УДК 621.391.28

Евсеева О.Ю., к.т.н., докторант, Харьковский нац. унив-т радиоэлектроники

ТЕНЗОРНАЯ МОДЕЛЬ ГАРАНТИРОВАННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМИРОВАННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ В ТКС

Евсєєва О.Ю. Тензорна модель гарантованого забезпечення нормованих показників якості обслуговування в ТКМ. Пропонується часова тензорна модель телекомунікаційної системи (ТКС), яку подано в рімановому просторі ортогональною однопродуктовою двополюсною мережею. Характерною рисою моделі, що пропонується, на відміну від раніше отриманих, є введення системи координат базисних контурів та базисних перетинів. В рамках такої моделі було формалізовано вимоги щодо якості обслуговування в термінах міжконцевої затримки передачі даних та затримки передачі по окремих підмережах між парою відправник-отримувач з урахуванням потокового характеру трафіка.

Евсеева О.Ю. Тензорная модель гарантированного обеспечения нормированных показателей качества обслуживания в ТКС. Предлагается временная тензорная модель телекоммуникационной системы (ТКС), представленная в римановом пространстве ортогональной однопродуктовой двухполюсной сетью. Отличительной от ранее полученных чертой предлагаемой модели является введение системы координат базисных контуров и базисных сечений. В рамках данной модели были формализованы требования к качеству обслуживания в терминах межконцевой задержки передачи данных и задержки передачи по отдельным подсетям между парой отправитель-получатель с учетом потокового характера трафика.

Yevsyeyeva O.Yu. **Tensor model of ensuring specified rates in TCS.** A temporary tensor model of TCS represented as orthogonal one- product bipolar network in Riemannian space is proposed. Characteristic feature of this model as against of those obtained before is the introduction of co-ordinates of basic circuit and basic intercections. In the context of this model the requirements for QoS were determined in terms of end-to-end data transmission delays and subnets transmission delays between a pair of sender-reciever taking into account the nature of flow traffic.

Введение

Четко определившиеся за последнее десятилетие тенденции развития телекоммуникационных систем (ТКС) указывают на необходимость неразрывного рассмотрения современной ТКС в контексте ее способностей касательно гарантированного обеспечения требуемого качества обслуживания (Quality of Service, QoS). Требования пользователей относительно приемлемого уровня качества обслуживания количественно находят свое выражение в значениях минимально или максимально допустимых показателей QoS и оформляются в виде договора об уровне обслуживания с оператором связи (Service Level Agreement, SLA). Как правило, эти значения отображают требования к результирующему (сквозному) качеству обслуживания «из конца в конец» [1]. Однако в случае передачи трафика через сети нескольких операторов связи (рис.1), возникает необходимость согласованного решения задач обеспечения гарантированного QoS в пределах каждого из них.

