

ДВУХУРОВНЕВЫЙ МЕТОД ИЕРАРХИЧЕСКО-КООРДИНАЦИОННОЙ QoS-МАРШРУТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ РЕСУРСОВ

Введение

Получение согласованных решений относительно гарантированного качества обслуживания (Quality of Service, QoS) при реализации многопутевой маршрутизации от источника (source routing) является достаточно сложной научной и прикладной проблемой. В настоящее время для ее решения в IP/MPLS-сетях используются различные технологические средства: функционал протоколов маршрутизации, возможности протокола резервирования ресурсов (RSVP) и их всевозможные модификации [1 – 3]. Как показал проведенный анализ, основным недостатком существующих решений в этой области является несогласованность работы приграничных маршрутизаторов как по расчету маршрутов, так и по резервированию канального ресурса в сети. Выход из сложившейся ситуации видится в переходе к иерархическо-координационным маршрутным решениям, предложенным в работах [4, 5], которые необходимо адаптировать под технологические особенности процессов обеспечения гарантированного качества обслуживания, основанного на резервировании канального ресурса. Получаемые таким образом решения должны ориентировать на более высокие значения производительности и масштабируемости телекоммуникационной сети (ТКС). В этой связи актуальной представляется задача, связанная с разработкой иерархическо-координационного метода маршрутизации с резервированием ресурсов для обеспечения качества обслуживания по множеству показателей.

1. Обзор решений иерархической QoS-маршрутизации с резервированием ресурсов

Решения по иерархической QoS-маршрутизации можно разделить на несколько классов: эвристические, которые в лучшем случае приводят к получению субоптимальных решений, комбинаторные и потоковые [4 – 10].

В работе [6] было предложено решение по масштабируемому распределению ресурсов на основе QoS в иерархической сетевой среде, основанное на модификации механизма QoS-based Resource Allocation Model (Q-RAM), в ходе которого передаваемый поток использует канальный ресурс пропорционально выделяемой ему пропускной способности при оптимизации общего уровня использования пропускной способности всеми потоками. Недостатками этого подхода является недостаточный уровень теоретического обоснования полученного решения, а также отсутствие его адаптации к существующим протоколам маршрутизации и резервирования ресурсов.

В свою очередь в работе [7] был представлен алгоритм непрерывной оптимизации использования пропускной способности в сетях, поддерживающих резервирование, в том числе MPLS сетях, который является комбинированным решением быстрого резервирования пропускной способности в реальном времени с реоптимизацией, непрерывно освобождающей пропускную способность для будущих временных интервалов (time slots). Необходимость реоптимизации возникает вследствие того, что ресурсы для входящих запросов на резервирование распределяются посредством быстрой динамической маршрутизации с помощью простых алгоритмов выбора пути. Это связано с временными ограничениями по удовлетворению запросов резервирования, что приводит к неравномерности распределения нагрузки и возникновению узких мест в сети. Данное решение позволит обслужить большую нагрузку на сеть, не требуя увеличения ее емкости. При этом задача реоптимизации была представлена как задача о максимальном многопродуктовом потоке (Maximum Concurrent Flow Problem, MCFP), для решения которой использовался комбинаторный алгоритм.

Особого внимания заслуживают решения по иерархической маршрутизации, основанные на принципах и постулатах теории иерархических многоуровневых систем управления.

Так, например, в работах [4, 5] предлагаются потоковые модели и двухуровневые методы иерархической маршрутизации, использующие принцип целевой координации. При этом целью межуровневой координации являлось предотвращение перегрузки каналов связи и потерь пакетов в сети. Для повышения скорости сходимости координационной процедуры предлагалось модифицировать метрику каналов связи сети, которая увеличивается в зависимости от удаленности этих каналов (по числу узлов) до соответствующего узла-отправителя или получателя. Это позволило снизить число координирующих итераций, что на практике способствует пропорциональному снижению объемов циркулирующей в сети служебной информации о состоянии сети, а также снижению времени решения поставленной задачи. В этой связи предлагается дальнейшее развитие потокового подхода, но основанного на согласованном решении задач иерархической маршрутизации и резервирования ресурсов, а также использовании тензорных условий обеспечения гарантированного QoS по таким показателям, как скорость передачи и средняя задержка пакетов.

2. Модель иерархической QoS-маршрутизации на основе резервирования ресурсов

Основываясь на результатах, полученных в работах [4, 5, 11], в рамках предлагаемой модели иерархической маршрутизации структура ТКС описывается одномерной сетью $S = (U, V)$, где $U = \{u_r, r = \overline{1, m}\}$ – множество узлов сети (нульмерных симплексов), моделирующих маршрутизаторы сети, а $V = \{v_z = (i, j); z = \overline{1, n}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множество ветвей сети (одномерных симплексов), при этом ветвь v_z моделирует z -й канал связи, соединяющий i -й и j -й маршрутизаторы. Обозначим через $\phi_{(i,j)}$ пропускную способность канала (i, j) , измеряемую в пакетах в секунду (1/с), которая фактически является пропускной способностью j -го сетевого интерфейса на i -м маршрутизаторе ТКС. Тогда мощность множества $|U| = m$ определяет общее число маршрутизаторов в сети, а $|V| = n$ – число каналов связи. Все множество узлов можно разбить на два подмножества: U^+ – подмножество приграничных маршрутизаторов, где m^+ их общее количество в сети; U^- – подмножество транзитных маршрутизаторов, количество которых в сети m^- .

