

УДК 681.3:519.2

*Л.О. КИРИЧЕНКО, Т.А. РАДИВИЛОВА, Э. КАЙАЛИ*

## **РАСЧЕТ СТОИМОСТИ МАРШРУТИЗАЦИИ В СЕТИ MPLS С УЧЕТОМ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТРАФИКА**

---

Описывается метод расчета стоимости маршрутизации сети MPLS, который позволяет минимизировать стоимость маршрутизации с учетом фрактальных свойств трафика, выбора пути его передачи и требований качества обслуживания. Метод использует значения показателя Херста и величину нормированного разброса значений трафика, что дает возможность применять его к самоподобным и мультифрактальным потокам данных.

### **Введение**

Экспериментальные и численные исследования, проведенные в последние десятилетия, свидетельствуют, что трафик во многих мультимедийных сетях обладает фрактальными свойствами. Такой трафик имеет особую структуру, сохраняющуюся на многих масштабах – в реализации всегда присутствует некоторое количество очень больших выбросов при относительно небольшом среднем уровне трафика. Эти выбросы вызывают значительные задержки и потери пакетов, даже когда суммарная потребность всех потоков далека от максимально допустимых значений. Причина такого эффекта заключается в особенностях распределения файлов по серверам, их размерах, в типичном поведении пользователей и в значительной степени связана с изменениями сетевых ресурсов и топологии сети. Оказалось, что изначально не проявляющие свойство самоподобия потоки данных, пройдя обработку на узловых серверах и активных сетевых элементах, начинают подавать ярко

выраженные признаки самоподобия. Кроме того, этот механизм в значительной степени связан с изменениями сетевых ресурсов и топологии сети [1,2].

В настоящее время эффективным решением задачи обеспечения качества обслуживания сетей является технология многопротокольной коммутации пакетов MPLS (Multiprotocol Label Switching Protocol). Управление трафиком на основе дифференцированного обслуживания в сетях MPLS обеспечивает их масштабируемость с несколькими классами обслуживания, резервирование ресурсов, отказоустойчивость и оптимизацию передачи ресурсов. С появлением MPLS-сетей происходит их изучение с точки зрения влияния самоподобных свойств трафика на качество обслуживания сети. В работах [3,4] исследовано влияние степени самоподобия трафика на сходимость реальной сети при управлении трафиком с различным качеством обслуживания QoS (Quality of Service). В [5, 6] рассмотрены зависимости характеристик QoS, такие как задержки, джиттер и потери пакетов от параметров самоподобия входящего трафика. Показано, что основное влияние на ухудшение характеристик QoS оказывают большие значения показателя Херста, как степени самоподобия, и коэффициента дисперсии, определяющего уровень всплесков трафика.

В настоящее время рассматривается несколько подходов, направленных на уменьшение влияния самоподобности потоков в MPLS-сетях. В работе [7] рассмотрены методы управления трафиком в сетях MPLS с динамически изменяющимися весами путей, зависящими от степени самоподобия входного потока; представлены результаты имитационного моделирования в малых сетях. При другом подходе, представленном в [8], предложен метод маркировки потоков в FEC, учитывающий значения показателя Херста и коэффициента дисперсии. Определение уровня всплесков также может помочь при маркировке потоков трафика, например, в случае, когда более приоритетный трафик в течение долгого времени препятствует прохождению потоков с более низким приоритетом. В работе [9] предлагается подход к сокращению количества LSP (т.е. увеличение количества свободной пропускной способности) и общей стоимости сети; при определении пути для передачи трафика и необходимой пропускной способности учитываются параметры самоподобного трафика.

*Целью* данной работы является улучшение качества обслуживания в сети MPLS путем предупреждения ее перегрузки при пиковых выбросах трафика, обладающего фрактальными свойствами. Представлено математическое описание функционирования сети MPLS, свойства самоподобного и мультифрактального трафика и разработан алгоритм расчета стоимости маршрутизации с учетом фрактальных свойств трафика.

## **1. Функционирование сети MPLS [10–12]**

В основе архитектуры MPLS лежит принцип обмена меток. Маршрутизаторы коммутации меток LSR (Label Switching Router) помечают пакеты специальными метками, определяющими дальнейший маршрут следования пакета к месту назначения, указывая в метке каждого пакета место назначения, информацию QoS, путь следования пакета до места назначения и др. Все функции классификации пакетов по классам FEC (Forwarding Equivalence Class) на основании необходимого качества обслуживания QoS, а также реализацию дополнительных сервисов фильтрации, явной маршрутизации, выравнивание нагрузки на сеть и управление трафиком берут на себя граничные маршрутизаторы LER (Label Edge Router). Таким образом, весь объем интенсивных вычислений приходится на граничную область, а высокопроизводительная коммутация выполняется в ядре, что позволяет эффективно оптимизировать конфигурацию устройств MPLS в зависимости от их расположения в сети.