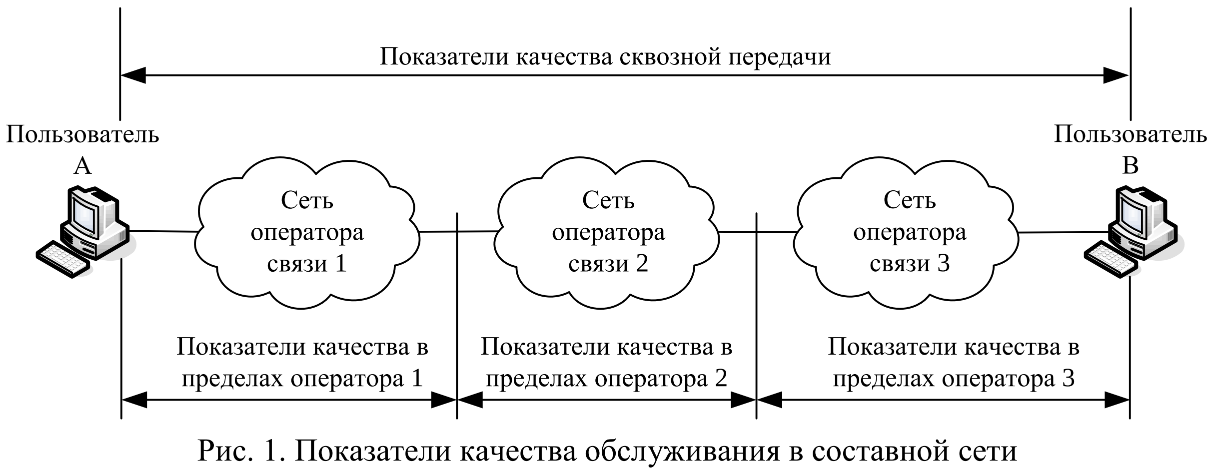

Рис. 1. Показатели качества обслуживания в составной сети

Решение задачи распределения трафика и сетевых ресурсов в условиях наличия требований к значениям показателей QoS в каждой отдельной посети, а так же с учетом динамического характера SLA предполагает наличие математических моделей, обеспечивающих максимально полное описание ТКС. Некоторые шаги в направлении решения задачи обеспечения QoS в условиях динамических SLA были предприняты в рамках тензорных моделей [2, 3]. Полученные с их помощью решения обеспечивают выполнение только требований относительно сквозных показателей, что достигается средствами многопутевой маршрутизации [2] и динамического перераспределения канальных и буферных ресурсов [3]. Однако вопрос обеспечения норм по отдельным подсетям в данных моделях не был затронут.

В этой связи представляется актуальной задача совершенствования тензорных моделей ТКС с их переориентацией на решение задач обеспечения QoS в рамках заданных норм по отдельным подсетям.

Геометризация структуры ТКС

В качестве перспективного направления расширения функциональности тензорных моделей может рассматриваться использование новых типов пространств и систем координат в них на этапе геометризации структуры ТКС, который является первым и определяющим этапом создания подобного рода моделей.

Важность самого понятия пространства в рамках аппарата тензорного анализа определяется рассмотрением процессов информационного обмена в ТКС как протекающих в дискретном пространстве-структуре, что является спецификой именно данного подхода. В зависимости от того, что принимается за отправную точку при описании пространства, в котором рассматривается ТКС, выделяются различные его типы. Так основываясь на трудах [4, 5, 6] были введены и затем успешно использованы применительно к телекоммуникационным сетям пространства контуров, узловых пар, разомкнутых путей. Их введение позволило формализовать и решить достаточно широкий спектр сетевых задач, начиная от задачи многопутевой маршрутизации одиночных пакетов, потокового трафика с гарантированным качеством обслуживания как по одному, так и по нескольким показателям QoS и заканчивая задачами структурно-функционального синтеза ТКС.

С целью решения задачи обеспечения норм на показатели качества обслуживания по отдельным участкам сети, заданной одномерной сетью $G(n,m)$, где n и m – количество его ребер и узлов соответственно, в рамках тензорного подхода введем новое n-мерное ортогональное пространство контуров и сечений, где системой координат будет множество $\mu=(n-m+1)$ базисных контуров и множество $\rho=(m-1)$ базисных сечений относительно некоторого выбранного дерева T.

В рамках аппарата тензорного анализа ключевым моментом является возможность перехода между проекциями одного и того же тензора, полученными в системах координат разных пространств. Законы координатного преобразования при переходе от одного базиса (в одном пространстве) к другому (в другом пространстве) строятся с использованием соответствующих матриц прямого и обратного координатного преобразования. В случае перехода между базисами пространства контуров и сечений $W^G_{\pi\omega}$ и пространства W^G_{ν}, образованного n отдельными ветвями одномерной сети G, законы координатного преобразования будут иметь вид

$$g^G_{\nu}=A^{\pi\omega}_{\nu}g^G_{\pi\omega}, \tag{1}$$

$$g^G_{\pi\omega}=C^{\nu}_{\pi\omega}g^G_{\nu}, \tag{2}$$

где g_{ν}^{G}, $g_{\pi\omega}^{G}$ – множества базисов (базисных векторов) пространств W_{ν}^{G} и $W_{\pi\omega}^{G}$ сети G относительно дерева T.