Допустим, что все множество K поступающих в сеть потоков в зависимости от того, на какой приграничный маршрутизатор поступает этот поток, декомпозировано на подмножества $\{K_r, r = \overline{1, m^+}\}$, где K_r – множество потоков, которые поступают на r -й приграничный маршрутизатор и будут обслуживаться в соответствии с индивидуальным стилем резервирования. В дальнейшем под k_r -м потоком будет пониматься k -й поток, который маршрутизируется с u_r -го приграничного маршрутизатора сети.

Как известно [3, 4], в IP-сетях в рамках модели IntServ для индивидуального резервирования используется фиксированный фильтр (Fixed Filter, FF), в соответствии с которым каждому потоку выделяется свой (требуемый) объем сетевого ресурса. Тогда каждому потоку из множества K_r сопоставим ряд параметров:

- $u_s^k \in U^+$ – приграничный маршрутизатор, через который поступает k -й поток (узел-источник);
- $u_d^k \in U^+$ – приграничный маршрутизатор, через который k -й поток убывает из сети (узел-получатель);
- $\lambda_{req}^{k_r}$ – интенсивность k_r -го потока, характеризующая требования по средней скорости передачи пакетов и поступающего в сеть с u_r -го приграничного маршрутизатора, а также

обслуживаемого в соответствии с фильтром индивидуального резервирования, значения которых, в свою очередь, являются метриками QoS.

Пусть в ТКС в ходе решения задач маршрутизации в рамках предлагаемой модели необходимо рассчитать один или множество путей между парой приграничных маршрутизаторов отправитель-получатель, определить порядок распределения между ними трафика заданной интенсивности, а для повышения согласованности при решении отдельных задач управления трафиком описать процесс распределения канального ресурса (пропускной способности канала связи в сети) между потоками, которые обслуживаются на основе индивидуального стиля резервирования.

Тогда для каждого u_r -го приграничного маршрутизатора в качестве искомым выступают маршрутные переменные $x_{i,j}^{k_r}$, которые характеризуют интенсивность k_r -го потока в канале связи $(i, j) \in V$. Кроме того, на этом же u_r -м приграничном маршрутизаторе подлежат расчету дополнительные управляющие переменные $y_{i,j}^{k_r}$, отвечающие за распределение канального ресурса и численно характеризующие доли пропускной способности $\phi_{i,j}$ канала связи $(i, j) \in V$, зарезервированной для обслуживаемых потоков.

Согласно физическому смыслу маршрутных переменных и переменных, отвечающих за распределение пропускной способности каналов связи, на них следует наложить ограничения

$$0 \leq x_{i,j}^{k_r} \leq 1; \quad (1)$$

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

С целью недопущения потерь пакетов на маршрутизаторах и в сети в целом в ходе расчета маршрутных переменных необходимо обеспечить выполнение системы условий сохранения потока [12]:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^{k_r} = 1, \text{ если } u_i = u_s^k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^{k_r} = 0, \text{ если } u_i \neq u_s^k, u_d^k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^{k_r} = -1, \text{ если } u_i = u_d^k, \end{cases} \quad (3)$$

где $k_r \in K_r$.

Для обеспечения управляемости процессом борьбы с перегрузкой в ходе маршрутизации потоков с учетом индивидуального стиля резервирования в модель вводятся следующие условия:

$$\lambda_{req}^{k_r} x_{i,j}^{k_r} \leq y_{i,j}^{k_r} \phi_{i,j}, \text{ если } k_r \in K_r, (i, j) \in V. \quad (4)$$

В рамках условий (4) учитывается децентрализация при расчете маршрутных переменных на каждом отдельно взятом приграничном маршрутизаторе, а также возможность резервирования ресурсов сети. Физический смысл выражения (4) состоит в том, что поток, маршрутизируемый с u_r -го приграничного маршрутизатора, не должен по своей интенсивности превышать доступную пропускную способность канала связи, которая зарезервирована под потоки данного конкретного стиля резервирования.

