

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДЕРЖКИ В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ

Малахов С.В., Тарасов В.Н., Карташевский И.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: vt@ist.psati.ru

В данной статье определяются задержки пакетов, вносимые использованием протокола OpenFlow в виртуальном вычислительном кластере, развернутого на программно-конфигурируемой сети. Проведены экспериментальные исследования прохождения трафика в программно-конфигурируемых сетях и традиционной сети. Экспериментальным путем найдены моментные характеристики интервалов между пакетами трафика, с помощью которых теоретически определены задержки пакетов в каналах как в случае подключения протокола OpenFlow, так и без него. Для теоретических расчетов использована математическая модель трафика в виде системы массового обслуживания $M_2/M/1$.

Ключевые слова: задержки пакетов, протокол OpenFlow, виртуальный вычислительный кластер, программно-конфигурируемые сети, моментные характеристики интервалов между пакетами.

Введение

Сетевые архитектуры, в которых уровни управления (например определение маршрута и качества передачи данных) отделены от уровней данных (то есть пересылка пакета с одного порта на другой организована согласно таблице коммутации) [1], становятся все больше популярными. Среди главных аргументов этого факта является то, что такая архитектура обеспечивает более структурированную программную среду для развития всей сети, потенциально упрощая уровень передачи данных. Управление передачей данных происходит с помощью специального программного обеспечения, так называемого контроллера [2], работающего на отдельном сервере, при этом контроллер вносит задержку обработки потоков. В связи с этим становится актуальной задача исследования производительности как контроллера, так и сети в целом [3].

Одной из первых технологий, развиваемых в рамках концепции программно-конфигурируемых сетей (ПКС), является протокол OpenFlow [4], позволяющий создавать внешние программные обработчики для расширения функциональности процессов коммутации, маршрутизации и обработки данных, которые не зависят от текущих прошивок оборудования и формируются на стороне специального внешнего приложения-контроллера [5].

Виртуализация распространяется сегодня не только на сервера, но и на сети, и на системы хранения данных [6]. Средства ПКС позволяют эффективнее и проще управлять облачными конфигурациями [7]. Для корпоративного сектора это дает возможность управления и оптимизации сложной инфраструктурой, а для среднего и малого бизнеса

– инструмент эффективной работы с публичными облаками.

Описание структуры экспериментального сегмента сети

Необходимо произвести по 10 тестовых задач с поддержкой протокола OpenFlow и без для оценки влияния протокола на производительность сети. Для исследования поведения пакетов было решено построить экспериментальный сегмент сети (рис. 1) в составе:

- коммутатор OpenFlow HP 3500yl;
- 8 серверов:
 1. Server 1 и Server 2 - центральные сервера (Xeon E5645 2,4ГГц, ОЗУ 32ГБ);
 2. Node-1 и Node-2 (Xeon E5645 2,4ГГц, ОЗУ 32ГБ);
 3. Node-3 и Node-4 (Core i5 2400 3ГГц, ОЗУ 32ГБ);
 4. Node-5 и Node-6 (Core i5 2320 3ГГц, ОЗУ 32ГБ);
- каналы связи между узлами сети 1000 Мб/с.

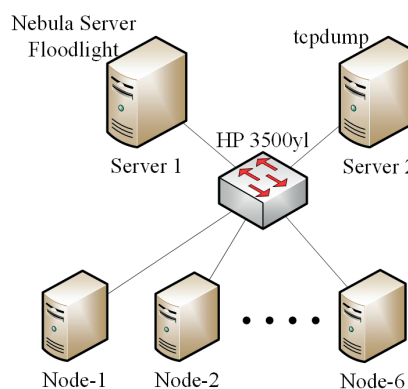


Рис. 1. Экспериментальный сегмент сети

На Server 1 установлена система OpenNebula [8], а на сервера Node – виртуальные вычислительные узлы кластера. В качестве OpenFlow контроллера (сетевой операционной системы) установлен Floodlight [9] Open SDN Controller с приложениями по умолчанию. На серверах Node будет развернут виртуальный вычислительный кластер, состоящий из 17-ти вычислительных узлов, с помощью OpenNebula. Server 2 предназначен для захвата трафика с помощью tcpdump, подключенный к зеркалированному порту коммутатора.