Здесь матрицы координатного преобразования строятся по следующему принципу (по аналогии с матрицами координатного преобразования, используемыми Кроном и Анго [4,5]):

$$A_{\nu}^{\pi\omega} = \begin{bmatrix} B_{\pi}^{*T} & B_{\omega}^{T} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

$$C_{\pi\omega}^{\nu} = \begin{bmatrix} B_{\pi}^{T} & B_{\omega}^{*T} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где B_{π}, B_{ω} – матрицы базисных векторов подпространств контуров W_{π}^{G} и сечений W_{ω}^{G} соответственно, размерности которых равны $(n-m+1)\times n$ и $(m-1)\times n$;

B_{π}^{*} – матрица базисных контуров, в которой ненулевыми (единичными) являются только элементы, соответствующие ветвям-хордам относительно выбранного дерева T,

$$b_{k,j}^{\pi} = \begin{cases} 1, & \text{если j-я ветвь является элементом базисного контура k и} \\ & \text{является хордой относительно выбранного дерева;} \\ 0 & \text{– во всех остальных случаях;} \end{cases}$$

B_{ω}^{*} – матрица базисных сечений, в которой ненулевыми (единичными) являются только элементы, соответствующие ветвям выбранного дерева T,

$$b_{k,j}^{\omega} = \begin{cases} 1, & \text{если j-я ветвь является элементом базисного} \\ & \text{сечения k и входит в состав дерева;} \\ 0 & \text{– во всех остальных случаях.} \end{cases}$$

Например, для одномерной сети G (рис. 2) и выбранного в ней дерева $\{v_2, v_3, v_5, v_6, v_7\}$, относительно которого базисными являются множества контуров $\{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}$ и сечений $\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5\}$, матрицы прямого и обратного координатного преобразования имеют вид:

$$A_{\nu}^{\pi\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_{\pi\omega}^{\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

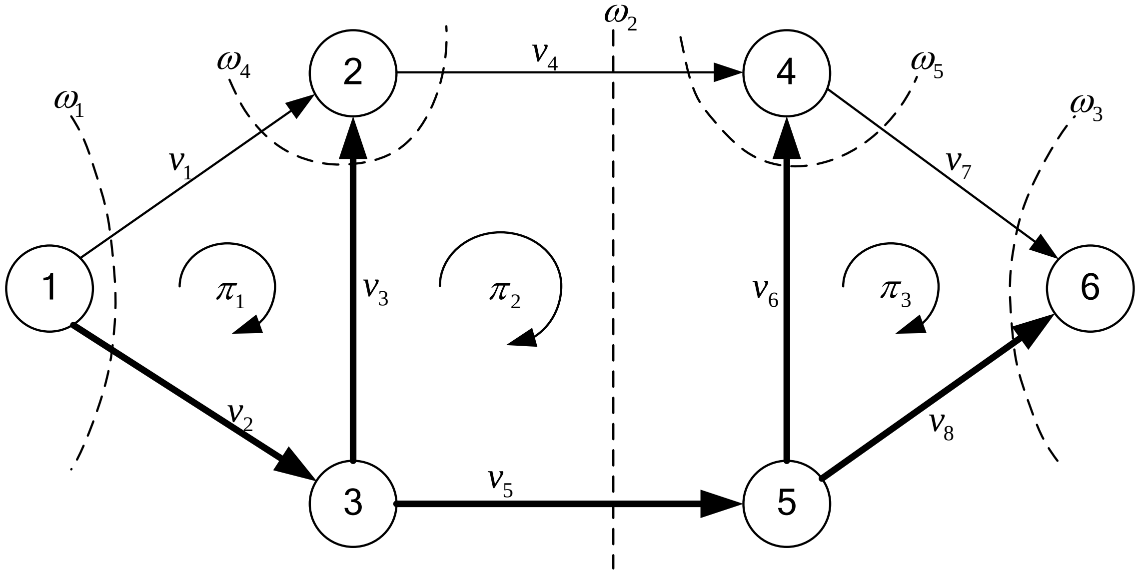

Рис. 2. Пример одномерной сети и ее система базисных контуров и сечений

Временная тензорная модель ТКС в пространстве контуров и сечений

Тензорная модель телекоммуникационной системы полностью определяется через совокупность таких геометрических объектов: тензоров (ковариантных и/или контравариантных), инвариантных величин, а так же законов преобразования проекций введенных объектов при смене системы координат рассмотрения исходного объекта – ТКС. С целью решения поставленной задачи построим тензорное описание ТКС с использованием таких тензоров: одновалентного контравариантного тензора интенсивностей передаваемого трафика Λ, компонентами которого являются λ^i, и одновалентного ковариантного тензора задержек передачи T, компонентами которого являются τ_j. Обозначим проекции данных тензоров в системе координат ветвей как Λ_v и T_v, а в пространстве контуров и сечений как $\Lambda_{\pi\omega}$ и $T_{\pi\omega}$:

