

ПОТОКОВАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ С БАЛАНСИРОВКОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ПРОГРАММНО- КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ

Вавенко Т.В.

Харьковский национальный университет
радиоэлектроники, Украина.

E-mail: tv_vavenko@mail.ru

Abstract

The paper presents the flow model of adaptive routing for software-defined networks with load balancing on two criteria. The first criterion was criterion of effective of load balancing, which characterizes the network as a whole, and was minimizing of maximum link utilization. The second criterion was criterion of adaption of load balancing, which characterized each flow separately, and was associated with one of the key parameter of the quality of service - the average packet delay. The paper presents the results of comparative analysis of solutions routing problem with proposed and previously known models. It was found that using of the proposed model can improve the indicators of quality of service, including multipath delay of packets from 10-16% to 35-39% compared with the previous models of routing. The proposed routing model allows to obtain the same values of average delay along a plurality of calculated routes, which allows to minimize packet jitter caused by the implementation of multipath routing strategies.

На сегодняшний день внимание ученых всего мира в отрасли телекоммуникаций направлено на развитие и реализацию концепции программно-конфигурируемых сетей (Software Defined Networks, SDN) [1]. Главная отличительная черта SDN состоит в отделении управляющего уровня от уровня передачи, что предполагает перенос ряда основных управляющих функций от операционных системы (ОС) узлов (маршрутизаторов и коммутаторов) телекоммуникационных сетей (ТКС) к сетевой ОС. Учитывая новизну концепции SDN, ее внедрение требует усовершенствования существующих телекоммуникационных технологий, и в том числе протоколов маршрутизации. На сегодняшний день протоколы маршрутизации с целью удовлетворения растущих требований по качеству обслуживания (Quality of Service, QoS) свои классические функции расширяют в направлении поддержки дополнительных возможностей, среди которых балансировка нагрузки по каналам ТКС с реализацией многопутевой стратегии маршрутизации. Эффективность балансировки нагрузки и достигаемое при этом качество обслуживания при решении задачи маршрутизации в ТКС в целом, и в SDN в частности, традиционно во многом зависит от адекватности математических моделей и методов, используемых при разработке соответствующих протоколов.

Известно, что протоколы маршрутизации в ТКС основаны преимущественно на графовых моделях. Однако в рамках подобных моделей не учитывается потоковый характер трафика, циркулирующего в современных сетях, поэтому перспективным является переход к потоковым моделям маршрутизации, в рамках которых наряду с расчетом множества путей определяется порядок распределения по ним трафика пользователей. В результате проведенного анализа потоковых моделей многопутевой маршрутизации замечено, что в их основу могут быть положены различные критерии оптимальности. Актуальной с научной и практической точки зрения представляется задача, связанная с выбором критериев оптимальности процесса балансировки нагрузки.

В данной работе предложена модель маршрутизации с балансировкой нагрузки с реализацией многопутевой стратегии маршрутизации, которая ориентирована на программно-конфигурируемые сети. Новизна модели заключается в том, что наряду с критерием оптимальности балансировки нагрузки, который связан с минимизацией максимальной загрузки каналов связи, предлагается использовать дополнительный критерий адаптации по средней многопутевой задержке, выполнение которого связано с обеспечением равенства нулю контурных задержек пакетов для каждого трафика в отдельности.

За основу разработанной модели выбрана модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту максимальной загрузки каналов телекоммуникационной сети, представленная в [2, 3]. Пусть структура ТКС описывается с помощью графа $G = (V, E)$, где V – это множество маршрутизаторов сети, E – множество каналов сети. Для каждой дуги $(i, j) \in E$ характерна ее пропускная способность $c_{i,j}$. Каждому трафику из множества K сопоставлен ряд параметров: пусть d_k , s_k , t_k – интенсивность k -го трафика, маршрутизатор-источник пакетов и маршрутизатор-получатель соответственно. Управляющей переменной служит величина $x_{i,j}^k$, которая характеризует долю k -го трафика, протекающего в канале $(i, j) \in E$. В соответствии с физикой решаемой задачи на переменные $x_{i,j}^k$ накладываются следующие ограничения:

