samara, 443086, Russian Federation; PhD student of the Department of Supercomputers and General Informatics. Tel.: +79277833131. E-mail: ampelos@mail.ru

**Sagatov Evgeny Sobirovich**, Samara National Research University, Moskovskoe shosse, 34, room 120, Samara, 443086, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Supercomputers and General Informatics; PhD in Technical Science. Tel.: +79879744477. E-mail: sagatov@ya.ru

**SamoiloVA Daria Viacheslavovna**, Samara National Research University, Moskovskoe shosse, 34, Samara, 443086, Russian Federation; Master Student of the Department of Supercomputers and General Informatics. E-mail: dasha9409@inbox.ru

### References

1. Paxson V., Mahdavi J., Mathis M., Almes G. *Framework for IP performance metrics*. IETF RFC 2330, 1998. 40 p.
2. Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M., Morton A. *RFC 7679: A one-way delay metric for IPPM*. Internet Society, January 2016. 20 p.
3. Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M. *RFC 2681: A round-trip delay metric for IPPM*. Internet Society, September 1999. 20 p.
4. Chimento, P., Ishac, J. *RFC 5136: Defining Network Capacity*. IETF Network Working group, February 2008. 14 p.
5. Calyam P., Lee C. G. Characterizing voice and video traffic behavior over the Internet. *International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS)*, 2005.
6. Eltetö T., Molnar S. On the distribution of round-trip delays in TCP/IP networks. *Conference on Local Computer Networks 1999 (LCN'99)*, IEEE, 1999, pp. 172-181. doi: 10.1109/LCN.1999.802014.
7. Sukhov A.M., Kuznecova N.Ju., Pervickij A.K., Gal'cev A.A. Funkcija raspredelenija zaderzhki paketov v global'noj seti dlja zadach teorii upravlenija [One-way delay distribution function in the global network for the problems of control theory]. *Telekommunikacii*, 2010, no.12, pp. 10-16.
8. Vinogradov N.I., Sagatov E.S., Sukhov A.M. Device for measuring one-way network delay with microsecond accuracy. *23rd Telecommunications Forum TELFOR 2015*, IEEE, 2015, pp. 133-136. doi: 10.1109/TELFOR.2015.7377432.
9. Vinogradov N.I., Sagatov E.S. Metodika izmerenija odnostononnej setevoj zaderzhki paketov s sinhronizaciej GLONASS [Method of measurement of one-way network packets delay with GLONASS synchronization]. *Telekommunikacii*, 2016, no.4, pp. 16-23.

10. Calyam P., Sridharan M., Mandrawa W., Schopis P. Performance measurement and analysis of H. 323 traffic. *Proceedings of the fifth International Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2004)*, 2004, pp. 137-146. doi: 10.1007/978-3-540-24668-8\_14.

Received 07.02.2017

УДК 629.783

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Зайнуллин А.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, РФ

E-mail: zainullin.a@list.ru

Предлагается оптическая архитектура формирования диаграммы направленности, в которой используется особенность пространственного разделения многосердцевидных оптических волокон для реализации компактных оптических сетей формирования радиолуча в гибридных сетях, что является новым направлением развития многосердцевидных оптических волокон. Продемонстрирована реализация оптической системы управления четырехэлементной антенной решеткой с использованием четырехжильного многосердцевидного оптического волокна. Проведен анализ влияния многосердцевидного оптического волокна на производительность излучающей системы. Экспериментально установлены требования к уровням перекрестных помех в рассмотренной архитектуре на основе многосердцевидного оптического волокна, которые также могут способствовать деградации сигнала. Аналитически оценено потенциальное ухудшение сигнала в оптической системе формирования радиолуча, имеющее особое значения при большом количестве жил в многосердцевидных оптических волокнах.

**Ключевые слова:** оптические системы формирования радиолуча, многосердцевидное оптическое волокно, перекрестные помехи, оптическая задержка в реальном времени

### Введение

Спутниковые системы наблюдения и провайдеры широкополосных услуг в космической области нуждаются в технологиях, способных реализовать потенциал высокоскоростной передачи больших объемов научных данных, видеоданных формата нового поколения и высокоскоростных IP подключений.

Использование фотонных подсистем в спутниках и других системах передачи данных приводит к улучшению с точки зрения пропускной способности, возможности реконфигурации, также массогабаритных показателей и энергоэффективности [1-2]. Использование функциональных свойств фотоники в телекоммуникационных системах не ограничивается распространением сигнала и его маршрутизацией внутри спутника, а также может быть использована для увеличения пропускной способности собственных радиоканалов, позволяя осуществлять широкополосные сеансы связи, увеличение скорости операций в многопользовательской среде и увеличение широты охвата покрытия связи при использовании в излучающих системах.

Электронные фазовращатели, используемые в антенных решетках для контроля угла диаграммы направленности (ДН), подвержены дрожанию луча, что, в свою очередь, ограничивает производитель-

ность системы. Избежать этого явления позволяют оптические системы формирования ДН [3-9] на основе метода временной задержки в реальном времени (РВЗ). Волоконная оптика хорошо приспособлена для реализации данного метода формирования ДН вследствие низких и радиочастотно-независимых оптических потерь, гибкости, невосприимчивости к электромагнитным помехам и высокой пропускной способности. К тому же фотонные системы формирования луча могут легко интегрироваться с удаленными частями антенны, что упрощает развертывание антенной решетки (АР), уменьшает перекрестные помехи и по своей природе не подвержено влиянию космической радиации.

В данной работе рассмотрены фотонные способы формирования ДН на основе оптических линий задержек [3-9]. В космической области, а также в других бортовых системах, таких как дроны и др., компактность является ключевым фактором. Продемонстрированы сверхкомпактные оптические системы формирования луча (ОСФЛ) на основе оптических кольцевых резонаторов на фотонных интегральных схемах, совместимых с процессами на комплементарных структурах металл-оксид-полупроводник [8]. Однако недостатками данного подхода являются ограничения как в диапазоне задержек, так и в радиочастотной (РЧ) ширине полосы.