$$\Lambda_v = \begin{bmatrix} \lambda_v^1 \\ \vdots \\ \lambda_v^i \\ \vdots \\ \lambda_v^n \end{bmatrix}, \qquad T_v = \begin{bmatrix} \tau_1^v \\ \vdots \\ \tau_j^v \\ \vdots \\ \tau_n^v \end{bmatrix}, \qquad \Lambda_{\pi\omega} = \begin{bmatrix} \lambda_{\pi\omega}^1 \\ \vdots \\ \lambda_{\pi\omega}^i \\ \vdots \\ \lambda_{\pi\omega}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_\pi^1 \\ \vdots \\ \lambda_\pi^{n-m+1} \\ \lambda_\omega^1 \\ \vdots \\ \lambda_\omega^{m-1} \end{bmatrix}, \qquad T_{\pi\omega} = \begin{bmatrix} \tau_1^{\pi\omega} \\ \vdots \\ \tau_j^{\pi\omega} \\ \vdots \\ \tau_n^{\pi\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1^\pi \\ \vdots \\ \tau_{n-m+1}^\pi \\ \tau_1^\omega \\ \vdots \\ \tau_{m-1}^\omega \end{bmatrix}.$$

Физический смысл компонент векторов проекций тензоров Λ и T в пространстве ветвей достаточно прост: при передаче трафика через тракт передачи, моделируемый ветвью v_j, величина интенсивности трафика в этом тракте соответствует λ_v^j, а задержка передачи через данный тракт – τ_j^v. В рамках пространства контуров величина τ_i^π соответствует величине задержки в контуре π_i. Неравенство нулю таких компонент вектора $T_{\pi\omega}$ свидетельствует о наличии зацикливаний пакетов при передаче трафика, а, следовательно, при решении практических задач закономерным является требование τ_i^π=0.

В теории графов принято, что сечение разбивает все множество узлов на два непересекающихся подмножества. Однако в рамках решения прикладных телекоммуникационных задач, применяя систему сечений, будем считать, что при помощи этих сечений сеть разбивается на ρ участков. Например, на рис. 3 при помощи двух сечений выделяются два участка. При условии многопутевого способа доставки в качестве τ_1^ω будет выступать время, за которое после передачи из узла-отправителя данные пересекут первый участок и достигнут какого-либо узла, принадлежащего следующему, второму участку. Так как на рис. 3 второму участку принадлежит только один узел (узел 2), то τ_1^ω будет соответствовать времени достижения данного узла. Аналогично, τ_2^ω содержит время достижения трафиком, переданным из узла второго участка, какого-либо узла из участка, следующего за вторым, то есть узла-получателя на рис. 3. Можно сказать, что τ_i^ω – это время прохождения через i-й участок. Заметим, что межконцевая задержка на рис. 3 равна ($\tau_1^\omega + \tau_2^\omega$). В общем случае межконцевая задержка равна сумме тех координат вектора $T_{\pi\omega}$, которые соответствуют сечениям, отделяющим получателя от отправителя.