Процесс распределения меток между маршрутизаторами приводит к установлению внутри сети MPLS путей с коммутацией по меткам LSP (Label Switching Path). Каждый маршрутизатор LSR содержит таблицу, в соответствии с которой при обработке пакета старое значение метки заменяется новым, после чего пакет отправляется к следующему устройству на пути LSP. Основная проблема заключается в выборе оптимального пути LSP для канала трафика с требованиями QoS в сети. Важным является факт множественности маршрутов: для маршрута между двумя граничными маршрутизаторами может существовать несколько альтернативных путей.

В математической модели сеть MPLS представляется в виде графа  $G = (V, E)$ , где  $V = \{1, 2, \dots, N\}$  и  $E = \{1, 2, \dots, M\}$  – набор маршрутизаторов и линий связи между ними соответственно. Все множество узлов в сети MPLS разбивается на два подмножества:  $V^+ = \{V_i^+, i = 1, n_{LER}\}$  – множество граничных маршрутизаторов LER и  $V^- = \{V_i^-, i = 1, n_{LSR}\}$  – множество коммутаторов меток LSR ( $V^+ \cup V^- = V, V^+ \cap V^- = \emptyset$ ).

Предположим, что в каждый момент  $t$  на один из маршрутизаторов поступает трафик интенсивностью  $\lambda(t)$ , относящийся к одному из 8 классов обслуживания  $q \in Q$ . Каждому классу обслуживания соответствуют значения максимально допустимой задержки  $\tau_q$  и максимально допустимого процента потерь  $l_q$ . Обозначим множество всех каналов QoS трафика  $Y$ . В одной линии связи  $m$  может существовать множество каналов  $y \in Y$ . Каждый канал передачи трафика требует полосу пропускания  $d_y$ . Требования к пропускной способности могут быть вычислены из договора с клиентом и/или из статистических данных, собранных между входным и выходным маршрутизаторами. Производительность маршрутизации трафика QoS сильно зависит от джиттера, задержки и надежности. Поскольку трафик проходит через LSP, время ожидания на каждом переходе будет иметь негативное влияние на эффективность маршрутизации по джиттеру и задержке. Кроме того, с применением меньшего количества хопов увеличивается надежность передачи трафика по каналам, так как вероятность выхода из строя на LSP уменьшается. Таким образом, у каналов передачи трафика  $y \in Y$  с требованиями QoS  $q$  есть ограничения на количество хопов в LSP. Для реализации этого ограничения для каждого канала трафика устанавливается допустимое множество путей  $P_y = \{p_y^1, \dots, p_y^{L_y}\}$  для пути  $L_y$ .

Через  $\lambda_{P_y}^q(t)$  обозначим, что в момент  $t$  на граничный маршрутизатор поступает трафик интенсивностью  $\lambda$ , относящийся к  $q$ -му классу обслуживания, который необходимо доставить на выходной маршрутизатор по любым путям из множества  $P_y$ , не превышая заданных максимально допустимых значений задержки  $\tau_q$  и максимально допустимого процента потерь  $l_q$ .

Каждый узел сети  $V$  в момент времени  $t$  характеризуется производительностью  $\mu$ , коэффициентом потерь  $X_V^q(t) \in X$  и средним временем ожидания пакета в очереди  $T_V^q(t)$ . Переменная  $X_V^q(t) \in X$ ,  $V = \overline{1, P_y}$ , равна потерям (%) на узле трафика с классом обслуживания  $q$ , маршрутизируемого по пути  $P_y$  между граничными маршрутизаторами в момент  $t$ . Предполагается, что вероятностью искажения пакета в тракте можно пренебречь, и потери происходят исключительно на узлах сети из-за переполнения запоминающего устройства.

Суммарные потери для трафика  $\lambda_{P_y}^q(t)$ , маршрутизируемого в момент  $t$ , не должны превышать максимально допустимого значения для данного класса обслуживания  $l_q$ . Потери определяются как отношение количества отброшенных данных к количеству поступивших на обслуживание. Значение величины потерь  $X_V^q(t)$  подлежит минимизации.