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1. \quad (1)$$

Для учета возможных потерь пакетов на маршрутизаторах и в сети в целом в модели предусмотрено условие сохранения потока [4]:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k (1 - p_{(j,i)}^k) = 0, & k \in K, i \neq s_k, t_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k = 1, & k \in K, i = s_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{j,i}^k (1 - p_{(i,j)}^k) = \varepsilon^k, & k \in K, i = t_k, \end{cases} \quad (2)$$

где ε^k – доля пакетов k -го трафика, обслуженного сетью, т.е. пакеты которого доставлены от узла-отправителя до узла-получателя; $p_{(i,j)}^k$ – вероятность потерь пакетов k -го трафика на j -м интерфейсе i -го маршрутизатора по причине его перегрузки.

Для обеспечения управляемости процессом перегрузки каналов связи ТКС необходимо выполнить условия:

$$\sum_{k \in K} d_k x_{i,j}^k \leq \alpha c_{i,j}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, (i, j) \in E, \quad (3)$$

где α – динамически управляемый порог максимальной загрузки каналов ТКС.

В ходе решения задачи маршрутизации в качестве первого критерия используется критерий оптимальности процесса балансировки нагрузки, который заключается в минимизации максимального порога загрузки каналов ТКС:

$$\min \alpha. \quad (4)$$

С целью обеспечения одинаковых вдоль всех путей доставки пакетов k -го трафика средних задержек, а также для устранения контуров (петель) в рассчитываемых маршрутах обслуживания трафика контурные слагаемые по средним задержкам для каждого трафика $k \in K$ приравняются к нулю:

$$\bar{\tau}^k = \begin{bmatrix} \tau_1^k \\ \tau_2^k \\ \vdots \\ \tau_r^k \end{bmatrix} = 0, \quad k \in K, \quad (5)$$

где $\bar{\tau}^k$ – вектор контурных задержек, координаты τ_i^k которого определяют алгебраическую сумму задержек вдоль каждого независимого контура с учетом ориентации дуг в графе, отображающем структуру ТКС, при передаче пакетов k -го трафика; r – количество независимых контуров. Условие (5) является вторым критерием в ходе решения задачи маршрутизации, который представлен в виде равенства [5] и представляет собой критерий адаптации средней многопутевой задержки пакетов.

Чтобы определить количество независимых контуров используется следующее выражение:

$$r = n - m + 1, \quad (6)$$

где n – количество каналов связи, m – количество узлов ТКС [4].

В рамках предлагаемой потоковой модели (1)–(5) задача поиска множества оптимальных путей сведена к задаче нелинейного программирования с критериями оптимальности (4) и адаптации (5) балансировки нагрузки при наличии ограничений (1)–(3). Выполнение критерия оптимальности балансировки нагрузки (4) позволяет получить минимальное значение коэффициента максимальной загрузки, что способствует эффективному использованию ресурсов сети. Достижение критерия адаптации балансировки нагрузки (5) обеспечивает выполнение условий равенства контурных задержек нулю, и это гарантирует, что средние задержки пакетов вдоль всех путей будут минимальны и равны между собой [4].

Для проведения исследования предложенной модели процесс обслуживания пакетов на узлах ТКС описывался при помощи системы массового обслуживания $fBM/M/1/N$, которая моделирует поступающий в систему поток со свойствами самоподобия, что характерно трафику, циркулирующему в современных телекоммуникационных сетях с пакетной коммутацией.

Для исследования предложенной модели был проведен ее сравнительный анализ с ранее известными моделями маршрутизации. В качестве первой модели (модель 1) была выбрана модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по критерию, связанному с минимизацией коэффициента максимального использования каналов ТКС, соответствующая технологии Traffic Engineering [2]. В качестве второй модели, подлежащей сравнению (модель 2), выбрана модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по критерию, основанному на минимизации взвешенной суммы длин очередей на интерфейсах маршрутизаторов в ТКС [6]. Особенности решения задачи маршрутизации в рамках предложенной модели (модель 3) и сравнение ее с ранее известными продемонстрированы на примере структуры ТКС (рис. 1а).

