

УДК 681.513

СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ КОМП'ЮТЕРНИХ СЕТЕЙ С ТЕХНОЛОГИЕЙ MPLS

**Е.Ю. ЗАЙЧЕНКО, Ю.П. ЗАЙЧЕНКО,
АШРАФ АБДЕЛЬ ХИЛАЛ КАРИМ АБУ-АИН**

Сформулирована задача синтеза структуры сетей MPLS с ограничениями на заданные показатели качества сервиса. Построена математическая модель задачи и предложен генетический алгоритм структурного синтеза, позволяющий оптимизировать структуру сети MPLS по критерию стоимости при ограничениях для различных классов потоков.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с резким возрастанием объемов передаваемой информации и ее видов (данные, аудио и видеoinформация) возникла необходимость в разработке новой технологии, обеспечивающей заданное качество сервиса QoS (Quality of Service), и перечня услуг для пользователей. Известные коммуникационные технологии (Ethernet, Frame Relay, IP) не позволяют реализовать заданное качество обслуживания и требуемый уровень QoS. По мере расширения мультимедийных приложений и телеконференций, требующих более высоких скоростей передачи и более широкой полосы пропускания, возникла необходимость в новой технологии, обеспечивающей единый транспортный механизм передачи QoS, работающий «поверх» самых разнообразных технологий, таких как Ethernet, Frame Relay, ATM, SONET, и обеспечивающий высокоскоростную передачу информации с требуемым качеством. Такой технологией является технология многопротокольной коммутации меток — MPLS (Multiprotocol Label Switching). MPLS — универсальное решение проблем обеспечения QoS, стоящих перед современными сетевыми технологиями. Она реализует высокую скорость передачи, масштабируемость, контроль и оптимизацию распределения трафика и маршрутизацию [1, 2].

Одной из важных задач, стоящих перед проектировщиками сетей с технологией MPLS, является задача структурного (топологического) синтеза сети под заданную входящую нагрузку, в результате которого определяются общая структура сети, типы каналов связи, их пропускные способности, распределение потоков при ограничениях на заданный уровень QoS для потоков различных классов обслуживания (Class of Service) по критерию

стоимости. При этом в качестве дополнительных ограничений могут выступать показатели надежности и живучести сети.

Ранее задачи структурного синтеза сети с перспективными технологиями рассматривались для сетей с технологией ATM (Asynchronous Transfer Mode) [3, 4]. Был разработан и исследован достаточно эффективный алгоритм оптимизации структурного синтеза, учитывающий специфику технологии ATM, в частности наличие нескольких категорий сервиса CBR, VBR и ABR.

Цель настоящей статьи — постановка и формализация задачи синтеза структуры сетей с технологией MPLS и разработка соответствующего алгоритма ее решения.

ПОСТАНОВКА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ

Основные особенности технологии MPLS.

1. Введение различных классов потоков (классов сервиса — CoS). Каждый класс имеет свой приоритет в обслуживании, которое реализуется в маршрутизаторах MPLS [1,2].

2. В данной технологии вводятся показатели QoS, в частности, средняя задержка, ее вариация и доля потерянных ячеек. Для каждого класса потоков устанавливаются свои значения QoS. Основная функция сети MPLS — обеспечение установленных показателей качества, поэтому при решении задач анализа и синтеза сетей с технологией MPLS соответствующие модели оценки показателей QoS должны учитывать указанные выше особенности технологии MPLS.

Имеется несомненная зависимость между числом классов потоков, установленными показателями QoS для классов потоков и результатами синтеза структуры сетей, так как синтезируемая топология сети должна обеспечить передачу всех классов входящих потоков с заданными показателями при минимальной стоимости.

Рассмотрим постановку и математическую модель задачи структурного синтеза.

