
А.В. Лемешко, Е.С. Невзорова

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКО-
КООРДИНАЦИОННОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ**

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина

Ключевые слова: принцип координации, количество итераций, иерархическая маршрутизация, потоковая модель маршрутизации.

Исследован метод двухуровневой маршрутизации на основе принципа целевой координации. Определены факторы, влияющие на количество координирующих итераций. Показана зависимость количества координирующих итераций от загруженности сети. Предложен метод уменьшения количества итераций за счет изменения маршрутной метрики каналов связи. Использование предложенного метода позволяет повысить масштабируемость маршрутных решений в телекоммуникационной сети, сократить количество итераций при реализации иерархической маршрутизации, тем самым сократить объемы служебного трафика в сети.

A.V. Lemeshko, E.S. Nevzorova

**THE INCREASING EFFICIENCY OF AN IMPLEMENTATION OF HIERARCHICAL
ROUTING WITH COORDINATION IN TELECOMMUNICATION NETWORK**

Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine

Keywords: coordination method, number of iterations, hierarchical routing, flow model of routing.

The two-level routing method based on the coordination principle has been investigated. The factors that influence on the number of coordinating iterations were determined. The dependence of the number of iterations on transmitted packet flows rate was shown. A method to reduce the number of iterations by changing the routing metric of links was proposed. Using the proposed method can both improve the scalability of routing decisions in the telecommunication network and reduce the number of

iterations in the implementation of hierarchical routing, and thus reduce the volume of service traffic on the network.

На сегодняшний день стремительно развиваются телекоммуникации в направлении парадигмы сетей нового поколения. При этом важными остаются вопросы, связанные с обеспечением качества обслуживания в телекоммуникационных сетях (ТКС) и повышению масштабируемости подобных решений. Поэтому на первое место выходит проблема разработки и использования адекватных моделей и эффективных методов иерархической маршрутизации в ТКС, основанных на теории иерархических многоуровневых систем [1,2].

В этой связи пусть структура ТКС описывается с помощью графа $G = (M, E)$, где M – множество вершин, моделирующее маршрутизаторы, а E – множество дуг, моделирующее каналы связи сети. Все множество M можно разбить на два подмножества: $M^+ = \{M_r^+, r = 1, m^+\}$ – подмножество приграничных маршрутизаторов, где m^+ – количество приграничных маршрутизаторов; $M^- = \{M_j^-, j = 1, m^-\}$ – подмножество транзитных маршрутизаторов, где m^- – их общее число. Каждому каналу связи $(i, j) \in E$ соответствует пропускная способность Φ_{ij} . Для каждого узла-источника в ТКС в качестве искомым выступают переменные $x_{ij}^{k_r}$, равные доле интенсивности k_r -го потока пакетов, передаваемого по каналу (i, j) ; k_r – поток пакетов, поступающий в сеть через r -й приграничный маршрутизатор; λ^{k_r} – интенсивность k_r -го потока.

С целью предотвращения потерь пакетов на маршрутизаторах и в сети в целом необходимо обеспечить выполнение условия сохранения потока:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r} = 1, \text{ если } i\text{-й маршрутизатор - узел-отправитель;} \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r} = 0, \text{ если } i\text{-й маршрутизатор - транзитный узел;} \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r} = -1, \text{ если } i\text{-й маршрутизатор - узел-получатель.} \end{array} \right. \quad (1)$$

Система уравнений (1) должна выполняться для каждого потока пакетов. Кроме того, с целью предотвращения перегрузки каналов связи важно выполнить условия:

$$\sum_{r \in M^+} \sum_{k_r \in K} \lambda^{k_r} x_{ij}^{k_r} \leq \Phi_{ij}. \quad (2)$$

Стоит учесть, что при децентрализованном расчёте маршрутных переменных на каждом отдельно взятом узле-источнике условия (2) в явном виде учесть не представляется возможным, т.к. каждый маршрутизатор определяет путь передачи потока пакетов без информации о результатах расчёта другого источника. В связи с этим условие условия (2) запишем в следующем виде:

$$\sum_{k_r \in K_r} \lambda^{k_r} x_{ij}^{k_r} \leq \Phi_{ij} - \sum_{\substack{s \in M^+ \\ s \neq r}} \sum_{k_s \in K_s} \lambda^{k_s} x_{ij}^{k_s}. \quad (3)$$

С целью реализации многопутевой маршрутизации на маршрутные переменные накладываются ограничения вида:

$$0 \leq x_{ij}^{k_r} \leq 1. \quad (4)$$

В векторно-матричной форме условия (1) и (3) представляются в следующем виде:

$$A_r \vec{x}_r = \vec{a}_r, \quad (5)$$

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

где \bar{x}_r – вектор, координатами которого являются искомые переменные $x_{ij}^{k_r}$.

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

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

где H_r – диагональная матрица весовых коэффициентов, координаты которой являются метрикой каналов связи, $[\cdot]^t$ – операция транспонирования вектора (матрицы).

