

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ПО ПУТЯМ С УЗЛОВЫМ ПЕРЕСЕЧЕНИЕМ

© 2015 г. А.С. ЕРЕМЕНКО, Н. ТАРИКИ

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
e-mail: alexere@ukr.net, nadotariki@gmail.com

Введение

Протоколы маршрутизации на сегодняшний день занимают важное место при внедрении инфокоммуникационных сервисов и совершенствовании средств обеспечения качества обслуживания (Quality of Service, QoS) пользователей. В свою очередь выбор путей в ходе маршрутизации пакетов между парой узлов отправитель-получатель является определяющим фактором, влияющим на числовые значения межконцевых показателей качества обслуживания (средней задержки, джиттера, вероятности потерь пакетов) и производительности сети в целом [1, 2]. Практически все современные маршрутные протоколы усовершенствовали свою функциональность поддержкой многопутевой маршрутизации [1, 3], которая посредством балансировки нагрузки одновременно по множеству путей способствует улучшению показателей QoS.

С точки зрения применения многопутевой маршрутизации важное место занимает также повышение отказоустойчивости и безопасности в телекоммуникационной сети (ТКС) с использованием маршрутизации по множеству непересекающихся путей [4, 5], в которых общими являются только узлы отправитель и получатель пакетов. Однако реализация многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям негативно отражается на производительности ТКС и уровне качества обслуживания в сети в целом. Поиск компромисса при обеспечении отказоустойчивости и безопасности, с одной стороны, и качества обслуживания, с другой, привел к тому, что в некоторых важных случаях требования относительно пересечения используемых путей можно снизить, и использовать пути, которые допускают пересечение, например, только по узлам ТКС. Это актуально в условиях, когда местом отказов и/или компрометации являются именно каналы связи с учетом высокой эксплуатационной надежности узлов на базе современного коммутационного оборудования.

Данная работа посвящена актуальной научной и практической задаче, связанной с разработкой новых математических моделей многопутевой маршрутизации по путям, пересекающимся по узлам, которые могут быть положены в основу соответствующих маршрутных протоколов для обеспечения заданного уровня качества обслуживания, повышения безопасности передаваемых данных, а также отказоустойчивости и эффективного использования сетевых ресурсов.

Потоковая модель многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям

В работе [5] была предложена потоковая модель многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям с возможностью регулировки числа используемых маршрутов. При разработке потоковой модели многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям за основу была взята модель, предложенная в [1]. При этом к ее достоинствам можно отнести учет особенностей как структуры сети, параметров каналов связи, так и характеристик передаваемого трафика, поддержку мультипоточности, а

также контроль возможной перегрузки элементов сети за счет выполнения условий сохранения потока в узлах сети и условий предотвращения перегрузки каналов связи.

В рамках базовой модели структура сети описывается с помощью взвешенного ориентированного графа $G = (V, E)$, где V – множество узлов (маршрутизаторов), а E – множество дуг (каналов связи). Каждая дуга $(i, j) \in E$ взвешивается параметром $c_{i,j}$, который характеризует пропускную способность моделируемого канала связи. Пусть S_k и D_k – узел-отправитель и узел-получатель k -го потока соответственно, а r_k – интенсивность k -го потока из множества K . Управляющей переменной служит величина $x_{i,j}^k$, которая характеризует долю k -го потока, передающегося по каналу связи $(i, j) \in E$. В соответствии с физикой решаемой задачи многопутевой маршрутизации на переменные $x_{i,j}^k$ накладываются следующие ограничения:

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

В ходе решения маршрутной задачи необходимо обеспечить выполнение условий сохранения потока в каждом из узлов и сети в целом:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 1, & i = S_k \text{ – для узла отправителя;} \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 0, & i \neq S_k, D_k \text{ – для транзитных узлов;} \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = -1, & i = D_k \text{ – для узла получателя.} \end{cases} \quad (2)$$

Также должны выполняться условия предотвращения перегрузки каналов связи, а именно

$$\sum_{k \in K} r_k \cdot x_{i,j}^k \leq c_{i,j}, \quad (i, j) \in E. \quad (3)$$

В ходе решения задачи маршрутизации пусть, для примера, минимизируется целевая функция вида:

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} f_{i,j} \cdot x_{i,j}^k, \quad (4)$$

где $f_{i,j}$ – метрика канала связи между i -м и j -м узлами ТКС.

При многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям необходимо, чтобы выполнялось следующее предположение: в каждый транзитный узел поток должен входить не более чем по одному каналу связи, и соответственно, выходить также не более чем по одному исходящему каналу. В соответствии с этим в обозначениях базовой модели (1)-(4) для всех входных интерфейсов i -го транзитного узла должны выполняться следующие условия:

$$\sum_{j:(j,i) \in E} \sum_{\substack{l:(l,i) \in E, \\ l \neq j}} x_{j,i}^k x_{l,i}^k = 0, \quad (5)$$

а для всех выходных интерфейсов i -го транзитного узла сети должны быть справедливыми такие равенства:

$$\sum_{n:(i,n) \in E} \sum_{\substack{m:(i,m) \in E, \\ m \neq n}} x_{i,n}^k x_{i,m}^k = 0. \quad (6)$$

Ввиду нелинейности условий (5) и (6) оптимизационная задача, связанная с минимизацией выражения (4), относится к классу задач нелинейного программирования.