Ограничения, накладываемые на время задержки, аналогичны: требование  $\sum_{V=1}^{P_y} T_V^q(t) \leq \tau_q$  выполняется для всех узлов сети, где  $T_V^q(t)$  – среднее время ожидания пакета класса обслуживания  $q$  в очереди на узле  $V$ , следующего по пути  $P_y$ . Выполнение данного ограничения способствует тому, что время доставки пакетов не превысит максимально допустимого значения для заданного класса обслуживания  $\tau_q$ .

## 2. Свойства самоподобного и мультифрактального трафика

Известно, что трафик в мультимедийных сетях обладает свойствами самоподобия. Стохастический процесс  $X(t)$  является самоподобным с параметром  $H$ , если процесс  $a^{-H}X(at)$  описывается теми же конечномерными законами распределений, что и  $X(t)$ . Параметр  $H$ ,  $0 < H < 1$ , называемый показателем Херста, представляет собой степень самоподобия процесса. Наряду с этим свойством, показатель  $H > 0.5$  характеризует меру долгосрочной зависимости процесса, т.е. убывание автокорреляционной функции  $r(k)$  по степенному закону:  $r(k) \sim k^{-\beta}$ ,  $0 < \beta < 1$ ,  $H = 1 - (\beta / 2)$ .

Если стохастический процесс  $X(t)$  обладает однородными фрактальными свойствами, которые определяются одним скейлинговым показателем – параметром Херста  $H$ , то в этом случае начальные моменты процесса можно описать формулой  $M\left[|X(t)|^q\right] = C(q)t^{Hq}$ , где  $C(q)$  является некоторой детерминированной величиной. Многие фрактальные процессы имеют сложную неоднородную структуру, которая проявляется в изменении статистических свойств реализаций при изменении масштаба агрегирования. В отличие от монофрактальных процессов, где все моменты  $M\left[|X(t)|^q\right]$  показывают одинаковый скейлинг, мультифрактальные процессы проявляют более сложный закон масштабного поведения  $M\left[|X(t)|^q\right] = c(q) \cdot t^{h(q)}$ , где  $c(q)$  – некоторая детерминированная функция;  $h(q)$  – обобщенный показатель Херста, являющийся нелинейной функцией, для которой значение  $h(q)$  при  $q = 2$  совпадает со значением параметра  $H$  [2].

Одной из причин возникновения перегрузок в телекоммуникационных сетях является наличие долгосрочной зависимости (персистентности): чем ближе параметр  $H$  к 1, тем медленнее убывают корреляции между данными:  $r(k) \sim \frac{1}{k^{2(1-H)}}$ . В частности, это означает, что за высокими значениями трафика данных с большой вероятностью также будут следовать высокие, что не дает достаточно быстро освободиться буферу. Одним из важнейших свойств сетевого трафика, как случайного процесса, является наличие тяжелых хвостов его одномерных функций распределений. Основное свойство случайной величины с тяжелым хвостом состоит в том, что она проявляет высокую изменчивость. Иными словами, выборка из такой случайной величины представляет собой большей частью относительно небольшие значения, однако также содержит и достаточное количество очень больших значений. В трафике это проявляется величиной и количеством всплесков при небольшой интенсивности.

В работах [13-15] показано, что размер очередей в буфере и величина потерь на участке сети, при прохождении самоподобного трафика, определяются показателем Херста и величиной индекса дисперсии  $F[\xi] = D[\xi] / M[\xi]$ , большие значения которого соответствуют большему разбросу значений потока данных. В [16,17] показано, что очереди и потери, порождаемые трафиком с мультифрактальными свойствами, определяются показателем Херста и степенью нелинейности скейлинга, которая соответствует степени неоднородности трафика, т.е. большему значению разброса данных. Таким образом, основными характеристиками потока, определяющими возникновение перегрузки сети, можно считать показатель Херста и величину нормированного разброса значений трафика  $S_{\text{norm}}(\tau) = S / \bar{X}$ , где  $\tau$  – временной интервал, на котором фиксируется проходящий трафик,  $S$  – среднее квадратическое отклонение,  $\bar{X}$  – интенсивность трафика. В работах [1,2,14] показано, что при значениях  $H \geq 0,9$  или при персистентном трафике с нормированным разбросом  $S_{\text{norm}} \geq 3$  величина потерь данных превышает 5-10%.

