

УДК 621.391

А.В. Лемешко¹, Е.В. Козлова², А.А. Романюк²¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники²Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ, ПРЕДСТАВЛЕННАЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЯМИ СОСТОЯНИЯ MPLS-СЕТИ

Предлагается потоковая модель отказоустойчивой маршрутизации, представленная алгебраическим уравнениями состояния в MPLS-сети. Модель позволяет для одного потока вычислить два вида пути: основной и резервный. В ходе решения задачи отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети минимизируется классическая метрика основного и резервного пути. В структуру потоковой модели введены нелинейные ограничения для обеспечения реализации различных схем резервирования: защиты канала, узла и пути.

Ключевые слова: математическая модель, отказоустойчивая маршрутизация, Fast ReRoute, защита узла, защита канала, защита маршрута.

Введение

Задачи маршрутизации всегда выполняли ключевую функцию в обеспечении качества обслуживания в современных телекоммуникационных системах, функционирующих преимущественно на основе технологий IP и MPLS (MultiProtocol Label Switching) [1, 2]. Важно отметить, что основным источником ухудшения качества обслуживания является возникающая в сети перегрузка. К сожалению большинство маршрутизирующих протоколов обеспечивают перерасчет маршрутов с периодом в десятки секунд, не обеспечивая тем самым оперативное реагирование на перегрузку в сети. Поэтому для повышения оперативности реагирования на возможные отказы в обслуживании пакетов, вызванных перегрузкой каналов и очередей маршрутизаторов, все чаще применяются средства отказоустойчивой маршрутизации (Fast ReRoute) [3, 4]. При этом важно, чтобы маршрутный протокол удовлетворял ряду важных требований: обеспечивал реализацию различных схем резервирования ресурсов и элементов сети: защиты канала, узла и пути; был адаптирован под одно/многопутевую стратегию маршрутизации, а также наряду с расчетом самих маршрутов определял порядок распределения по ним сетевого трафика.

В этой связи предлагается подход к решению задачи отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети путем разработки потоковой модели, которая бы удовлетворяла перечисленным требованиям.

Описание модели отказоустойчивой маршрутизации

Пусть структура MPLS-сети представлена в виде графа $G = (V, E)$, где V – это множество узлов, E – множество каналов сети. Для каждой дуги $(i, j) \in E$ определим ее пропускную способность φ_{ij} .

Каждому потоку трафика из множества K сопоставлен ряд параметров: d_k , s_k , t_k – интенсивность k -го трафика, узел-источник и узел-получатель соответственно.

Пусть управляющей переменной служит величина x_{ij}^k , которая характеризует долю k -го трафика, протекающего в канале $(i, j) \in E$.

В рамках модели имеют место условия сохранения потока в узлах и в сети в целом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = 0; \quad k \in K, \quad i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = 1; \quad k \in K, \quad i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = -1; \quad k \in K, \quad i = d_k. \end{array} \right. \quad (1)$$

С целью предотвращения перегрузки каналов связи вводится условие

$$\sum_{k \in K} r^k x_{ij}^k \leq \varphi_{ij}; \quad (i, j) \in E. \quad (2)$$

Для реализации однопутевой стратегии маршрутизации необходимо обеспечить удовлетворение следующей системы ограничений:

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad (3)$$

а при использовании многопутевой маршрутизации:

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

Для определения запасного (резервного) маршрута необходимо рассчитать переменные \bar{x}_{ij}^k , которые характеризует долю k -го трафика, протекающего в канале $(i, j) \in E$ запасного маршрута. На переменные \bar{x}_{ij}^k также накладываются ограничения, подобные (1) – (4). Для предотвращения пересечения основного и запасного маршрутов с реализаци-

ей различных схем резервирования необходимо выполнить ряд ключевых дополнительных условий.

При реализации схемы защиты (i, j) -канала в предлагаемую модель необходимо ввести условия вида:

$$x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \quad (5)$$

выполнение которых гарантирует использование (i, j) -канала лишь одним маршрутом – либо основным, либо запасным. При реализации схемы защиты i -го узла модель стоит дополнить таким условием:

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \quad (6)$$

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

Для обеспечения защиты пути (путей) в структуре модели необходимо ввести условия-равенства

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \quad (7)$$

что эквивалентно удовлетворению требований относительно отсутствия в основном и запасном маршрутах общих узлов и каналов (кроме узла-отправителя и узла-получателя).

Для расчета маршрутных переменных x_{ij}^k и \bar{x}_{ij}^k при решении задач Fast ReRoute в MPLS-сети минимизировалась следующая целевая функция:

$$F = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \bar{c}_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k, \quad (8)$$

где c_{ij}^k и \bar{c}_{ij}^k – метрики маршрутизации для основного и запасного маршрутов соответственно.

