

ЦЕЛЕВАЯ КООРДИНАЦИЯ ДВУХУРОВНЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В MPLS-СЕТИ

Введение

Технология *MPLS* (*MultiProtocol Label Switching*) в настоящее время рассматривается как основная транспортная платформа современных телекоммуникационных систем [1, 2]. При ее разработке в разной степени был учтен опыт эксплуатации и совершенствования таких транспортных технологий, как *IP* (*Internet Protocol*) и *ATM* (*Asynchronous Transfer Mode*), что проявилось в сочетании в рамках *MPLS* принципов *IP*-маршрутизации и высокоскоростной *ATM*-коммутиации. В результате функциональной основой *MPLS* стала реализация режима виртуальных соединений с маршрутизацией «от источника», что значительно расширяет возможности данной технологии с точки зрения поддержки функций качества обслуживания (*Quality of Service, QoS*). Однако наряду с преимуществами *MPLS* обладает и рядом недостатков, характерных для традиционных транспортных технологий. В первую очередь это касается проблемы повышения масштабируемости маршрутных решений в условиях территориальной распределенности ТКС, увеличения числа сетевых узлов и их связности, постоянного роста числа и разнородности трафиков пользователей, а также расширения перечня показателей качества обслуживания.

Как показал проведенный анализ [3, 4], основным источником совершенствования существующих и разработки новых маршрутизирующих протоколов является пересмотр математических моделей и методов маршрутизации, что, прежде всего, связано с переходом к потоковым моделям, в рамках которых по сравнению с графовыми моделями производится более полный учет структурно-функциональных параметров ТКС и характеристик обслуживаемых трафиков. С целью повышения масштабируемости решений, получаемых в рамках потоковых моделей, традиционно эффективным является решение, основанное на реализации принципов многоуровневой (иерархической) маршрутизации [5, 6]. В этой связи в данной работе будет предложена математическая модель маршрутизации, относящаяся к классу потоковых моделей многоуровневой маршрутизации и адаптированная к особенностям построения и функционирования *MPLS*-сети.

Структурное описание *MPLS*-сети

Пусть структура *MPLS*-сети (рис.1) описывается с помощью графа $G=(M, E)$, где M – множество узлов, а E – множество трактов передачи в сети. Все множество узлов в соответствии с принципами построения сети *MPLS* можно разбить на два подмножества: $M^+ = \{M_r^+, r = \overline{1, m_{LER}}\}$ – подмножество приграничных маршрутизаторов (*Label Edge Router, LER*) и $M^- = \{M_j^-, j = \overline{1, m_{LSR}}\}$ – подмножество транзитных маршрутизаторов (*Label Switching Router, LSR*). Каждой дуге $(i, j) \in E$ графа, моделирующей соответствующий тракт передачи в сети, ставится в соответствие пропускная способность φ_{ij} этого тракта. Все множество поступающих от абонентов (сетей доступа) трафиков K в зависимости от того, на какой приграничный маршрутизатор поступает этот трафик, можно декомпозицировать на подмножества $\{K_r, r = \overline{1, m_{LER}}\}$, где K_r – множество трафиков, поступающих на r -й *LER*. Тогда каждому трафику из множества K_r сопоставляется ряд параметров:

M_r^+ – r -й *LER*, на который поступает k -й трафик (узел-источник);

M_p^+ – p -й *LER*, через который k -й трафик убывает из *MPLS*-сети (узел-получатель);

λ^{kr} – интенсивность k_r -го трафика, т.е. k -го трафика, поступающего на r -й *LER*.