Кроме того, для обеспечения резервирования лишь доступного канального ресурса важно выполнить условие

$$\sum_{u_r \in U^+} \sum_{k_r \in K_r} y_{i,j}^{k_r} \leq 1. \quad (5)$$

3. Межконцевые QoS-ограничения

С целью обеспечения межконцевого QoS по множеству показателей важно ввести в модель дополнительные условия для каждого из потоков. Для этого целесообразно перейти к тензорной модели ТКС [11, 13], в которой структура сети определяет дискретное n -мерное пространство, где n – число каналов связи в сети. ТКС будет рассматриваться в двух ортогональных системах координат (СК): СК ветвей сети $\{v_k, k = \overline{1, n}\}$ и СК линейнонезависимых контуров $\{\pi_i, i = \overline{1, \mu}\}$ и узловых пар $\{\eta_j, j = \overline{1, \phi}\}$, где $n = \phi(S) + \mu(S)$, $\mu(S) = n - m + 1$ – цикломатическое число, а $\phi(S) = m - 1$ – ранг сети S , которые определяют соответственно количество базисных контуров и узловых пар в сети. Тогда, например, в случае моделирования функционирования интерфейса маршрутизаторов сети системой массового обслуживания М/М/1 метрика пространства будет представлена тензором E . При этом координаты его проекции в СК ветвей, представленные диагональными элементами матрицы E_v размера $n \times n$ и отнесенные к каждому потоку в сети, будут рассчитываться, исходя из следующего выражения [11]:

$$e_{zz}^v = \frac{1}{\lambda_v^z (\varphi_z - \lambda_v^z)}, \quad (6)$$

где λ_v^z – интенсивность рассматриваемого потока в z -м канале связи при использовании сквозной нумерации каналов, а φ_z – пропускная способность z -го канала связи, зарезервированная для данного потока.

Далее для удобства представления будем использовать дважды контравариантный метрический тензор $G_v = [E_v]^{-1}$, проекции которого при смене СК его рассмотрения преобразуются следующим образом:

$$G_{\pi\eta} = A^t G_v A, \quad (7)$$

где $G_{\pi\eta}$ – проекция тензора G в СК контуров и узловых пар, A – $n \times n$ матрица ковариантного координатного преобразования при переходе от СК контуров и узловых пар к СК ветвей [11], $[\cdot]^t$ – оператор транспонирования, $[\cdot]^{-1}$ – операция обращения матрицы.

Как показано в [11, 14], матрицу $G_{\pi\eta}$ можно представить блочной структурой, т.е.

$$G_{\pi\eta} = \left\| \begin{array}{c|c} G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle} \\ \hline G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} \end{array} \right\|, \quad G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} = \left\| \begin{array}{c|c} G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \\ \hline G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \end{array} \right\|,$$

где $G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle}$ и $G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$ – квадратные подматрицы размера $\mu \times \mu$ и $\phi \times \phi$ соответственно, $G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle}$ – подматрица размера $\mu \times \phi$, $G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle}$ – подматрица размера $\phi \times \mu$; $G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle}$ – первый элемент матрицы $G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$.

Тогда, как было получено в работах [11, 13], условия обеспечения качества обслуживания для каждого k_r -го потока по требуемым значениям средней задержки $\tau_{req}^{k_r}$ и скорости передачи пакетов $\lambda_{req}^{k_r}$ принимают вид

$$\lambda_{req}^{k_r} \leq \left(G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right) \tau_{req}^{k_r}. \quad (8)$$

4. Формирование критерия оптимальности решений по QoS-маршрутизации на основе резервирования ресурсов

Маршрутные переменные и переменные, отвечающие за распределение пропускной способности каналов связи, отнесенные к u_r -му приграничному маршрутизатору ($k_r \in K_r$, $(i, j) \in V$), являются координатами соответствующих векторов:

$$\bar{x}_r = \begin{bmatrix} x_{1,2}^{k_r} \\ x_{1,3}^{k_r} \\ \vdots \\ x_{i,j}^{k_r} \\ \vdots \\ x_{m,m-1}^{k_r} \end{bmatrix}, \quad \bar{y}_r = \begin{bmatrix} y_{1,2}^{k_r} \\ y_{1,3}^{k_r} \\ \vdots \\ y_{i,j}^{k_r} \\ \vdots \\ y_{m,m-1}^{k_r} \end{bmatrix}, \quad (r = \overline{1, m^+}). \quad (9)$$

В матричной форме систему условий (5) можно представить в виде

$$\sum_{u_r \in U^+} B_r \bar{y}_r \leq I, \quad (10)$$

где B_r – согласующая матрица, количество строк которой определяется числом каналов связи в сети n , а количество столбцов – размером вектора \bar{y}_r , I – вектор размера $n \times 1$, все координаты которой равны 1. В общем случае размерность вектора \bar{y}_r равна $K_r \cdot n$.