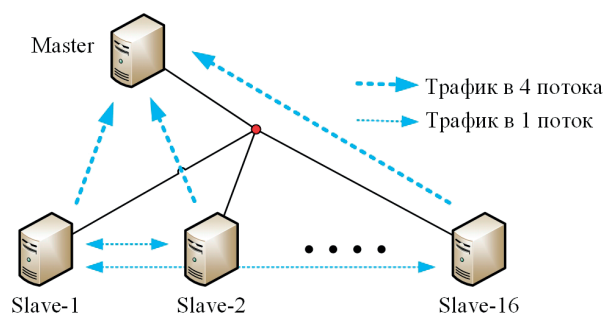


Рис. 2. Направление потока данных

Под виртуальные вычислительные узлы выделены следующие ресурсы: Master – 1CPU, ОЗУ 8ГБ и Slave – 1CPU, ОЗУ 6ГБ. Трафик генерируется с помощью утилиты iperf, установленной на узлах кластера (см. рис. 2). Размер генерируемого пакета по умолчанию 1500 байта. Обмен данными между машинами по умолчанию 10 с. На каждом из узлов запущена утилита iperf с параметром клиента, которая генерирует трафик в направлении узла Master. На Master утилита запущена с параметром сервера. С каждого узла идет

по 4 потока на порты узла Master: 80, 443, 145 и 137. Также трафик генерируется между узлами Slave в один поток на порт 137. Весь трафик в сети зеркалируется на порт коммутатора и захватывается tcpdump на сервере Server 2.

Результаты проведения эксперимента

Для анализа результатов понадобится обработать файлы логов выполнения эксперимента. На Server 2 файлы логов создаются утилитой tcpdump. За две части эксперимента сформировалось 20 файлов. С использованием известных формул математической статистики определяются моментные характеристики временных интервалов. В работе использованы статистики до 3-го порядка, которые позволяют судить о характере распределения интервалов. Например, коэффициент вариации показывает отличие трафика от пуассоновского потока и совместно с асимметрией позволяет судить о степени весомости «хвостов» распределений интервалов между пакетами.

Среднее значение интервала между соседними пакетами равно

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (t_{k+1} - t_k), \quad (1)$$

где t_k – моменты времени поступления пакетов; N – число анализируемых интервалов.

Выборочная дисперсия равна $D_g = \overline{t^2} - \bar{\tau}^2$, где $\overline{t^2}$ – второй начальный момент

$$\overline{t^2} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (t_{k+1} - t_k)^2. \quad (2)$$

Таблица 1. Моментные характеристики интервала между пакетами без поддержки протокола OpenFlow

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{\tau}$	3,5E-03	3,4E-03	3,5E-03	3,6E-03	3,4E-03	3,1E-03	2,5E-03	3,2E-03	3,4E-03	3,7E-03
$\overline{t^2}$	2,2E-04	4,5E-04	2,4E-04	1,9E-04	1,7E-04	1,8E-04	1,2E-04	2,0E-04	2,2E-04	1,9E-04
$\overline{t^3}$	4,1E-05	4,6E-04	2,5E-04	2,0E-04	1,8E-04	1,8E-04	1,2E-04	2,1E-04	2,3E-04	2,0E-04
D_g	2,1E-04	4,5E-04	2,4E-04	1,9E-04	1,7E-04	1,8E-04	1,2E-04	2,0E-04	2,2E-04	1,9E-04
c	4,0855	6,1580	4,4032	3,8428	3,7957	4,3258	4,2788	4,4412	4,4084	3,6677
A_s	12,6490	36,1173	9,1701	7,2441	7,1847	8,8179	9,3015	9,2111	13,4884	6,9769
Пак.	19108	14737	21812	17991	18057	22954	19676	21414	22566	23014
Вр.	46,8	46,6	47,4	45,6	47,5	46,6	46,9	47,8	48,1	48,6

