

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СЕТЕЙ С ТЕХНОЛОГИЕЙ MPLS

Елена Зайченко, Юрий Зайченко

Abstract: The problem of MPLS computer networks structural synthesis under constraints is considered. The method of network structure optimization is suggested which utilizes ideas of genetic algorithm. The experimental investigations of the suggested algorithm are presented and discussed.

Keywords: MPLS network, structure synthesis, quality of service (QoS), network optimization

ACM Classification Keywords: C2. Computer-communication networks

Conference: The paper is selected from XVth International Conference "Knowledge-Dialogue-Solution" KDS 2009, Varna, Bulgaria, June-July 2009

Введение

Одной из наиболее перспективных телекоммуникационных технологий является технология многопротокольной коммутации меток (MPLS). Эта технология предоставляет унифицированный транспортный механизм для передачи разнотипной информации – аудио, видео и данных на высоких скоростях и обеспечивает заданное качество обслуживания (QoS).

Одной из важных задач, которые стоят перед проектировщиками сетей с технологией MPLS есть задача структурного, или топологического синтеза сети, под заданную входную нагрузку, в результате которой определяется общая структура сети, типы каналов связи, их пропускные способности, распределение потоков при ограничениях на заданный уровень QoS для потоков разных классов обслуживания (Class of Service) по критерию стоимости. При этом как дополнительные ограничения могут выступать показатели надежности и живучести сети.

В рамках решения задачи построения сети, кроме задачи выбора топологии, стоит задача выбора оптимальных пропускных способностей будущей сети при априори неизвестных, то есть нераспределенных потоках, базируясь лишь на требованиях к объему данных, которые должны передаваться между узлами сети. Решение этой задачи является необходимым для оценки стоимости построенной структуры, следовательно, и для выбора оптимальной.

Ранее задачи структурного синтеза сети с перспективными технологиями рассматривались для сетей с технологией ATM (Asynchronous Transfer Mode) и был разработан и исследован достаточно эффективный алгоритм оптимизации структурного синтеза, который учитывает специфику технологии ATM в частности наличие нескольких категорий сервиса CBR, VBR и ABR [Зайченко Е.Ю., 2003].

Целью настоящей работы является постановка и формализация задачи синтеза структуры сетей с технологией MPLS, разработка соответствующего метода ее решения и его исследования.

Математическая модель задачи структурного синтеза сетей

Задано множество узлов сети $X = \{x_j\} \quad j = \overline{1, n}$ - маршрутизаторов MPLS (так называемых LRS – 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 их удельных стоимостей на длины $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$, определены классы обслуживания CoS (Class of Service), известны матрицы входящих требований для k -го класса $H(k) = \|h_{ij}(k)\| \quad i, j = \overline{1, n}; \quad k = 1, 2, \dots, K$, где $h_{ij}(k)$ – интенсивность k -го класса, который необходимо передавать из узла i в узел j за единицу времени (Кбит/с).

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

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 $T_{зад,k}$ и при этом бы выполнялись ограничения на долю потерянных пакетов CLP_k , а стоимость сети была бы минимальной [Зайченко Е.Ю., 2006].

Составим математическую модель данной задачи синтеза.

Требуется найти такую структуру сети E , для которой:

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

при условиях

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

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

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

$$CLP_k(\{\mu_{rs}\}; \{f_{rs}\}) \leq CLP_{k зад}, \quad (5)$$

где $CLP_k(\{\mu_{rs}\}; \{f_{rs}\})$ - доля потерянных пакетов для потока k -го класса (приоритета), $CLP_{k зад}$ - заданное ограничение на эту величину.

В работе [Зайченко Е.Ю., 2007] было получено следующее выражение для средней задержки $T_{cp,k}$:

$$T_{cp,k}(\{\mu_{rs}\}, F) = \frac{1}{H_{\Sigma}^{(k)}} \sum_{(r,s) \in E} \frac{f_{rs}^{(k)} \sum_{i=1}^K f_{rs}^{(i)}}{(\mu_{rs} - \sum_{i=1}^{K-1} f_{rs}^{(i)}) (\mu_{rs} - \sum_{i=1}^K f_{rs}^{(i)})} \quad (6)$$

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

В работах [Зайченко Е.Ю., 2007] получено следующее выражение для величины доли потерянных пакетов в каналах (r, s) :

$$CLP_{rs} = P_k = P_0 (f_{rs} / \mu_{rs})^{n_{rs}} \frac{1}{n_{rs}!} \left(\frac{f_{rs}}{n_{rs} \mu} \right)^{N_{rs}}, \quad (7)$$