В качестве критерия оптимальности получаемых решений выберем экстремум целевой функции F , основным требованием к форме и содержанию которой является учет технологических особенностей решаемой задачи и возможность представления в аддитивной форме для последующей ее декомпозиции на подзадачи и их координации. Примером в этом может служить следующая квадратичная форма:

$$\min_{x,y} F \text{ при } F = \sum_{u_r \in U^+} \left[\bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \bar{y}_r^t Q_r \bar{y}_r \right], \quad (11)$$

где H_r – диагональная матрица весовых коэффициентов, которые являются по сути метриками соответствующих каналов связи, характеризуюя условную стоимость их использования k_r -м потоком; Q_r – диагональная матрица весовых коэффициентов, характеризующих условную стоимость резервирования канального ресурса для потоков, маршрутизируемых от u_r -го приграничного маршрутизатора.

Таким образом, в рамках предложенной модели маршрутизации на основе резервирования сетевых ресурсов (1) – (11) формализованы основные закономерности процессов многопутевой маршрутизации, распределения и резервирования пропускной способности каналов связи сети в интересах пользовательского трафика, обслуживаемого в рамках индивидуаль-

ного стиля резервирования. Модель по своему содержанию соответствует особенностям построения сетей IP/IntServ и MPLS, т.к. процессы маршрутизации и резервирования ресурсов инициализируются на приграничных маршрутизаторах, т.е. эти две задачи решаются не централизованно, а распределенно. На выходе модели ввиду множества возможных решений сформулирована задача по оптимизации процессов маршрутизации и резервирования канальных ресурсов сетях IP/IntServ или MPLS.

5. Двухуровневый метод иерархическо-координационной маршрутизации на основе резервирования ресурсов

Целью метода является обеспечение координированной работы приграничных маршрутизаторов для получения согласованного решения задач маршрутизации и резервирования ресурсов и предотвращения перегрузки каналов связи. В основу предлагаемого метода будет положено решение оптимизационной задачи, связанной с минимизацией квадратичной целевой функции (11) при наличии условий-ограничений (1) – (10). В ходе решения задачи условной оптимизации (11) с целью учета условий взаимодействия приграничных маршрутизаторов (10), переходя к задаче на безусловный экстремум, необходимо максимизировать по множителям Лагранжа (μ) функцию

$$\Omega(\mu) = \min_{x,y} L(x, y, \mu),$$

где

$$L = \sum_{U_r \in U^+} [\bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \bar{y}_r^t Q_r \bar{y}_r] + \sum_{U_r \in U^+} \bar{\mu}_r^t \left[\sum_{U_r \in U^+} B_r \bar{y}_r - I \right]. \quad (12)$$

Для решения сформулированной оптимизационной задачи используем принцип целевой координации [4, 5, 15]. Тогда лагранжиан (12) с учетом видоизмененной записи выражения (10)

$$B_r \bar{y}_r \leq I - \sum_{\substack{u_i \in U^+ \\ i \neq r}} B_i \bar{y}_i \quad (13)$$

можно записать в виде

$$L = \sum_{u_r \in U^+} [\bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \bar{y}_r^t Q_r \bar{y}_r] + \sum_{u_r \in U^+} \bar{\mu}_r^t [B_r \bar{y}_r] - \sum_{u_r \in U^+} \bar{\mu}_r^t I + \sum_{u_r \in U^+} \bar{\mu}_r^t \sum_{\substack{u_i \in U^+ \\ i \neq r}} B_i \bar{y}_i. \quad (14)$$

Тогда лагранжиан (14) можно представить в форме

$$L = \sum_{u_r \in U^+} L_r,$$

где

$$L_r = \bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \bar{y}_r^t Q_r \bar{y}_r + \bar{\mu}_r^t [B_r \bar{y}_r] - \bar{\mu}_r^t I + \sum_{\substack{u_i \in U^+ \\ i \neq r}} \bar{\mu}_i^t [B_r \bar{y}_r]. \quad (15)$$

Таким образом, общая проблема маршрутизации на основе резервирования канального ресурса с обеспечением гарантий по качеству обслуживания в ТКС оказалась декомпозицированной на ряд подзадач (по числу приграничных маршрутизаторов). Каждая задача маршрутизации с резервированием ресурсов на u_r -м приграничном маршрутизаторе, состоящая в расчете векторов \bar{x}_r и \bar{y}_r , свелась к минимизации лагранжиана L_r при ограничениях (1)-

(3), (5) и (8). Решение задач по минимизации выражений (15) определяет нижний уровень расчетов.

