

УДК 621.391

А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## **АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ОДНОПУТЕВОЙ И МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ МНОГОПОТОКОВОГО ТРАФИКА В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ**

*В данной работе проведен анализ решений задач одно- и многопутевой маршрутизации многопоточного трафика в телекоммуникационных сетях. В результате количественного сравнения решений, полученных для одно- и многопутевой маршрутизации, выработаны рекомендации по области применения и особенностям реализации той или иной стратегии маршрутизации в телекоммуникационной сети в зависимости от ее пропускной способности, числа и интенсивности обслуживаемых потоков.*

**Ключевые слова:** маршрутизация, однопутевая маршрутизация, многопутевая маршрутизация, многопутевая маршрутизация с балансировкой нагрузки, коэффициент загрузки.

### **Введение**

Важным слагаемым современных и перспективных телекоммуникационных технологий транспортного уровня сетей нового поколения (Next Generation Network, NGN) [1, 2] являются средства поддержки качества обслуживания (Quality of Service, QoS). Расширение перечня предоставляемых услуг в рамках NGN-решений, постоянное увеличение числа пользователей и, как следствие, рост сетевого трафика требуют постоянного совершенствования средств поддержки QoS как на технологическом уровне, так и, что немаловажно, на теоретическом уровне.

Архитектурные модели IntServ и DiffServ, составляющие основу решений по обеспечению QoS в IP-сетях как транспортной основы NGN [3], во многом зависят от эффективности решения задач маршрутизации, т.к. в настоящее время особенно востребованы гарантии качества услуг из конца в конец (end-to-end QoS), что требует высокой координации работы множества элементов телекоммуникационной сети (ТКС). В этой связи технологические средства маршрутизации, представленные соответствующими протоколами маршрутизации [4, 5], постоянно совершенствуются и, в отличие от большинства других средств поддержки QoS, обеспечивают динамический перерасчет путей в сети на основе анализа состояния ТКС: ее топологии, загруженности и т.д.

Одним из важных направлений совершенствования протоколов маршрутизации, наряду с расширением перечня поддерживаемых метрик и оптимизацией управляющих таймеров, является реализация многопутевых решений. И в этом направлении на практике уже много сделано – большинство современных протоколов маршрутизации поддерживают функции балансировки нагрузки по путям с одинаковой и, что очень важно, с различной метрикой [4]. Однако дополнительное конфигурирование сетевого оборудования (маршрутизаторов, маршрутизирующих коммутаторов) все еще необходимо проводить в ручном режиме.

Теме многопутевой маршрутизации посвящено достаточно много публикаций отечественных и зарубежных авторов, описывающих процессы маршрутизации как в проводных, так и беспроводных ТКС [6 – 8]. Однако остается открытым вопрос – всегда ли многопутевая маршрутизация является более эффективным решением по сравнению с однопутевой стратегией? Известно, что в ходе многопутевой маршрутизации более эффективно (сбалансированно) используются доступные сетевые ресурсы – пропускные способности каналов связи и буферная емкость маршрутизаторов, что положительно сказывается на численных значениях основных показателей QoS – скорости передачи, средней задержке и уровне потерь пакетов. С другой стороны, реализация на практике однопутевой маршрутизации всегда технологически проще, чем многопутевой. Кроме того, контроль за показателями QoS при реализации многопутевой маршрутизации заметно усложняется, и если не принимать дополнительных мер, может привести к росту джиттера пакетов и т.д.

В этой связи **целью данной статьи** является количественное сравнение решений, полученных для одно- и многопутевой маршрутизации с выработкой рекомендаций по обоснованию области применения и особенностям реализации той или иной стратегии маршрутизации в телекоммуникационной сети в зависимости от ее пропускной способности, числа и интенсивности обслуживаемых потоков.

### **Описание потоковых моделей маршрутизации**

В ходе сравнения одно- и многопутевой маршрутизации, основываясь на результатах работ [9, 10], выберем в качестве базовой потоковую модель балансировки нагрузки, предложенную в работе [11]. Эта модель является компромиссным вариантом по адекватности описания процессов маршрутизации и сложности получения искомых зависимостей.