Задано множество узлов сети $X = \{x_j\}$, $j = \overline{1, n}$ — маршрутизаторов MPLS (так называемых LSR — Label Switching Routers), их размещение по территории региона, набор пропускных способностей каналов связи $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$, из которых ведется синтез, и их удельных стоимостей на единицу длины $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$, определены CoS, известны матрицы входящих требований для потока k -го класса $H(k) = \|h_{ij}(k)\|$, $i, j = \overline{1, n}$; $k = 1, 2, \dots, K$, где $h_{ij}(k)$ — интенсивность потока k -го класса, который необходимо передавать из узла i в узел j в единицу времени (Кбит/с).

Кроме того, введены ограничения на показатели QoS для каждого класса k в виде ограничения на среднюю задержку $T_{\text{зад}, k}$, $k = \overline{1, K}$.

Требуется найти структуру сети в виде набора каналов связи (КС) $E = \{(r, s)\}$, выбрать пропускные способности (ПС) каналов связи $\{\mu_{rs}\}$ и найти распределение потоков всех классов $F(k) = [f_{rs}(k)]$ таким образом,

чтобы обеспечить передачу требований всех классов $H(k)$ в полном объеме и с задержками T_{cp} , не превышающими заданные $T_{зад}$ при минимальной стоимости сети.

Составим математическую модель данной задачи синтеза.

Требуется найти

$$\min_{E\{\mu_{rs}\}} C_{\Sigma}(M) = \sum_{(r,s) \in E} C_{rs}(\{\mu_{rs}\}) \quad (1)$$

при условиях

$$T_{cp}(\{\mu_{rs}\}; \{f_{rs}\}) \leq T_{зад,k} \quad k = \overline{1, K}, \quad (2)$$

$$f_{rs} < \mu_{rs} \quad \text{для всех } (r, s), \quad (3)$$

$$\mu_{rs} \in D. \quad (4)$$

В работе [5] для потока k -го класса при условии, что обслуживание в классах происходит с относительными приоритетами ρ_k в порядке убывания номера класса (т.е. $\rho_1 > \rho_2 > \dots > \rho_k$) при заданном наборе ПС каналов $\{\mu_{rs}\}$ и распределении потоков (РП) $F(k) = [f_{rs}^{(k)}]$, получено следующее выражение для средней задержки $T_{cp,k}$:

$$T_{cp,k}(\{\mu_{rs}\}, F) = \frac{1}{H_{\Sigma}^{(k)}} \sum_{(r,s) \in E} \frac{f_{rs}^{(k)} \sum_{i=1}^K f_{rs}^{(i)}}{(\mu_{rs} - \sum_{i=1}^{K-1} f_{rs}^{(i)}) (\mu_{rs} - \sum_{i=1}^K f_{rs}^{(i)})} \quad (5)$$

при условии $\sum_{i=1}^K f_{rs}^{(i)} = f_{rs} < \mu_{rs}$, где $f_{rs}^{(i)}$ — величина потока класса i в КС (r, s) .

Данная задача синтеза относится к классу комбинированных задач дискретного программирования и является NP-полной. Поэтому для ее решения предлагается генетический алгоритм структурного синтеза.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА

Алгоритм состоит из двух этапов: предварительного и основного.

Предварительный этап. Синтезируется N начальных структур $\{E_1(0), \dots, E_i(0), \dots, E_N(0)\}$.

Сначала из исходных узлов $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ синтезируется кратчайшее связывающее дерево (КДС), для чего используется известный алгоритм Исау-Вильямса. Здесь в качестве корня дерева D_0 выбирается узел i^* с наибольшей суммарной интенсивности информационного обмена с остальными.

$$x_{i^*} : H_i = \sum_{j=1}^n h_{ij} \rightarrow \max.$$

Далее случайным образом, используя процедуру «Ввод ребра», структура D_0 дополняется до заданной степени избыточности, и на ее основе генерируется N начальных многосвязных структур $\{E_1(0), \dots, E_i(0), \dots, E_N(0)\}$, где N — размер популяции (подбирается экспериментально). В данном варианте принимаем $N = 3 \dots 5$.

Далее переходим к основному этапу.

Основной этап состоит из однотипных итераций, на каждой из которых осуществляется оптимизация одной текущей структуры в памяти.

