

УДК 621.391

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОТОКОВОЙ МОДЕЛИ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ



[А.В. ЛЕМЕШКО](#),

[Т.В. ВАВЕНКО](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Проведено аналіз недоліків потокової моделі багатопутової маршрутизації на основі балансування навантаження. Запропоновано ряд рішень, направлених на усунення виявлених недоліків, які стосуються перегляду (вдосконалення) самої моделі та методики її використання при розрахунках.

The analysis of the shortcomings of the flow-based model multipath routing based on load balancing. A number of solutions to address these shortcomings. They relate to the revision (improvement) of the model itself or the method of its use in calculations.

Проведен анализ недостатков потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки. Предложен ряд решений, направленных на устранение отмеченных недостатков, касающихся пересмотра (усовершенствования) самой модели или методики ее использования при расчетах.

Введение

Повышение роли телекоммуникаций в жизни общества в целом и каждого человека в частности выдвигает все новые требования к самим сетевым технологиям, которые должны обеспечить устойчивый доступ к постоянно расширяющемуся перечню инфо-коммуникационных услуг и связанную с этим обработку всевозрастающих объемов пользовательского трафика. Как показал анализ [1, 2], среди множества решений в области построения телекоммуникационных сетей (ТКС) на сегодняшний день наиболее оправдала себя концепция сетей нового поколения (Next Generation Network, NGN), где под NGN понимают телекоммуникационные сети с пакетной коммутацией, основанные на разделении функций предоставления услуг и высокоскоростного транспорта на базе технологий IP/MPLS с поддержкой функций сквозного (end-to-end) качества обслуживания (Quality of Service, QoS).

Известно, что ключевая роль в обеспечении заданных значений таких важных показателей QoS, как средняя задержка, джиттер, уровень потерь пакетов и скорость их передачи [3-5], отводится протоколам маршрутизации. При этом общей тенденцией в развитии данных протоколов является придание им функций поддержки многопутевой стратегии маршрутизации, реализация которой на практике способствует обеспечению более сбалансированной загруженности элементов (маршрутизаторов и каналов связи) ТКС и, как следствие, повышению качества обслуживания. Примером тому является технология Traffic Engineering (TE), реализованная в MPLS-сетях [6, 7].

Однако во многом остается открытым вопрос относительно теоретического обоснования решений, касающихся вариантов реализации многопутевой маршру-

тизации. Отсутствие действенных моделей многопутевой маршрутизации привело к тому, что на практике балансировка нагрузки по путям с разной метрикой (стоимостью) осуществляется в рамках известных протоколов маршрутизации преимущественно вручную, что делает этот процесс очень чувствительным к уровню опыта и квалификации администратора сети. В этой связи актуальной представляется задача, связанная с выбором (разработкой), а также детальным исследованием математических моделей многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки в телекоммуникационных сетях.

I. Выбор и описание базовой модели многопутевой маршрутизации в телекоммуникационных сетях

В результате анализа математических моделей маршрутизации замечено, что существует два их основных типа: графовые и потоковые модели [8-17]. В рамках графовых моделей учитываются, прежде всего, особенности структурного построения моделируемой ТКС, а сама задача маршрутизации сводится к поиску т.н. «кратчайшего» пути на графе – для однопутевой маршрутизации или поиску оптимального мультипути – при многопутевой маршрутизации. В основу современных протоколов маршрутизации [4, 5] положены именно графовые модели, в которых для расчета путей используются алгоритмы Дейкстры и Беллмана-Форда.

В потоковых моделях основное внимание уделяется описанию функциональных свойств моделируемого процесса и, наряду со структурой сети, более полно учитываются параметры каналов связи и передаваемого трафика. Так как современный сетевой трафик является преимущественно мультимедийным и имеет потоковый характер, то использование именно потоковых моделей позволяет получать наиболее эффективные решения задач маршрутизации. В результате проведенного анализа [18-22] замечено, что к настоящему моменту времени известны и активно используются потоковые модели многопутевой маршрутизации, основанные на сетях массового обслуживания, алгебраических, интегрально-дифференциальных и разностных уравнениях стояния ТКС, тензорном представлении и др.

Однако по мнению многих ученых, работающих в области сетевых технологий, компромиссным вариантом при выборе модели многопутевой маршрутизации, сочетающим адекватность описания и приемлемую сложность расчетов, является решение под технологию Traffic Engineering, предложенное в работах [10-12]. В рамках этой модели маршрутизации структура ТКС описывается с помощью графа $G = (V, E)$, где V – множество узлов сети, E – множество каналов связи. Для каждой дуги $(i, j) \in E$ характерна ее пропускная способность c_{ij} . Каждому трафику из множества K сопоставлен ряд параметров: пусть d_k, s_k, t_k – интенсивность k -го трафика, узел-источник и узел-получатель соответственно. Управляющей переменной служит величина x_{ij}^k , которая характеризует долю k -го трафика, протекающего в канале $(i, j) \in E$. В соответствии с физикой решаемой задачи на переменные x_{ij}^k накладываются следующие ограничения:

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

Важно не допустить потери пакетов на сетевых узлах и в сети в целом, для этого необходимо обеспечить выполнение условий сохранения потока:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = 0, & k \in K, i \neq s_k, t_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = 1, & k \in K, i = s_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = -1, & k \in K, i = t_k. \end{cases} \quad (2)$$

Кроме этого, необходимо обеспечить выполнение условий предотвращения перегрузки в каналах сети:

$$\sum_{k \in K} d_k x_{ij}^k \leq c_{ij} \alpha, \quad (i, j) \in E, \quad (3)$$

где α – динамически управляемый порог максимальной загруженности каналов ТКС. На переменную α накладываются следующие ограничения:

$$0 \leq \alpha \leq 1. \quad (4)$$

В ходе решения задачи маршрутизации минимизируется величина α :

$$\alpha \rightarrow \min. \quad (5)$$

В рамках рассмотренной потоковой модели (1)-(5) задача поиска множества оптимальных путей сведена к задаче линейного программирования по минимизации функции (5) при наличии ограничений (1)-(4). Достоинством модели (1)-(5) является соответствие концепции Traffic Engineering при реализации многопутевой маршрутизации, причем коэффициент балансировки (5) с ростом загруженности сети также растет линейно [14, 16], что гарантирует отсутствие колебаний в численных значениях основных показателей качества обслуживания. И, несмотря на то, что данная модель все еще не положена в основу вновь разработанного протокола маршрутизации, ее нередко используют как эталонное решение при усовершенствовании и настройке существующих протоколов [14].

II. Анализ базовой модели многопутевой маршрутизации в телекоммуникационных сетях с полудуплексными или дуплексными каналами связи

Базовая модель (1)-(5) описывает процесс маршрутизации для сетей с симплексными каналами связи, назовем ее БМ-С. Однако, как показал анализ, на сегодняшний день в ТКС широко используют решения, основанные на полудуплексном и дуплексном режимах обмена данными. Поэтому актуальной представляется задача,

связанная с исследованием в рамках базовой модели (1)-(5) процессов многопутевой маршрутизации в ТКС с полудуплексными и дуплексными каналами.

Чтобы учесть полудуплексный или дуплексный режим работы каналов связи в потоковых моделях, как правило, осуществляют следующие преобразования [23]:

- каждый полудуплексный канал моделируется двумя дугами, направленными в противоположные стороны, при этом суммарная пропускная способность этих дуг равна пропускной способности моделируемого канала связи;
- каждый дуплексный канал также моделируется двумя дугами, направленными в противоположные стороны, при этом каждой дуге соответствует своя пропускная способность.

Для модели ТКС (1)-(5) с дуплексными каналами (назовем эту модель БМ-Д) увеличится лишь число неравенств в условиях (3). При полудуплексном режиме те же условия предотвращения перегрузки каналов связи претерпят некоторые изменения:

$$\sum_{k \in K} d_k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} d_k x_{ji}^k \leq c_{ij} \alpha, \quad (i, j) \in E. \quad (6)$$

В результате проведенной замены условий предотвращения перегрузки получена модифицированная базовая модель (1), (2), (4)-(6) для сетей с полудуплексными каналами связи, которую назовем БМ-ПД.