В рамках выбранной модели структура ТКС описывается с помощью взвешенного ориентированного графа  $G = (V, E)$ , где множество вершин  $V$  моделирует множество узлов сети, а множество дуг  $E$  описывает множество каналов связи сети. Каждую дугу  $(i, j) \in E$  взвесим пропускной способностью канала связи (КС)  $c_{ij}$ . Каждому  $k$ -му трафику из множества  $K$  сопоставим ряд параметров: пусть  $d_k, s_k, t_k$  – интенсивность  $k$ -го трафика, узел-источник и узел-получатель соответственно. Управляющей переменной будет служить величина  $X_{i,j}^k$ , которая характеризует долю интенсивности  $k$ -го трафика, протекающего в канале  $(i, j) \in E$ . С целью недопущения перегрузки сетевых узлов и сети в целом необходимо обеспечить выполнение условий сохранения потока:

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

Кроме этого, важно добиться выполнения условий предотвращения перегрузки каналов связи:

$$\sum_{k \in K} d_k X_{i,j}^k \leq c_{ij} \alpha, \quad (i, j) \in E, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – верхний порог использования пропускной способности КС сети.

В соответствии с физикой решаемой задачи в случае моделирования однопутевой маршрутизации на переменные  $X_{i,j}^k$  накладывались ограничения вида:

$$X_{i,j}^k \in \{0, 1\}. \quad (3)$$

При моделировании многопутевой маршрутизации пакетов одного и того же трафика ограничения на маршрутные переменные приобретали вид:

$$0 \leq X_{i,j}^k \leq 1. \quad (4)$$

В ходе оптимизации процесса маршрутизации использовались два типа критериев [9, 10]. При использовании первого критерия необходимо было минимизировать целевую функцию, представленную линейной формой:

$$\min \sum_{(i,j)} f_{i,j} X_{i,j}, \quad (5)$$

где каждому КС присваивалась метрика, которая используется в протоколе IGRP:

$$f_{ij} = 10^7 / c_{ij}. \quad (6)$$

При использовании второго критерия в ходе решения задачи маршрутизации минимизировался верхний порог использования пропускной способности КС сети [11], т.е.

$$\alpha \rightarrow \min, \quad (7)$$

при  $0 \leq \alpha \leq 1. \quad (8)$

Таким образом, при моделировании процессов однопутевой маршрутизации (ОПМ) использовались выражения (1) – (3), (5) и (6), а параметр  $\alpha$  принимался константой и равнялся единице. Задача однопутевой маршрутизации формулировалась как оптимизационная задача с критерием (5) и ограничениями (1) – (3). При решении задачи однопутевой маршрутизации (рис. 1) все поступающие в сеть потоки передавались по одному, наилучшему с точки пропускной способности, пути (рис. 1), т.к. использовалась метрика (6).

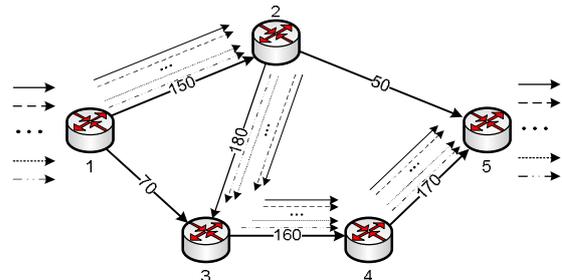


Рис. 1. Пример однопутевой маршрутизации

На рис. 1 и последующих рисунках в разрывах каналов связи указаны их пропускные способности (Мбит/с). Пропускная способность такой сети составляла 210 Мбит/с.

При моделировании многопутевой маршрутизации в ТКС (МПМ1), когда между отправителем и получателем выбираются несколько путей, но решение задачи маршрутизации в рамках одного трафика носило однопутевой характер (рис. 2), использовались выражения (1) – (3), (7) и (8). В качестве критерия оптимальности выступало выражение (7), а ограничения представлены выражениями (1) – (3) и (8).

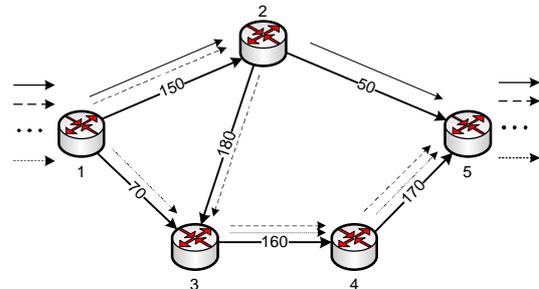


Рис. 2. Пример многопутевой маршрутизации (потоки передаются по разным маршрутам)

При моделировании многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки (МПМ2), когда между отправителем и получателем выбираются несколько путей, и решение задачи маршрутизации в рамках одного трафика тоже носит многопутевой характер (рис. 3), в качестве критерия оптимальности выступало условие (7), а в качестве ограничений – выражения (1), (2), (4) и (8). Описанные постановки задач одно- и многопутевой маршрутизации относились к задачам линейного программирования и решались с помощью хорошо апробированных процедур bintprog и linprog среды Matlab v.7.

