

УДК 621.391

А.В. Лемешко, К.М. Арус

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

МОДЕЛЬ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ МНОГОАДРЕСНЫХ И ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ В MPLS-СЕТИ

Предложена модель отказоустойчивой маршрутизации многоадресных и широковещательных потоков в MPLS-сети. Потокковая модель представлена алгебраическими уравнениями и неравенствами, которые характеризуют состояние MPLS-сети, т.е. загруженность ее каналов связи. В рамках предложенной модели заложена возможность реализовать в соответствии с концепцией Fast ReRoute три основных схемы резервирования: защиты канала, узла и дерева маршрутов. На расчетных примерах показана работоспособность предлагаемой модели отказоустойчивой маршрутизации.

Ключевые слова: потокковая модель, отказоустойчивость, маршрутизация, Fast ReRoute, схема резервирования, многоадресный поток.

Введение

При предоставлении услуг IPTV, дистанционного обучения, репликации баз данных, веб-услуг, рассылки корпоративной информации в современных телекоммуникационных сетях (ТКС) ключевая роль отводится протоколам многоадресной (multicast) и широковещательной (broadcast) маршрутизации [1]. Известно, что именно от эффективности решения маршрутных задач во многом зависят численные значения ключевых показателей качества обслуживания: скорость передачи, средняя задержка, джиттер, уровень потерь пакетов.

Кроме того, в условиях возможных отказов сетевого оборудования или при перегрузке отдельных каналов связи и маршрутизаторов ТКС на первое место выходят требования относительно повышения отказоустойчивости маршрутных решений. В технологии многопротокольной коммутации по меткам (MultiProtocol Label Switching, MPLS) функции по повышению отказоустойчивости процесса маршрутизации регламентируются в рамках концепции быстрой перемаршрутизации (Fast ReRoute) [2]. Важной особенностью Fast ReRoute является поддержка функций оперативного переключения потоков пакетов на резервный маршрут при отказе основного. При этом резервный путь должен рассчитываться одновременно с основным, реализуя определенную схему резервирования: защита узла, канала или маршрута. В ходе реализации многоадресной или широковещательной отказоустойчивой маршрутизации ключевым требованием также является учет потокового характера мультимедийного трафика, на передачу которого и ориентирован подобный вид маршрутизации. В этой связи в статье предлагается дальнейшее развитие потоковых моделей многоадресной и широковещательной маршрутизации [3, 4] за счет придания ей функций отказоустойчивости [5, 6].

Математическая модель маршрутизации многоадресных и широковещательных потоков

Пусть при разработке модели многоадресной маршрутизации структура ТКС описывается с помощью ориентированного графа $\Gamma = (V, E)$, где $V = \{v_i, i = \overline{1, m}\}$ – множество вершин – узлов (маршрутизаторов) сети, а $(i, j) \in E$ – множество дуг графа, моделирующих каналы связи (КС) ТКС. Для каждого КС, моделируемого дугой $(i, j) \in E$, задана пропускная способность, измеряемая в пакетах в секунду ($1/c$), которая будет обозначаться как $\varphi_{(i,j)}$. С каждым k -м потоком связано ряд параметров: r_k – средняя интенсивность потока на входе в сеть; s_k – узел-отправитель;

$$d_k^* = \{d_k^1, d_k^2, \dots, d_k^{m_k}\} \quad (1)$$

– множество узлов-получателей, где m_k – число получателей пакетов k -го потока.

В ходе решения задачи многоадресной маршрутизации необходимо рассчитать множество булевых переменных

$$x_{(i,j)}^k \in \{0, 1\}, \quad (2)$$

каждая из которых характеризует долю интенсивности k -го потока в КС $(i, j) \in E$; $k \in K$, где K – множество потоков в сети.

На маршрутные переменные (2) накладывается ряд ограничений:

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k \geq 1 \quad \text{при } k \in K, \quad v_i = s_k, \quad (3)$$

а также

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k = 1 \quad \text{при } k \in K; \quad v_j \in d_k^*. \quad (4)$$

Ограничение (3) вводится для узла-отправителя, а его выполнение ориентирует на то, что от этого узла поток, поступающий на обслуживание, будет передан хотя бы одному смежному узлу. Условие (4) нацелено на обеспечение доставки пакетов на каждый узел-получатель, причем поток должен поступать на эти узлы лишь с одного смежного узла. Для каждого транзитного узла $v_j \in V$, в качестве которого может выступать любой узел, кроме отправителя, дополнительно вводятся следующие условия:

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k \geq x_{(j,p)}^k \quad \text{при } k \in K; v_j \notin s_k, \quad (5)$$

выполнение которых делает возможным наличие потока в любом из исходящих от транзитного узла каналах связи $((j,p) \in E)$ лишь в том случае, когда этот поток поступает на этот узел хотя бы через один входящий КС $((i,j) \in E)$.