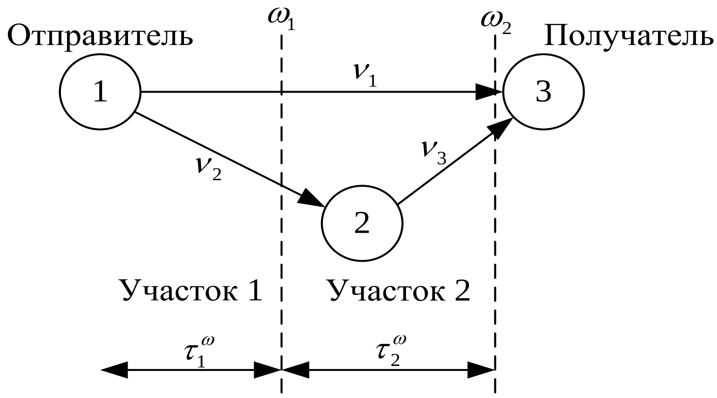

Рис. 3. Пример деления сети на участки при помощи системы сечений

Компоненты вектора проекций тензора интенсивности нагрузки в пространстве контуров и сечений $\Lambda_{\pi\omega}$, соответствующие сечениям (λ_ω^j), указывают на суммарную интенсивность трафика в данном сечении. Данные компоненты отражают выполнение закона сохранения потока в сети: интенсивность суммарного трафика в сечении, не отделяющем получателя от отправителя (сечение $\{v_2, v_3\}$ на рис.3), должна быть равна нулю, а в сечении, отделяющем получателя от отправителя (сечения ω_1 и ω_2 на рис.3), равна интенсивности трафика между отправителем и получателем.

Из теории массового обслуживания известно следующее выражение для расчета величины средней задержки передачи пакета в тракте передачи с пропускной способностью φ (пак/с)

$$\tau = \frac{1}{\varphi - \lambda}, \tag{5}$$

где λ – интенсивность трафика, пак/с.

Выражение (5) получено при условии моделирования тракта передачи системой массового обслуживания (СМО) вида M/M/1, в рамках которой предполагается, что поток, поступающий в сеть, представляет собой пуассоновский поток заявок, а длины всех пакетов независимы и распределены по показательному закону. Данное выражение может быть применено к описанию ТКС в целом, предполагая, что система представляет собой совокупность отдельных трактов передачи, каждый из которых моделируется СМО вида M/M/1, а также принимая «гипотезу о независимости», предполагающей, что при объединении нескольких потоков в тракте передачи сохраняется независимость между интервалами поступления и длинами пакетов.

Запишем выражение (5) в виде

$$\tau = e(\varphi,\lambda)\lambda, \qquad (6)$$

где $e(\varphi,\lambda)=\dfrac{1}{\lambda(\varphi-\lambda)}$ – функция пропускной способности тракта передачи и интенсивности трафика в нем, то есть контравариантных координат тензора-модели ТКС, что является признаком риманова пространства.

Используя выше введенные обозначения, выражение (6) может быть записано в виде

$$\tau_i^{v} = e_v^{ii}\lambda_v^{i}, \qquad (7)$$

где e_v^{ii} – функция пропускной способности ветви i и интенсивности трафика в ней, являющаяся элементом диагональной матрицы E_v.

Тогда в векторно- матричном виде уравнение (7) в соответствии с первым постулатом обобщения Г.Крона имеет вид

$$T_v = E_v\Lambda_v, \qquad (8)$$

где Λ_v и T_v являются векторами размерности n, E_v – матрица размерности $n\times n$. Здесь элементы Λ_v, T_v и E_v относятся к отдельным ветвям сети и представляют собой проекции соответствующих тензоров в пространстве (системе координат) ветвей.

В соответствии со вторым обобщающим постулатом Г.Крона уравнение (8) может быть приведено к тензорному виду

$$T = E\Lambda, \qquad (9)$$

где все компоненты являются тензорами.

Тензорный характер введенных геометрических объектов Λ, T, E подтверждается линейным характером их преобразований при смене системы координат и переходе между пространством ветвей и ортогональным пространством контуров и сечений (рис. 4):

$$E_{\pi\omega} = A^{T}E_vA, \qquad (10) \qquad\qquad E_v = CE_{\pi\omega}C^{T}, \qquad (11)$$

$$\Lambda_v = C\Lambda_{\pi\omega}, \qquad (12) \qquad\qquad T_v = AT_{\pi\omega}. \qquad (13)$$