На верхнем уровне, основной задачей которого является координация решений, полученных на нижнем уровне, с целью недопущения перегрузки каналов связи сети при резервировании канальных ресурсов, осуществляется модификация вектора множителей Лагранжа в ходе выполнения следующей градиентной процедуры:

$$\bar{\mu}_r(\alpha + 1) = \bar{\mu}_r(\alpha) + \nabla \bar{\mu}_r, \quad (16)$$

где $\nabla \bar{\mu}_r$ – градиент функции, который рассчитывается, исходя из получаемых на нижнем уровне результатов решения задач и резервирования ресурсов (\bar{y}_r^*) на каждом конкретном r -м приграничном маршрутизаторе ($u_r \in U^+$), т.е.

$$\left. \nabla \bar{\mu}_r(y) \right|_{y=y^*} = \sum_{r \in M^+} B_r \bar{y}_r - I. \quad (17)$$

Таким образом, результаты решения задач на каждом отдельном приграничном маршрутизаторе передаются координатору сети (верхний уровень иерархии), где осуществляется их анализ и координация путем расчета (корректировки) векторов множителей Лагранжа $\bar{\mu}_r$ ($u_r \in U^+$) в ходе процедуры (16) и (17). Полученные новые решения снова «спускаются» на первый уровень управления для итерационной оптимизации процесса многопутевой маршрутизации с резервированием ресурсов.

6. Численный пример решения задачи QoS-маршрутизации на основе резервирования ресурсов

Особенности метода иерархической QoS-маршрутизации на основе резервирования сетевых ресурсов (1) – (17) могут быть продемонстрированы, например, на структуре сети, показанной на рис 1. При этом сеть состоит из пяти маршрутизаторов и семи каналов связи. На рис. 1 в разрывах каналов связи показана их пропускная способность $\phi_{i,j}$ (1/с). Предположим, что в сети передаются два потока: пакеты первого потока передаются от первого маршрутизатора к пятому, а второго – от третьего к пятому маршрутизатору. Каждый из потоков пакетов должен удовлетворять следующим QoS-требованиям:

- для первого потока: $\lambda_{req}^1 = 470$ 1/с, $\tau_{req}^1 = 0,1$ с;
- для второго потока: $\lambda_{req}^3 = 490$ 1/с, $\tau_{req}^3 = 0,05$ с.

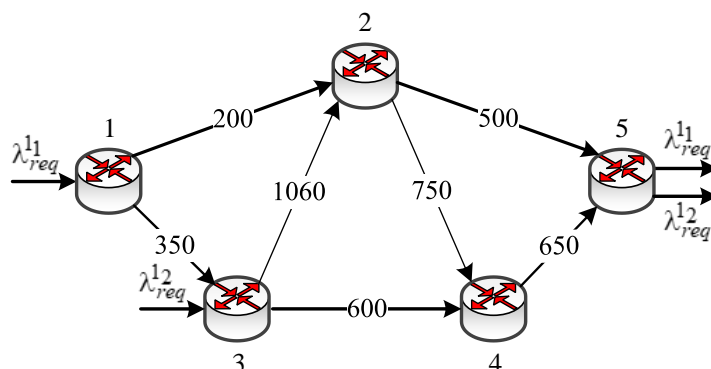


Рис. 1

В случае передачи первого потока сеть S_1 (рис. 2) определяет дискретное n -мерное пространство, где $n = 7$, а $m = 5$. Тогда цикломатическое число и ранг сети S_1 соответственно равны $\mu(S_1) = 3$ и $\phi(S_1) = 4$. Множество базисных контуров и узловых пар, используемое при передаче первого потока, также показано на рис. 2.

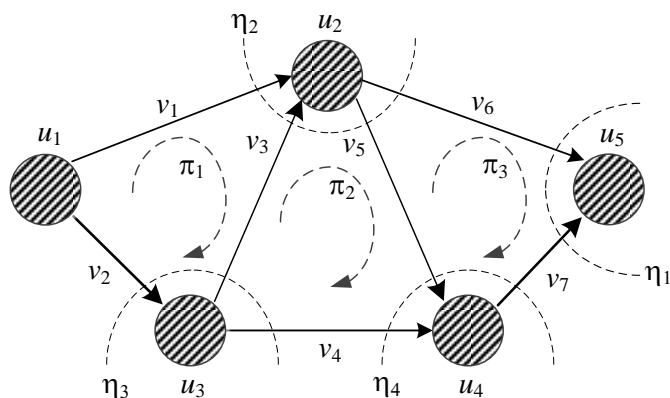


Рис. 2

Относительно выбранного остова в сети $\{v_2, v_3, v_5, v_7\}$ хордами являются ветви v_1, v_4, v_6 , которые определяют три базисных контура: $\pi_1 = v_1, \pi_2 = -v_4, \pi_3 = v_6$ [11, 14]. Полный базис контуров и узловых пар через образующие их ветви можно задать так:

$$\begin{cases} \pi_1 = v_1; \\ \pi_2 = -v_4; \\ \pi_3 = v_6; \\ \eta_1 = v_6 + v_7; \\ \eta_2 = v_1 + v_3 - v_5 - v_6; \\ \eta_3 = v_2 - v_3 - v_4; \\ \eta_4 = v_4 + v_5 - v_7. \end{cases}$$

