

МОДЕЛЬ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СЕТЕВЫХ РЕСУРСОВ

© 2014 г. А.В. ЛЕМЕШКО, К.М. АРУС

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Введение

Важное место в общем комплексе мероприятий по обеспечению заданного качества обслуживания (Quality of Service QoS) в современных мультисервисных телекоммуникационных сетях (ТКС) по праву отводится средствам (моделям, методам и протоколам) маршрутизации. Именно от эффективности решения маршрутных задач во многом зависят ключевые показатели межконцевого (end-to-end) QoS, такие как средняя задержка, джиттер, вероятность потерь пакетов и производительность ТКС в целом. Отличительной особенностью применяемых на практике протоколов маршрутизации [1] является то, что период (таймер) перерасчета маршрутных таблиц составляет, в общем случае, десятки секунд (60 с – для протокола RIP, 90 с – для протокола IGRP). Выбор численного значения данного таймера продиктован, прежде всего, поиском компромисса между максимизацией адаптивности маршрутных решений и минимизацией объема циркулирующей служебной информации о состоянии ТКС.

Однако, как показывает практика, нередко вдоль выбранного маршрута могут возникать отказы в обслуживании, вызванные перегрузкой или недостаточной эксплуатационной надежностью сетевого оборудования. К сожалению, время реакции на эти отказы как раз и определяется значением таймера перерасчета маршрутных таблиц. На уровне ядра сети, где циркулируют потоки на гигабитных, а то и терабитных скоростях, задержка в пересчете отказавшего маршрута в десятки секунд может вызвать достаточные большие потери в объемах передаваемых данных, а значит приведет к существенному снижению QoS. В этой связи, на первое место по своей актуальности выходят требования относительно повышения отказоустойчивости маршрутных решений. На практике первые шаги в этой области связаны с технологической реализацией идей, заложенных в концепцию быстрой перемаршрутизации (Fast ReRoute) [2]. В рамках данной концепции заложена возможность оперативного переключения потоков трафика на резервный маршрут при отказе основного. Ввиду того, что резервный путь рассчитывается одновременно с основным, реализуя определенную схему защиты – защита узла, канала, маршрута, время на переключение минимально, и определяется в основном скоростью обнаружения вероятных отказов.

В данной работе развивается подход, предложенный в статьях [3, 4] и ориентированный на решение проблем, связанных с предотвращением перегрузки каналов связи ТКС при реализации различных схем резервирования сетевых ресурсов.

Математическая модель потоковой маршрутизации

Пусть при разработке математической модели потоковой 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 – узел получатель. В ходе решения задачи маршрутизации необходимо рассчитать множество переменных $x_{i,j}^k$, каждая из которых характеризует долю интенсивности k -го потока в КС $(i,j) \in E$; $k \in K$, где K – множество потоков в сети.

При однопутевой маршрутизации имеют место условия

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

а при необходимости реализации многопутевых решений условия (1) заменяются на

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

Кроме того, с целью недопущения потерь пакетов в узлах и сети в целом вводятся условия сохранения потока

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 0; & k \in K, i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 1; & k \in K, i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = -1; & k \in K, i = d_k. \end{cases} \quad (3)$$

Условия обеспечения отказоустойчивости маршрутных решений

Для расчета резервного пути необходимо, наряду с неизвестными переменными (2), рассчитать дополнительные управляющие переменные $\bar{x}_{i,j}^k$, которые характеризует долю k -го потока, протекающего в канале $(i,j) \in E$ резервного маршрута. На переменные $\bar{x}_{i,j}^k$ также накладываются ограничения, подобные (1)-(3). Кроме того, в структуру предлагаемой модели для предотвращения пересечения основного и резервного маршрутов при реализации различных схем резервирования вводится ряд дополнительных условий-ограничений:

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

$$x_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k = 0, \quad (4)$$

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

- при реализации схемы защиты i -го узла модель дополняется условием

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k = 0, \quad (5)$$

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

- для обеспечения защиты пути (путей) в модель вводится условие:

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

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

Условия предотвращения перегрузки каналов связи телекоммуникационной сети

Немаловажное место в структуре математической модели потоковой маршрутизации занимают условия предотвращения перегрузки каналов связи. Содержание этих условий состоит в том, чтобы суммарная интенсивность потоков, протекающих по определенному КС, не превосходила его пропускную способность. В работах [3, 4] расчет множества основных маршрутов осуществлялся в соответствии с условиями