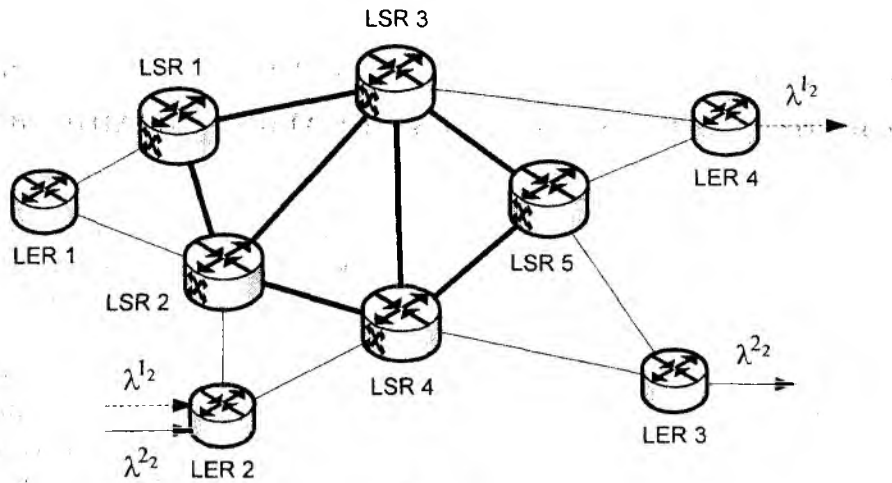


Рис. 1

В качестве примера на рис. 1 показаны интенсивности двух трафиков (λ^{12} и λ^{22}), поступающих на второй LER и предназначенных для четвертого и третьего LER соответственно.

Функциональное описание MPLS-сети

В MPLS-сети в ходе решения задач маршрутизации в рамках потоковых моделей необходимо рассчитать один или множество путей (*Label Switching Path, LSP*) между парой приграничных узлов отправитель–получатель, а также определить порядок распределения между ними трафика заданной интенсивности. Условимся, что с точки зрения повышения масштабируемости решений задач маршрутизации применим двухуровневую схему расчета:

на нижнем уровне – искомые маршруты подлежат расчету независимо на каждом LER для трафиков, которые поступают на него от абонентов (сетей доступа);

на верхнем уровне – полученные на нижнем уровне решения координируются с целью предотвращения вероятной перегрузки трактов передачи сети ввиду децентрализации принимаемых решений по маршрутизации трафиков.

Тогда для каждого r -го LER в качестве искомым выступают маршрутные переменные $x_{ij}^{k_r}$, которые характеризуют интенсивность k_r -го трафика в тракте $(i, j) \in E$. С целью недопущения потерь пакетов на маршрутизаторах и в сети в целом в ходе расчета маршрутных переменных необходимо обеспечить выполнение условий сохранения потока:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r} = \lambda^{k_r} \quad \text{ï ðè } k_r \in K_r, \quad i = M_r^+; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r} = 0 \quad \text{ï ðè } k_r \in K_r, \quad i \neq M_r^+, M_p^+; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r} = -\lambda^{k_r} \quad \text{ï ðè } k_r \in K_r, \quad i = M_p^+. \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений-условий (1) должна выполняться для каждого трафика, поступающего на произвольный приграничный маршрутизатор (LER). Кроме того, с целью предотвращения возможной перегрузки трактов передачи MPLS-сети в ходе расчета маршрутных переменных важно выполнить условия (по количеству трактов передачи):

$$\sum_{r \in M^+} \sum_{k_r \in K_r} x_{ij}^{k_r} \leq \phi_{ij}; \quad (i, j) \in E. \quad (2)$$

Стоит учесть, что при децентрализованном расчете маршрутных переменных на каждом отдельно взятом *LER* условия (2) в явном виде учесть не представляется возможным, т.к. каждый приграничный маршрутизатор определяет *LSP* для поступающих на него трафиков пользователей без информации о результатах расчета на соседних *LER*. В этой связи условия (2) запишем в следующем виде:

$$\sum_{k_r \in K_r} x_{ij}^{k_r} \leq \phi_{ij} - \sum_{\substack{s \in M^+ \\ s \neq r}} \sum_{k_s \in K_s} x_{ij}^{k_s}; \quad r \in M^+, (i, j) \in E. \quad (3)$$

Смысл выражения (3) состоит в том, что трафик, маршрутизируемый с *r*-го *LER*, не должен по своей интенсивности превышать доступной пропускной способности тракта передачи, которая осталась после обслуживания трафиков других приграничных маршрутизаторов.