где

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{n_{rs}} \left(\frac{f_{rs}}{\mu} \right) \frac{1}{k!} + \left(\frac{f_{rs}}{\mu} \right)^{n_{rs}} \frac{1}{n_{rs}!} \sum_{k=1}^N \left(\frac{f_{rs}}{n_{rs} \mu} \right)^k \right]^{-1} - \quad (8)$$

нормирующий множитель, n_{rs} - число цифровых каналов базовой пропускной способности μ (1.544 Мбит/с) в линии связи (r, s) ; N_{rs} - размер буфера коммутатора MPLS, выделенного для потока k -го класса.

Тогда вероятность отсутствия потерь пакетов в сети из множества каналов E равна $P = \prod_{(r,s) \in E} (1 - CLP_{rs})$, а средняя вероятность, (доля) потерянных пакетов K -го класса в целом по сети равна

$$CLP_k = 1 - P = 1 - \prod_{(r,s) \in E} (1 - CLP_{rs}(\mu_{rs}; f_{rs})). \quad (9)$$

Данная задача синтеза структуры относится к классу комбинаторных задач дискретного программирования и является NP - полной задачей. Поэтому для ее решения предлагается генетический метод структурного синтеза.

Описание метода структурного синтеза

Метод состоит из двух этапов: предварительного и основного [Зайченко Е.Ю., 2006].

Цель предварительного этапа: синтезировать начальную структуру сети, удовлетворяющую условиям заданной связности.

На основном этапе, состоящем из однотипных итераций, осуществляем оптимизацию структуры текущей сети по стоимости при ограничениях на заданные значения показателей качества QoS.

На предварительном этапе, используя алгоритм Исау-Вильямса, сначала строим кратчайшее связывающее дерево из исходных узлов, а затем дополняем его до заданной связности 2.

Переходим на первую итерацию оптимизации основного этапа.

На этом этапе используется генетический алгоритм структурного синтеза. При этом генерируется случайным образом популяция из N начальных структур $E_1(0), E_2(0), \dots, E_N(0)$, что необходимо для реализации генетического метода.

Основной этап.

Этот этап состоит из однотипных итераций, на каждой из которых осуществляется оптимизация текущей структуры в памяти по критерию стоимости при ограничениях на среднюю задержку.

($k+1$) итерация.

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

1. С вероятностью $p_i(k)$ обратно пропорциональной $C_\Sigma(E_i)$ выбираем структуру $E_i(k)$ для модификации.

В качестве $p_i(k)$ выбираем:

$$p_i(k) = \frac{C_\Sigma(E_i(k))^{-1}}{\sum_{i=1}^N C_\Sigma(E_i)^{-1}}. \quad (10)$$

2. Для структуры $E_i(k)$ определяем множество КС - претендентов на удаление $R_{y_{\phi_i}}(k)$ по условиям сохранения заданной связности и множество КС - претендентов на ввод $R_{\phi_{\phi_i}}(k)$.

3. Для КС $(r, s) \in R_{y_{\phi_i}}(k)$ вычисляем показатель неэффективности

$$q_{rs} = C_{rs}(1 - \rho_{rs}) = C_{rs} \left(\frac{\mu_{rs} - f_{rs}}{\mu_{rs}} \right) \quad (11)$$

и с вероятностями $q_{rs} = \frac{q_{rs}}{\sum_{(r,s) \in P_{y_{\phi_i}}} q_{rs}}$ выбираем канал (r^*, s^*) , удаляем его из структуры $E_i(k)$ и

получим $E_i^{(n)}(k) = E_i(k) \setminus (r^*, s^*)$.

4. Для структуры $E_i^{(n)}(k)$ решаем задачу анализа сети, а именно ВПС РП, используя алгоритм ВПС и РП, описанные в [Зайченко Е.Ю., 2007], и находим новые ПС $\{\mu_{rs}^{(n)}(k)\}$ и распределение потоков $F^{(n)}(k) = [f_{rs}^{(n)}(k)]$. Вычисляем её стоимость $C_\Sigma^{(n)} = C_\Sigma(\{\mu_{rs}^{(n)}\})$.