Выразив элементы базиса ветвей через элементы базиса контуров и узловых пар, имеем

$$\begin{cases} v_1 = \pi_1; \\ v_2 = -\pi_1 + \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4; \\ v_3 = -\pi_1 + \pi_2 + \eta_1 + \eta_2 + \eta_4; \\ v_4 = -\pi_2; \\ v_5 = \pi_2 - \pi_3 + \eta_1 + \eta_4; \\ v_6 = \pi_3; \\ v_7 = -\pi_3 + \eta_1. \end{cases}$$

На основании полученных соотношений между элементами базисов могут быть получены матрицы ковариантного и контравариантного координатного преобразования, описывающие для данного случая переходы между СК ветвей и СК контуров и узловых пар:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

При передаче пакетов второго потока сеть S_2 (рис. 3) определяет дискретное n -мерное пространство, где уже $n=5$, а $m=4$. Здесь цикломатическое число и ранг сети S_2 равны $\mu(S_2) = 2$ и $\phi(S_2) = 3$. В этом случае для передачи второго потока использовалось множество базисных контуров и узловых пар, показанное на рис. 3.

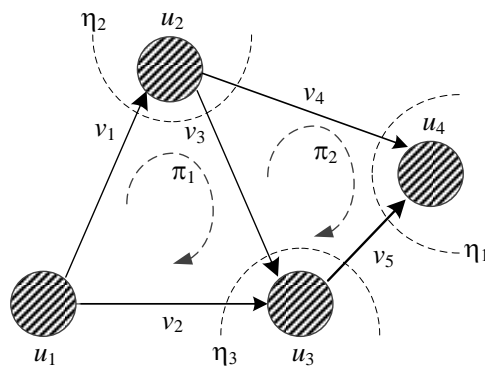


Рис. 3

Здесь выбранный остов в сети $\{v_1, v_3, v_5\}$ определяется хордами, которыми являются ветви v_2 и v_4 , определяющие два базисных контура: $\pi_1 = -v_2$, $\pi_2 = v_4$. В этом случае полный базис контуров и узловых пар через образующие их ветви задается следующим образом:

$$\begin{cases} \pi_1 = -v_2; \\ \pi_2 = v_4; \\ \eta_1 = v_4 + v_5; \\ \eta_2 = v_1 - v_3 - v_4; \\ \eta_3 = v_2 + v_3 - v_5. \end{cases}$$

Далее, как и прежде, выражаем элементы базиса ветвей через элементы базиса контуров и узловых пар и получаем следующие соотношения:

$$\begin{cases} v_1 = \pi_1 + \eta_1 + \eta_2 + \eta_3; \\ v_2 = -\pi_1; \\ v_3 = \pi_1 - \pi_2 + \eta_1 + \eta_3; \\ v_4 = \pi_2; \\ v_5 = -\pi_2 + \eta_1. \end{cases}$$

В этом случае матрицы ковариантного и контравариантного координатного преобразования, описывающие для передачи второго потока переходы между СК ветвей и СК контуров и узловых пар, имеют вид

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для представленных выше исходных данных по структуре сети, характеристикам потоков и QoS-требованиям работа предлагаемого метода иерархическо-координационной QoS-маршрутизации на основе резервирования ресурсов осуществлялась в рамках трех итераций (16), (17). Так, в табл. 1 представлены результаты расчетов, получаемые для каждого потока в отдельности после первой координирующей итерации. Для этой итерации характерно то, что для каждого из потоков обеспечение выполнения QoS требований по скорости и средней межконцевой задержке осуществлялось в ходе использования для первого потока четырех маршрутов (рис. 1): 1→2→5, 1→3→2→5, 1→2→4→5, 1→3→4→5, а для второго потока – трех путей (рис. 1): 3→2→5, 3→2→4→5, 3→4→5. Однако ввиду несогласованности работы первого и третьего приграничных маршрутизаторов в результате маршрутизации исходящих от них потоков наблюдалась перегрузка каналов связи (3, 4) и (2, 4). Так, например, в канале (3, 4) под первый поток первый маршрутизатор намеревается зарезервировать 335 1/с, а третий маршрутизатор для второго потока – 360 1/с, что в сумме заметно превосходит пропускную способность данного канала (600 1/с).

Таблица 1

Канал связи	Пропускная способность канала связи, 1/с	QoS-требования для первого потока: $\lambda_{req}^{11}=470$ 1/с, $\tau_{req}^{11}=0,1$ мс			QoS-требования для второго потока: $\lambda_{req}^{13}=490$ 1/с, $\tau_{req}^{13}=0,05$ мс		
		Выделенная пропускная способность, 1/с	Скорость передачи потока пакетов, 1/с	Средняя задержка пакетов, мс	Выделенная пропускная способность, 1/с	Скорость передачи потока пакетов, 1/с	Средняя задержка пакетов, мс
(1,2)	200	180	165	68	–	–	–
(1,3)	350	320	305	65,4	–	–	–
(3,2)	1060	520	139	2,6	520	273	4
(3,4)	600	335	166	5,9	360	217	7
(2,4)	750	405	100	3,3	400	60	2,9
(2,5)	500	236	205	32	235	213	46
(4,5)	650	300	265	28,8	300	277	43

Предлагаемый метод обеспечил согласованное решение задач маршрутизации двух потоков с резервированием необходимой пропускной способности каналов связи и обеспечением заданных QoS-требований после третьей итерации работы координирующей процедуры (16), (17). При этом ни один из каналов сети перегружен не был. Результаты расчетов после завершения координации приведены в табл. 2.

