

**АДАПТАЦИЯ ТЕНЗОРНЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ
МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ К ДЕЙТАГРАММНЫМ СЕТЯМ**

**ADAPTATION OF THE TENSOR DECISIONS OF A TASK OF
MULTIPACH ROUTING TO DATA – NETWORKS**

Аннотация. Предлагается адаптация задачи многопутевой маршрутизации к дейтаграммным сетям с применением тензорных методов исследования. Представлен алгоритм решения задачи многопутевой маршрутизации для дейтаграммных сетей с использованием тензорной модели телекоммуникационной сети. На конкретном примере продемонстрирована реализация приведенного алгоритма.

Summary. The adaptation of a task of multipach routing to data - networks is offered with application of tensor methods of research. The algorithm of the decision of a task of multipach routing for data - networks is submitted with use of tensor model of a telecommunication network. The realization of the given algorithm is shown on a concrete example.

Характерной чертой развития современных телекоммуникационных систем является ориентация на предоставление услуг гарантированного качества. В условиях жесткой конкуренции различных сетевых технологий именно вопросы гарантии качества играют определяющую роль в выборе облика проектируемой мультисервисной сети. В настоящее время в телекоммуникационных сетях (ТКС) уровня *WAN (Wide-Area Network)* находят свою реализацию целый ряд технологий, благодаря наличию механизмов обеспечения заданного уровня *QoS (Quality of Service)*. К основным из них следует отнести технологии *ATM (Asynchronous Transfer Mode)*, *MPLS (MultiProtocol Label Switching)*, а также *IP (Internet Protocol)*, дополненный стандартами контроля качества *IntServ/RSVP, DiffServ/RSVP+*. Отличительной особенностью выше перечисленных технологий является тот факт, что все они базируются на полном или частичном использовании режима коммутации виртуальных каналов. И, если технология *ATM* изначально поддерживала режим виртуальных соединений, то в фрагментах *IP*-сетей, в рамках которых обеспечивается гарантированный уровень качества услуг, вынуждены были отказаться от дейтаграммного режима пакетной коммутации.

Однако, несмотря на достаточно широкое разнообразие сетевых технологий, проблема обеспечения гарантированного качества предоставляемых услуг еще далека от своего полного и окончательного решения. Присущая режиму виртуальных соединений ориентированность решений маршрутных задач на поиск одного и при том единственного пути доставки абонентского трафика между заданной парой отправитель-получатель является существенным ограничением. Единственный путь (маршрут), являясь оптимальным в рамках принятых критериев, обеспечивает загрузку лишь части доступных сетевых ресурсов. Большая же часть ресурсов сети непосредственно к решению поставленной задачи не задействуется. Такой подход, в частности, расходится с комплексными требованиями системного характера концепции *Traffic Engineering* [1], направленных на обеспечение сбалансированного использования всех ресурсов сети.

Известно, что потенциально именно дейтаграммный режим передачи данных обеспечивает предельно полную загрузку сетевых ресурсов, способствуя тем самым повышению производительности ТКС в целом. В этой связи особую актуальность приобретает задача контроля качества в дейтаграммных сетях. На комплексное решение перечисленных задач претендует стратегия многопутевой маршрутизации, обеспечивающая гарантированную доставку абонентского трафика по множеству альтернативных путей. В данной работе предлагается адаптация решений задачи многопутевой маршрутизации к дейтаграммным сетям. Для решения поставленной задачи будем опираться на тензорную модель ТКС [2 - 4], полученную с использованием математического аппарата тензорного анализа сетей Г. Крона [5]. Применение тензорного анализа сетей позволяет задействовать для получения искомых решений не только информацию функционального характера, но и сведения об особенностях структурного построения сети связи.

В рамках предложенной модели [3] структуру ТКС можно представить в виде ортогональной одномерной сети (1-сети) $G(\Psi, \Omega)$. Множество вершин $\Psi = \{\psi_i\}$, $i = \overline{1, m}$ сети G составляют маршрутизаторы, где m их общее количество в ТКС, а множество ветвей сети $\Omega = \{\sigma_{i,j}\}$,

$i, j = \overline{1, m}; i \neq j$ моделирует n трактов передачи данных (ТПД) между маршрутизаторами ТКС. Исходя из особенностей решаемой задачи, транспортная сеть может быть представлена в анизотропном пространстве-структуре в виде двухвалентного смешанного тензора $N = H \otimes T$, где $H^i = [h^1, h^2, \dots, h^i, \dots, h^n]$ – одновалентный контравариантный тензор, компоненты (координаты) h^i которого характеризуют величины информационной загрузки ТПД, измеряемых в единицах трафика (ед. т.); $T^i = [t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n]$ – одновалентный ковариантный тензор, компоненты t_i которого отражают величины временных задержек в трактах сети, измеряемых в секундах; \otimes – знак тензорного умножения; t – символ транспонирования.