5. Сравнение. Если

$$C_\Sigma^{(n)}(k) < C_\Sigma(E_i(k)), \quad (12)$$

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

6. Анализируем множество КС претендентов на ввод - $R_{\text{вв},i}(k)$, для них рассчитываем показатели эффективности от ввода в структуру КС (i, j)

$$G_{ij}^{\text{вв}} = C(\pi_{ij}) - C_{ij}, \quad (13)$$

где $C(\pi_{ij}) = \sum_{(r,s) \in \pi_{ij}} C_{rs}(f_{rs}) \cdot \frac{f_{rs}^{(i,j)}}{f_{rs}}$ - 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) .

7. С вероятностями $P_{ij}^{\text{вв}} = \frac{G_{ij}}{\sum_{(i,j) \in P_{\text{вв}}} G_{ij}}$ выбираем из множества $R_{\text{вв},i}(k)$ КС (i^*, j^*) и вводим его в

структуру $E_i(k)$. Получим структуру $\bar{E}_i^{(H)}(k) = E_i(k) \cup (i^*, j^*) \setminus (r^*, s^*)$.

8. Для структуры $\bar{E}_i^{(n)}$ решаем задачу ВПС РП, используя алгоритмы ВПС и РП, находим новые ПС $\{\mu_{rs}^{(n)}(k)\}$ и поток $\{f_{rs}^{(n)}(k)\}$, а также стоимость новой сети:

$$C_\Sigma^{(n)}(k) = C_\Sigma(\bar{E}_i^{(n)}(k)) = \sum_{(r,s) \in \bar{E}_i^{(n)}} (\mu_{rs}^{(n)}(k))$$

9. Проверяем условие: если $C_\Sigma^{(n)}(k) < C_\Sigma(E_i(k))$, (14)

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

10. В противном случае восстанавливаем прежнюю структуру $E_i(k)$ и удаляем КС (i^*, j^*) из списка претендентов: $R_{\text{вв},i}(k) = R_{\text{вв},i}(k) \setminus (i^*, j^*)$ и переходим на шаг 11.

11. Проверка условия $P_{\text{вв}}(k) \neq \emptyset$. Если да, то на шаг 6. Иначе на шаг 12.

12. Удаляем КС (r^*, s^*) из списка претендентов на удаление $P_{\text{уд}}^{(H)}(k) = P_{\text{уд}}(k) \setminus (r^*, s^*)$.

13. Проверка условия $P_{\text{уд}}^{(H)}(k) \neq \emptyset$. Если да, то восстанавливаем структуру $E_i(k)$. Восстанавливаем исходное множество претендентов на ввод $P_{\text{вв}}(k)$ и на шаг 2. Повторяем шаги 2-13. Иначе на шаг 14.

14. Восстанавливаем прежнюю структуру $E_i(k)$. Она не может быть улучшена и зафиксируем ее в популяции $\Pi(k)$.

Выбор другой структуры $E_j(k)$ из популяции $\Pi(k)$.

Повторяем с ней шаги 1=13 до тех пор, пока один либо из них не закончится исходом (14), и тогда конец (k+1)-й итерации, либо фиксируем в популяции структуру $E_j(k)$ как такую, которая не может оптимизирована и выбираем очередную структуру и из популяции для $\Pi(k)$ оптимизации.

Метод прекращает работу, когда все текущие структуры некоторой популяции $\Pi(r)$ будут зафиксированы, как невозможные для улучшения. Тогда выбираем из популяции структуру $E_i(k)$ с минимальным значением критерия C_Σ и конец работы метода.

Как следует из приведенного описания, данный метод использует идеи генетического алгоритма вместе с направленным перебором вариантов.

Поскольку используется механизм селекции, то на каждой итерации значение критерия улучшается. Этим обеспечивается сходимость к оптимальному решению.

В данном случае получаемая структура является локально-оптимальной. Но вместе с тем, при некотором усложнении механизмов генерации новых структур (потомков) и увеличении числа итераций можно обеспечить сходимость к глобально-оптимальному решению

Экспериментальные исследования

С целью реализации предложенного метода структурного синтеза была разработана соответствующая программа синтеза сетей MPLS, которая вошла составной частью в инструментальный программный комплекс "MPLS NETBuilder". Были проведены ее экспериментальные исследования в процессе проектирования глобальной сети с технологией MPLS Украины. В процессе экспериментов варьировались матрицы требований входящих потоков, ограничения на показатели качества обслуживания. Некоторые из результатов приводятся ниже.