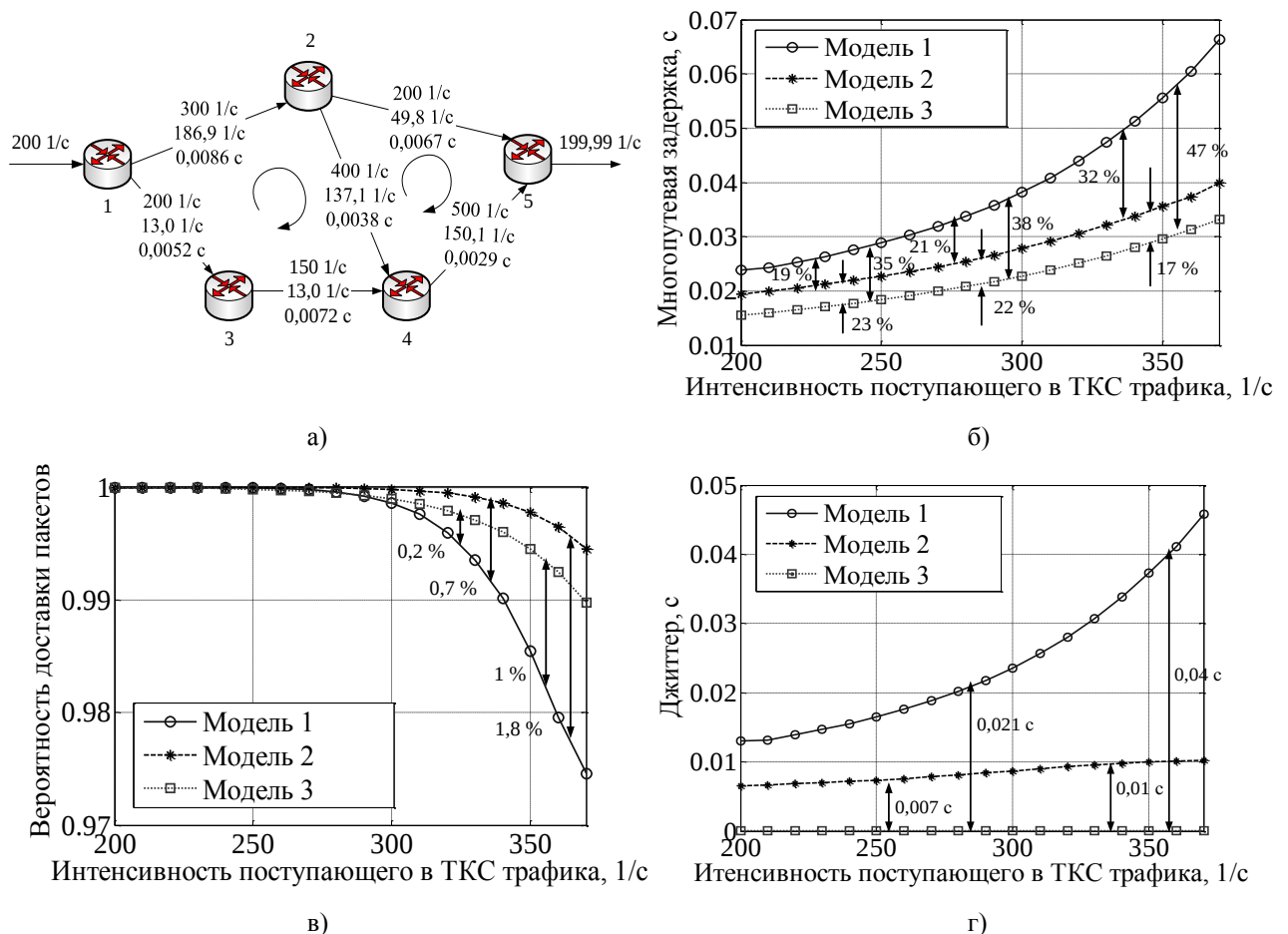


Рис. 1. Пример структуры ТКС (а) и результаты сравнительного анализа решения задачи маршрутизации по основным QoS-показателям в рамках различных моделей (б, в, г)