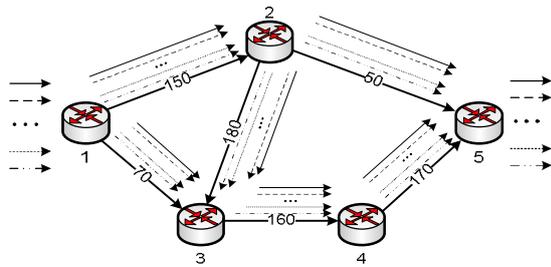


Рис. 3. Пример многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки для одного потока (каждый поток передается сбалансированно по нескольким маршрутам)

**Анализ результатов решения задач однопутевой и многопутевой маршрутизации**

В ходе сравнительного анализа исследованию подлежали перечисленные три варианта маршрутизации, реализованные на множестве сетевых структур с различными значениями пропускной способности. Кроме того, варьировалось число обслуживаемых трафиков и их интенсивность.

В качестве критерия оценки эффективности использования той или иной стратегии маршрутизации выберем коэффициент загрузки каналов передачи (максимальное и среднее значение)  $\sigma_{\text{макс}}$  и  $\sigma_{\text{ср}}$ , рассчитываемые по формулам

$$\sigma_{i \in E} = \max_{k \in K} \frac{\sum X_{i,j}^k}{c_{i,j}}, \quad \sigma_{\text{ср}} = \frac{\sum_{(i,j) \in E} \left( \sum_{k \in K} X_{i,j}^k / c_{i,j} \right)}{n}$$

где  $n$  – число каналов связи в сети;  $(i, j) \in E$ .

Заметим, что от значения данных показателей зависят значения показателей QoS, а именно: среднее время задержки при передаче пакетов, джиттер, вероятность потерь пакетов, средняя длина очереди в сетевых устройствах.

В качестве примера приведены результаты исследования для структуры сети, представленной на рис. 1, для случаев, когда интенсивность одного потока принимала поочередно значения 1 Мбит/с, 3 Мбит/с и 10 Мбит/с. Значение коэффициента максимальной и средней загруженности каналов передачи при решении задачи в рамках каждой из стратегий приведены в табл. 1 – 3.

В рамках полученных результатов выделим три области загруженности сети при решении задачи маршрутизации:

- 1) область низких нагрузок (загруженность сети до до 30% от своей пропускной способности);
- 2) область средних нагрузок (от 30 до 65%);
- 3) область высоких нагрузок (более 65%).

Для каждой из областей оценивалось качество балансировки по введенным показателям.

Таблица 1

Значение коэффициентов загрузки, когда интенсивность одного потока 1 Мбит/с

Количество поступающих в сеть потоков	Интенсивность суммарного входящего потока, Мбит/с	Уровень нагрузки	Средние значения коэффициента загрузки ( $\sigma_{\text{ср}}$ )			Максимальные значения коэффициента загрузки ( $\sigma_{\text{макс}}$ )		
			ОПМ	МПМ1	МПМ2	ОПМ	МПМ1	МПМ2
1	1	Область низких нагрузок	0,0041	0,0041	0,0043	0,0067	0,0067	0,0083
20	20		0,0812	0,0812	0,0869	0,1333	0,1333	0,1657
40	40		0,1624	0,1624	0,1739	0,2667	0,2667	0,3313
60	60		0,2435	0,2435	0,2608	0,4000	0,4000	0,4970
80	80	Область средних нагрузок	0,3247	0,3247	0,3478	0,5333	0,5333	0,6626
100	100		0,4059	0,4059	0,4347	0,6667	0,6667	0,8283
120	120		0,4871	0,4871	0,5217	0,8000	0,8000	0,9940
140	140		0,5683	0,5683	0,6061	0,9333	0,9333	1,0000
160	160	Область высоких нагрузок	-	0,6529	0,6505	-	1,0000	1,0000
180	180		-	0,7487	0,7240	-	1,0000	1,0000
200	200		-	0,8444	0,8152	-	1,0000	1,0000
210	210		-	0,8923	0,8638	-	1,0000	1,0000