### 3. Расчет стоимости маршрутизации с учетом фрактальных свойств трафика

В архитектуре MPLS возможен выбор маршрутов на основе отдельных потоков, причем различные потоки, связывающие одну и ту же пару конечных точек, могут следовать по разным маршрутам. Кроме того, при возникновении перегрузки проложенные архитектурой MPLS маршруты могут быть изменены. Протокол маршрутизации, основываясь на данных о состоянии каналов, вычисляет кратчайшие пути (маршруты наименьшей стоимости) между входным граничным маршрутизатором и всеми остальными. В данной работе предложен метод расчета стоимости маршрутизации с учетом самоподобной структуры трафика, что позволяет предупреждать перегрузку сети при пиковых выбросах трафика.

Значение стоимости маршрутизации  $c_m$  присваивается линии связи  $m$  и может зависеть от ряда параметров, а именно: от скорости, длины и надежности. Стоимость пути  $p_y^1$  обозначается  $C_y^1$  и равна сумме стоимости линий связи:  $C_y^1 = \sum_{m \in p_y^1} c_m$ . Если  $x_y^1(t)$  представляет пропускную способность, которая направляется на допустимый путь  $p_y^1$  канала передачи  $y$  трафика  $\lambda_{p_y^1}^q(t)$ , тогда выполняется:

$$\sum_{t \in T; l=1}^{L_y} x_y^1(t) = d_y, \quad \forall y \in Y, \quad \forall l \in \{1, \dots, L_y\}.$$

Целевая функция, минимизирующая стоимость маршрута на множестве путей  $P_y = \{p_y^1, \dots, p_y^{L_y}\}$ , выглядит следующим образом:

$$\sum_{y \in Y} \sum_{l=1}^{L_y} C_y^l x_y^l(t) \rightarrow \min. \quad (1)$$

При прохождении по сети трафика с сильными фрактальными свойствами требуется своевременное увеличение пропускных способностей линий связи. Чтобы отразить изменение самоподобных свойств потоков, стоимости путей  $C_y^1$  обновляются в регулярные промежутки времени и пересчитываются по формуле

$$C_{new_y^1} = \begin{cases} C_y^1, & H \leq 0,5; \\ C_y^1 + (H - 0,5)C_0, & 0,5 < H < 0,9, S_{norm} \leq 1; \\ C_y^1 + (H - 0,5)(S_{norm} - 1)C_0, & 0,5 < H < 0,9, 1 < S_{norm} < 3; \\ C_y^1 + C_0, & H \geq 0,9 \text{ или } H > 0,5, S_{norm} \geq 3. \end{cases}$$

где  $C_y^1 = \sum_{m \in p_y^1} c_m$  определяется в соответствии с целевой функцией (1), значение  $C_0$  выбирается администратором сети с учетом ее топологии. Алгоритм маршрутизации не изменяется (стоимость пути  $C_{new_y^1} = C_y^1$ ), если трафик является обычным пуассоновским потоком ( $H = 0,5$ ) или обладает антиперсистентными свойствами ( $H < 0,5$ ). При  $0,5 < H < 0,9$  и малом разбросе данных ( $S_{norm} \leq 1$ ) значение  $C_y^1$  увеличивается пропорционально значению показателя Херста ( $H < 0,5$ ). При показателе Херста  $0,5 < H < 0,9$  и с большим разбросом данных ( $1 < S_{norm} < 3$ ) значение  $C_y^1$  увеличивается пропорционально обем характеристикам. Стоимость с максимальным значением  $C_y^1 + C_0$  получается при  $H \geq 0,9$  или при персистентном трафике с нормированным отклонением  $S_{norm} \geq 3$ .

Оценивание параметра Херста осуществляется с помощью дискретного вейвлет-преобразования, что позволяет работать в реальном времени [18]. После перерасчета стоимости всех путей объявление о состоянии путей рассылается между маршрутизаторами.

#### Выводы

Представлен алгоритм расчета стоимости маршрутизации сети MPLS с учетом фрактальных свойств трафика, который позволяет предупреждать перегрузку сети при пиковых выбросах. *Научная новизна работы* заключается в том, данный метод использует значения показателя Херста и величину нормированного разброса значений трафика, что позволяет применить его к самоподобным и мультифрактальным потокам данных. *Прак-*

тическая значимость заключается в том, что использование предложенного метода позволяет минимизировать стоимость маршрутизации с учетом фрактальных свойств трафика, выбора пути его передачи и требований качества обслуживания. Разработанный метод можно использовать для оптимизации сетевых ресурсов с помощью имитационного моделирования функционирования сети.