Приведем пример перехода от модели ТКС с симплексными каналами (БМ-С) к модели сети с полудуплексными каналами (БМ-ПД). На рис. 1 а) представлена структура ТКС, а также пропускные способности ее каналов связи, измеряемые в пакетах в секунду (1/с), обозначенные цифрами в разрывах самих каналов. Пусть узел-отправитель пакетов – узел 1, а узел – получатель – узел 5.

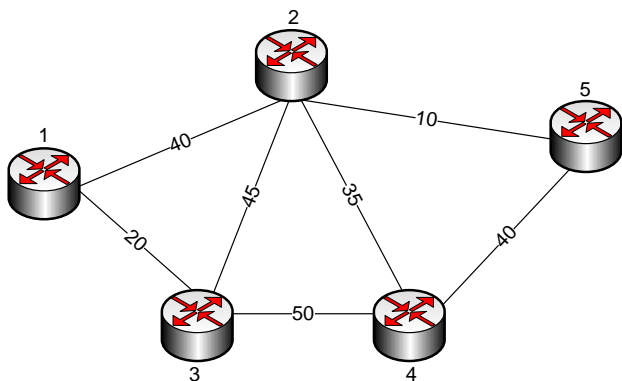


Рис. 1. Структура анализируемой телекоммуникационной сети

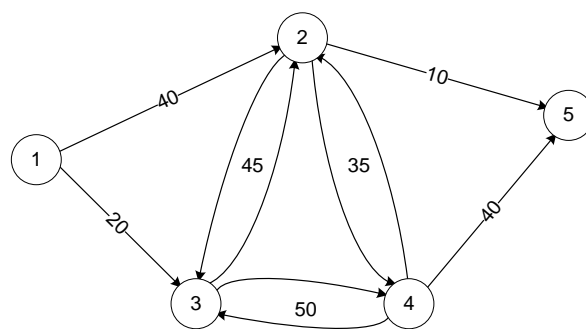


Рис. 2. Графовая модель ТКС с полудуплексными каналами

Представим структуру ТКС (рис. 1) в виде ориентированного графа (рис. 2). При этом, например, дуплексный или полудуплексный канал между узлами 2 и 3, который имел пропускную способность 45 1/с, заменялся двумя дугами, направленными в противоположные стороны, с той же суммарной пропускной способностью с той лишь разницей, что для полудуплексного режима необходимо было выполнить условие (6), а при дуплексном режиме каждый канал имел «свою» фиксированную

пропускную способность. Применим данное преобразование и для каналов между узлами 3 и 4, а также 2 и 4. При передаче пакетов от узла 1 к узлу 5 каналы, инцидентные данным узлам, будут работать только в симплексном режиме, поэтому их преобразования не коснулись.

В ходе определения порядка маршрутизации трафика, передаваемого между узлами 1 и 5, например с интенсивностью 40 1/с, при использовании как модели БМ-Д (рис. 3), так и модели БМ-ПД (рис. 4) в разрывах каналов связи уже указывалась пакетная интенсивность протекающего в них трафика.

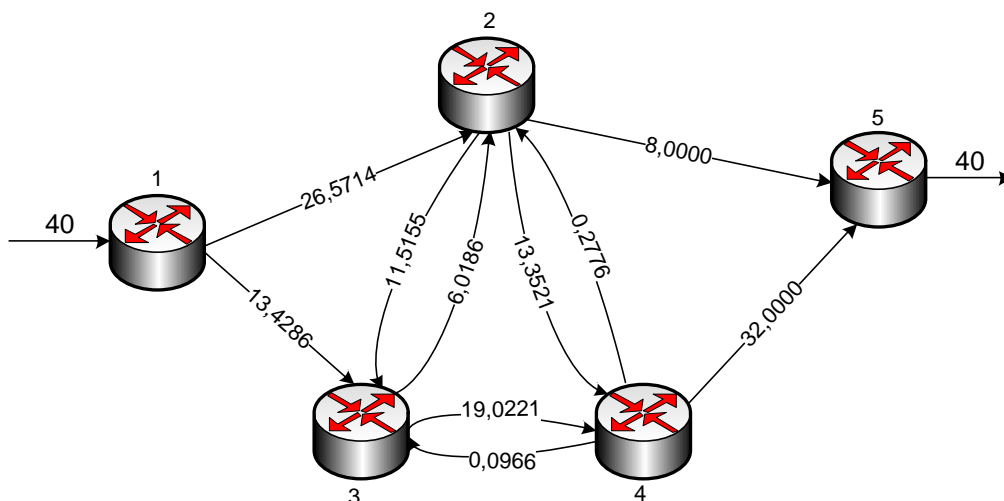


Рис. 3. Порядок маршрутизации трафика в рамках модели БМ-Д

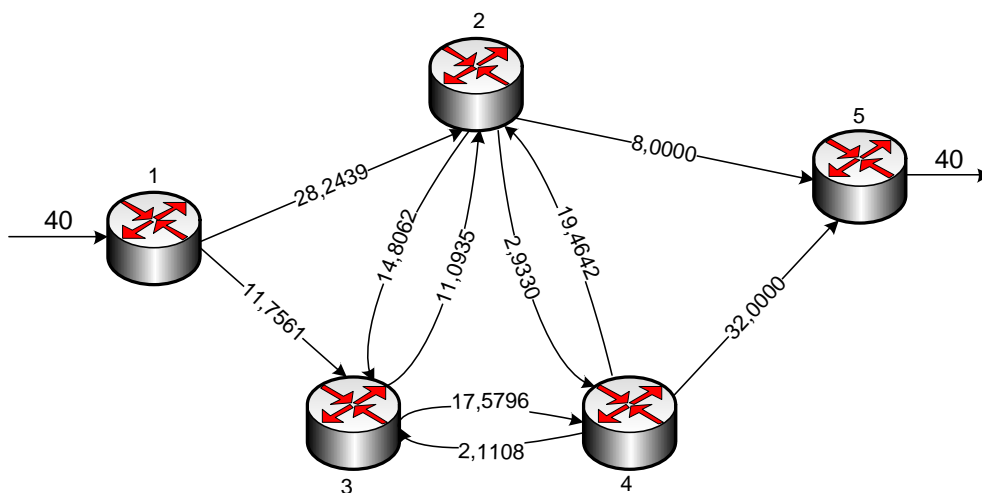


Рис. 4. Порядок маршрутизации трафика в рамках модели БМ-ПД

В результате установлено, что имел место эффект зацикливания пакетов, т.е. образовывались т.н. «петли». Это проявлялось в том, что пакеты одного и того же трафика передавались между одной и той же парой узлов в разных направлениях, что на практике приводит, прежде всего, к росту задержек и джиттера пакетов, т.е. к ухудшению качества обслуживания в целом. При этом пропускная способность исходных каналов (рис. 1) делилась поровну для вводимых дуплексных каналов (рис. 3),

что в целом не отразилось на общности получаемых результатов, т.к. эффект заикливания наблюдался и при другом распределении канального ресурса.

Подобная проблема также наблюдалась при решении задачи маршрутизации для других вариантов структур ТКС. Особенно это проявлялось при росте числа каналов, неинцидентных узлам отправителю и получателю пакетов. Устранение данной проблемы подразумевает усовершенствование базовой модели многопутевой маршрутизации (1)-(5), (6) с точки зрения более полного учета особенностей процесса балансировки нагрузки по каналам, работающим в дуплексном и (или) полудуплексном режимах.

III. Направления совершенствования базовой модели маршрутизации для устранения эффекта заикливания пакетов

В результате исследования сформулированы три основных способа устранения замеченного эффекта в ходе усовершенствования базовой модели (1)-(5):

1. Способ I. Подбор направлений передачи трафика в дуплексных и полудуплексных каналах связи сети.
2. Способ II. Изменение критерия оптимальности получаемых решений.
3. Способ III. Введение в базовую модель дополнительных условий, выполнение которых гарантировало бы отсутствие эффекта заикливания пакетов.