Размерность дискретного пространства численно равна количеству ветвей, т.е. числу отдельных трактов передачи в ТКС. Совокупность независимых замкнутых и разомкнутых путей, проходящих по ветвям сети, образуют системы координат [2-5]. Преобразование структуры сети с сохранением численности ветвей или переход от одной совокупности независимых путей к другой трактуется как преобразование системы координат. Каждый путь ввиду своей независимости определяет в рамках введенного пространства координатную ось, а каждая структура – свою систему координат. Дополним структурный компонент модели функциональным тензорным уравнением поведения сети

$$H = L \cdot T, \quad (1)$$

где L – двухвалентный дважды контравариантный метрический тензор, координаты l^{ij} ($i, j = \overline{1, n}$) которого характеризуют величины пропускных способностей сети и измеряются в единицах трафика за секунду (ед. траф./с).

Уравнение (1) носит инвариантный характер и имеет одинаковый вид для любой сети с количеством ветвей равным n . Для каждой подобной сети выражение (1) принимает вид векторно-матричного уравнения, которое соответствует принятой к рассмотрению системе координат.

Использование тензорной модели ТКС позволяет получить решение исходной задачи на основе решения ее некоторого примитивного аналога, в рамках которого сохраняются принятые к рассмотрению структурный и функциональные инварианты, соответственно, количество ветвей сети и вид функционального уравнения (1). Сеть, соответствующая наиболее удачному представлению, с точки зрения последующего анализа, называется примитивной. Обычно в качестве примитивной выбирается сеть, состоящая из отдельных разомкнутых между собой ветвей [2-5]. Таким образом, структура примитивной сети определяет систему координат отдельных ветвей, которой отвечает функциональное векторно-матричное уравнение вида $H_v = L_v \cdot T_v$, где H_v – вектор координат тензора H , T_v – вектор координат тензора T и L_v – матрица координат метрического тензора L в системе координат ветвей сети.

В свою очередь, соединенной структуре сети соответствует система координат независимых контуров и пар узлов, общее количество которых также равно n . В этой системе координат векторно-матричное уравнение (1) имеет вид

$$H_{ku} = L_{ku} \cdot T_{ku}, \quad (2)$$

где H_{ku} , T_{ku} , L_{ku} – векторы и матрица координат, соответственно, одновалентных тензоров H , T и метрического тензора L в системе координат, которая соответствует структуре соединенной сети.

Характер тензоров, входящих в выражение (1), определяется, исходя из законов их координатного преобразования при переходе, например, от координатной системы контуров и пар узлов в систему координат отдельных ветвей сети

$$H_v = C \cdot H_{ku}, \quad (3)$$

$$T_v = A \cdot T_{ku},$$

$$L_v = C^t \cdot L_{ku} \cdot C, \quad (4)$$

где матрицы преобразования C и A связаны между собой условием ортогональности

$$C^t \cdot A = I, \quad (5)$$

где, в свою очередь, I – единичная матрица размерности $n \times n$.

В отличие от подхода, изложенного в работах [6, 7], воспользуемся ортогональным методом расчета [3]. В рамках ортогонального метода функциональное уравнение (2) удобно представить в виде

$$\begin{bmatrix} H_k \\ \dots \\ H_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ku}^1 & | & L_{ku}^2 \\ \dots & | & \dots \\ L_{ku}^3 & | & L_{ku}^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_k \\ \dots \\ T_u \end{bmatrix},$$

где H_k и T_k – контурные слагаемые векторов, соответственно, H_{ku} и T_{ku} ; H_u и T_u – узловые слагаемые тех же векторов H_{ku} и T_{ku} , а также

$$\begin{bmatrix} L_{ku}^1 & | & L_{ku}^2 \\ \dots & | & \dots \\ L_{ku}^3 & | & L_{ku}^4 \end{bmatrix} = L_{ku}.$$

Размерность слагаемых H_k и T_k соответствует количеству в сети независимых контуров и равна r . Соответственно, размерность узловых слагаемых H_u и T_u , отвечающая числу независимых пар узлов, равна k . При этом имеет место тождество [2-5] $n = r + k$.