(k + 1)-я итерация.

Допустим в результате k -й итерации построена текущая популяция $\Pi = \{E_1(k), \dots, E_i(k), \dots, E_N(k)\}$. Обозначим $C_{\Sigma}(E_i(k))$ величину критерия для структуры $E_i(k)$.

1. Выбираем структуру $E_i(k)$ для модификации с вероятностью $p_i(k)$, обратно пропорциональной $C_{\Sigma}(E_i)$.

$$p_i(k) = \frac{C_{\Sigma}(E_i(k))^{-1}}{\sum_{i=1}^N C_{\Sigma}(E_i)^{-1}}. \quad (6)$$

2. Определяем множество КС претендентов на удаление $R_{уд_i}(k)$ по условиям сохранения заданной связности и множество КС претендентов на ввод $R_{вв_i}(k)$ для структуры $E_i(k)$.

3. Вычисляем показатель неэффективности

$$q_{rs} = C_{rs}(1 - \rho_{rs}) = C_{rs} \left(\frac{\mu_{rs} - f_{rs}}{\mu_{rs}} \right) \quad (7)$$

для КС $(r, s) \in R_{уд_i}(k)$ и с вероятностями $q_{rs} = \frac{q_{rs}}{\sum_{(r,s) \in P_{уд}} q_{rs}}$ выбираем канал

(r^*, s^*) , удаляем его из структуры $E_i(k)$ и получаем $E_i^{(H)}(k) = E_i(k) \setminus (r^*, s^*)$.

4. Решаем задачу выбора пропускных способностей и распределения потоков (ВПСРП) для структуры $E_i^{(H)}(k)$, используя алгоритм ВПС, предложенный в работе [5], и РП в [6], находим новые ПС $\{\mu_{rs}^{(H)}(k)\}$ и РП $F^{(H)}(k) = [f_{rs}^{(H)}(k)]$. Вычисляем ее стоимость $C_{\Sigma}^{(H)} = C_{\Sigma}(\{\mu_{rs}^{(H)}\})$.

5. Сравниваем. Если

$$C_{\Sigma}^{(H)}(k) < C_{\Sigma}(E_i(k)), \quad (8)$$

то полагаем $E_i(k+1) = E_i^{(H)}(k)$ и записываем структуру $E_i(k+1)$ вместо $E_i(k)$ в популяцию Π . И конец итерации $(k+1)$. Иначе на шаг 6.

6. Восстанавливаем структуру $E_i(k)$ и удаляем КС (r^*, s^*) из списка претендентов.

$$R_{уд_i}(k) = R_{уд_i}(k) \setminus (r^*, s^*).$$

7. Анализируем множество КС — $R_{вв_i}(k)$. Рассчитываем для них показатели эффективности от ввода в структуру КС (i, j) .

$$G_{ij}^{BB} = C(\Pi_{ij}) - C_{ij}, \quad (9)$$

где $C(\Pi_{ij}) = \sum_{(r,s) \in \Pi_{ij}} C_{rs} \frac{f_{rs}^{(i,j)}}{f_{rs}}$ — стоимость передачи информации между узлами i и j по маршруту Π_{ij} в структуре $E_i(k)$; C_{ij} — стоимость введения нового КС (i, j) ; $f_{(r,s)}^{(i,j)}$ — доля трафика в КС (r, s) между узлами (i, j) ; f_{rs} — суммарный трафик в КС (r, s) .

8. Выбираем с вероятностями $P_{ij}^{BB} = \frac{G_{ij}}{\sum_{(i,j) \in P_{BB}} G_{ij}}$ из множества $R_{вв_i}(k)$

КС (i^*, j^*) и вводим его в структуру $E_i(k)$. Получаем структуру $\bar{E}_i^{(h)}(k) = E_i(k) \cup (i^*, j^*)$.