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

а для потоков, протекающих по резервным маршрутам подобные условия (7) не вводились. Для учета потоков резервных маршрутов условия (7) необходимо модифицировать, введя в левую часть неравенства переменные $\bar{x}_{i,j}^k$. В случае реализации отказоустойчивой маршрутизации в рамках модели (1)-(6) важно учесть, что в один и тот же момент времени могут отказать лишь некоторые элементы (узлы, каналы) сети, т.е. в одном и том же КС могут протекать потоки основных и резервных маршрутов. Поэтому в обновленной версии условий (7) суммарная интенсивность потоков, протекающих по выбранному КС, будет рассчитываться для «худшего случая», т.е. во внимание будет приниматься большая из интенсивностей k -го потока, относящихся к основному или резервному маршруту. Тогда для варианта однопутевой маршрутизации, когда искомые маршрутные переменные носят булевый характер (1), условия предотвращения перегрузки будут иметь вид

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} r^k \left(\frac{x_{i,j}^k + \bar{x}_{i,j}^k}{x_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k + 1} \right) \leq \varphi_{ij}, \quad (i,j) \in E, \quad (8)$$

а для случая организации многопутевой маршрутизации условия (8) модифицируются в неравенство

$$\frac{1}{2} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} r^k \left((x_{i,j}^k + \bar{x}_{i,j}^k) + \sqrt{(x_{i,j}^k - \bar{x}_{i,j}^k)^2} \right) \leq \varphi_{i,j}, \quad (i,j) \in E. \quad (9)$$

Критерий оптимальности решений по повышению отказоустойчивости маршрутных решений в ТКС

Для расчета маршрутных переменных $x_{i,j}^k$ и $\bar{x}_{i,j}^k$ при решении задач отказоустойчивой маршрутизации в ТКС необходимо минимизировать следующую целевую функцию:

$$F = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{i,j}^k x_{i,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \bar{c}_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k, \quad (10)$$

где $c_{i,j}^k$ и $\bar{c}_{i,j}^k$ – маршрутные метрики каналов для основного и запасного маршрутов соответственно. Функция (10) численно характеризует суммарные затраты на формирование и использование основного и резервного маршрутов между парой узлов отправитель-получатель.

Параллельно с расчетом маршрутов определялся порядок их использования потоками пользователей. Как отмечается в работах [3, 4] модель (1)-(10) необходимо дополнить условием

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

выполнение которого гарантирует то, что основной путь (мультипуть) всегда будет эффективнее (производительнее по скорости, задержке пакетов) резервного в рамках выбранных маршрутных метрик $c_{i,j}^k$ и $\bar{c}_{i,j}^k$.

Задача расчета маршрутных переменных $x_{i,j}^k$ и $\bar{x}_{i,j}^k$ при наличии ограничений (1), (3)-(6), (8), (11) с целевой функцией (10) относится к классу задач смешанного целочисленного нелинейного программирования. А при реализации многопутевой отказоустойчивой маршрутизации, т.е. при учете условий (2) и (9) вместо (1) и (8) – это задача нелинейного программирования.

Заключение

Предлагается математическая модель отказоустойчивой маршрутизации для различных схем резервирования сетевых ресурсов (1)-(11). Модель представлена линейными (1)-(3), (11) и нелинейными (4)-(6), (8), (9) условиями-ограничениями, которые совместно с целевой функцией (10) позволили сформулировать оптимизационную задачу по расчету искомым маршрутных переменных. В рамках модели заложена возможность реализации различных схем резервирования: узла (5), канала (4) и маршрута (6). Новизна модели состоит в модификации условий предотвращения перегрузки каналов связи, по которым, в общем случае, одновременно могут протекать потоки как основных, так и резервных маршрутов. Использование условий (8) и (9) в ходе реализации одно- и многопутевой маршрутизации позволит предотвратить перегрузку каналов связи даже в случае, если лишь некоторые потоки переключатся с основным путей на резервные. Модель охватывает случай одноадресной (unicast) маршрутизации, но введенные условия (8) и (9) справедливы также и при организации многоадресной (multicast) или широковещательной (broadcast) маршрутизации, осуществляемой, например, в рамках модели, описанной в работе [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hussain I. Fault-Tolerant IP and MPLS Networks, Cisco Press, - 2004, 336 p.
2. Urrea A., Calle E., Marzo J.L. Partial Disjoint Path for Multi-layer Protection in GMPLS Networks // Proceedings.5th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks, 2005. (DRCN 2005), p. 165-170.
3. 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.
4. Lemeshko O., Romanyuk A., Kozlova H. Design schemes for MPLS Fast ReRoute // XIIth International Conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», Polyana-Svalyava-(Zakarpattya), UKRAINE 19-23 February 2013: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013, p. 202-203.
5. Лемешко А.В., Арус К.М. Повышение отказоустойчивости решений задач многоадресной и широковещательной маршрутизации в телекоммуникационных сетях // Труды международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC - 2013), часть 5, 2 – 6 декабря 2013 г. – Москва, 2003, с. 91-94.