Остановимся на предложенных способах подробнее.

Способ I. Первый способ не влечет пересмотр самой базовой модели (1)-(5), а больше связан с особенностями ее применения. Способ основывается на искусственном отказе от полудуплексного или дуплексного режимов работы каналов связи с переходом в симплексный режим, при котором эффекта заикливания не наблюдалось. Суть способа практически состоит в «угадывании» направления протекания трафика между узлами с полудуплексными/дуплексными каналами связи и отказом в использовании обратного направления передачи на этапе формирования модели.

В рамках данного способа решение задачи маршрутизации проводится для различных комбинаций направлений передачи пакетов трафика в полудуплексных и дуплексных каналах связи, не инцидентных узлам отправителю и получателю. В ходе просчета множества вариантов, число которых в общем случае равно 2^n , где n – количество подобных каналов, выбирается наилучший с точки зрения минимума показателя загруженности каналов (α) телекоммуникационной сети в целом.

В рамках рассмотренного примера ТКС (рис. 1) выделяется всего три канала, неинцидентных узлам отправителю и получателю, т.е. необходимо сравнить восемь различных комбинаций выбора направлений передачи в этих каналах. Как пример на рис. 5. приведен порядок распределения трафика для трех вариантов, в которых на симплексные заменялись полудуплексные каналы между узлами 2 и 3, а также 3 и 4. В качестве оптимального может быть выбран третий вариант (рис. 4 в), в рамках которого обеспечивался минимум загруженности каналов ТКС ($\alpha = 0,8$).

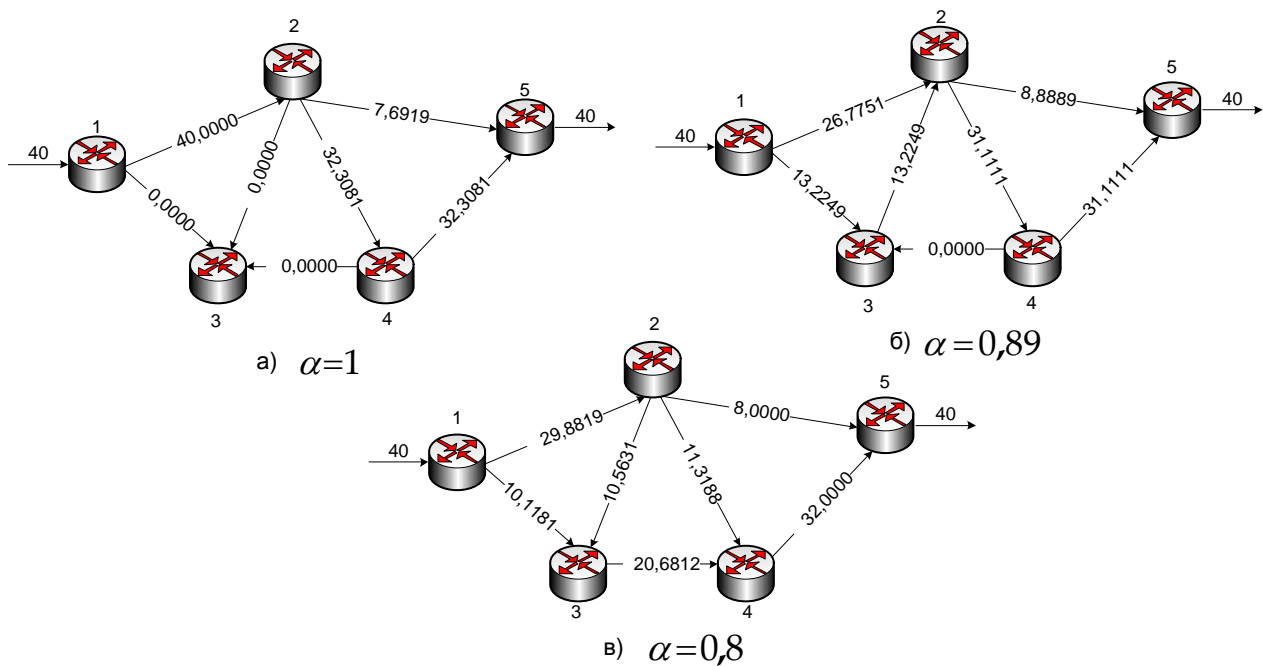


Рис. 5. Варианты распределения трафика по каналам связи сети при использовании способа подбора направлений передачи

Преимуществом данного способа является то, что базовая модель (1)-(5) остается прежней (линейной). Кроме того, заметно снижается размерность задачи по сравнению с моделированием сетей с дуплексными или полудуплексными каналами связи. Однако с ростом размерности сети, т.е. при увеличении числа каналов в ней, соответственно растет и число анализируемых вариантов распределения трафика в ТКС, резко увеличивая трудоемкость процесса поиска оптимального решения. Для ТКС высокой размерности реализация данного способа на практике является затруднительной.

Способ II. В рамках второго способа предлагается усовершенствовать базовую модель (1)-(5), изменив критерий оптимальности получаемых решений. В частности предлагается использовать минимум линейной целевой функции аддитивного вида

$$\sum_{k \in K(i,j) \in E} a_{ij} x_{ij}^k \rightarrow \min, \quad (7)$$

где весовые коэффициенты a_{ij} по сути являются маршрутными метриками. Например, при использовании метрики протокола маршрутизации внутреннего шлюза IGRP (Interior Gateway Routing Protocol) [4, 5] весовые коэффициенты рассчитываются согласно выражению $a_{ij} = 10^7 / c_{i,j}$. С точки зрения балансировки нагрузки целевая функция (7) представляет собой аналог обобщенной суммы коэффициентов использования всех каналов телекоммуникационной сети.

Таким образом, критерий оптимальности (5) заменяется на критерий (7), на смену условиям (3) и (4) приходит выражение

$$\sum_{k \in K} d_k x_{ij}^k \leq c_{ij}, \quad (i,j) \in E, \quad (8)$$

для дуплексных каналов, а для полудуплексных каналов упростится условие (6)

$$\sum_{k \in K} d_k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} d_k x_{ji}^k \leq c_{ij}, \quad (i, j) \in E. \quad (9)$$

Таким образом, при использовании второго способа базовая модель практически не усложняется, т.к. сохраняет линейность. Кроме того, при определении порядка распределения трафика в рамках вновь введенного критерия, например для полудуплексных каналов, действительно наблюдалось отсутствие эффекта заикливания пакетов (рис. 6), но качество балансировки, как правило, ухудшалось, т.к. коэффициент использования (загруженность) каналов связи ТКС увеличивался. И если при удачном применении первого способа $\alpha = 0,8$ (рис. 5 в), то в рамках второго способа $\alpha = 1$ (рис. 6).

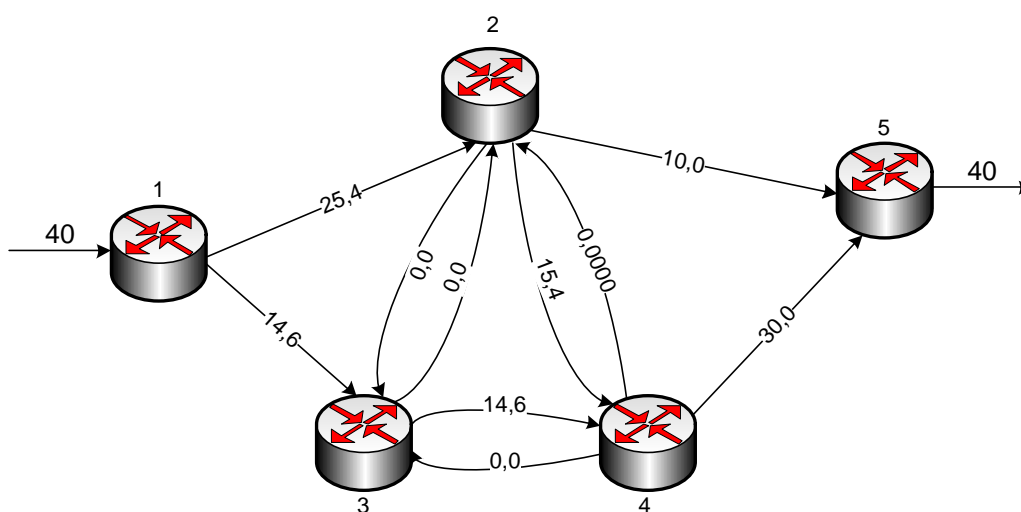


Рис. 6. Порядок распределения трафика при решении задачи маршрутизации при изменении критерия оптимальности ($\alpha = 1$)

Ухудшение качества балансировки, как правило, сопровождается снижением основных показателей качества обслуживания (QoS) – производительности сети, средней задержки, джиттера и потерь пакетов.