9. Решаем задачу ВПСРП для структуры $\bar{E}_i^{(h)}$, используя алгоритмы ВПС и РП, находим новые ПС $\{\mu_{rs}^{(h)}(k)\}$ и потоки $\{f_{rs}^{(h)}(k)\}$, а также стоимость новой сети $C_{\Sigma}^{(h)}(k) = C_{\Sigma}(\bar{E}_i^{(h)}(k)) = \sum_{(r,s) \in \bar{E}_i^{(h)}} (\mu_{rs}^{(h)}(k))$.

10. Проверяем условие: если

$$C_{\Sigma}^{(h)}(k) < C_{\Sigma}(E_i(k)), \quad (10)$$

то фиксируем структуру $\bar{E}_i^{(h)}(k) = E_i(k+1)$, записываем $E_i(k+1)$ вместо $E_i(k)$ в текущую популяцию П. Конец итерации.

11. Восстанавливаем прежнюю структуру $E_i(k)$ и удаляем КС (i^*, j^*) из списка претендентов: $R_{вв_i}(k) = R_{вв_i}(k) \setminus (i^*, j^*)$ и переходим на шаг 1.

Повторим шаги 1...11 со структурами из популяции П до тех пор, пока либо не выполнится одно из двух условий: $C_{\Sigma}^{(h)}(E_i(k)) < C_{\Sigma}(E_i(k))$, и тогда конец итерации $(k+1)$, либо списки претендентов на удаление и ввод будут исчерпаны: $R_{вв_i}(k) = 0$; $R_{уд_i}(k) = 0$ для всех $i = \overline{1, N}$. Тогда выбираем из популяции $\Pi(k)$ наилучшую структуру $E_{i^*}(k)$: $C_{\Sigma}(E_{i^*}(k)) = \min_i C_{\Sigma}(E_i(k))$, и конец работы алгоритма.

Данный алгоритм является генетическим. Он сходится к некоторому субоптимальному решению за конечное число итераций, благодаря конеч-

ности множеств каналов претендентов на удаление и ввод. Использование основных идей генетического метода оптимизации, а именно: популяция из текущих структур, введение вероятностных механизмов для выбора режимов изменения структуры (ввод канала, его удаление и замена), повышает вероятность нахождения глобального минимума.

Вычислительная сложность алгоритма $N = O(m^2 n^2 k)$, где m — число каналов; n — число узлов сети; k — размеры популяции.

Данный алгоритм был реализован программно. Проведены его экспериментальные исследования в задаче синтеза структуры глобальной компьютерной сети Украины с числом узлов $n = 25$; $m = 39$ (начальное число каналов).

В результате проведенных исследований установлено, что применение предложенного алгоритма структурного синтеза позволяет снизить стоимость сети по сравнению с базовым вариантом на 20...25%.

ВЫВОДЫ

1. Сформулирована задача синтеза структуры сетей с технологией MPLS, отличающаяся от известных постановок учетом специфики технологии MPLS, в частности, наличием нескольких классов потоков и введением соответствующих показателей качества сервиса, которые должны быть обеспечены синтезируемой сетью.

2. Предложен генетический алгоритм структурного синтеза сетей MPLS, позволяющий оптимизировать структуру сети MPLS по критерию стоимости при ограничениях на установленные значения средней задержки для различных классов потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. — СПб.: БХВ, 2005. — 304 с.
2. Вивьен О. Структура и реализация современной технологии MPLS / Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. — 480 с.
3. Зайченко О.Ю. Структурный синтез глобальных сетей с технологией ATM за заданными показателями качества обслуживания // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 5. — С. 5–11.
4. Зайченко Е.Ю. Сети ATM: Моделирование, анализ и оптимизация. — Киев: ВІПОЛ, 2003. — 216 с.
5. Зайченко Ю.П., Хамуди Мухаммед Али-Аззам. Оптимальный выбор пропускных способностей каналов связи в сети с технологией MPLS // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. — 2005. — № 43. — С. 196–201.
6. Зайченко Ю.П., Ахмед Шарадка. Задача распределения потоков различных классов в сети с технологией MPLS // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. — 2005. — № 43. — С. 113–123.

Поступила 31.03.2006