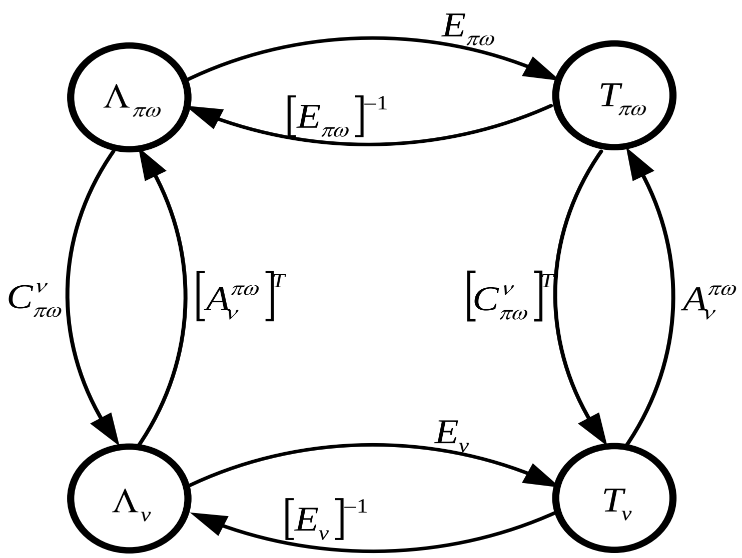

Рис. 4. Алгебраическая диаграмма категории тензорной модели ТКС, представленной сетью контуров и сечений

Представим выражение (9) для проекций в пространстве контуров и сечений в виде

$$\begin{bmatrix} T_\pi \\ -- \\ T_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\pi\omega}^{\langle 1 \rangle} & | & E_{\pi\omega}^{\langle 2 \rangle} \\ --- & + & --- \\ E_{\pi\omega}^{\langle 3 \rangle} & | & E_{\pi\omega}^{\langle 4 \rangle} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_\pi \\ -- \\ \Lambda_\omega \end{bmatrix}, \tag{14}$$

где вектора Λ_π, Λ_ω и T_π, T_ω объединяют в себе компоненты $\Lambda_{\pi\omega}$ и $T_{\pi\omega}$ соответственно, относящиеся к подпространству контуров (нижний индекс π) и к подпространству сечений (нижний индекс ω).

Из (14) имеем систему из двух векторно-матричных уравнений:

$$T_\pi = E_{\pi\omega}^{\langle 1 \rangle} \Lambda_\pi + E_{\pi\omega}^{\langle 2 \rangle} \Lambda_\omega, \tag{15}$$

$$T_\omega = E_{\pi\omega}^{\langle 3 \rangle} \Lambda_\pi + E_{\pi\omega}^{\langle 4 \rangle} \Lambda_\omega. \tag{16}$$

Как и в любой сетевой задаче естественным будет требование отсутствия петель в маршрутах доведения потоков трафика, что в рамках изложенной тензорной модели формулируется как равенство нулю контурных задержек, то есть элементов вектора T_π. В результате из (15) имеем выражение

$$\Lambda_\pi = -\left(E_{\pi\omega}^{\langle 1 \rangle}\right)^{-1} E_{\pi\omega}^{\langle 2 \rangle} \Lambda_\omega. \tag{17}$$

Подставив (17) в (16) имеем

$$T_\omega = \left(E_{\pi\omega}^{\langle 4 \rangle} - E_{\pi\omega}^{\langle 3 \rangle} \left(E_{\pi\omega}^{\langle 1 \rangle}\right)^{-1} E_{\pi\omega}^{\langle 2 \rangle} \right) \Lambda_\omega. \tag{18}$$

С целью упрощения дальнейших изложений обозначим $E'_{\pi\omega} = \left(E_{\pi\omega}^{\langle 4 \rangle} - E_{\pi\omega}^{\langle 3 \rangle} \left(E_{\pi\omega}^{\langle 1 \rangle}\right)^{-1} E_{\pi\omega}^{\langle 2 \rangle} \right)$.

Учитывая физический смысл элементов вектора Λ_ω, представим его в виде $\Lambda_\omega = \begin{bmatrix} \Lambda_\omega^{\langle \beta \rangle} \\ --- \\ \Lambda_\omega^{\langle \rho-\beta \rangle} \end{bmatrix}$, где $\Lambda_\omega^{\langle \beta \rangle}$ – вектор длиной β, все элементы которого равны $\lambda_{треб}$ – заданной величине интенсивности потока между отправителем и получателем $\Lambda_\omega^{\langle \beta \rangle} = \begin{bmatrix} \lambda_{треб} & \ldots & \lambda_{треб} \end{bmatrix}^T$, $\Lambda_\omega^{\langle \rho-\beta \rangle}$ – вектор длиной $\langle \rho - \beta \rangle$, все элементы которого равны 0, $\Lambda_\omega^{\langle \rho-\beta \rangle} = \begin{bmatrix} 0 & \ldots & 0 \end{bmatrix}^T$. Здесь β – это число сечений, отделяющих получателя от отправителя.