Способ III. В рамках третьего способа предлагается сохранить неизменным вид критерия оптимальности (5), а в структуру базовой модели маршрутизации (1)-(5) ввести дополнительные условия, выполнение которых позволило бы предотвратить возникновение эффекта заикливания пакетов. В качестве подобных условий могут выступать выражения, представленные в виде равенств

$$x_{ij}^k \cdot x_{ji}^k = 0, \quad (i, j) \in E, \quad k \in K. \quad (10)$$

Условие (10) гарантирует, что интенсивность хотя бы одного из двух трафиков, протекающих друг навстречу другу в дуплексном или полудуплексном каналах, будет равна нулю, тем самым гарантируя отсутствие эффекта заикливания пакетов. На рис. 7 приведен пример порядка распределения трафика по каналам сети в ходе

решения задачи многопутевой маршрутизации на основе модели (1)-(6) с введением в нее дополнительных условий (10).

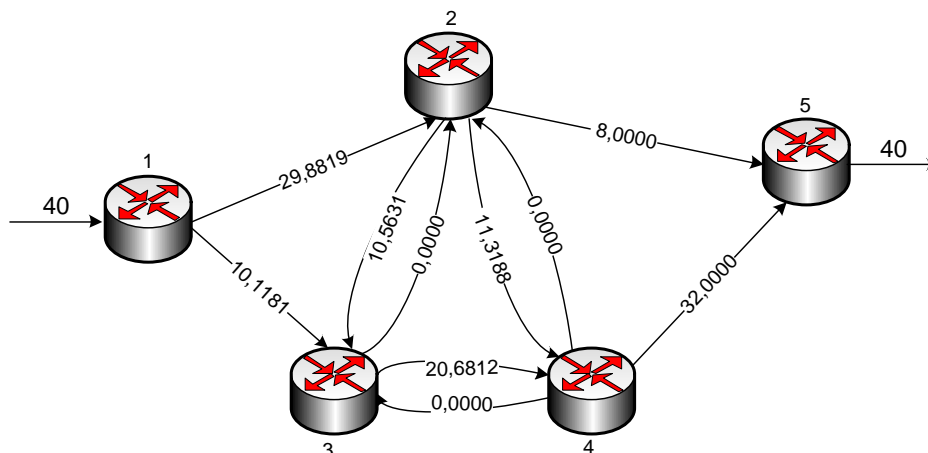


Рис. 7. Порядок распределения трафика по каналам сети с учетом введения дополнительных условий (10) ($\alpha = 0,8$)

Использование модели (1)-(6), (10) гарантирует отсутствие эффекта закливания пакетов без снижения качества балансировки, что достигается за счет некоторого усложнения самой модели и последующих расчетов. Это обусловлено тем, что вводимые условия (10) носят нелинейный характер и предполагают использование методов нелинейной оптимизации. Для сравнения второго и третьего способов был проведен анализ величины максимальной загруженности α (рис. 8) при различных интенсивностях входного трафика и структур ТКС. Результаты сравнения засвидетельствовали преимущества третьего способа по показателю максимальной загрузки, что особенно проявлялось при высоких нагрузках на сеть. Для примера приведены результаты сравнения в рамках выбранной ранее структуры телекоммуникационной сети (рис. 1).

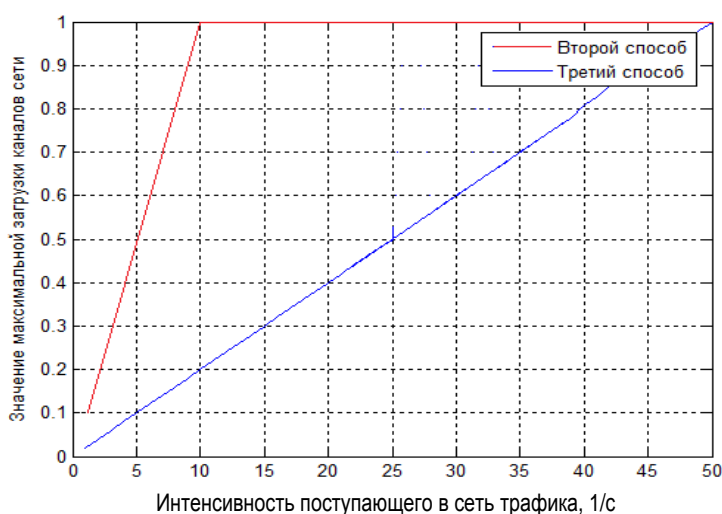


Рис. 8. Результаты анализа величины максимальной загруженности α для второго и третьего способов усовершенствования базовой модели при различных интенсивностях входного трафика

IV. Анализ базовой модели многопутевой маршрутизации для телекоммуникационных сетей с неоднородной структурой

В ходе последующего исследования базовой модели многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки (1)-(5) также было установлено, что не для всех топологий ТКС получаемые решения всегда способствуют максимальному улучшению балансировки по всем, но отдельно взятым каналам связи. Особенно это проявлялось для ТКС с неоднородной топологией, когда связность узлов по сети была не постоянной, а варьировалась в некоторых пределах. При этом под связностью узлов понималось число инцидентных ему каналов связи.

В особенности данная ситуация наблюдалась при решении задачи маршрутизации на основе балансировки нагрузки для сети, представленной разделимым графом [24]. Разделимый граф представляет собой множество подграфов, соединенных между собой точкой сочленения (канал или узел). Соответственно ТКС, представленная разделимым графом, состоит из подсетей, которые связаны между собой некоторым заданным числом каналов или узлов.

При исследовании процесса маршрутизации в рамках модели (1)-(5) было замечено, что в случае, когда пропускная способность каналов, соединяющих подсети, меньше пропускной способности каждой из этих подсетей, качество балансировки внутри подсетей при решении задачи маршрутизации заметно снижается. Снижение качества балансировки происходит из-за присутствия в сети «узкого места», т.е. участка с минимальной пропускной способностью. На этом участке величина загруженности трафиком достигает максимального значения среди значений загруженности каналов на других участках сети, определяя значение критерия (5) для ТКС в целом. Это, в свою очередь, препятствует минимизации величины загруженности других каналов в подсетях, приводя к ухудшению качества обслуживания в ТКС в целом.

Данную проблему можно продемонстрировать на следующем примере. В качестве примера используем структуру ТКС, представленную на рис. 9 ориентированным графом G .