Если в структуре сети возможно образование контуров (циклов), то при выполнении условий (2) – (5) может и не обеспечиваться связность отдельных каналов при формировании дерева маршрутов [4]. Для предотвращения образования контуров в предлагаемую модель вводятся условия (по числу контуров в сети) вида

$$\sum_{(i,j) \in E_\pi^i} x_{(i,j)}^k < |E_\pi^i|, \quad (6)$$

где E_π^i – множество дуг графа, образующих в соответствии со своей ориентацией i -й контур (π); $|E_\pi^i|$ – мощность множества E_π^i .

Выполнение условия (6) гарантирует, что число задействованных в ходе многоадресной маршрутизации дуг, составляющих тот или иной контур, всегда меньше общего количества дуг в этом контуре, т.е. контур в рассчитываемый маршрут не входит.

С целью недопущения перегрузки каналов связи маршрутизируемыми потоками необходимо выполнить следующие условия:

$$\sum_{k \in K} r_k x_{(i,j)}^k \leq \phi_{(i,j)}, \quad (i,j) \in E. \quad (7)$$

При описании потоковой модели ширококестельной маршрутизации [4] с каждым k -м потоком связано расширенное по сравнению с (1) множество узлов-получателей пакетов

$$d_k^{**} = \{d_k^1, d_k^2, \dots, d_k^{m-1}\}, \quad (8)$$

куда входят все узлы ТКС, кроме s_k .

При этом в ходе решения задачи ширококестельной маршрутизации также необходимо рассчитать множество булевых маршрутных переменных $x_{(i,j)}^k$ (2), на которые накладываются ограничения,

аналогичные (3), (4), (6) и (7), с сохранением ранее вкладываемого физического смысла. При этом стоит учесть, что ввиду того, что условие (4) касается всех узлов сети (кроме узла-отправителя), т.е. $v_j \in d_k^{**}$, то в потоковой модели ширококестельной маршрутизации нет необходимости в дополнительном введении условий (5), т.к. в каждый узел сети (8) «по умолчанию» поступает поток заданной интенсивности r_k (4).

Условия обеспечения отказоустойчивости маршрутных решений

С целью повышения отказоустойчивости многоадресной и ширококестельной маршрутизации, наряду с основным деревом маршрутов с корнем в узле-отправителе (s_k), необходимо определить запасное дерево маршрутов с тем же корнем. С математической точки зрения для определения запасного (резервного) дерева маршрутов необходимо, наряду с неизвестными (2), рассчитать дополнительные переменные \bar{x}_{ij}^k , которые характеризует долю k -го потока, протекающего в канале $(i,j) \in E$ запасного дерева маршрутов. На переменные \bar{x}_{ij}^k также накладываются ограничения, подобные (2) – (7).

Кроме того, в структуру предлагаемой модели для предотвращения пересечения основного и запасного маршрутов с реализацией различных схем резервирования [2] вводится ряд дополнительных условий-ограничений, связывающих маршрутные переменные для расчета основного и резервного деревьев путей [6]. Например, при реализации схемы защиты (i,j) -канала в предлагаемую модель (1) – (8) вводятся условия вида:

$$x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \quad (9)$$

выполнение которых гарантирует использование (i,j) -канала лишь одним деревом маршрутов – либо основным, либо запасным.

При реализации схемы защиты i -го узла модель дополняется следующим условием:

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \quad (10)$$

выполнение которого гарантирует использование i -го узла (т.е. всех инцидентных ему каналов) либо основным, либо запасным деревом маршрутов.

Для обеспечения защиты основного дерева маршрутов в структуру модели необходимо ввести условие-равенство

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \quad (11)$$

что эквивалентно удовлетворению требований отно-

сительно отсутствия в основном и запасном деревьях маршрутов любых общих каналов ТКС.

В ходе расчета маршрутных переменных x_{ij}^k и \bar{x}_{ij}^k при решении задач Fast ReRoute в ТКС целесообразно минимизировать следующую целевую функцию:

$$F = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \bar{c}_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k, \quad (12)$$

где c_{ij}^k и \bar{c}_{ij}^k – метрики каналов, которые используются при расчете основного и запасного деревьев маршрутов соответственно.