**Список литературы:** 1. Столингс В. Современные компьютерные сети / В. Столингс. СПб.: Питер, 2003. 783 с. 2. Шелухин О. И. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / О. И. Шелухин, А. В. Осин, С. М. Смольский. М.: Физматлит, 2008. 368 с. 3. Lopez V. A Bayesian decision theory approach for the techno-economic analysis of an all-optical router / V. Lopez, J. A. Hernandez, J. Aracil, J. P. F. Palacios, O. Gonzalez de Dios // Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking Vol. 52 Issue 10. Inc. New York, NY, USA. 2008. P.1916-1926. 4. Casellas R. Packet Based Load Sharing Schemes in MPLS networks // R. Casellas, J. L. Rougier, D. Kohan // Proceedings of the 3rd international IFIP/ACM Latin American conference on Networking. Paris. 2002. P.18-28. 5. Carvalho de P. An Experimental Testbed for Evaluation Topics in Converged Networks / De Carvalho, H. Abdalla, A. M. Soares, P. Barreto, P. Tarchetti, R. Lambert, G. Amvamenze // Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brazil. 2005. P.503-509. 6. Barreto P. A Traffic Characterization Procedure for Multimedia Applications in Converged Networks / P. Barreto, P. deCarvalho, J. A. M. Soares, H. Abdalla // Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. Washington, DC, USA. 2005. P.153-160. 7. Vargas-Rosales C. Routing with Wavelet-Based Self-Similarity Estimation / C. Vargas-Rosales, L. J. Manzanero // Computación y Sistemas. vol.8, n.2. Monterrey, Mexico. 2004. P. 119-131. 8. De Carvalho P. Analysis of the influence of self-similar traffic in the performance of real time applications / P. de Carvalho, H. Abdalla Jr., A. M. Soares, P. Soares Barreto, P. Tarchetti // Department of Electrical Engineering, University of Brasilia. 2005. P.480-485. 9. Kyu-Seek Sohn. A Distributed LSP Scheme to Reduce Spare Bandwidth Demand in MPLS Networks / Kyu-Seek Sohn, Seung Yeob Nam, Dan Keun Sung // Communications, IEEE, Vol. 54, Issue:7. 2006. P.1277-1288. 10. Лемешко О.В. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: підручник у 2-х частинах. Ч.1 / О.В. Лемешко, В.А. Лошаков, В.В. Поповський та ін. // Харків: ТОВ "Компанія СМІТ". 2010. 470 с. 11. Олвейн В. Структура и реализация современной технологии MPLS / Вивек Олвейн // Cisco Press. 2004. 480 с. 12. Hussain I. Fault-Tolerant IP and MPLS Networks / I. Hussain // Cisco Press. 2005. 336 с. 13. Кириченко Л. О. Исследование влияния самоподобия трафика при проектировании фрагмента сети / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. 2007. №1-2. С. 124-129. 14. Kirichenko L. Analysis of network performance under selfsimilar system loading by computer simulation / L. Kirichenko, T. Radivilova // Бионика интеллекта. 2008. №1 (68). С. 158-160. 15. Кириченко Л. О. Влияние методов маршрутизации на качество обслуживания в мультисервисных сетях при самоподобной нагрузке / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, Э. Кайали // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. 1/2 (49). С. 15-18. 16. Kirichenko L. Modeling telecommunications traffic using the stochastic multifractal cascade process / L. Kirichenko, T. Radivilova, E. Kayali // Information science and computing. 2012. V. 28. P.55-63. 17. Кириченко Л. О. Моделирование телекоммуникационного трафика с использованием стохастических мультифрактальных каскадных процессов / Л. О. Кириченко, К. А. Демерчян, Э. Кайали, А. Ю. Хабачёва // Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2012. №1 (26). С.48-53. 18. Abry P. Wavelet analysis of long-range dependent traffic / P. Abry, D. Veitch // IEEE/ACM Transactions Information Theory. 1998. № 1 (44). P. 2-15.

Поступила в редакцию 24.11.2012

**Кириченко Людмила Олеговна**, канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: самоподобные и мультифрактальные случайные процессы, фрактальный и мультифрактальный анализ временных рядов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, тел. 70-21-436. E-mail: ludmila.kirichenko@gmail.com.

**Радивилова Тамара Анатольевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем ХНУРЭ. Научные интересы: телекоммуникационные сети и системы, самоподобные и мультифрактальные информационные потоки. Адрес: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, тел. 70-21-640. E-mail tomachka\_7@yahoo.com.

**Кайали Эйаз**, аспирант кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: телекоммуникационные сети и системы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, тел. 70-21-640. E-mail: ludmila.kirichenko@gmail.com.