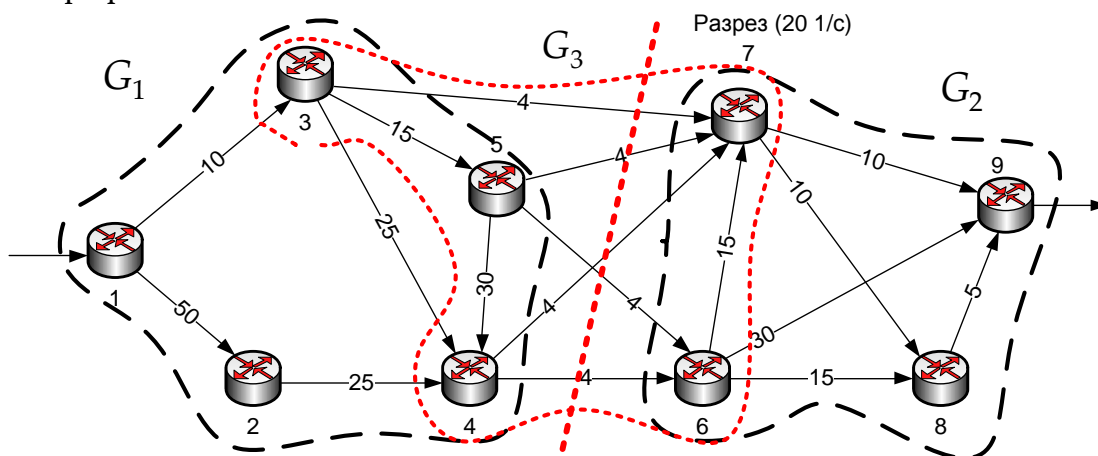


Рис. 9. Структура рассматриваемой телекоммуникационной сети (многосвязная топология)

Пусть узел 1 – узел-источник, а узел 9 – узел-получатель. Числовые значения на дугах графа в данном случае обозначают пропускную способность каналов ТКС. Граф G разбивается на три подграфа, как показано на рис. 9. Подграфы G_1 , G_2 и G_3 моделируют соответственно первую, вторую и третью подсети. По отношению друг к другу подсети, представленные подграфами G_1 и G_2 , являются многосвязными (между ними существует множество каналов: (3, 7), (5, 7), (4, 7), (5, 6), (4, 6)). Разрез подграфа G_3 имеет пропускную способность 20 1/с.

В рамках выбранной топологии ТКС произведем оценку качества балансировки α для сети в целом, а также для каждой отдельной подсети (α_1 , α_2 и α_3) в соответствии со следующими выражениями:

$$\alpha = \max_{k \in K} \frac{\sum d_k x_{ij}^k}{c_{ij}}, \quad (i, j) \in G, \quad (11)$$

$$\alpha_n = \max_{k \in K} \frac{\sum d_k x_{ij}^k}{c_{ij}}, \quad (i, j) \in G_n; \quad n = \overline{1,3}. \quad (12)$$

Пусть в ТКС обслуживается трафик интенсивностью 15 1/с, тогда решением задачи маршрутизации для выбранной сети в рамках исследуемой модели (1)-(5) будет распределение, представленное на рис. 10. Числовые значения в дугах графа в данном случае означают интенсивность трафика, протекающего в том или ином канале. На рис. 10 также представлены значения коэффициентов максимальной загрузки α , α_1 , α_2 и α_3 .

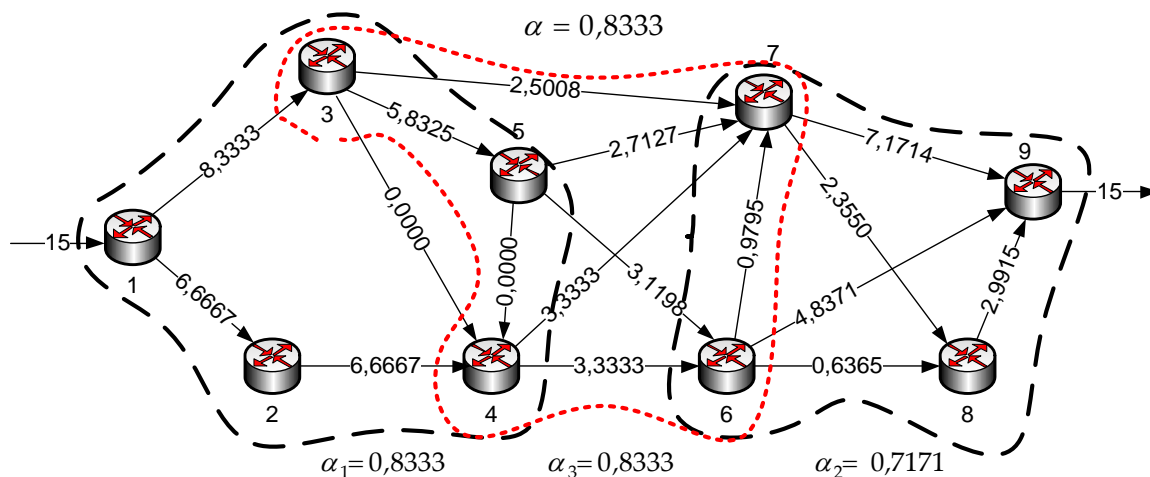


Рис. 10. Порядок распределения трафика и значения коэффициентов загрузки подсетей и сети (рис. 9) в целом

Для структуры ТКС, представленной на рис. 10, значения коэффициентов загрузки сети (11), (12) в целом отличаются незначительно, что продиктовано особенностями сетевой многосвязной топологии. Однако картина меняется при сокращении количества каналов, соединяющих подсети, представленных подграфами

G_1 и G_2 , до двух (двухсвязная топология), при этом пропускную способность разреза подграфа G_3 сохраним такой же – 20 1/с (рис. 11).

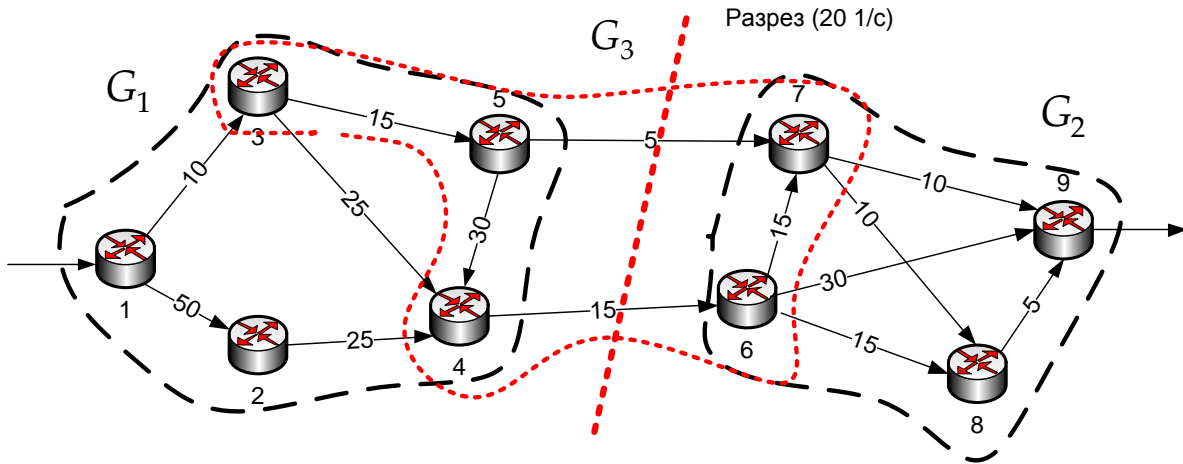


Рис. 11. Структура рассматриваемой телекоммуникационной сети (двухсвязная топология)

Решение задачи маршрутизации для этой структуры сети (рис. 11), а также значение коэффициентов максимальной загрузки α , α_1 , α_2 и α_3 в рамках исследуемой модели маршрутизации (1)-(5) представлено на рис. 12.