Таблица 2

Значение коэффициентов загрузки, когда интенсивность одного потока 3 Мбит/с

Количество поступающих в сеть потоков	Интенсивность суммарного входящего потока, Мбит/с	Уровень нагрузки	Средние значения коэффициента загрузки ( $\sigma_{\text{ср}}$ )			Максимальные значения коэффициента загрузки ( $\sigma_{\text{макс}}$ )		
			ОПМ	МПМ1	МПМ2	ОПМ	МПМ1	МПМ2
1	1	Область низких нагрузок	0,0122	0,0122	0,0130	0,0200	0,0200	0,0248
10	30		0,1218	0,1218	0,1304	0,2000	0,2000	0,2485
20	60		0,2435	0,2435	0,2608	0,4000	0,4000	0,4970
30	90	Область средних нагрузок	0,3653	0,3653	0,3913	0,6000	0,6000	0,7455
40	120		0,4871	0,4871	0,5217	0,8000	0,8000	0,9940
45	135		0,5480	0,5480	0,5850	0,9000	0,9000	1,0000
50	150		0,6089	0,6089	0,6305	1,0000	1,0000	1,0000
55	165	Область высоких нагрузок	-	0,6768	0,6605	-	1,0000	1,0000
60	180		-	0,7487	0,7240	-	1,0000	1,0000
65	195		-	0,8205	0,8122	-	1,0000	1,0000
70	210		-	0,8923	0,8638	-	1,0000	1,0000

Значение коэффициентов загрузки, когда интенсивность одного потока 10 Мбит/с

Количество поступающих в сеть потоков	Интенсивность суммарного входящего потока, Мбит/с	Уровень нагрузки	Средние значения коэффициента загрузки ( $\sigma_{cp}$ )			Максимальные значения коэффициента загрузки ( $\sigma_{max}$ )		
			ОПМ	МПМ1	МПМ2	ОПМ	МПМ1	МПМ2
1	1	Область низких нагрузок	0,0406	0,0406	0,0435	0,0667	0,0667	0,0828
2	20		0,0812	0,0812	0,0869	0,1333	0,1333	0,1657
4	40		0,1624	0,1624	0,1739	0,2667	0,2667	0,3313
6	60		0,2435	0,2435	0,2608	0,4000	0,4000	0,4970
8	80	Область средних нагрузок	0,3247	0,3247	0,3478	0,5333	0,5333	0,6626
10	100		0,4059	0,4059	0,4347	0,6667	0,6667	0,8283
12	120		0,4871	0,4871	0,5217	0,8000	0,8000	0,9940
14	140		0,5683	0,5683	0,6061	0,9333	0,9333	1,0000
16	160	Область высоких нагрузок	-	0,6529	0,6505	-	1,0000	1,0000
18	180		-	0,7487	0,7240	-	1,0000	1,0000
20	200		-	0,8444	0,8152	-	1,0000	1,0000
21	210		-	0,8923	0,8638	-	1,0000	1,0000

**Выводы**

Установлено, что однопутевая маршрутизация справлялась с обслуживанием поступающего на вход сети трафиком лишь в случаях низкой и средней нагрузки. Причем в этих областях именно однопутевая маршрутизация обеспечивала лучшие значения выбранных показателей качества балансировки трафика в сети (в среднем до 10%). Особенно это проявлялось, когда суммарный поступающий в сеть трафик был образован большим числом потоков небольшой интенсивности. Таким образом, учитывая простоту реализации и сокращенные объемы таблиц маршрутизации, для области низких нагрузок рекомендуется применение однопутевой стратегии маршрутизации.

В области высоких нагрузок однопутевая маршрутизация не могла обеспечить обслуживание поступающего в сеть трафика, так как полностью использован ресурс единственного пути между источником и получателем. Поэтому лучше применять многопутевую маршрутизацию, особенно при возрастании доли потоков с большой интенсивностью. Большую эффективность показал вариант многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки (МПМ2), улучшая выбранные показатели в среднем на 1–2 % по сравнению с МПМ1.