В отличие от Λ_ω все компоненты вектора T_ω являются неизвестными, причем на первые β из них в соответствии с их физическим смыслом накладываются ограничения, связанные с допустимыми SLA величинами задержки. В случае присутствия сети только одного оператора и использования межконцевых норм требование относительно допустимой величины сквозной задержки $T_{треб}$ во введенных обозначениях формулируется как

$$\sum_{p=1}^{\beta} \tau_p^{\omega} = T_{треб}. \tag{19}$$

Ограничения на допустимую величину задержек на каждом отдельном p-м участке формализуются в рамках используемой модели следующим образом

$$\tau_p^{\omega} = \tau_{p\,треб}^{\omega}, \ p = \overline{1,\beta}. \tag{20}$$

С целью исключения компонентов вектора T_ω, не связанных ограничениями (19) или (20), проведем следующие преобразования. Запишем выражение (18) в виде

$$\begin{bmatrix} T_\omega^{\langle\beta\rangle} \\ -- \\ T_\omega^{\langle\rho-\beta\rangle} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\pi\omega}'^{\langle 1\rangle} & | & E_{\pi\omega}'^{\langle 2\rangle} \\ --- & + & --- \\ E_{\pi\omega}'^{\langle 3\rangle} & | & E_{\pi\omega}'^{\langle 4\rangle} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_\omega^{\langle\beta\rangle} \\ -- \\ \Lambda_\omega^{\langle\rho-\beta\rangle} \end{bmatrix}. \tag{21}$$

Здесь вектор T_ω представляется как совокупность двух компонентов – $T_\omega^{\langle\beta\rangle}$, который включает в себя первые, связанные ограничением (19) или (20), β элементов данного вектора, и $T_\omega^{\langle\rho-\beta\rangle}$, объединяющего в себе все остальные $\langle\rho-\beta\rangle$ элементы.

Из (21) имеем

$$T_\omega^{\langle\beta\rangle} = E_{\pi\omega}'^{\langle 1\rangle}\Lambda_\omega^{\langle\beta\rangle} + E_{\pi\omega}'^{\langle 2\rangle}\Lambda_\omega^{\langle\rho-\beta\rangle}, \tag{22}$$

$$T_\omega^{\langle\rho-\beta\rangle} = E_{\pi\omega}'^{\langle 3\rangle}\Lambda_\omega^{\langle\beta\rangle} + E_{\pi\omega}'^{\langle 4\rangle}\Lambda_\omega^{\langle\rho-\beta\rangle}. \tag{23}$$

Откуда, из уравнения (22), учитывая $\Lambda_\omega^{\langle\rho-\beta\rangle} = [0 \ \ \dots \ \ 0]^T$, получаем

$$T_\omega^{\langle\beta\rangle} = E_{\pi\omega}'^{\langle 1\rangle}\Lambda_\omega^{\langle\beta\rangle}. \tag{24}$$

В условиях наличия норм для участков сети, выделенных сечениями, выражение (24) может быть записано в виде следующего неравенства

$$T_{треб}^{\langle\beta\rangle} \ge E_{\pi\omega}'^{\langle 1\rangle}\Lambda_\omega^{\langle\beta\rangle}, \tag{25}$$

где $T_{треб}^{\langle\beta\rangle}$ – вектор норм по отдельным участкам сети, $\tau_{p\,треб}^{\omega}$, $p = \overline{1,\beta}$.

В условиях наличия требований к сквозным параметрам передачи получим ограничение в виде

$$T_{треб} \ge I\left(E_{\pi\omega}'^{\langle 1\rangle}\Lambda_\omega^{\langle\beta\rangle}\right), \tag{26}$$

где I – единичный вектор длиной β.