Таблица 2

Канал связи	Пропускная способность канала связи, 1/с	QoS-требования для первого потока: $\lambda_{req}^{11}=470$ 1/с, $\tau_{req}^{11}=0,1$ мс			QoS-требования для второго потока: $\lambda_{req}^{13}=490$ 1/с, $\tau_{req}^{13}=0,05$ с		
		Выделенная пропускная способность, 1/с	Скорость передачи потока пакетов, 1/с	Средняя задержка пакетов, мс	Выделенная пропускная способность, 1/с	Скорость передачи потока пакетов, 1/с	Средняя задержка пакетов, мс
(1,2)	200	180	165	68	–	–	–
(1,3)	350	320	305	65,4	–	–	–
(3,2)	1060	550	174	2,7	505	293	4,7
(3,4)	600	280	131	6,7	320	197	8,1
(2,4)	750	380	135	4,1	370	79	3,4
(2,5)	500	235	204	32	236	214	45,3
(4,5)	650	302	266	28	300	276	41,8

С точки зрения проверки полученных расчетных результатов продемонстрируем выполнение условий обеспечения качества обслуживания (8) для каждого из потоков. В ходе передачи пакетов первого потока для структуры S_1 метрический тензор G_v имеет вид

$$G_v = \begin{vmatrix} 2430,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4661,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 65271 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 19527 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 33049 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6362,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9524,8 \end{vmatrix}.$$

Учитывая выражение (7) и зная структуру матрицы A ковариантного координатного преобразования при переходе от СК контуров и узловых пар к СК ветвей, получим $G_{\pi\eta}$ – проекцию тензора G в СК контуров и узловых пар:

$$G_{\pi\eta} = \begin{vmatrix} G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle} \\ G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 2430,1 & 0 & 0 & 0 & 2430,1 & 0 & 0 \\ 0 & 19527 & 0 & 0 & 0 & 19527 & -19527 \\ 0 & 0 & 6362,4 & 6362,4 & -6362,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6362,4 & 15887 & -6362,4 & 0 & -9524,8 \\ 2430,1 & 0 & -6362,4 & -6362,4 & 107110 & -65271 & -33049 \\ 0 & 19527 & 0 & 0 & -65271 & 89460 & -19527 \\ 0 & -19527 & 0 & -9524,8 & -33049 & -19527 & 62101 \end{vmatrix},$$

$$G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} = \begin{vmatrix} G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \\ G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 15887 & -6362,4 & 0 & -9524,8 \\ -6362,4 & 107110 & -65271 & -33049 \\ 0 & -65271 & 89460 & -19527 \\ -9524,8 & -33049 & -19527 & 62101 \end{vmatrix}.$$

Откуда следует, что для первого потока

$$G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} = 4700 ,$$

что определяет выполнение условий обеспечения качества обслуживания (8) для данного потока по требуемым значениям скорости передачи пакетов 470 1/с и средней задержки 0,1 с.

При передаче пакетов второго потока для соответствующей структуры S_2 метрический тензор G_v принимает вид

$$G_v = \begin{vmatrix} 62136 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 24213 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 22957 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4725,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6600,6 \end{vmatrix}.$$

Таким образом, получаемая проекция тензора G в СК контуров и узловых пар $G_{\pi\eta}$ (7) следующая:

$$G_{\pi\eta} = \begin{vmatrix} G_{\pi\eta}^{(1)} & G_{\pi\eta}^{(2)} \\ G_{\pi\eta}^{(3)} & G_{\pi\eta}^{(4)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 24213 & 0 & 0 & 0 & -24213 \\ 0 & 4725,8 & 4725,8 & -4725,8 & 0 \\ 0 & 4725,8 & 11326 & -4725,8 & -6600,6 \\ 0 & -4725,8 & -4725,8 & 89819 & -22957 \\ -24213 & 0 & -6600,6 & -22957 & 53771 \end{vmatrix},$$

$$G_{\pi\eta}^{(4)} = \begin{vmatrix} G_{\pi\eta}^{(4,1)} & G_{\pi\eta}^{(4,2)} \\ G_{\pi\eta}^{(4,3)} & G_{\pi\eta}^{(4,3)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 11326 & -4725,8 & -6600,6 \\ -4725,8 & 89819 & -22957 \\ -6600,6 & -22957 & 53771 \end{vmatrix}.$$

Следовательно,

$$G_{\pi\eta}^{(4,1)} - G_{\pi\eta}^{(4,2)} \left[G_{\pi\eta}^{(4,4)} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{(4,3)} = 9804,9,$$

что также подтверждает выполнение условий обеспечения качества обслуживания (8) для второго потока по требуемым значениям скорости передачи пакетов 490 1/с и средней задержки 0,05 с.