Для обеспечения регулировки числа используемых непересекающихся путей при реализации многопутевой маршрутизации k -го потока обозначим через M_{UB}^k верхнее пороговое значение (Upper Bound) количества непересекающихся путей, которое определяется степенью вершин, моделирующих узлы отправителя и получателя, т.е. количеством инцидентных этим вершинам дуг (каналов связи):

$$M_{UB}^k = \min(d(S_k), d(D_k)), \quad (7)$$

где $d(S_k)$ и $d(D_k)$ – степени вершин (узлов) отправителя и получателя k -го потока соответственно. Фактически используемое число непересекающихся путей M^k при маршрутизации k -го потока, применяя модель (1)-(4) и условия (5), (6), по аналогии с выражением (7) можно рассчитать таким образом:

$$M^k = \sum_{j:(j,i) \in E} \lceil x_{i,j}^k \rceil \text{ или } M^k = \sum_{n:(n,m) \in E} \lceil x_{n,m}^k \rceil \text{ при } i = S_k, m = D_k, \quad (8)$$

где $\lceil \cdot \rceil$ – операция округления числа к ближайшему большему целому; $\sum_{j:(j,i) \in E} \lceil x_{i,j}^k \rceil$ –

число выходных интерфейсов, по которым k -й поток выходит из узла-отправителя;

$\sum_{n:(n,m) \in E} \lceil x_{n,m}^k \rceil$ – число входных интерфейсов, по которым k -й поток входит в узел-получатель.

Величина M^k может выступать как оцениваемый параметр, так и в качестве регулируемой величины, пределы изменения которой определяются по такому неравенству

$$1 \leq M^k \leq M_{UB}^k. \quad (9)$$

Потоковая модель многопутевой маршрутизации с использованием путей, пересекающихся по узлам

Рассмотрим случай, когда необходимо реализовать многопутевую маршрутизацию пакетов с использованием путей, пересекающихся по узлам. В этой модели необходимо выполнение следующего предположения. Для всех входных и выходных интерфейсов i -го транзитного узла сети должны выполняться следующие условия: каждый входной поток заданной интенсивности должен соответствовать выходному потоку такой же интенсивности:

$$\sum_{m=1}^{N_{in}} \prod_{n=1}^{N_{out}} x_{m,i}^k (x_{m,i}^k - x_{i,n}^k) = 0, \quad (10)$$

где N_{in} – число входных интерфейсов i -го транзитного узла; N_{out} – число выходных интерфейсов i -го транзитного узла. Кроме того, должно выполняться обратное утверждение: каждый выходной поток заданной интенсивности должен соответствовать входному потоку точно такой же интенсивности:

$$\sum_{n=1}^{N_{out}} \prod_{m=1}^{N_{in}} x_{i,n}^k (x_{i,n}^k - x_{m,i}^k) = 0. \quad (11)$$

Выполнение нелинейных ограничений (10) и (11) гарантирует, что потоки поступают в i -й транзитный узел от того же количества смежных узлов, что и передаются

следующим соседним узлам с точно такой же интенсивностью. Таким образом, осуществляется формирование множества пересекающихся путей не только с общей парой узлов отправитель и получатель, а также с использованием общих транзитных узлов. Возможность управлять количеством маршрутов с использованием выражений (7)-(9), как это сделано в [5], может быть применена в случае путей, пересекающихся по узлам, таким же образом.

Заключение

В представленном исследовании было предложено решение актуальной научной и практической задачи, связанной с развитием потоковой модели многопутевой маршрутизации с использованием путей, пересекающихся по узлам ТКС. Предложенная модель является дальнейшим развитием известной модели многопутевой маршрутизации [1] в связи с введением в ее структуру нелинейных ограничений (10) и (11), что позволило получить порядок многопутевой маршрутизации с пересекающимися по узлам путями при решении задачи нелинейного программирования с целевой функцией (4), линейными ограничениями (1)-(3) и нелинейными условиями (10) и (11). Среди преимуществ использования предложенной модели многопутевой маршрутизации по путям с узловым пересечением можно выделить следующее. При обеспечении отказоустойчивости и безопасности, с одной стороны, и качества обслуживания, с другой, в некоторых случаях требования относительно пересечения используемых путей могут быть снижены, и допускается использование путей, пересекающихся только по узлам. Это возможно в тех случаях, когда только каналы связи подвержены отказам и/или компрометации. Кроме того, надежность работы узлов транспортной сети обусловлено использованием современного коммутационного оборудования с высоким коэффициентом готовности. Таким образом, при тех же параметрах безопасности и отказоустойчивости обеспечивается повышение производительности и качества обслуживания в ТКС в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Seok Y., Lee Y., Kim C., Choi Y.* Dynamic Constrained Multipath Routing for MPLS Networks // IEEE International Conference on Computer Communications and Networks. – 2001, №3, p. 348-353.
2. *Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю.* Математические модели телекоммуникационных систем. Часть 1. Математические модели функциональных свойств телекоммуникационных систем [Электронный ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2011, № 2 (4), с. 3-41. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_popovsky_functional.pdf.
3. *Лемешко А.В., Вазенко Т.В.* Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки [Электронный ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2012, № 1 (6), с. 12-29. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf.
4. *Natarajan M.* Graph Theory Algorithms for Mobile Ad Hoc Networks // Informatica – An International Journal of Computing and Informatics. – 2012, vol. 36, p. 185-200.
5. *Еременко А.С.* Потоковая модель многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям в телекоммуникационной сети [Электронный ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2015, № 1 (16), с. 85-93. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_yeremenko_disjoint.pdf.