Согласно физическому смыслу маршрутных переменных, на них следует наложить ограничения вида

$$0 \leq x_{ij}^{k_r} \leq \lambda^{k_r}. \quad (4)$$

В векторно-матричной форме условия (1) – (3) и критерий (4) можно представить в следующем виде:

$$A_r \cdot \bar{x}_r = \bar{a}_r. \quad (5)$$

$$B_r \cdot \bar{x}_r \leq \sum_{\substack{s \in M^+ \\ s \neq r}} C_{rs} \bar{x}_s. \quad (6)$$

В ходе расчета вектора искомых переменных \bar{x}_r в качестве критерия оптимальности получаемых решений выберем минимум следующей целевой функции:

$$\min_x F \quad \text{при} \quad F = \sum_{r \in M^+} \bar{c}_r^t \bar{x}_r, \quad (7)$$

где весовые коэффициенты – координаты вектора \bar{c}_r по сути являются метрикой тракта (i, j) , характеризующая условную стоимость использования k_r -м трафиков этого тракта; $[\cdot]^t$ – операция транспонирования вектора (матрицы).

Тогда, переходя к задаче на безусловный экстремум, необходимо максимизировать лагранжиан по множителям Лагранжа (ρ и μ):

$$\min_x F = \max_{\rho, \mu} L,$$

где

$$L = \sum_{r \in M^+} \bar{c}_r^t \bar{x}_r + \sum_{r \in M^+} \rho_r^t (A_r \cdot \bar{x}_r - \bar{a}_r) + \sum_{r \in M^+} \mu_r^t (B_r \cdot \bar{x}_r - \sum_{\substack{s \in M^+ \\ s \neq r}} C_{rs} \bar{x}_s) \quad (8)$$

Применение метода целевой координации для реализации многоуровневой стратегии маршрутизации

Для решения сформулированной оптимизационной задачи используем метод целевой координации [7, 8], в рамках которого лагранжиан (8) представим в виде

$$L = \sum_{r \in M^+} \bar{c}_r^t \bar{x}_r + \sum_{r \in M^+} \rho_r^t (A_r \cdot \bar{x}_r - \bar{a}_r) + \sum_{r \in M^+} \mu_r^t (B_r \cdot \bar{x}_r) - \sum_{r \in M^+} \mu_r^t \sum_{\substack{s \in M^+ \\ s \neq r}} C_{rs} \bar{x}_s. \quad (9)$$

Предположив, что величины μ_r являются фиксированными, можно последнее слагаемое в выражении (9) привести к виду

$$\sum_{r \in M^+} \mu_r^t \sum_{\substack{s \in M^+ \\ s \neq r}} C_{rs} \bar{x}_s = \sum_{r \in M^+} \sum_{\substack{s \in M^+ \\ s \neq r}} \mu_r^t C_{rs} \bar{x}_s.$$

тогда выражение (9) можно записать следующим образом:

$$L = \sum_{r \in M^+} L_r, \text{ где } L_r = \bar{c}_r^t \bar{x}_r + \rho_r^t (A_r \cdot \bar{x}_r - \bar{a}_r) + \mu_r^t (B_r \cdot \bar{x}_r) - \sum_{\substack{s \in M^+ \\ s \neq r}} \mu_s^t C_{sr} \bar{x}_r. \quad (10)$$

Таким образом, функция (10) приобретает сепарабельную форму, а общая проблема маршрутизации в MPLS-сети оказалась декомпозицированной на ряд маршрутных задач (по числу приграничных маршрутизаторов), где каждая задача маршрутизации на r -м LER, состоящая в расчете вектора \bar{x}_r , свелась к максимизации лагранжиана L_r . Решение задачи по максимизации выражения (11) определяет нижний уровень расчетов – LER-уровень. На верхнем уровне (LSR-уровне), основной задачей которого является координация решений, полученных на нижнем уровне с целью недопущения перегрузки трактов передачи сети (2), осуществляется модификация вектора множителей Лагранжа в ходе выполнения следующей градиентной процедуры:

$$\mu_r(\alpha + 1) = \mu_r(\alpha) + \nabla \mu_r, \quad (11)$$

где $\nabla \mu_r$ – градиент функции рассчитывается исходя из получаемых на верхнем уровне результатов решения задач маршрутизации \bar{x}_r^* на каждом конкретном r -м LER ($r \in M^+$), т.е.

$$\nabla \mu_r(x) \Big|_{x=x^*} = B_r \cdot \bar{x}_r^* - \sum_{\substack{s \in M^+ \\ s \neq r}} C_{rs} \bar{x}_s^*. \quad (12)$$

Общая схема двухуровневой маршрутизации в MPLS-сети представлена на рис. 2.