Таблица 2. Моментные характеристики интервала между пакетами с поддержкой протокола OpenFlow

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{\tau}$	2,0E-02	8,8E-03	1,0E-02	6,8E-03	9,8E-03	1,1E-02	1,1E-02	1,3E-02	1,0E-02	1,0E-02
$\overline{t^2}$	3,9E-03	2,4E-04	4,3E-04	1,7E-04	3,1E-04	6,1E-04	3,2E-04	4,8E-04	3,2E-04	3,4E-04
$\overline{t^3}$	2,3E-03	9,5E-06	5,9E-05	7,3E-06	1,6E-05	8,6E-05	1,3E-05	4,3E-05	1,5E-05	1,7E-05
D_{σ}	3,5E-03	1,6E-04	3,3E-04	1,3E-04	2,1E-04	4,8E-04	2,0E-04	3,2E-04	2,2E-04	2,4E-04
c	2,8986	1,4549	1,7847	1,6547	1,4826	1,9548	1,35	1,4222	1,4795	1,5281
A_s	10,113	2,133	8,0084	3,0491	2,7735	6,445	3,7536	4,9888	2,2307	2,5883
Пак.	2127	3863	4141	2468	4268	3741	3855	2752	4150	4390
Вр.	35,1	24,7	22,3	18	20,3	24,7	26,3	27	26,4	25,9

Коэффициент вариации $c = \sigma_{\sigma} / \bar{\tau}$, где $\sigma_{\sigma} = \sqrt{D_{\sigma}}$. Асимметрия находится по формуле $A_s = (\overline{t^3} - 3\overline{t^2} \cdot \bar{\tau} + 2\bar{\tau}^3) / \sigma_{\sigma}^3$, где $\overline{t^3}$ – третий начальный момент:

$$\overline{t^3} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (t_{k+1} - t_k)^3. \quad (3)$$

Для расчета моментных характеристик данные из лог-файлов были импортированы в MS Excel. Будут учитываться только пакеты, направляемые с одного узла на Master на 80 порт.

В таблице 1 представлены 10 экспериментов без поддержки протокола OpenFlow, где отображены найденные характеристики, такие как первый начальный момент (1), второй начальный момент (2), третий начальный момент (3), количество дошедших пакетов, время и др.

В таблице 2 представлены 10 экспериментов с поддержкой протокола OpenFlow, где отображены найденные моментные характеристики распределения трафика.

Полученные данные свидетельствуют о том, что анализируемый трафик сильно отличается от пуассоновского (коэффициент вариации $c > 1$), значение асимметрии $A_s > 2$ говорит о том, что распределение интервалов между пакетами трафика относится к распределениям с тяжелыми «хвостами». Например, у экспоненциального закона $A_s = 2$. Для расчета характеристик такого трафика требуется соответствующий математический аппарат, в качестве которого выберем систему массового обслуживания (СМО) $H_2/M/1$.

Теоретическое исследование задержек

Для аналитического расчета задержек в двух случаях потребуются: первый, второй, третий начальные моменты и интенсивности входного

потока и обслуживания в канале. Воспользуемся результатами работ [3-4], в которых изложены результаты по системе $H_2/M/1$.

Среднее время задержки находится по формуле

$$\bar{W} = (1/s_1) - (1/\mu), \quad (4)$$

где μ – интенсивность обслуживания в канале;

$$s_1 = \sqrt{\frac{c_2^2}{4} + c_1} - \frac{c_2}{2}; \quad c_2 = \lambda_1 + \lambda_2 - \mu;$$

$$c_1 = \mu[\lambda_1(1-p) + \lambda_2 p] - \lambda_1 \lambda_2.$$

Здесь, в свою очередь, p , λ_1 и λ_2 параметры гиперэкспоненциального распределения с функцией плотности

$$a(t) = p\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + (1-p)\lambda_2 e^{-\lambda_2 t},$$

μ – параметр экспоненциального распределения с функцией плотности $b(t) = \mu e^{-\mu t}$ для системы $H_2/M/1$.