В первой серии экспериментов исследовались зависимости получаемых структур сетей от величин матриц входящих требований $H(r)$. При этом матрица требований для класса r умножалась на коэффициент k : $H(r) = k H_0(r)$.

В первом эксперименте принималось $k=0,2$. Оптимальная структура приводится на рис.1.



Рис. 1. Оптимальная структура стоимостью 6265,9 тыс. у.е

В следующих экспериментах коэффициент k менялся в интервале $[0.5-2.0]$. Синтезированная структура сети для $k=1.0$ приводится на рис.2.

Анализируя структуры сети, полученные при варьировании коэффициента пропорциональности k в диапазоне $0.2-2.0$, можно сделать вывод об *устойчивости базовой структуры (бекбона) сети* в широком диапазоне вариации входящей нагрузки (при десятикратном её увеличении). Это свидетельствует о высокой эффективности разработанного метода структурного синтеза сетей.



Рис. 2. Структура сети для $k=1$

Проведем сравнение полученных результатов структурного синтеза сетей с решением задачи ВПСРП для базовой структуры сети при варьировании коэффициента k .

В таблице 1 приведены следующие результаты для структур с оптимизированной топологией и для структур с фиксированной топологией, (оптимизированной при $k=1$) и оптимизированными с помощью алгоритма ВПС РП пропускными способностями:

Таблица 1

Коэффициент	Оптимизированная структура	Оптимизированные ПС с использованием ВПСРП
0,2	6265,934	8052,466
0,4	9117,214	10463,3
0,6	12056,44	12973,66
0,8	15432,63	15546,2
1	18560,43	18560,43
1,2	19057,57	22800,82
1,4	22385,43	Нет решения
1,6	25971,16	Нет решения
1,8	27787,29	Нет решения
2	34928,58	Нет решения

Как видим, полученная зависимость стоимости от суммарной интенсивности входящих потоков близка к линейной, что хорошо согласуется с теорией. При этом оптимизация структуры сети дает существенно лучшие результаты по сравнению с просто оптимизацией пропускных способностей при фиксированной структуре.

В последующих экспериментах исследовалась зависимость стоимости синтезируемых структур от значений средней задержки T_{cp} для различных классов сервиса. В этих экспериментах варьировались ограничения на T_{cp} для различных категорий сервиса. При этом величина $k=1$. Соответствующие

результаты приводятся в таблице 2. Анализируя их можно сделать вывод, что тем жестче требования по задержке, тем выше стоимость сети, что хорошо согласуется теоретическими положениями.

Таблица 2. Зависимость стоимости сети от средней задержки

Задержка	Оптимизированная структура тыс. у.е
1	18790,2
0,3	19449,8
0,12	20233
0,06	20410
0,03	20937,2

Заключение

В работе предложен метод структурного синтеза сетей с технологией MPLS при ограничениях на показатели качества обслуживания. Метод использует идеи генетической оптимизации и позволяет синтезировать субоптимальную структуру сети по критерию стоимости. Проведены экспериментальные исследования предложенного метода, позволяющие оценить его эффективность.

Благодарности

Статья частично финансирована из проекта **ITHEA XXI** Института Информационных теории и Приложений FOI ITHEA и Консорциума FOI Bulgaria (www.ithea.org, www.foibg.com).

Литература

- [Зайченко Е.Ю., 2003] Зайченко Е.Ю. Сети ATM: Моделирование, анализ и оптимизация. – Киев ЗАТ «ВИПОЛ».- 2003.-224с.
- [Зайченко Е.Ю., 2007] Зайченко Е.Ю. Комплекс алгоритмов оптимизации сетей с технологией MPLS// Системні дослідження та інформаційні технології-2007.-№4.-с.58-71.
- [Зайченко Е.Ю., 2006] Зайченко Е.Ю., Зайченко Ю.П., Ашраф АбдельХилал Абу-Аин. Структурный синтез компьютерных сетей с технологией MPLS // Системні дослідження та інформаційні технології-2006.-№4.-с.65-70.

Информация об авторах

Зайченко Елена Юрьевна, профессор, д.т.н., кафедра «Институт прикладного системного анализа». Киев, НТУУ «КПИ», ул. Политехническая 14. тел: +8(044)287-69-67.

Зайченко Юрий Петрович, профессор, д.т.н., кафедра «Институт прикладного системного анализа». Киев, НТУУ «КПИ», ул. Политехническая 14. тел: +8(044)241-86-93,
e-mail: baskervil@voliacable.com