Первое слагаемое в функции (8) численно характеризует условную стоимость использования основного маршрута, а второе – запасного маршрута. В случае если все метрики c_{ij}^k и \bar{c}_{ij}^k равнялись единице, то оптимальным считался путь с минимальным числом переприемов. Если осуществлялся переход к метрике протокола IGRP (Interior Gateway Routing Protocol), т.е. $c_{i,j} = 10^7 / \varphi_{i,j}$, то «кратчайшим» выбирался путь с максимальной пропускной способностью, что актуально для гетерогенных сетей.

В результате минимизации выражения (8) осуществлялся расчет переменных x_{ij}^k и \bar{x}_{ij}^k , чему на практике отвечало определение двух типов маршрутов между парой узлов отправитель-получатель – основного и запасного. Причем параллельно с расчетом маршрутов определялся порядок их использования трафиками пользователей. Кроме того, в ходе исследования модели (1)-(8) установлена необходимость ее дополнения условием

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij}^k x_{ij}^k \leq \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \bar{c}_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k, \quad (9)$$

выполнение которого гарантирует то, что основной путь (мультипуть) всегда будет эффективнее, т.е. производительнее или «короче» запасного в зависимости от выбора метрик c_{ij}^k и \bar{c}_{ij}^k .

По определению решения, связанные с резервированием сетевых ресурсов, плохо масштабируемы и могут вызывать снижение эффективности управления трафиком, что является определенной «платой» за повышение отказоустойчивости.

Для некоторого повышения масштабируемости конечных решений при расчете переменных \bar{x}_{ij}^k от выполнения аналога условий (2) можно отказаться, что приведет к тому, что для трафика, протекающего по основному маршруту, будет гарантирована необходимая пропускная способность в каналах связи, а запасной маршрут будет лишь допустимым, т.е. без каких либо гарантий по скорости передачи пакетов. Кроме того, для повышения масштабируемости решений целесообразно при расчете основного маршрута использовать условие (4), направленное на реализацию многопутевой маршрутизации, а при расчете запасного маршрута использовать аналог условия (3), связанного с однопутевой маршрутизацией.

При реализации однопутевой отказоустойчивой маршрутизации оптимизационная задача (8) с ограничениями (1), (2), (4)-(7), (9) относится к классу задач смешанного целочисленного нелинейного программирования. При многопутевой отказоустойчивой маршрутизации, когда справедливы ограничения (1)-(3), (5)-(7), (9) это уже задача нелинейной оптимизации, что предполагает применение соответствующих методов решения.

Примеры использования предложенной модели отказоустойчивой маршрутизации

Рассмотрим ряд примеров применения предлагаемой модели (1)-(9) при решении задач отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети, структура которой представлена на рис. 1. Сеть состоит из пяти узлов (Label Switch Router, LSR) и шести каналов, в разрывах которых указаны их пропускные способности (1/с). Узел-источник – LSR 1, узел получатель – LSR 5. Интенсивность потока составляет 50 1/с. Пусть в рамках примера реализуется однопутевая маршрутизация с минимизацией числа переприемов ($c_{ij}^k = 1$).

На рис. 2 а) приведен пример решения задачи отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети с защитой канала (3,5). Тогда в качестве основного маршрута LSP (Label Switched Path) будет рассчитан путь LSR1->LSR3->LSR5 (2 переприема), а как запасной – путь LSR1->LSR3->LSR4->LSR5 (3 переприема). Таким образом, резервный маршрут не содержит канал (3,5).

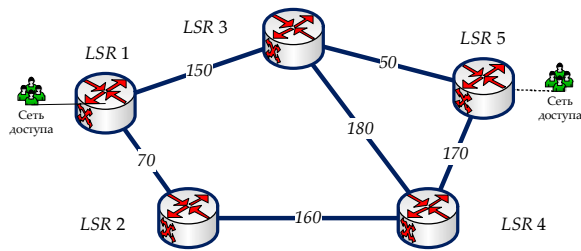
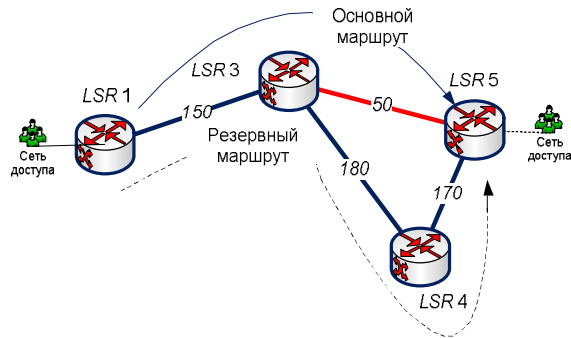
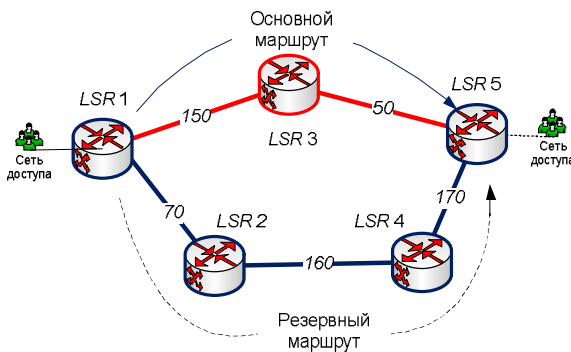