Для определения неизвестных параметров входного распределения: p , λ_1 и λ_2 подставляем в систему (5) полученные в экспериментальной части результаты по начальным моментам интервалов между пакетами для каждого эксперимента из таблиц 1-2.

$$\begin{cases} \bar{\tau}_{\lambda} = \frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2}; \\ \overline{\tau_{\lambda}^2} = \frac{2p}{\lambda_1^2} + \frac{2(1-p)}{\lambda_2^2}; \\ \overline{\tau_{\lambda}^3} = \frac{6p}{\lambda_1^3} + \frac{6(1-p)}{\lambda_2^3}. \end{cases} \quad (5)$$

В таблице 3 представлены найденные задержки (4) пакетов в сети с поддержкой протокола OpenFlow и без для каждого из 10 экспериментов.

Таблица 3. Задержки в сети в секундах

№	без OpenFlow	с OpenFlow
1	0,143	0,983
2	0,302	0,550
3	0,079	0,076
4	0,091	0,236
5	0,109	0,015
6	0,077	0,089
7	0,552	0,031
8	0,105	0,172
9	0,120	0,238
10	0,043	0,210

Средняя задержка для эксперимента с поддержкой протокола OpenFlow 0,241 с, а без протокола 0,162 с.

Заключение

В ходе проведения экспериментов были получены моментные характеристики интервалов между пакетами трафика. Для аналитического расчета была использована система $H_2/M/1$, в случае высокой весомости «хвоста» распределения входного потока. По результатам расчетов задержка с использованием протокола OpenFlow получилась в 1,5 раза больше, чем без него. Это говорит, о том, что дополнительную задержку в сеть вносит контроллер OpenFlow. Этот факт следует учитывать особенно в случае высокой нагрузки на программно-конфигурируемые сети. В нашем случае эксперименты проводились для случаев невысокой нагрузки на каналы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-47-02686.

Малахов Сергей Валерьевич, старший преподаватель Кафедры программного обеспечения и управления в технических системах (ПОУТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 228-00-13. E-mail: malakhov-sv@psuti.ru

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., проф., зав. Кафедрой ПОУТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-13. E-mail: vt@ist.psati.ru

Карташевский Игорь Вячеславович, к.т.н., доцент Кафедры ПОУТС ПГУТИ. Тел. 8-927-013-15-13. E-mail: kartashevsky-iv@psuti.ru

Литература

1. Коломеец А.Е., Сурков Л.В. Программно-конфигурируемые сети на базе протокола OpenFlow // Инженерный Вестник. № 5, 2014. – С. 518-525.
2. Робачевский А. Программируемый Интернет. Российский НИИ Развития Общественных Сетей // URL: <http://www.ripn.net/articles/SDN> (д.о. 15.07.15).
3. Малахов С.В., Тарасов В.Н. Экспериментальные исследования производительности сегмента программно-конфигурируемых сетей // Интеллект. Инновации. Инвестиции. № 2, 2013. – С. 81-85.
4. OpenFlow // URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Openflow> (д.о. 15.07.15).
5. Малахов С.В., Тарасов В.Н. Исследование производительности контроллера в программно-конфигурируемых сетях // Системы управления и информационные технологии. № 3 (53), 2013. – С. 64-67.
6. Управление и виртуализация в современных сетях. Сети 2014: SDN&NFV // URL: <http://sdiconf.com/rus/Conference/> (д.о. 15.07.15).
7. Ефимушкин В.А., Ледовский Т.В., Корабельников Д.М. Международная стандартизация программно-конфигурируемых сетей // Электро-связь. № 8, 2014. – С. 3-9.
8. OpenNebula.org // URL: <http://opennebula.org> (д.о. 15.07.15).
9. Floodlight / Project Floodlight // URL: <http://www.projectfloodlight.org/floodlight> (д.о. 15.07.15).
10. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Горелов Г.А., Малахов С.В. Анализ входящего трафика на уровне трех моментов распределений временных интервалов // Информационные технологии. № 9, 2014. – С. 54-59.
11. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Горелов Г.А. Математическая модель трафика с тяжелохвостным распределением на основе системы массового обслуживания $H_2/M/1$ // Инфокоммуникационные технологии. Т.12, № 3, 2014. – С. 36-41.