Для решения сформулированной оптимизационной задачи использован принцип целевой координации [2-4]. Тогда, переходя к задаче на безусловный экстремум, необходимо максимизировать лагранжиан. По множителям Лагранжа:

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

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

В рамках данного принципа лагранжиан (8) представим в виде:

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

В рамках двухуровневой иерархии решений предположим, что μ_r для нижнего уровня (уровня приграничных маршрутизаторов) являются фиксированными, т.е. значение множителя Лагранжа определяется на верхнем уровне. Тогда выражение (9) примет вид:

$$L = \sum_{r \in M^+} L_r,$$

$$L_r = \bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \mu_r^t (B_r \bar{x}_r) - \sum_{\substack{s \in M^+ \\ s \neq r}} \mu_s^t C_{rs} \bar{x}_s. \quad (10)$$

Таким образом, лагранжиан (10) приобретает сепарабельную форму, а общая проблема маршрутизации оказалась декомпозицированной на ряд маршрутных задач (по числу приграничных маршрутизаторов). Решение задачи по минимизации выражения (10) определяет нижний уровень расчётов. Основной задачей верхнего уровня является координация решений полученных на нижнем уровне с целью недопущения перегрузки каналов связи сети (3). На верхнем уровне осуществляется модификация вектора множителей Лагранжа в ходе выполнения следующей градиентной процедуры:

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

где α – номер итерации, $\nabla \mu_r$ – градиент функции рассчитывается исходя из получаемых на нижнем уровне результатов решения задач маршрутизации на каждом узле-отправителе:

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

Исследование сходимости процедуры (11), (12) для примера рассмотрено для структуры сети, представленной на рис. 1. Сеть состояла из 6 маршрутизаторов и 9 каналов связи. На каналах связи показана их пропускная способность (1/с). В ходе исследования была установлена зависимость количества итераций (11) от интенсивности потоков пакетов. Число потоков для

наглядности было выбрано двум. Первый поток пакетов передавался от первого маршрутизатора к третьему, а второй поток – от пятого к третьему. Максимальная интенсивность потоков от каждого источника составляла 200 1/с, т.к. при интенсивностях выше 200 1/с от каждого источника наблюдалась перегрузка каналов связи.

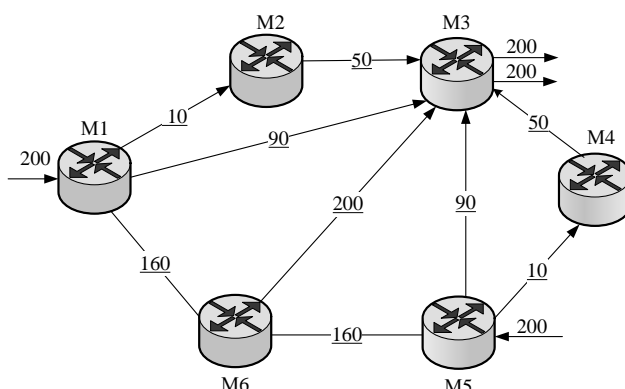


Рисунок 1. Структура исследуемой сети

Из табл. 1 видно, что с ростом интенсивностей потоков увеличивается и количество координирующих итераций, то есть замедляется сходимость метода иерархическо-координационной маршрутизации (8)-(12). Максимальное количество итераций равнялось 13 и наблюдалось при интенсивностях в 200 1/с для каждого потока. В ходе исследований установлено, что причина роста числа координирующих итераций – это перегрузка удалённых по количеству переприемов от узлов отправителя или получателя каналов связи.

Таблица 1. Результаты сравнительного анализа сходимости метода

№ расчета	Интенсивность первого потока пакетов, 1/с	Интенсивность второго потока пакетов, 1/с	Количество итераций в методе (8)-(12)	Количество итераций при использовании (13)
1	20	20	1	1
2	40	20	1	1
...
10	200	20	3	2
...
57	140	180	7	2
58	140	200	8	2
...
92	200	40	3	2
...
98	200	160	9	2
99	200	180	12	2
100	200	200	13	2

В этой связи в работе предлагается для каждого потока пакетов обеспечить увеличение метрики использования им каналов связи пропорционально удалённости этих каналов (по числу узлов) до соответствующего узла-отправителя или получателя. Поэтому для каждого потока для модификации метрик предлагаются следующие выражения:

$$M_i^* = M_i^n + q \cdot p_i, \quad p_i = \min(hop_i^s, hop_i^d) - 1, \quad (13)$$

где M_i^n – метрика i -го канала связи, формирующаяся тем или другим протоколом маршрутизации; q – коэффициент изменения метрики ($q > 0$); hop_i^s – минимальное количество

узлов между узлом-отправителем и i -м каналом связи; hop_i^d – минимальное количество узлов между узлом-отправителем и i -м каналом связи.

Используя выражение (13) в рамках метода иерархической маршрутизации на основе принципа целевой координации, была также получена зависимость количества итераций от интенсивностей входящих потоков пакетов (табл. 1). Таким образом, после проведенных исследований можно сделать вывод, что модификация метрики удаленных каналов (13) значительно повлияла на количественный результат сходимости координационной процедуры, а именно – удалось сократить число итераций в среднем от 1,5 до 5 раз в зависимости от интенсивностей передаваемых потоков пакетов.

Литература:

1. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Издательство "Мир", 1973, 344 с.
2. Лемешко А.В., Ахмад М. Хайлан. Многоуровневое управление трафиком в сети MPLS–TE DiffServ на основе координационного принципа прогнозирования взаимодействий [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций, 2010, № 1 (1), с. 35-44. Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_traffic.pdf.
3. Lemeshko O., Ahmad M. Nailan, Ali S. Ali. A flow-based model of two-level routing in multiservice network // Proceedings of the international conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science». – Lviv-Slavsko, 2010, p. 225.
4. Невзорова Е.С. Ахмед К. Хасан, Бильчук В.А. Анализ метода двухуровневой маршрутизации на основе принципа целевой координации // Труды Северо-Кавказского филиала Московского Технического университета связи и информатики: Часть I, СКФ МТУСИ «ИНФОКОМ - 2014», 2014, с. 289-293.