

УДК 621.391

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕНЗОРНОГО МЕТОДА ПРИ РАСЧЕТЕ ТКС, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ УЗЛОВОЙ СЕТЬЮ



[И.В. СТРЕЛКОВСКАЯ](#),

[И.Н. СОЛОВСКАЯ](#)

Одесская национальная
академия связи им. А.С. Попова

Запропоновано розв'язання задачі маршрутизації в телекомунікаційній мережі із застосуванням тензорних методів розрахунку. На конкретному прикладі продемонстровано розв'язання задачі динамічної маршрутизації в вузловій мережі пакетної комутації.

The method of routing solving problem in telecommunications networks with the use of the tensor research model is suggested. With the specific reference the approach of a routing problem in the packet switching nodal network is illustrated.

Предложено решение задачи маршрутизации в телекоммуникационной сети с применением тензорных методов расчета. На конкретном примере продемонстрировано решение задачи динамической маршрутизации в узловой сети пакетной коммутации.

Введение

Основным направлением развития телекоммуникаций сегодня является внедрение сетей нового поколения *Next Generation Network (NGN)*, архитектура которых обладает свойствами мультисервисности, многопротокольности и инвариантности к технологиям коммутации. Единая сетевая архитектура сетей *NGN* должна обеспечить совместное использование сетевых ресурсов и требуемую пропускную способность с гарантированным качеством обслуживания *QoS (Quality of Service)*. Обеспечение требуемой пропускной способности при предоставлении мультисервисных услуг в телекоммуникационных сетях (ТКС) *NGN* достигается выбором перспективного варианта прохождения трафика в сочетании с интеллектуальной маршрутизацией и использованием функций перераспределения и ограничения потоков трафика. Вопросы гарантированного качества обслуживания *QoS* играют определяющую роль при внедрении сетей *NGN* [1].

Используя тензорный анализ, получим оценки параметров сетевого трафика, значения возможных задержек, пропускной способности, взаимного влияния потоков трафика, а также оценки качества обслуживания при изменении параметров сети при переходе от одной топологии к другой с учетом используемых протоколов, интерфейсов при условии динамического развития сети [2–6].

1. Тензорная модель ТКС, представленной узловой сетью

Тензорное моделирование ТКС предполагает ее описание в метрическом пространстве. Причем, в качестве метрики может выступать интенсивность нагрузки в

каналах связи ТКС, что наглядно может быть подтверждено в ходе тензорного обобщения известной в теории телетрафика формулы Литтла:

$$h_v^i = l_v^i \tau_i^v \quad (i = \overline{1, m}), \quad (1)$$

где h_v^i – длина очереди, в которой помещаются пакеты для передачи i -м каналом связи ТКС; τ_i^v – средняя задержка пакетов в i -м канале связи ТКС; l_v^i – интенсивность трафика в i -м канале связи ТКС; m – общее число каналов связи в ТКС.

По аналогии с тензорным подходом, предложенным Г. Кроном и развитым в работах [2, 3], структура ТКС описывается одномерным симплицеальным комплексом (одномерной сетью), которая, в свою очередь, определяет дискретное m -мерное пространство. При этом ветви сети v_i ($i = \overline{1, m}$) моделируют каналы связи ТКС, а узлы сети N_j ($j = \overline{1, n}$) – маршрутизаторы ТКС.

Во введенном m -мерном пространстве произведем тензорное описание системы в рамках узловых сетей. В качестве информативных систем координат (СК) будут введены в рассмотрение две координатные системы. Первая – система координат ветвей сети, а вторая – система координат узловых пар η_k ($k = \overline{1, \rho}$) сети. В системе координат ветвей сети необходимо рассчитать неизвестные величины – загруженность пакетами буферов очередей на маршрутизаторах и их временные задержки в каждом канале связи ТКС. В системе координат узловых пар проекции тензора H определяют исходные данные для решения расчетных задач – исходную длину очереди на маршрутизаторе-отправителе.

В узловых сетях в качестве воздействующей (возбуждающей) переменной в уравнении (1) выступает величина h_v^i , а в качестве переменной отклика – задержка τ_i^v . Тогда уравнение (1) можно представить в тензорном виде

$$H = L T, \quad (2)$$

где L – дважды контравариантный тензор интенсивностей трафика в базисных путях сети, которое в СК ветвей примет форму

$$H_v = L_v T_v, \quad (3)$$

где $L_v = \|l_v^{ij}\|$ – квадратная матрица интенсивностей трафика в ветвях сети m -го порядка, которая имеет диагональную структуру.