Заключение

В статье предложен метод иерархическо-координационной QoS-маршрутизации на основе резервирования сетевых ресурсов, представленный выражениями (1) – (17). Предлагаемый метод основан на введении двухуровневой иерархии решений. Нижний (первый) уровень отвечал за обеспечение согласованного решения задач распределенной маршрутизации от источника и резервирования канального ресурса с выполнением межконцевых QoS-требований по скорости передачи и средней задержке пакетов (8). Подобные условия удалось получить благодаря тензорному описанию ТКС, что позволило обеспечить одинаковые средние межконцевые задержки пакетов вдоль каждого из множества рассчитанных путей, которые и не превышали допустимых значений.

Основной задачей верхнего (второго) уровня является предотвращение перегрузки каналов связи в ходе резервирования их пропускной способности, распределенно иницируемого каждым из приграничных маршрутизаторов ТКС. Для этого в методе вводилась процедура целевой координации (16), (17), а сам процесс решения поставленной задачи приобрел итерационный характер. Установлено, что предлагаемый метод сходил к оптимальному решению задачи QoS-маршрутизации на основе резервирования сетевых ресурсов за конечное число итераций (от 2 до 5). При этом число таких итераций зависело от структуры сети, объема доступных сетевых ресурсов, числа потоков и требований к уровню качества обслуживания, что подтверждено на численном примере.

Список литературы:

1. Barreiros M. QoS-Enabled Networks: Tools and Foundations. 2nd Edition / M. Barreiros, P. Lundqvist. Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, Wiley, 2016. 254 p.
2. Sziget T. End-to-End QoS Network Design: Quality of Service for Rich-Media & Cloud Networks. 2nd Edition / T. Sziget, C. Hattingh, R. Barton, K. Briley. Cisco Press, 2013. 1040 p.
3. Cisco Networking Academy, ed. Routing Protocols Companion Guide, 1st Edition Cisco Press, 2014. 792 p.
4. Lemeshko A. Mathematical Model and Method of Routing with Resources Reservation in IP/IntServ Network / A. Lemeshko, Ahmad M. Hailan, O. Yevsyeyeva // Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012). Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. – P. 325-326.
5. Lemeshko O. The increasing convergence of coordination procedure in the implementation of multipath hierarchical routing / O. Lemeshko, O. Nevzorova, A. Hailan // 2014 First International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PICS&T'2014). P. 45-48.
6. Ghosh S. Scalable QoS-based resource allocation in hierarchical networked environment / S. Ghosh, R. Rajkumar, J. Hansen, J. Lehoczy // 11th IEEE Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2005. P. 256-267.
7. Schmidt S. Scalable bandwidth optimization in advance reservation networks / S. Schmidt, J. Kunegis // 2007 15th IEEE International Conference on Networks (ICON 2007). P. 95-100.
8. Yuan X. Resource reservation mechanisms for distributed multi-path quality of service routing / X. Yuan, H. Ding, Y. Zhong, J. Zhang // Proceedings Ninth International Conference on Computer Communications and Networks, 2000. P. 9-13.
9. Ashjae, M. End-to-End Resource Reservations in Distributed Embedded Systems / M. Ashjaei, S. Mubeen, M. Behnam, L. Almeida, T. Nolte // 2016 IEEE 22nd International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), 2016. P. 1-11.
10. Zuo L. Improved Scheduling Algorithms for Single-Path Multiple Bandwidth Reservation Requests / L. Zuo, M.M. Zhu // 2016 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA, 2016. P. 1692-1699.
11. Lemeshko A.V. Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greate Number of Indices / A.V. Lemeshko, O.Yu. Evseeva, S.V. Garkusha // Telecommunications and RadioEngineering. 2014. Vol.73, No 15. P. 1339-1360.
12. Lee Y. A Constrained Multipath Traffic Engineering Scheme for MPLS Networks / Y. Lee, Y. Seok, Y. Choi, C. Kim // Proc. IEEE ICC'2002. Publisher : IEEE, New York, 2002. P. 2431-2436.
13. Lemeshko O. V. Dynamics Analysis of Multipath QoS-Routing Tensor Model with Support of Different Flows Classes / O. V. Lemeshko, O. S. Yeremenko // 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST). Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Croatia, 2016. P. 225-230.
14. Kron G. Tensor analysis of networks / G. Kron. Wiley, New York, 1939. 635 p.
15. Singh M. G. Systems: Decomposition, Optimization and Control / M. G. Singh, A. Titli // Pergamon, Oxford, 1978. 645 p.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 07.03.2018