

**ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ
МНОГОАДРЕСНОЙ И ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ
В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ**

© 2013 г. А.В. ЛЕМЕШКО, К.М. АРУС

Харьковский национальный университет радиозлектроники, Украина

Введение

Ключевая роль при предоставлении услуг IPTV, дистанционного обучения, репликации баз данных, веб-услуг, рассылки корпоративной информации в современных телекоммуникационных сетях (ТКС) отводится многоадресной (multicast) маршрутизации [1]. Известно, то от эффективности маршрутизации во многом зависят ключевые показатели качества обслуживания: скорость передачи, средняя задержка, джиттер, уровень потерь пакетов. Кроме того, в условиях возможных отказов сетевого оборудования, вызванного невысокой эксплуатационной надежностью или перегрузкой отдельных каналов связи и узлов ТКС, на первое место выходят требования относительно повышения отказоустойчивости маршрутных решений. Это связано, например, с технологической реализацией идей, заложенных в концепцию 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 защиты – защита узла, канала, маршрута. В ходе реализации многоадресной отказоустойчивой маршрутизации ключевым требованием также является учет потокового характера мультимедийного трафика, на передачу которого и ориентирован подобный вид маршрутизации. В этой связи в докладе предлагается дальнейшее развитие потоковой модели многоадресной маршрутизации [3, 4] за счет придания ей функций отказоустойчивости [5, 6].

Потоковая модель многоадресной маршрутизации

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/с), 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:

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

а также

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

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 на структуре сети возможно образование контуров (циклов), то при выполнении условий (2)-(5) не будет обеспечиваться связность отдельных каналов в маршрут. 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 той 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:

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

Условия обеспечения отказоустойчивости маршрутных решений

Для определения запасного (резервного) маршрута 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 маршрута. 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 вводится ряд дополнительных условий-ограничений, связывающих маршрутные переменные для расчета основного и резервного путей.

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

$$x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \quad (8)$$

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

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

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \quad (9)$$

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

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

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

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 Re-Route в ТКС минимизировалась следующая целевая функция:

$$F = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \bar{c}_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k, \quad (11)$$

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

В результате минимизации выражения (11) осуществляется 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 потоками пользователей. Кроме того, в ходе исследования модели (1)-(11) установлена необходимость ее дополнения условием

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

выполнение которого гарантирует то, что основной путь (мультипуть) 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 многоадресной отказоустойчивой маршрутизации оптимизационная задача (11) с ограничениями (2)-(10) и (12) относится к классу задач смешанного целочисленного нелинейного программирования, что предполагает применение соответствующих методов расчета [7-9].

Заключение

Таким образом, предложена потоковая модель многоадресной маршрутизации (1)-(7) в телекоммуникационной сети. Модель представлена системой линейных алгебраических неравенств и уравнений состояния сети. С помощью модели можно обеспечить расчет путей для множества потоков при многоадресной маршрутизации. Причем в зависимости от выбранной метрики обеспечивается расчет множества путей с максимальной пропускной способностью или минимальным числом переприемов. Модель включает в себя условия предотвращения возможной перегрузки каналов связи, что важно при обслуживании одновременно множества многоадресных потоков. Модель может использоваться как непосредственно при решении маршрутных задач, так и для решения более сложных (комплексных) задач по обеспечению качества обслуживания или проектированию ТКС.

Предлагаемая модель многоадресной маршрутизации дополнена условиями повышения отказоустойчивости маршрутных решений за счет введения дополнительных ограничений на маршрутные переменные, которые связаны с реализацией схем защиты узла (9), канала (8) и маршрута (10). В целом модель соответствует требованиям концепции быстрой перемаршрутизации Fast ReRoute.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pragyansmita P., Raghavan S.V.* Survey of Multicast Routing Algorithms and Protocols // Proceedings of the Fifteenth International Conference on Computer Communication (ICCC 2002). – 2002, p. 902-926.
2. *Xi K., Chao H.* IP fast reroute for double-link failure recovery // Proceeding GLOBECOM'09 Proceedings of the 28th IEEE conference on Global telecommunications. – 2009, p. 1035-1042.
3. *Лемешко А.В., Кинан Моххамед Арус.* Потоковая модель многоадресной маршрутизации // Материалы 23-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'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 широковещательной маршрутизации в телекоммуникационных сетях [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, К.М. Арус // Проблемы телекомунікацій. – 2013, № 1 (10), с. 38 - 45. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131_lemeshko_multicast.pdf
5. *Лемешко А.В., Романюк А.А., Козлова Е.В.* Модель отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети // 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., Козлова Е.В., Романюк А.А.* Математическая модель отказоустойчивой маршрутизации, представленная алгебраическими уравнениями состояния MPLS-сети // Системи обробки інформації. Вып. 2 (109), 2013, с. 217-219.
7. *Tawarmalani M., Sahinidis N.V.* Global optimization of mixed-integer nonlinear programs: A theoretical and computational study // Mathematical Programming. – 2004, vol. 99(3), p. 563-591.
8. *Tawarmalani M., Sahinidis N.V.* Convexification and global optimization in continuous and mixed-integer nonlinear programming: theory, algorithms, software, and applications, nonconvex optimization and its applications series, 65. – Boston MA: Kluwer Academic Publishers, 2002, 499 p.
9. *Kocis G.R., Grossmann I.E.* Computation Experience with DICOPT: solving MILNP problems in process systems engineering // Computers Chem. Eng. – 1989, vol. 13, p. 307-315.