При решении задачи многопутевой маршрутизации некоторые слагаемые векторов информационной загрузки и временной задержки предполагаются известными. В частности всегда известны величины H_u и T_k . Узловые слагаемые H_u характеризуют величины информационных потоков в узлах сети, а контурные слагаемые T_v приравниваются к нулю, гарантируя, тем самым, отсутствие контуров (циклов) в рассчитываемых маршрутах доведения абонентского трафика. Пропускные способности отдельных ветвей сети обычно известны и представляются диагональной матрицей L_v , знание которой, исходя из выражения (4), позволяет рассчитать матрицу пропускных способностей L_{ku}

$$L_{ku} = A^t \cdot L_v \cdot A. \tag{6}$$

Ввиду известных H_u, T_v и L_{ku} , получаем следующие две системы уравнений:

$$T_u = (L_{ku}^4)^{-1} H_u; \tag{7}$$

$$H_k = L_{ku}^2 T_u. \tag{8}$$

Рассчитав из выражения (8) контурные слагаемые вектора H_{ku} , можно вычислить, учитывая зависимость (3), величины информационной загрузки непосредственно ветвей сети, т.е. трактов передачи данных ТКС, определив, тем самым, решение задачи многопутевой маршрутизации.

Продемонстрируем решение задачи многопутевой маршрутизации на следующем примере. Пусть структура сети связи задана 1-сетью (рис.1), содержащей пять узлов (У1-У5) и восемь ветвей (В1-В8), определив тем самым $m = 5$, $n = 8$ и $r = k = 4$. Необходимо обеспечить передачу абонентского трафика от узла 1 к узлу 5 объемом 100 ед. т. за минимальное время. Пропускные способности ветвей сети, расположенные на главной диагонали матрицы L_v , предполагаются известными (табл. 1). Выбор базисных путей, заданных последовательностью входящих в них узлов, приведен в табл. 2.

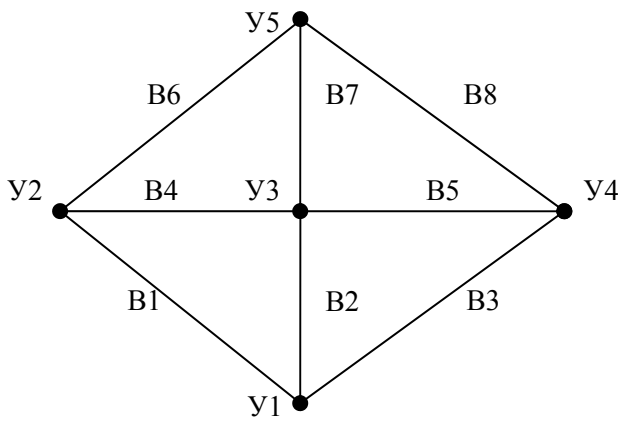


Рисунок 1 – Структурная модель телекоммуникационной сети, представленная 1-сетью

Таблица – 1

№ ветви	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Величина пропускной способности ветви (ед. траф./с)	50	90	40	50	90	70	20	40

Таблица – 2

Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ветвей сети	У1–У2	У1–У3	У1–У4	У3–У2	У3–У4	У2–У5	У3–У5	У4–У5
Контуров и пар узлов	У1–У2	У1–У3	У2–У5	У4–У5	Убывает из У5	Убывает из У2	Убывает из У3	Убывает из У4

Согласно алгебре путей, предложенной в работе [5] и использованной в работах [2,3], а также в соответствии с определенными выше базисами представления сети, матрицы прямого и обратного координатного преобразования имеют вид

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

с выполнением условия ортогональности (7). Основываясь на заданных в исходных данных координатах матрицы L_v (табл. 1), матрица пропускных способностей L_{ku} , вычисленная из выражения (9), приобретает следующую форму:

$$L_{ku} = \begin{bmatrix} L_{ku}^1 & | & L_{ku}^2 \\ \text{---} & | & \text{---} \\ L_{ku}^3 & | & L_{ku}^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 50 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 70 & 0 & | & 70 & -70 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 40 & | & 40 & 0 & -40 & 0 \\ - & - & - & - & + & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 70 & 40 & | & 130 & -70 & -40 & -20 \\ 50 & 0 & -70 & 0 & | & -70 & 170 & 0 & -50 \\ 0 & 40 & 0 & -40 & | & -40 & 0 & 170 & -90 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & -20 & -50 & -90 & 250 \end{bmatrix}$$