На дугах графа (рис. 1а) указаны (сверху вниз) пропускная способность канала связи (1/с), интенсивность обслуживаемого трафика (1/с) и средняя задержка пакетов (с) (например, при интенсивности поступающего в сеть трафика 200 1/с). В структуре ТКС (рис. 1а) содержится два независимых контура ($r = 2$). Рассматривается однопродуктовый случай, когда в ТКС на обслуживание поступает один трафик ($k = 1$). Так как пропускная способность в рассматриваемой сети от узла 1 до узла 5 равняется 450 1/с, в сеть поступал трафик интенсивностью от 200 до 370 1/с, чтобы проанализировать процесс решения задачи маршрутизации для различных случаев загрузки сети. На рис. 3 показаны результаты сравнительного анализа значений показателей качества обслуживания при решении задачи маршрутизации в зависимости от интенсивности поступающего в сеть трафика: по межконцевой многопутевой задержке (рис. 3 а), по межконцевой вероятности доставки пакетов (рис. 3 б), по джиттеру пакетов, вызванного реализацией многопутевой стратегии маршрутизации (рис. 3 в).

В ходе анализа полученных результатов установлено, что при решении задачи многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в рамках предложенной модели (1)-(5) выигрыш по средней многопутевой задержке составил 17-23 % по сравнению с решением в рамках модели 2 и 35-47 % по сравнению с решением в рамках модели 1 (рис. 3 а). Однако при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели наблюдалось незначительное ухудшение значений вероятности доставки пакетов (на 0,1-1 %) по сравнению со значениями, полученными в рамках модели 1 (рис. 3 б). При анализе джиттера пакетов, вызванного реализацией многопутевой стратегии маршрутизации, замечено, что так как средние задержки пакетов вдоль всего множества путей, рассчитанные в рамках предложенной модели, были равны между собой, то многопутевой джиттер пакетов приблизительно равен нулю (рис 3 в). Для других сравниваемых моделей он был равен в среднем 0,007-0,01 с (модель 1) и 0,021-0,04 с (модель 2). При решении задачи маршрутизации для других исходных данных наблюдалась та же закономерность: значения многопутевой задержки, полученные в рамках предложенной модели, были улучшены в среднем от 10-19 % до 35-48 % по сравнению с значениями, полученными в рамках модели 1 и 2, причем вероятность доставки пакетов существенно не изменялась. Было установлено, что выигрыш по средней многопутевой задержке возрастал с увеличением размерности и связности ТКС.

Таким образом, в работе предложена потоковая модель многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки для программно-конфигурируемых сетей. Новизна модели состоит в том, что балансировка нагрузки осуществляется одновременно по двум критериям. В качестве первого критерия, который введен в целевую функцию, используется коэффициент максимальной загрузки каналов ТКС. В качестве второго критерия, который был введен при помощи дополнительных ограничений, использовалась средняя многопутевая задержка, что позволило получить одинаковые вдоль всех путей доставки пакетов средние задержки.

Реализация предложенной модели на практике целесообразна именно в программно-конфигурируемых сетях, в которых некоторое усложнение процесса расчета может быть компенсировано более высокой производительностью серверов сетевой ОС по сравнению с классическими IP-маршрутизаторами.

Литература:

1. *Смелянский Р.Л.* Программно конфигурируемые сети – основа интернета нового поколения // Сборник материалов 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2012)». – Ростов-на Дону: Южный федеральный университет, 2012. – С. 321-329.
2. *Mérindol P., Pansiot J., Cateloin S.* Improving Load Balancing with Multipath Routing // Proc. of the 17th International Conference on Computer Communications and Networks, IEEE ICCCN 2008. – 2008. – P. 54-61.
3. *Лемешко А.В., Вавенко Т.В.* Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 12–29. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf.
4. *Лемешко А.В., Евсеева О.Ю.* Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 4 (9). – С. 16 - 31. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/4/1/124_lemeshko_tensor.pdf.
5. *Растрюгин Л.А.* Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981 – 375 с.
6. *Стерин В.Л., Вавенко Т.В., Еферов Д.М.* Маршрутизация с балансировкой нагрузки по длине очереди на узлах телекоммуникационной сети // Вестник НТУ "ХПИ". тем. сборник "Новые решения в современных технологиях". - 2013. – Вып. 16. – С. 45-49.