В результате минимизации выражения (12) осуществляется расчет переменных x_{ij}^k и \bar{x}_{ij}^k , чему на практике отвечает определение двух типов деревьев маршрутов между парой узлов отправитель-получатель – основного и запасного. Причем параллельно с расчетом маршрутов определялся порядок их использования потоками пользователей. Кроме того, в работе [6] установлена необходимость введения условия

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij}^k x_{ij}^k \leq \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \bar{c}_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k, \quad (13)$$

выполнение которого гарантирует то, что основное дерево маршрутов всегда будет эффективнее (производительнее по скорости, задержке пакетов), т.е. «короче» запасного в рамках выбранных маршрутных метрик c_{ij}^k и \bar{c}_{ij}^k .

При реализации отказоустойчивой маршрутизации многоадресных и ширококвещательных потоков оптимизационная задача (12) с ограничениями (2) – (11) и (13) относится к классу задач смешанного целочисленного нелинейного программирования, что предполагает применение соответствующих методов расчета [7 – 9].

Примеры реализации различных схем резервирования при отказоустойчивой маршрутизации многоадресных потоков

Рассмотрим ряд примеров применения предлагаемой модели (1) – (13) при решении задач отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети, структура которой представлена на рис. 1. Сеть состоит из пяти узлов (Label Switch Router, LSR) и семи каналов связи, в разрывах которых указаны их пропускные способности (1/с). Узел-источник – LSR 1, узлы получатели – LSR 3, LSR 4 и LSR 5. Интенсивность многоадресного потока составляет 70 1/с. Пусть в рамках рассматриваемого примера реализуется многоадресная маршрутизация с минимизацией числа переприемов ($c_{ij}^k = 1$).

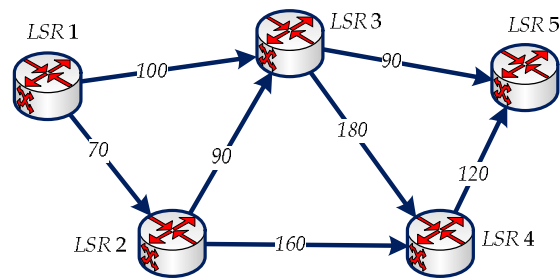
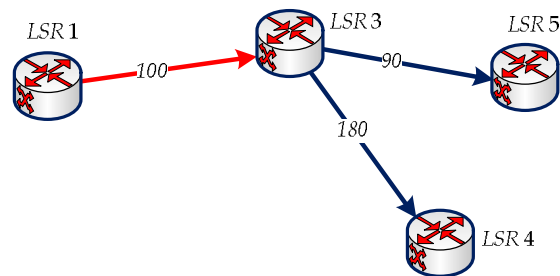
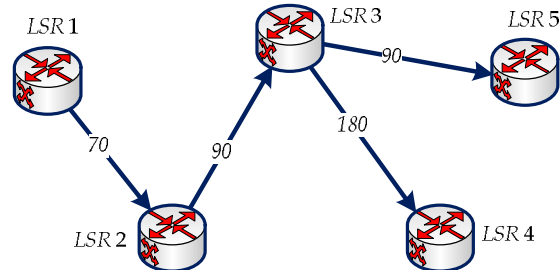


Рис. 1. Пример структуры MPLS-сети

На рис. 2 приведен пример решения задачи отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети с защитой канала (1, 3). Тогда в качестве основного дерева маршрутов выступает решение, представленное на рис. 2, а), причем «длина» данного дерева минимальна и составляет 3 переприема. Резервное дерево маршрутов (рис. 2, б), включая в себя уже 4 переприема, в соответствии с реализуемой схемой защиты не содержит канала (1, 3). И основное, и резервное дерево маршрутов может обслужить многоадресный поток интенсивностью 70 1/с.



а – основное дерево маршрутов



б – запасное дерево маршрутов

Рис. 2. Реализация схемы защиты канала (1, 3)

На рис. 3 приведен пример решения задачи отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети с защитой основного дерева маршрутов.

Тогда на рис. 3, а показано основное дерево маршрутов, а на рис. 3, б – запасное дерево маршрутов, которые не имеют общих каналов связи. В соответствии с условием (13) метрика основного дерева маршрутов (3 переприема) по-прежнему меньше метрики запасного дерева маршрутов (4 переприема).