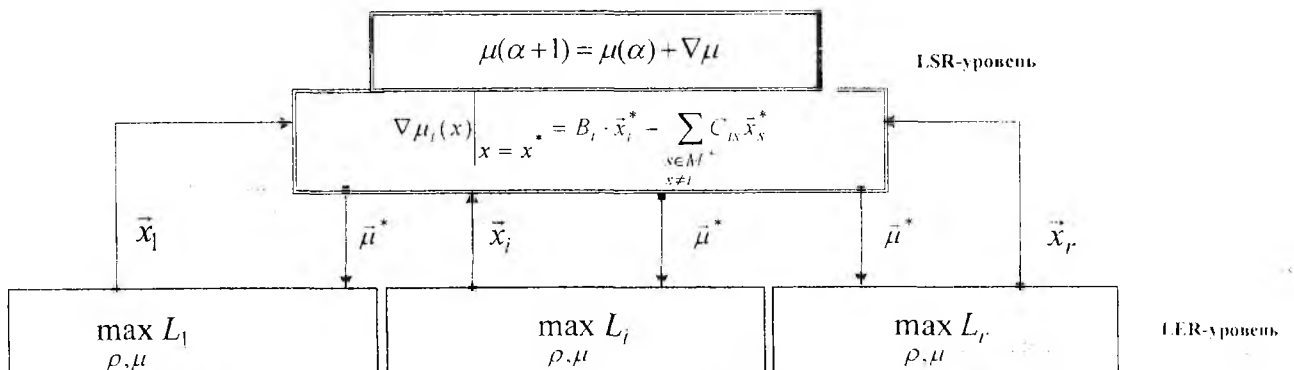


Рис. 2

Выводы

В статье предложена потоковая модель двухуровневой маршрутизации в *MPLS*-сети, представленная выражениями (1) – (7). В ходе решения возникающей на выходе предложенной математической модели маршрутизации оптимизационной задачи был использован метод целевой координации (8) – (12). Сама процедура расчета маршрутных переменных в этой связи приобрела двухуровневый характер, где на нижнем уровне (*LER*-уровень) на приграничных маршрутизаторах рассчитывалось множество путей для трафиков, поступающих на данный *LER*, а на верхнем уровне (*LSR*-уровне) полученные на *LER*-уровне решения (маршрутные переменные) координировались с целью недопущения перегрузки трактов передачи сети. Функции координатора в *MPLS*-сети могут быть возложены на один из транзитных маршрутизаторов.

Реализация на практике предложенного двухуровневого решения имеет целью повысить масштабируемость стратегий потоковой маршрутизации, т.к. использование централизованных схем во многом инерционно и ресурсозатратно в условиях роста размерности *MPLS*-сети. Преимуществом метода целевой координации является простота расчетных задач (11) – (12) на *LSR*-уровне, т.к. в соответствии с парадигмой «stupid network», поддерживаемой в *MPLS*-сетях, все «интеллектуальные» функции сосредоточены на приграничных маршрутизаторах (*LER*-уровень). В случае рассмотрения самой *MPLS*-сети как множества взаимосвязанных подсетей процесс маршрутизации также можно трактовать как многоуровневый с выделением дополнительных иерархических уровней.

Список литературы: 1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. М.: Эко-Трендз, 2005. 304 с. 2. Олвейн В. Структура и реализация современной технологии MPLS: Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. 480 с. 3. Simha A., Osborne E. Traffic Engineering with MPLS. Cisco Press, 2002. 608 p. 4. Burns J. E., Ott T. J., De Kock J. M., Krzesinski A. E. Path selection and bandwidth allocation in MPLS networks: a non-linear programming approach // Proc. SPIE. Florida, 2001. Vol. 4523. P.15-26. 5. Лемешко А.В., Беленков А.Г. Двухуровневый алгоритм оптимизации процессов маршрутизации и управления доступом в телекоммуникационных сетях магистрального уровня // Радиотехника. 2003. Вып. 135. С. 113-118. 6. Евсеева О.Ю. Решение задачи иерархическо-координационной маршрутизации в телекоммуникационных сетях методом предсказания взаимодействия // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Харьков: НАКУ «ХАИ», 2003. Вып.21. С. 102-111. 7. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с. 8. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. М.: Машиностроение, 1986. 494 с.

Харьковский национальный
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 25.08.2009