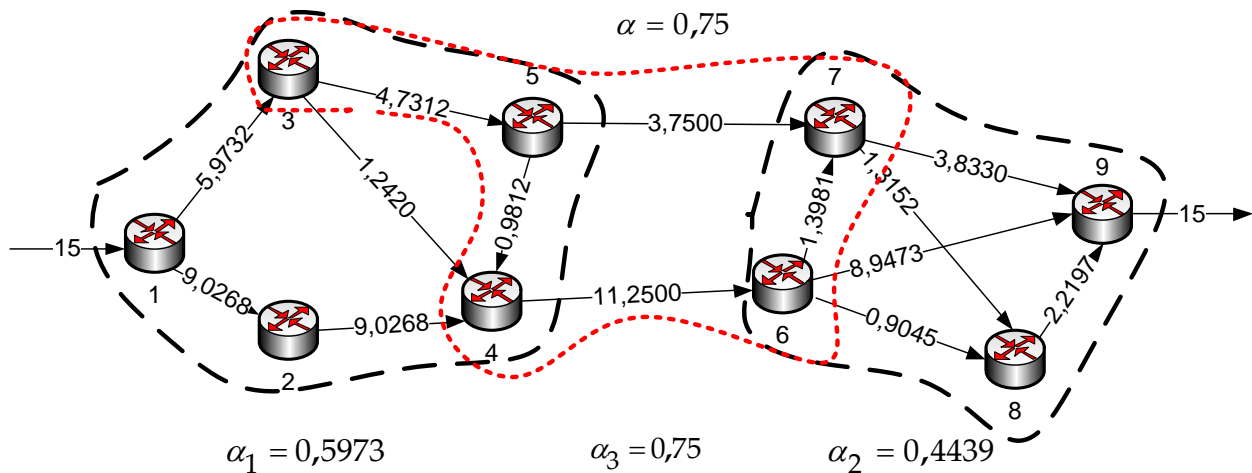


Рис. 12. Порядок распределения трафика и значения коэффициентов загрузки подсетей и сети (рис. 11) в целом

При дальнейшем сокращении числа каналов между подсетями, представленными подграфами G_1 и G_2 , до одного получена односвязная топология (рис. 13). Пропускную способность максимального разреза подграфа G_3 сохраним прежней – 20 1/с.

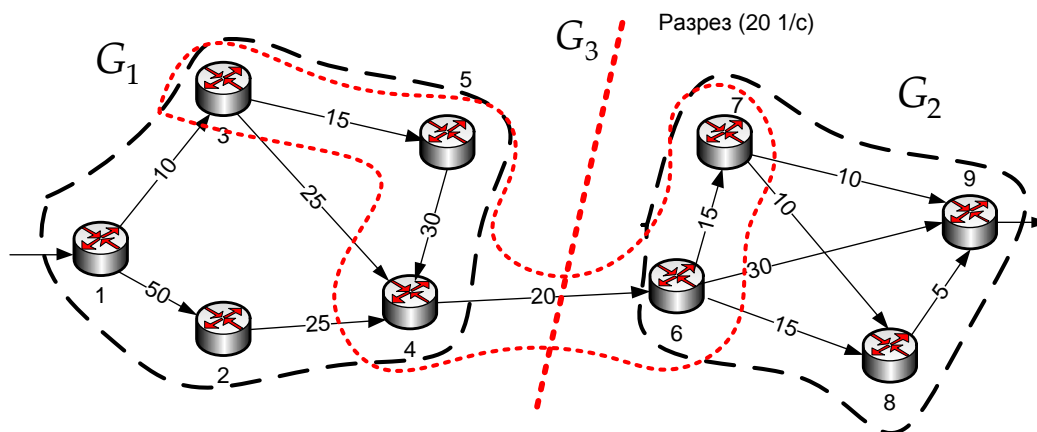


Рис. 13. Структура рассматриваемой телекоммуникационной сети (односвязная топология)

Решение задачи маршрутизации для односвязной сети, а также значения коэффициентов максимальной загруженности α , α_1 , α_2 и α_3 в рамках базовой модели представлено на рис. 14.

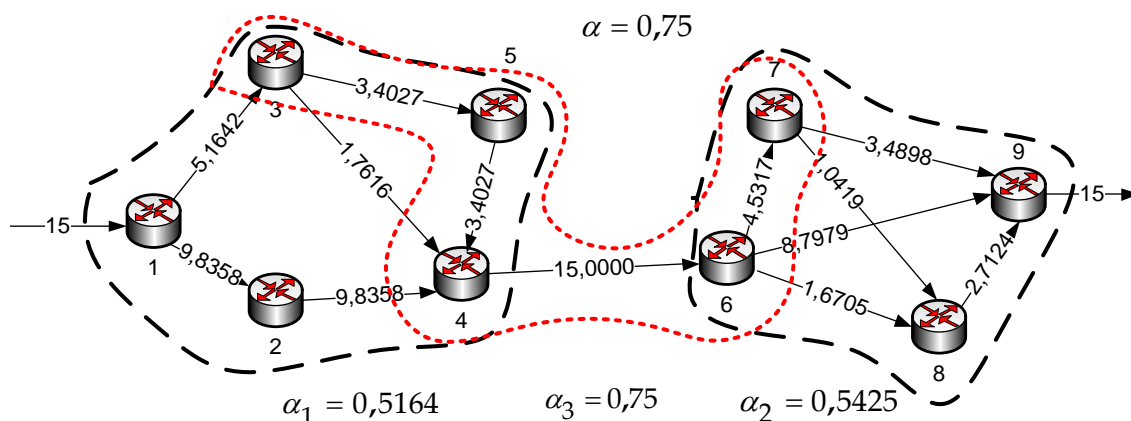


Рис. 14. Порядок распределения трафика и значения коэффициентов загруженности подсетей и сети (рис. 13) в целом

Для всех трех вариантов структуры коэффициенты максимальной загруженности сведены в таблицу (табл. 1). Анализ содержания табл. 1 показал, что значение коэффициента максимальной загруженности каналов α совпадает с коэффициентом максимальной загруженности подсети, которая является «узким местом» (bottleneck) в ТКС. В качестве такой подсети выступала подсеть G_3 . В рамках модели (1)-(5) это не всегда способствует улучшению качества балансировки нагрузки в других подсетях, что особенно характерно для ТКС с неоднородной структурой, т.е. к примеру, для сети с односвязной и двухсвязной топологиями. Так, если бы решение задачи многопутевой маршрутизации для подсетей, представленных подграфами G_1 и G_2 , осуществлялось независимо друг от друга, то для них значения коэффи-

ентов максимальной загруженности (соответственно α_1 и α_2) могли бы быть заметно улучшены (рис. 15) по сравнению с решением, показанным на рис. 14.

Табл. 1. Значение коэффициента максимальной загруженности каналов сети для различных сетевых топологий

Коэффициент Топология	α	α_1	α_2	α_3
Многосвязная	0,8333	0,8333	0,7171	0,8333
Двусвязная	0,75	0,5973	0,4439	0,75
Односвязная	0,75	0,5164	0,5425	0,75

Подобная закономерность подталкивает к необходимости перехода от централизованных решений к распределенным, т.е. решению задач многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки по подсетям. Решение задачи многопутевой маршрутизации для сети, представленной разделимым графом, при использовании метода «по подсетям» заключается в том, что балансировка нагрузки оптимизируется отдельно для каждой из подсетей, на которые предварительно должна быть декомпозирована ТКС в соответствии с особенностями своего топологического построения.

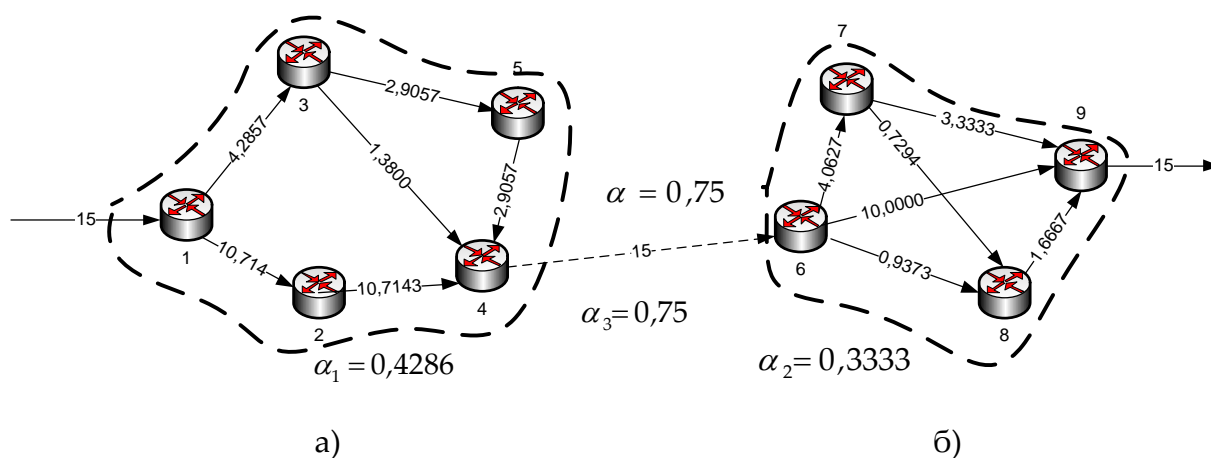


Рис. 15. Порядок распределения трафика и значения коэффициентов загруженности подсетей (рис. 13) и сети в целом при независимой балансировке трафика по подсетям