Выводы

Таким образом, предложенная модель (1) – (13) позволяет для одного и того же многоадресного или ширококвещательного потока рассчитать два типа деревьев маршрутов: основное и запасное (резервное).

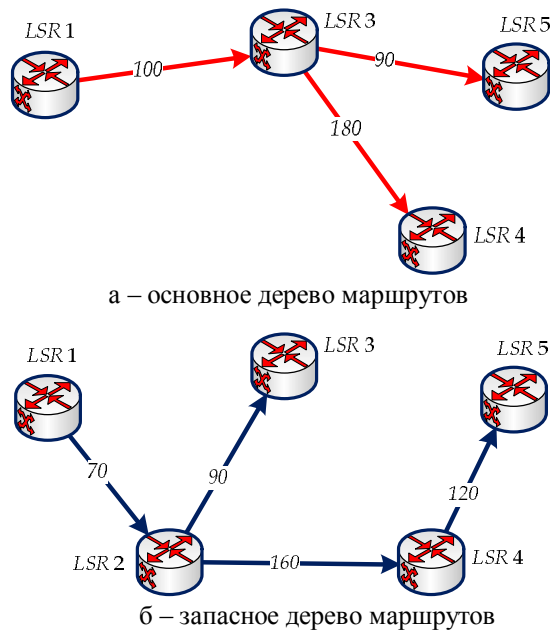


Рис. 3. Реализация схемы защиты дерева маршрутов

В зависимости от применяемых в модели условий (9), (10) или (11) можно реализовать различные схемы резервирования: с защитой канала, узла и дерева маршрутов. В ходе решения задачи MPLS Fast ReRoute минимизируется аддитивная метрика основного и резервного маршрутов. При этом в качестве метрики могут выступать функции от ключевых функциональных характеристик каналов связи: пропускной способности, задержки, уровня потерь пакетов и др. Применение предложенной модели (1) – (13) позволяет расширить область применения отказоустойчивой маршрутизации с одноадресных потоков [6] на многоадресные и (или) широкоадресные потоки пакетов.

Список литературы

1. Pragyansmita P. Survey of Multicast Routing Algorithms and Protocols / P. Pragyansmita, S.V. Raghavan // Proceedings of the Fifteenth International Conference on Computer Communication (ICCC 2002). – 2002. – P. 902-926.

2. Xi K. IP fast reroute for double-link failure recovery / K. Xi, H. Chao // Proceeding GLOBECOM'09 Proceedings of the 28th IEEE conference on Global telecommunications. – 2009. – P. 1035-1042.

3. Лемешко А.В. Потокковая модель многоадресной маршрутизации / А.В. Лемешко, Кинан Моххамед Арус // Материалы 23-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМуКо'2013), Севастополь, 8-13 сентября 2013 г., в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. – Т.1. – С. 523-524.

4. Лемешко А.В. Потокковые модели многоадресной и широкоадресной маршрутизации в телекоммуникационных сетях [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, К.М. Арус // Проблемы телекоммуникаций. – 2013. – № 1 (10). – С. 38-45. – Режим доступа к журналу: http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131_lemeshko_multicast.pdf.

5. Лемешко А.В. Модель отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети / А.В. Лемешко, А.А. Романюк, Е.В. Козлова // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2013. – С. 203-206.

6. Лемешко А.В. Математическая модель отказоустойчивой маршрутизации, представленная алгебраическими уравнениями состояния MPLS-сети / А.В. Лемешко, Е.В. Козлова, А.А. Романюк // Системы обработки информации, 2013. – Вып. 2 (109). – С. 217-219.

7. Tawarmalani M. Global optimization of mixed-integer nonlinear programs: A theoretical and computational study / M. Tawarmalani, N.V. Sahinidis // Mathematical Programming. – 2004. – Vol. 99(3). – P. 563-591.

8. Tawarmalani M. Convexification and global optimization in continuous and mixed-integer nonlinear programming: theory, algorithms, software, and applications, nonconvex optimization and its applications series, 65 / M. Tawarmalani, N.V. Sahinidis. – Boston MA: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 499 p.

9. Kocis G.R. Computation Experience with DICOPT: solving MILNP problems in process systems engineering / G.R. Kocis, I.E. Grossmann // Computers Chem. Eng. – 1989. – Vol. 13. – P. 307-315.

Поступила в редколлегию 4.10.2013