Уравнение (2) в СК узловых пар имеет вид

$$H_\eta = L_\eta T_\eta, \quad (4)$$

где T_η , H_η и L_η – проекции тензоров T , H и L в базисе узловых пар, причем

$$H_\eta = \begin{bmatrix} h_\eta^1 \\ h_\eta^2 \\ \vdots \\ h_\eta^i \\ \vdots \\ h_\eta^\rho \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad T_\eta = \begin{bmatrix} \tau_1^\eta \\ \tau_2^\eta \\ \vdots \\ \tau_i^\eta \\ \vdots \\ \tau_\rho^\eta \end{bmatrix}$$

– векторы, соответственно, длин очередей и задержек передачи пакетов в узловых парах сети, а L_η – матрица интенсивностей трафика в СК узловых пар сети, а ρ – ранг сети.

Тензорный характер геометрических объектов T , H и L по отношению к введенным СК подтверждается линейным характером преобразования их проекций при смене координатной системы рассмотрения

$$T_v = B_\eta^t T_\eta, \quad L_\eta = B_\eta L_v B_\eta^t \quad \text{и} \quad H_\eta = B_\eta H_v.$$

где t – знак транспонирования матрицы.

Вектор H_v^+ – вектор возбуждения размерности m , одна из координат которого задает исходный размер очереди передаваемых пакетов h^{ucx} между заданной парой узлов сети.

II. Тензорный метод расчета ТКС

Рассмотрим следующую задачу. Пусть задана исходная структура телекоммуникационной сети, состоящая из n узлов, представленных маршрутизаторами, связанных m ветвями – трактами. Задана пропускная способность в ветвях сети, представленная в виде координат матрицы L_v и направления передачи – исток и сток. Известна длина исходной пакетной очереди между заданной парой узлов, заданная в виде координат вектора H_v^+ . Необходимо рассчитать минимальную задержку передачи пакетов из очереди на исходящем узле, а также загруженности очередей на транзитных узлах сети.

Для расчета минимальной задержки передачи пакетов из очереди на исходящем узле и загруженности очередей на всех транзитных узлах сети (нахождение вектора H_v), рассмотрим модель структуры сети, которая содержит пять узлов $n = 5$, которые соединяют восемь ветвей $m = 8$, показанную на рис. 1. С помощью анализа структуры исходной сети, определяем необходимость введения мнимой ветви в направлении передачи пакетов – направление $N_5 \Rightarrow N_2$.

На структурной схеме сети (рис. 1) сплошными линиями выделены реальные ветви сети, а пунктирной – мнимая ветвь направления $N_5 \Rightarrow N_2$, для которого необходимо обеспечить многопутевую передачу пакетов из очереди длиной 100 пакетов. Таким образом, полюсами сети являются пятый и второй узлы. Отсутствие реальной

ветви в анализируемом направлении передачи подразумевает введение дополнительной мнимой ветви с нулевой загруженностью [7].

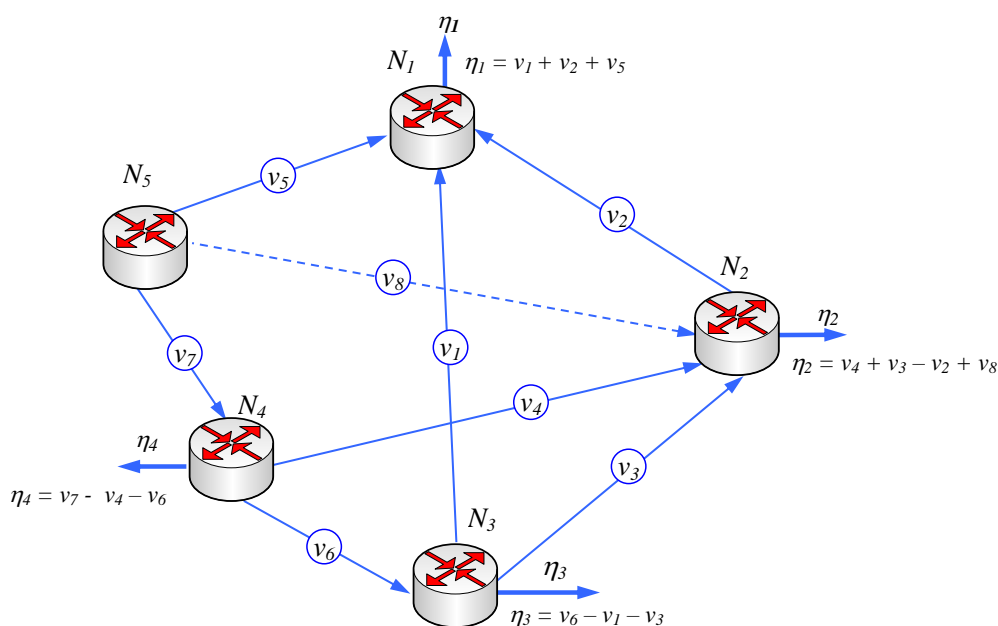


Рис. 1. Структурная схема узловой сети

Пропускные способности направлений известны и приведены в табл. 1.