V. Анализ решения задачи многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки при использовании метода «по подсетям»

Проведем анализ влияния качества балансировки нагрузки в ТКС на численные значения такого важного показателя QoS, как средняя межконцевая задержка пакетов при реализации многопутевой стратегии маршрутизации. При этом сравнивались решения, основанные на централизованной маршрутизации и на методе

маршрутизации «по подсетям». Для расчета средней межконцевой задержки пакетов k -го трафика использовалось выражение

$$\tau^k = \sum_{r \in R} x_r^k t_r^k, \quad (13)$$

где R – множество путей между рассматриваемой парой узлов «отправитель» и «получатель»; x_r^k – доля k -го трафика, протекающего по r -му пути; t_r^k – средняя задержка пакетов k -го трафика вдоль r -го пути, которая рассматривалась как аддитивная метрика, а средние задержки в отдельных каналах рассчитывались в принятии гипотезы о моделировании каналов связи, например, системой массового обслуживания типа M/M/1.

На рис. 16 и рис. 17 представлены результаты сравнительного анализа качества балансировки по подсетям и в сети в целом, а также средней межконцевой задержки пакетов, получаемые при централизованной многопутевой маршрутизации и при использовании метода маршрутизации «по подсетям» для разных сетевых топологий.

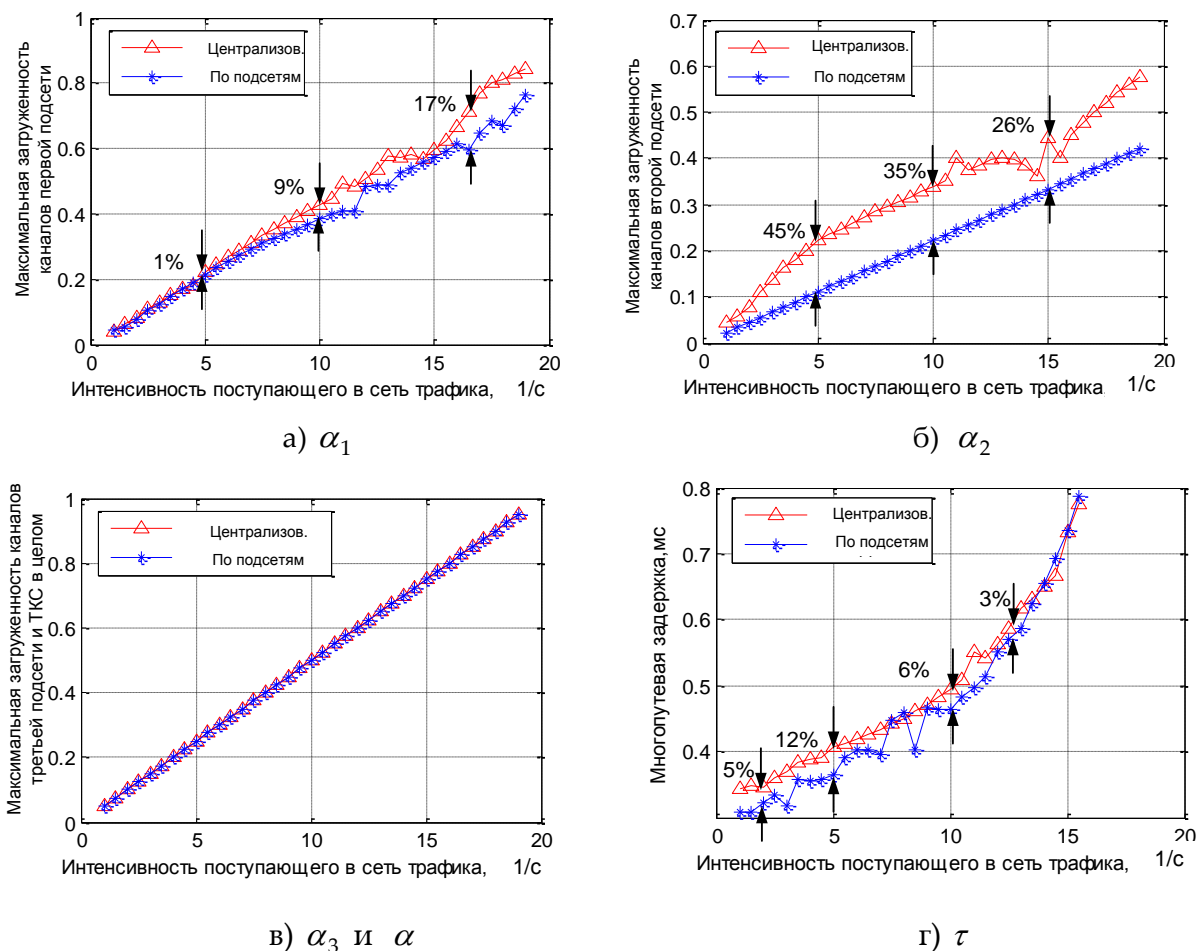


Рис. 16. Результаты сравнительного анализа качества балансировки по подсетям и в сети в целом, а также средней межконцевой задержки пакетов, получаемые при централизованной многопутевой маршрутизации и при использовании метода маршрутизации «по подсетям» для двухсвязной топологии ТКС (рис. 11)

Для двухсвязной топологии ТКС, представленной на рис. 11, выигрыш по балансировке трафика по подсетям составлял в среднем от 8 до 10% для первой подсети (рис. 16 а) и от 30 до 40% для второй подсети (рис. 16 б), что позволило улучшить среднюю межконцевую задержку пакетов на 6-10% (рис. 16 г). Для односвязной топологии ТКС, представленной на рис. 13, выигрыш по балансировке трафика по подсетям составлял в среднем от 15 до 20% для первой подсети (рис. 17 а) и от 35 до 37% для второй подсети (рис. 17 б), что позволило улучшить среднюю межконцевую задержку пакетов уже на 30% (рис. 17 г). Таким образом, чем выше неоднородность структуры ТКС, тем больше выигрыш можно получить и по балансировке, и по средней задержке пакетов при реализации на практике метода многопутевой маршрутизации «по подсетям».