Согласно выражениям (7) и (8) имеем $T_u^t = [1,4; 0,71; 0,57; 0,46]$; $H_k^t = [35,6; 22,93; 48,16; 33,06]$. Непосредственное решение задачи определяют рассчитываемые из выражения (3) компоненты вектора H_v , которые характеризуют информационные нагрузки в каждой из ветвей сети,

$$H_v^t = [35,6; 41,47; 22,93; 12,56; 10,13; 48,16; 18,78; 33,06]. \quad (9)$$

Таким образом, минимальное время многопутевого доведения абонентского трафика объема 100 ед.т., равное первому слагаемому вектора T_u , составляет 1,4 секунды. В случае, если качество обслуживания оценивается минимальным временем доведения, то в данной сети абонентский трафик заданного объема будет принят к обслуживанию только с гарантированным временем доставки не менее 1,4 секунды. Для сравнения, в рамках приведенного примера доставка заданного объема трафика по кратчайшему пути В1 – В6 в метрике пропускных способностей ветвей сети была бы обеспечена не ранее чем за 3,4 секунды, что подтверждает преимущества многопутевой доставки.

Предложенное решение задачи многопутевой маршрутизации ранее претерпело свою адаптацию применительно к телекоммуникационным сетям, ориентированных на установление виртуальных соединений [6,7].

Результатом адаптации тензорных решений задачи многопутевой маршрутизации к действующим сетям должна стать сводная маршрутная таблица вида $M = \|\phi_i^j\|$, $i, j = \overline{1, m}$, где ϕ_i^j –

маршрутные переменные, определяющие долю информационного трафика, передаваемого j -му маршрутизатору сети, от общей нагрузки, поступившей на i -й маршрутизатор.

Окончательное решение (9), полученное с помощью выражения (3) и представленное вектором H_v , определило следующий вид сводной маршрутной таблицы (табл. 3) для обеспечения многопутевой доставки абонентского трафика объемом 100 ед. т. от первого маршрутизатора к пятому за 1,4 с.

В виду того, что пятый маршрутизатор является в рассматриваемом примере получателем данных и в транзите трафика участия не принимает, то пятая строка таблицы маршрутизации (табл. 3) была опущена.

Для организации многопутевой доставки строки маршрутной таблицы должны быть предварительно разосланы соответствующим маршрутизаторам сети для распределения принятого к обслуживанию абонентского трафика. При сервисе каждого последующего трафика содержание таблицы будет претерпевать модификацию в соответствии с выше предложенным алгоритмом маршрутизации.

В заключении стоит сделать следующие важные выводы:

Во-первых, требованиям комплексного характера, направленных на повышение качества обслуживания за счет сбалансированной загрузки всех имеющихся сетевых ресурсов, отвечает многопутевая стратегия маршрутизации с контролем качества.

Таблица – 3

Номера узлов сети	1	2	3	4	5
1	0	0,356	0,415	0,229	0
2	0	0	0	0	1
3	0	0,3	0	0,24	0,46
4	0	0	0	0	1

Во-вторых, предложенная адаптация тензорных решений задачи многопутевой маршрутизации позволила распространить их действие на широкий круг действующих сетей.

В-третьих, получение результативного алгоритма многопутевой маршрутизации с контролем качества было обеспечено благодаря использованию тензорных модели и метода расчета телекоммуникационной сети.

Литература

1. Олифер В., Олифер Н. Искусство оптимизации трафика // Журнал сетевых решений / LAN. – 2001. – №12. – С. 38-47.
2. Поповский В.В., Лемешко А.В. Тензорный анализ в задачах системного исследования телекоммуникационных систем // Радиотехника: Всеукр. межвеж. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 125. – С. 156-164.
3. Григорьева Т.И. Тензорная модель телекоммуникационной сети // Праці УНДІРТ. – № 2 (30). – 2002. – С. 74 – 75.
4. Лемешко А.В. Особенности моделирования двухполюсной сети связи ортогональной сетью в рамках тензорного анализа // Радиотехника: Всеукр. межвеж. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 128. – С. 16-25.
5. Крон Г. Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1978. – 719 с.
6. Лемешко А.В. Реализация алгоритма многопутевой маршрутизации в современных транспортных сетях // Вісник Українського Будинку економічних та науково-технічних знань / Науково-технічний журнал. – № 1. – К.: Тов. „Знання” 2002. – С. 109-114.
7. Лемешко А.В. Тензорный синтез адаптированного алгоритма многопутевой маршрутизации с контролем качества в гибридных телекоммуникационных системах // Праці УНДІРТ, – 2002 – №2(30). – С. 69-74.