Рис. 1. Пример структуры MPLS-сети



а – схема защиты канала



б – схема защиты пути

Рис. 2. Примеры результатов решения задачи отказоустойчивой маршрутизации с различными схемами резервирования

На рис. 2 б) приведен пример решения задачи отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети с защитой пути. Тогда в качестве основного LSP будет рассчитан путь

LSR1->LSR3->LSR5 (2 переприема),

а как запасной – путь

LSR1->LSR2->LSR4->LSR5 (3 переприема).

Основной и резервный пути не пересекаются. Этот

же пример (рис. 2 б) демонстрирует работу модели с реализацией схемы защиты узла (LSR 3).

Таким образом, предложенная модель позволяет для одного и того же потока рассчитать два типа путей: основной и запасной (резервный). В зависимости от параметров модели можно реализовать различные схемы резервирования: с защитой канала, узла и пути. В ходе решения задачи MPLS Fast ReRoute минимизируется классическая метрика основного и резервного маршрутов.

Выводы

Таким образом, предложенная потоковая модель (1)-(9) позволяет для одного и того же потока рассчитать два типа путей: основной и запасной (резервный). В зависимости от параметров модели можно реализовать различные схемы резервирования: с защитой канала, узла и пути. В ходе решения задачи MPLS Fast ReRoute минимизируется классическая метрика основного и резервного маршрутов.

Модель ориентирована на реализацию как однопутевой, так и многопутевой стратегии маршрутизации. Применение предложенной модели позволит повысить отказоустойчивость управления трафиком в условиях возможной перегрузки элементов (узла, канала, маршрута) MPLS-сети за счет оперативного переключения трафика с отказавшего маршрута на предварительно рассчитанный запасной (резервный) резервный маршрут.

Список литературы

1. Вегшина Ш. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. / Ш. Вегшина. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
2. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка / Х. Остерлох. – СПб.: BHV. 2002. – 512 с.
3. Alvarez S. QoS for IP/MPLS Networks / S. Alvarez. – Cisco Press, 2006. – 336 p.
4. Xi K., Chao H. IP fast reroute for double-link failure recovery / Xi K., Chao H. // Proceeding GLOBECOM'09 Proceedings of the 28th IEEE conference on Global telecommunications. – 2009. – P. 1035-1042.

Поступила в редколлегию 5.02.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Ю. Евсеева, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІДМОВСТІЙКОСТІ МАРШРУТИЗАЦІЇ, ЩО ПРЕДСТАВЛЕНА АЛГЕБРАІЧНИМИ РІВНЯННЯМИ СТАНУ MPLS-МЕРЕЖІ

О.В. Лемешко, О.В. Козлова, А.О. Романюк

Пропонується потокова модель відмовостійкої маршрутизації, що представлена алгебраїчними рівняннями стану в MPLS-мережі. Модель дозволяє для одного потоку обчислити два види шляхів: основний і резервний. У результаті розв'язання задачі відмовостійкої маршрутизації в MPLS-мережі мінімізується класична метрика основного і резервного шляху. У структуру потокової моделі введені нелінійні обмеження для забезпечення реалізації різних схем резервування: захисту каналу, вузла і маршруту.

Ключові слова: математична модель, відмовостійка маршрутизація, Fast ReRoute, захист вузла, захист каналу, захист маршруту.

**A MATHEMATICAL MODEL OF FAULT-TOLERANT ROUTING,
PRESENTED ALGEBRAIC EQUATIONS OF MPLS-NETWORK STATE**

O.V. Lemeshko, H.V. Kozlova, A.O. Romanyuk

Design of flow-based model for MPLS Fast ReRoute is proposed in the paper. The model allows for the same flow calculate two types of paths: primary and backup. Depending on the parameters of the model it is possible to implement different schemes of reservation: link, node or path protection. In the course of solving the problem of MPLS Fast Reroute the classical metric of primary and backup paths is minimized. The nonlinear restrictions, which are responsible for prevention of node, link or path intersection of primary and backup routes is introduced in the structure of the model.

Keywords: *mathematical model, fault-tolerant routing, Fast ReRoute, node protection, channel protection, path protection.*