Таким образом, в рамках перспективных решений по маршрутизации трафика важно предусмотреть адаптацию к характеристикам обслуживаемых потоков и общему их числу, т.е. реализовывать адаптивную стратегию маршрутизации. А именно, при низких и средних нагрузках (при большом числе потоков низкой интенсивности) – использовать однопутевую маршрутизацию, а при увеличении доли высокоинтенсивных трафиков и в области высокой нагрузки целесообразно использовать многопутевую маршрутизацию с балансировкой нагрузки. Подобная адаптивная стратегия позволит более эффективно использовать доступные сетевые ресурсы в зависимости от характеристик поступающего в сеть трафика, повышая, тем самым, уровень качества обслуживания.

**Список литературы**

1. NGN: принципы построения и организации / под ред. Ю.Н. Чернышова. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 400с.: ил.
2. Y.2001. ITU-T. Recommendation Y.2001: General overview of NGN/ITU-T. – Geneva, 2004. – 18 p.
3. Вегенша Ш. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. / Ш. Вегенша. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 368 с.
4. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка / Х. Остерлох. – СПб.: BHV. – СПб, 2002. – 512 с.
5. Хелеби С. Принципы маршрутизации в Internet / С. Хелеби, Д. Мак-Ферсон. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 402 с.
6. Mohammed I. Gumel. Routing with Load Balancing in Wireless Mesh Networks. Research Article / Mohammed I. Gumel, Nasir Faruk, A.A. Ayeni // International Journal of Current Reseach. – 2011. – Vol.3. – Issue 7. – P. 087-092.
7. Surendra Bhosale. Maximum Flow Based Balanced Routing Protocol for WDM Networks / Surendra Bhosale, Nisha Sarwade // European Journal of Scientific Research. – 2011. – No. 3. – P. 364-375.
8. Wang Y. Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering / Y. Wang, Z. Wang // Proc. of 8th International Conference on Computer Communications and Networks. – Paris, 1999. – P. 582-588.
9. Поповский В.В. Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях / В.В. Поповский, А.В. Лемешко, Л.И. Мельникова, Д.В. Андрушко // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Том.4. – Вып. № 4. – С. 372-382.
10. Лемешко О.В. Результати порівняльного аналізу поточкових моделей маршрутизації в телекомунікаційних мережах / О.В. Лемешко, О.А. Дробот, Д.В. Симоненко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: XV ПС, 2007. – Вип. 1(13). – С. 66-69.
11. Yongho Seok. Dynamic Constrained Multipath Routing for MPLS Networks / Yongho Seok, Youngseok Lee, Changhoon Kim, Yanghee Choi // IEEE International Conference on Computer Communications and Networks. – 2001. – №3. – P.348-353.

Поступила в редколлегию 15.11.2011

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

**АНАЛІЗ РІШЕНЬ ЗАДАЧ ОДНОШЛЯХОВОЇ ТА БАГАТОШЛЯХОВОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ  
ДЛЯ БАГАТОПОТОКОВОГО ТРАФІКУ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ**

О.В. Лемешко, Т.В. Вавенко

*В даній роботі проведено аналіз рішень задач одно- та багатошляхової маршрутизації багатопотокового трафіку у телекомунікаційних мережах. У результаті кількісного порівняння рішень, отриманих для одно- та багатошляхової маршрутизації, вироблені рекомендації по області застосування і особливостям реалізації тієї чи іншої стратегії маршрутизації в телекомунікаційних мережах в залежності від її пропускної здатності, числа та інтенсивності обслуговуваних потоків.*

**Ключові слова:** маршрутизація, одношляхова маршрутизація, багатошляхова маршрутизація, багатошляхова маршрутизація з балансуванням навантаження, коефіцієнт завантаження.

**ANALYSIS OF SOLVING OF THE SINGLEPATH AND MULTIPATH ROUTING IN MULTISTREAM TRAFFIC IN  
TELECOMMUNICATION NETWORKS**

O.V. Lemeshko, T.V. Vavenko

*In this work we analyze the solutions of the single- and multipath routing in multistream traffic in telecommunication networks. As the result of quantitative comparison of solutions, which obtained for single- and multipath routing, it was developed recommendations for the application and features of the implementation of a strategy for routing in telecommunications networks, depending on its capacity, the number and intensity of serviced streams*

**Keywords:** routing, singlepath routing, multipath routing, multipath routing with balancing of loading, load factor.