Табл. 1. Пропускные способности направлений связи узловой сети

Направление связи	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
Пропускная способность	100	200	200	300	200	300	100	0

При решении задачи известно: структура сети, направления передачи, пропускная способность в направлениях и размер исходной очереди пакетов. Согласно заданной структурной схеме узловой сети (рис. 1), выбираем исходящий узел в качестве опорного и определяем остов сети, относительно которого производим выбор базисных разрезов, представленных узловыми парами в сети. Зависимость между узловыми парами $\eta_k, k = \overline{1,4}$ и ветвями сети $v_k, k = \overline{1,8}$ имеет вид

$$\begin{cases} \eta_1 = v_1 + v_2 + v_5; \\ \eta_2 = v_4 + v_3 - v_2 + v_8; \\ \eta_3 = v_6 - v_1 - v_3; \\ \eta_4 = v_7 - v_4 - v_6. \end{cases}$$

Согласно структурной модели сети и заданных направлений передачи формируем базисную матрицу разрезов (узловых пар) B_η сети:

$$B_{\eta} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Известна также длина исходной пакетной очереди между заданной парой узлов направления $N_5 \Rightarrow N_2$ длиной 100 пакетов, заданная в виде координат вектора H_v^+ . Тогда вектор возбуждения ветвей сети имеет вид:

$$H_v^+ = (0 \ 0 \ 0 \ 100)^t. \quad (6)$$

Известны также пропускные способности в ветвях сети (табл.1), которые представлены в виде координат диагональных элементов матрицы L_v (3):

$$L_v = \begin{pmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 300 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 300 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Решение задачи динамической маршрутизации в узловой сети пакетной коммутации состоит в нахождении минимальной задержки передачи пакетов из очереди на исходящем узле T_v и определении загрузки очередей на всех транзитных узлах сети, что подразумевает нахождение вектора H_v (3).

Этап первый. Определим загрузку узлов сети передаче исходной пакетной очереди направления $N_5 \Rightarrow N_2$. Производим расчет проекции тензора H_{η} в системе координат базисных узловых пар:

$$H_{\eta} = B_{\eta} H_v^+. \quad (8)$$

Согласно выражениям (5), (6), (8) получаем:

$$H_{\eta} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 100 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Этап второй. Рассчитаем матрицу пропускных способностей узлов сети. Определим проекции дважды контравариантных тензоров в системе координат узловых пар:

$$L_{\eta} = B_{\eta} L_v B_{\eta}^t. \quad (10)$$

В соответствии с выражениями (5), (7) и (10) находим матрицу L_η :

$$L_\eta = \begin{pmatrix} 500 & -200 & -100 & 0 \\ -200 & 700 & -200 & -300 \\ -100 & -200 & 600 & -300 \\ 0 & -300 & -300 & 700 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Этап третий. Определяем величину задержки пакетов на каждом узле сети T_η . Рассчитываем проекции ковариантных тензоров, в системе координат базисных узловых пар, вычисляя обратную матрицу $[L_\eta]^{-1}$, находим значение вектора T_η (4):

$$T_\eta = [L_\eta]^{-1} H_\eta. \quad (12)$$

Согласно формуле (12), определим вектор T_η :

$$T_\eta \approx \begin{pmatrix} 0.0038 & 0.0029 & 0.0029 & 0.0025 \\ 0.0029 & 0.0052 & 0.0043 & 0.0041 \\ 0.0028 & 0.0043 & 0.0057 & 0.0043 \\ 0.0025 & 0.0041 & 0.0043 & 0.0050 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.375 \\ 0.296 \\ 0.286 \\ 0.249 \end{pmatrix}.$$

Этап четвертый. Находим минимальное время доставки пакетов из очереди на исходящем узле. Для этого рассчитаем проекции ковариантных тензоров T в системе координат ветвей сети:

$$T_v = B_\eta^t T_\eta. \quad (13)$$

Находим координаты вектора T_v для каждой ветви рассматриваемой модели сети согласно выражениям (5) и (12), (13):

$$T_v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.375 \\ 0.296 \\ 0.286 \\ 0.249 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.089 \\ 0.079 \\ 0.010 \\ 0.047 \\ 0.375 \\ 0.037 \\ 0.249 \\ 0.296 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Этап пятый. Определим порядок загруженности очередей пакетами на узлах сети, определив координаты вектора H_v . Находим проекции тензора H_v в системе координат ветвей сети, определяя окончательное решение задачи (3):

$$H_v = (8.90 \ 15.80 \ 2.00 \ 14.10 \ 75.00 \ 11.10 \ 24.90 \ 0)^t.$$

Таким образом, минимальное время многопутевой передачи пакетов из очереди условной длиной 100 пакетов в направлении от пятого узла ко второму приблизительно составляет 0,296 с. Нетрудно проверить, что эта задержка является одинако-

вой для всех возможных путей доставки фрагментов пакета исходной длины. Например, путь $N_5 \mapsto N_4 \mapsto N_2$ или путь $N_5 \mapsto N_4 \mapsto N_3 \mapsto N_2$. На рис. 2 представлены результаты решения задачи и указаны загруженность очереди (в числителе) и средняя задержка пакетов (в знаменателе).