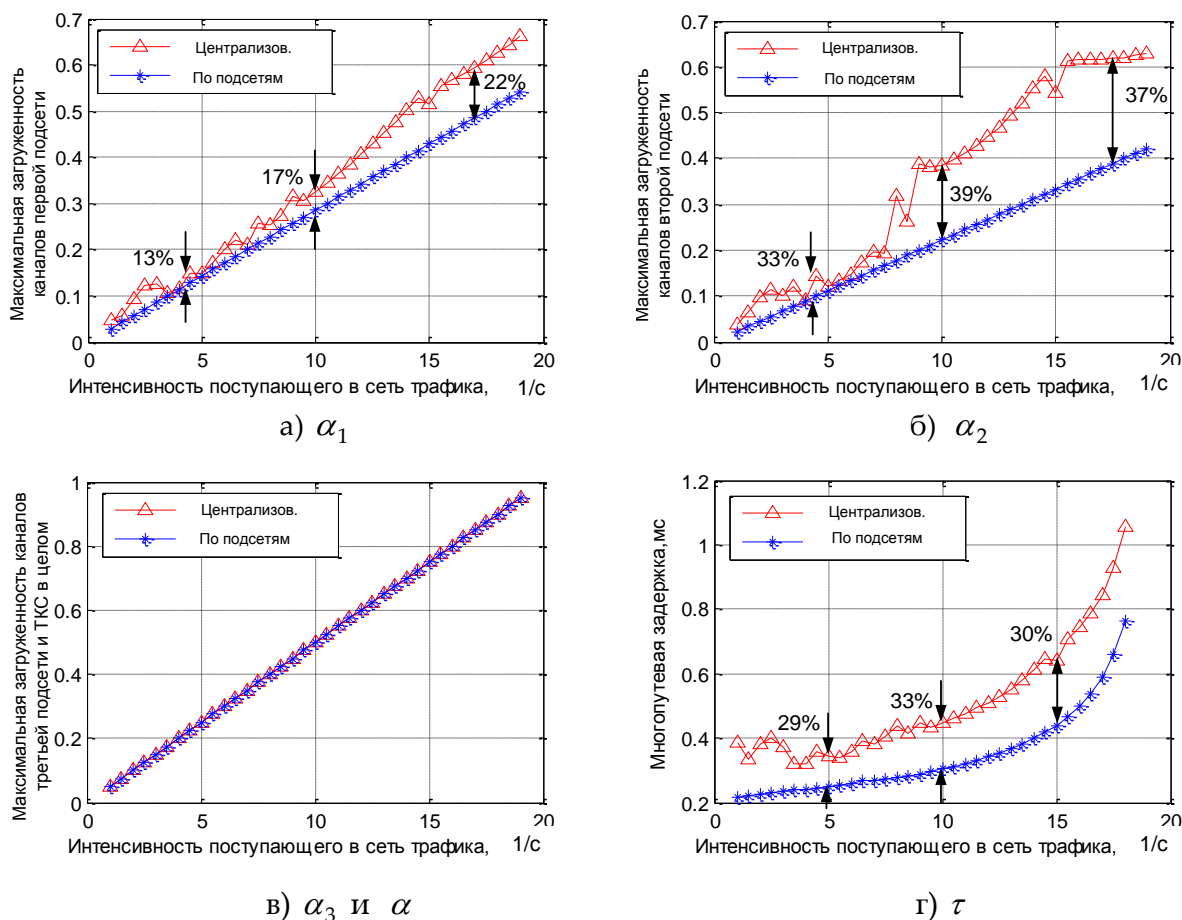


Рис. 17. Результаты сравнительного анализа качества балансировки по подсетям и в сети в целом, а также средней межконцевой задержки пакетов, получаемые при централизованной многопутевой маршрутизации и при использовании метода маршрутизации «по подсетям» для односвязной топологии ТКС (рис. 13)

Выводы

На основе анализа модели многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки (1)-(5), которая рассматривается как достаточно удачная реализация принципов Traffic Engineering, установлены ее основные недостатки:

– первый недостаток связан с неадекватностью применения модели (1)-(5) в сетях с полудуплексными и (или) дуплексными каналами связи, приводящего к зацикливанию пакетов;

– второй недостаток состоял в том, что не для всех топологий ТКС получаемые с помощью модели (1)-(5) решения всегда способствуют максимальному улучшению балансировки по всем, но отдельно взятым, каналам связи. Особенно критичным было снижение качества балансировки для сетей с неоднородной топологией, представимых в виде разделимого графа.

В этой связи предложен ряд решений, направленных на устранение отмеченных недостатков, касающихся пересмотра (усовершенствования) самой модели или методики ее использования при расчетах. Для устранения первого недостатка предложено три способа, третий из которых, основанный на некотором усложнении самой модели за счет введения в ее структуру дополнительных нелинейных по своей природе ограничений (10), гарантирует отсутствие эффекта зацикливания пакетов без снижения качества балансировки. Результаты численного моделирования подтвердили эффективность этого способа.

Для минимизации второго недостатка предлагается отказаться от централизованного решения задачи многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в рамках модели (1)-(5), а перейти к методу маршрутизации «по подсетям». Это связано с тем, что эффективность балансировки трафика в ТКС в целом полностью определяется качеством балансировки в «узком месте» сети, что не способствует улучшению балансировки трафика в других каналах сети. Это особенно актуально для сетей с неоднородной топологией, представимых в виде разделимого графа. Переход к методу маршрутизации «по подсетям», как показали проведенные исследования и результаты численного моделирования, позволяет заметно улучшить эффективность балансировки трафика по всем каналам сети и повысить численные значения ключевых показателей качества обслуживания, например, средней межконцевой задержки пакетов на 10-30% в зависимости от степени неоднородности структуры ТКС. Причем чем выше неоднородность структуры сети, тем значительней выигрыш от применения метода маршрутизации «по подсетям» (рис. 17).

Список литературы:

1. NGN: принципы построения и организации / под ред. Ю.Н. Чернышова. – М.: ЭкоТрендз, 2008. – 400 с.
2. Y.2001. ITU-T. Recommendation Y.2001: General overview of NGN [Text] / ITU-T. – Geneva, 2004. – 18 p.
3. Вегенша III. Качество обслуживания в сетях IP. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 368 с.
4. Остерлох X. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка / X. Остерлох. – СПб.: BHV. – СПб., 2002. – 512 с.
5. Medhi D., Ramasamy K. Network routing: algorithms, protocols, and architectures. Morgan Kaufmann, 2007. – 788 p.

6. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2005. – 304 с.
7. Simha A., Osborne E. Traffic Engineering with MPLS. Cisco Press, 2002. – 608 p.
8. Pioro M., Medhi D. Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks. Morgan Kaufmann Series in Networking. Издательство: Elsevier Digital Press. 2000. – 794 p.
9. Поповский В.В., Лемешко А.В., Мельникова Л.И., Андрушко Д.В. Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Том.4. – Вып. № 4. – С. 372-382.
10. Wang Y., Wang Z. Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering // Proc. of 8th International Conference on Computer Communications and Networks. Paris, 1999. – P. 582-588.
11. 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.
12. Merindol P., Pansiot J.-J., Cateloin S. Improving Load Balancing with Multipath Routing // 2008 Proceedings of 17th International Conference on Computer Communications and Networks. – 2008. – P. 1-8.
13. Casas P., Larroca F., Rougier J.-L., Vaton S. Robust routing vs dynamic load-balancing a comprehensive study and new directions // 7th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks. – 2009. – P. 123-130.
14. Fortz B., Rexford J., Thorup M. Traffic engineering with traditional IP routing protocols // Communications Magazine. – 2002. – Vol. 40, No. 10. – P. 118–124.
15. Bhosale S., Sarwade N. Maximum Flow Based Balanced Routing Protocol for WDM Networks // European Journal of Scientific Research. – 2011. – No.3. – P. 364-375.
16. Лемешко О.В., Дробот О.А., Симоненко Д.В. Результаты порівняльного аналізу поточкових моделей маршрутизації в телекомунікаційних мережах // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Вип. 1(13), 2007. – С. 66-69.
17. Лемешко А.В. Динамическая модель балансировки буферных и канальных ресурсов транспортной сети телекоммуникационной системы [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Д.В. Симоненко // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 2 (2). – С. 42 – 49. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_dynamic.pdf.
18. Gallager R. A minimum delay routing algorithm using distributed computation // IEEE Trans. on communications. – 1975. – Vol. 25, №1. – P.73-85.
19. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. – М.: Мир, 1989. – 544 с.
20. Гуревич И.М. Динамическая модель сети связи // Теория телетрафика в системах информатики. – М.: Наука, 1989. – С. 54-64.
21. Segall A. The modeling of adaptive routing in data communications networks // IEEE Trans. on communications. – 1975. – Vol. 25, №1. – P. 85-95.
22. Popovsky V., Lemeshko A. Multitensor Model of the Telecommunication Network // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science / Proceedings of conference International TCSET'2004 / Lviv-Slavsko, 2004. – P. 323-325.
23. Форд Л., Фалкерсон Д. Потоки в сетях: Пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 276 с.
24. Сешу С., Рид М.Б. Линейные графы и электрические цепи. – М.: «Высш. школа», 1971. – 448 с.