Получено 04.08.2015

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF PACKET DELAYS IN SOFTWARE DEFINED NETWORKS

Malakhov S.V., Tarasov V.N., Kartashevsky I.V.

Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: vt@ist.psati.ru

This work is concerned with determination of packet delays inserted by using OpenFlow protocol in virtual computing cluster performed over software defined network by OpenNebula system with installed Floodlight controller. We experimentally found moment characteristics of packet delays. Based on these values we theoretically determined packet delays in channels both with and without OpenFlow via traffic simulation in the kind of queuing system H2/M/1. According to results, packet delay under using OpenFlow protocol is more 1.5 times then under without it. This fact should be taken into account for heavy load software defined network, while we performed experimental research under light load channels.

Keywords: packet delays, OpenFlow protocol, virtual computing cluster, software defined network, moment characteristics of packets intervals

DOI: 10.18469/ikt.2015.13.4.08

Malakhov Sergey Valerjevich, Senior Lecture of the Department of Software and Management in Technical Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation. Tel.: +78462280013. E-mail: malakhov-sv@psuti.ru

Tarasov Veniamin Nikolaevich, Doctor of Technical Science, Professor, the Head of Department of Software and Management in Technical Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation. Tel.: +79626022578. E-mail: vt@ist.psati.ru.

Kartashevsky Igor Vyacheslavovich, PhD in Technical Science Associated Professor of the Head of Department of Software and Management in Technical Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation. Tel.: +79270131513. E-mail: kartashevsky-iv@psuti.ru.

References

1. Kolomeets A.E., Surkov L.V. Programmno-konfiguriruemie seti na baze protokola OpenFlow [The software defined network on the basis of the OpenFlow protocol]. *Inzhenernyj Vestnik*, 2014, no. 5, pp. 518-525.
2. Robachevsky A. *Programmiruemii internet* [Programmable Internet]. Available at: <http://www.ripn.net/articles/SDN> (accessed 15.07.15).
3. Malakhov S.V., Tarasov V.N. Experimentalnie issledovaniya proizvoditelnosti segmenta programmno-konfiguriruemykh setei [The pilot studies of productivity of a segment of the software-defined network]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*, 2013, no. 2, pp. 81-85.
4. *OpenFlow*. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Openflow> (accessed 15.07.15).
5. Malakhov S.V., Tarasov V.N. Issledovanie proizvoditelnosti kontrollera v programmno-konfiguriruemykh setyah [Research of productivity of the controller on the software-defined network]. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*, 2013, vol. 53, no. 3, pp. 64-67.
6. *Upravlenie i virtualizatsiya v sovremennykh setyah* [Management and virtualization in modern networks]. Available at: <http://sdiconf.com/rus/Conference> (accessed 15.07.15).
7. Efimushkin V.A., Ledovsky T.V., Korabelnikov D. M. Megdunarodnaya standartizatsiya programmno-konfiguriruemykh setei [The international standardization of the program-configured networks]. *Jelektrosvyaz*, 2014, no. 8, pp. 3-9.
8. *Official site of the OpenNebula project*. Available at: <http://opennebula.org> (accessed 15.07.15).
9. *Official site of the Project Floodlight*. Available at: <http://www.projectfloodlight.org/floodlight> (accessed 15.07.15).
10. Tarasov V.N., Bahareva N.F., Gorelov G.A., Malakhov S.V. Analiz vkhodyasago trafika na urovne trekh momentov raspredeleniya vremennykh intervalov [The analysis of the incoming traffic at the level of three moments of time slot assignments]. *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 9, pp. 54-59.
11. Tarasov V.N., Bahareva N.F., Gorelov G.A. Matematicheskaya model trafika s tyagelo-hvostim raspredeleniem na osnove sistemi massovogo obsluzhivaniya H2/M/1 [Mathematical model of traffic with heavy hvostnym distribution on the basis of H₂/M/1 queuing system]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 36-41.

Received 04.08.2015