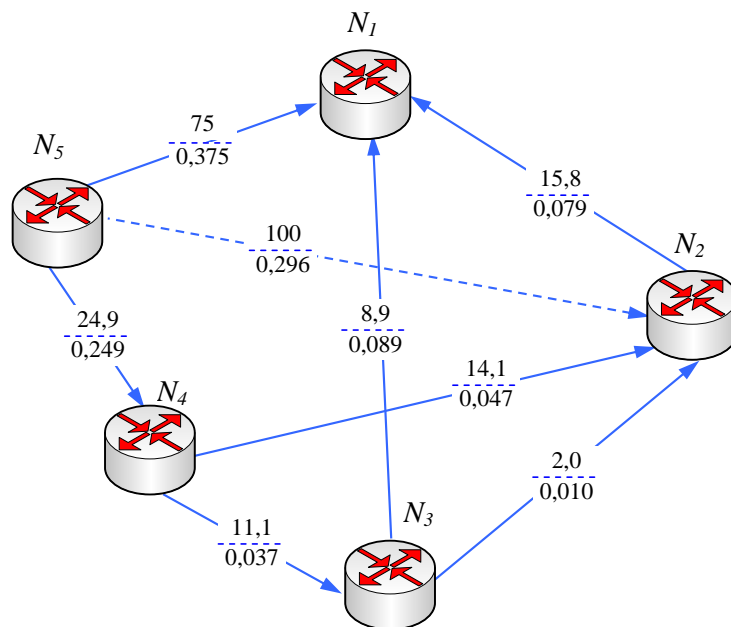


Рис. 2. Характеристики узловой сети пакетной коммутации

Таким образом, если требуемая задержка доставки пакетов составляет не менее 0,296 с, то трафик принимается к обслуживанию сетью, в противном случае получает отказ. Применение тензорного метода расчета позволило обеспечить получение в аналитическом виде результатов, гарантирующих минимальное время доставки.

Выводы

1. Продемонстрирована практическая реализация тензорного метода к моделированию телекоммуникационных систем, показана возможность совместного математического моделирования структурных свойств и функциональных характеристик с помощью специального способа задания системы координат и свойства инвариантности тензора, где инвариантом является значение трафика в каждый конкретный момент времени.

2. Применение тензорных методов расчета позволило обеспечить получение в аналитическом виде результатов, гарантирующих минимальное время доставки пакетов в узловой сети.

3. Показано, что в рамках пакетных сетей могут быть выполнены оптимизационные процедуры по наиболее рациональному использованию ресурсов, и одновременно решена задача обеспечения параметров качества обслуживания.

4. Продемонстрированная методика решения сетевых задач дает возможность применять тензорные методы для решения различных телекоммуникационных задач, например, решения задач сетевого управления трафиком.

Список литературы:

1. Росляков А.В. Сети следующего поколения NGN / Под редакцией А.В. Рослякова. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 424 с.
2. Поповский В. В., Стрелковская И. В., Григорьева Т. И. Методы теории моделей в задачах анализа и синтеза телекоммуникационных сетей // Междунар. форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития»: Сб. научн. трудов. – Харьков: АН ПРЭ, ХНУРЭ, 2002. – С. 400–401.
3. Поповский В.В., Лемешко А.В. Тензорный анализ в задачах системного исследования телекоммуникационных систем // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып.125. – С. 156–164.
4. Григорьева Т.И. Тензорная модель телекоммуникационной сети // Праці УНДІРТ, 2002. – № 2 (30). – С. 74–75.
5. Лемешко А.В., Григорьева Т.И. Адаптация тензорных решений задачи многопутевой маршрутизации к дейтаграммным сетям // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2003. – № 1. – С. 72–76.
6. Стрелковская И.В., Григорьева Т.И. Применение теории моделей и тензорного анализа при моделировании телекоммуникационных систем // Радиотехника: Всеукр. науч.-техн. сб., – 2007. – Вып. 148, – С. 102–106.
7. Рогинский В. Н., Харкевич А.Д. Теория сетей связи: Учебник для вузов связи. – М.: Радио и связь, 1981. – 192 с.