При наличии заданных норм по подсетям составной сети, в состав которых входят несколько участков, ограничения будут иметь промежуточную форму между (25) и (26). Например, ограничение на задержку передачи в первой подсети, образованной узлом-отправителем на рис. 2, (или, что то же самое, на время достижения второй подсети, образованной узлами 2 и 3 и объединяющей в себе участки, выделенные сечениями ω_1 и ω_4) будет формализовано в виде $T^{\langle 1\rangle}_{треб} \geq \tau^{\omega}_1 + \tau^{\omega}_4 = \alpha\left(E'_{\pi\omega}\Lambda_{\omega}\right)$, где α =[1 0 0 1 0]. Или в общем виде

$$T^{\langle i\rangle}_{треб} \geq \alpha\left(E'_{\pi\omega}\Lambda_{\omega}\right), \tag{27}$$

где α – вектор длиной β, содержащий ненулевые (единичные) элементы, соответствующие номерам сечений, отделяющих i-ю подсеть от $(i+1)$-й.

Полученные с использованием тензорной модели ТКС выражения (25), (26) и (27) представляют собой формализацию как межконцевых, так и по подсетям, требований относительно допустимого уровня задержек и могут быть использованы в качестве дополнительных ограничений в рамках существующих методов распределения нагрузки с целью их развития в направлении обеспечения гарантированного QoS.

Пример решения задачи многопутевой маршрутизации с обеспечением нормированных требований по подсетям

Сформулированные выше ограничения были использованы в контексте задачи многопутевой маршрутизации с гарантированным качеством обслуживания для сети, представленной на рис. 2. Информация о составе сети в терминах ее подсетей и требованиях к допустимым средним значениям задержек в них отражена в табл. 1. Результат решения этой задачи представлен на рис. 5, где в каждой ветви указано (сверху вниз) ее пропускная способность (млн. пак/с), интенсивность передаваемого трафика (млн. пак/с) и средняя задержка передачи (с). Суммарная интенсивность входного трафика в направлении получателя составляла $\lambda_{треб}$= 38 млн. пак/с.

Нетрудно проверить, что в рамках полученного решения выполняется ряд требований. Во-первых, задержки во всех контурах данной сети, как и требовалось при выводе формул, действительно равны нулю τ^{π}_i=0. Например, для контура π_1, образованного ветвями v_1, v_2, v_3, причем $\pi_1 = v_1 - v_2 - v_3$, задержка равна $\tau^{\pi}_1 = 0{,}40 - 0{,}37 - 0{,}03 = 0$, для контура π_2 задержка составляет $\tau^{\pi}_2 = 0{,}30 + 0{,}03 - 0{,}08 - 0{,}25 = 0$, для π_3: $\tau^{\pi}_3 = 0{,}32 + 0{,}08 - 0{,}4 = 0$. Во-вторых, выполняются требования к допустимым значениям средних задержек (табл. 1). Так средняя задержка в первой подсети (время достижения из узла-отправителя узлов второй подсети) составляет 0,37 с для узла 3 и 0,4 с для узла 2, что соответствует допустимому значению $T^{\langle 1\rangle}_{треб} = 0{,}4$ с.

Для второй подсети, наибольшая средняя задержка имеет место при достижении узла 4 и составляет 0,30+0,03=0,33 с, что удовлетворяет допустимому значению $T^{\langle 2\rangle}_{треб} = 0{,}33$ с. Среднее время достижения узла-получателя из третьей подсети равно максимально допустимому значению $T^{\langle 3\rangle}_{треб} = 0{,}4$. Здесь четко проявляется еще одно свойство всех тензорных моделей: средняя задержка трафика в различных путях его доведения между заданной парой узлов одинакова. Так, на рис.5 задержка передачи трафика из узла 5 в узел 6 вдоль пути через узел 4 равна 0,08+0,32=0,4 с, и этому же значению равна задержка в прямом канале между данной парой узлов. В целом межконцевая задержка в полученном решении задачи многопутевой маршрутизации трафика заданной интенсивности составила 1,02 с в независимости от пути доведения.

Структура подсетей сети и допустимые величины задержек Табл. 1

Подсеть	Допустимая величина средней задержки в подсети, с	Сечения, отделяющие данную подсеть от последующей	Узлы, входящие в состав следующей подсети	Значение вектора α в (27)
1	$T_{треб}^{\langle 1\rangle} = 0,4$	ω_1	3	[1 0 0 1 0]
		ω_4	2	
2	$T_{треб}^{\langle 2\rangle} = 0,33$	ω_2	5	[0 1 0 0 1]
		ω_5	4	
3	$T_{треб}^{\langle 3\rangle} = 0,4$	ω_3	6	[0 0 1 0 0]

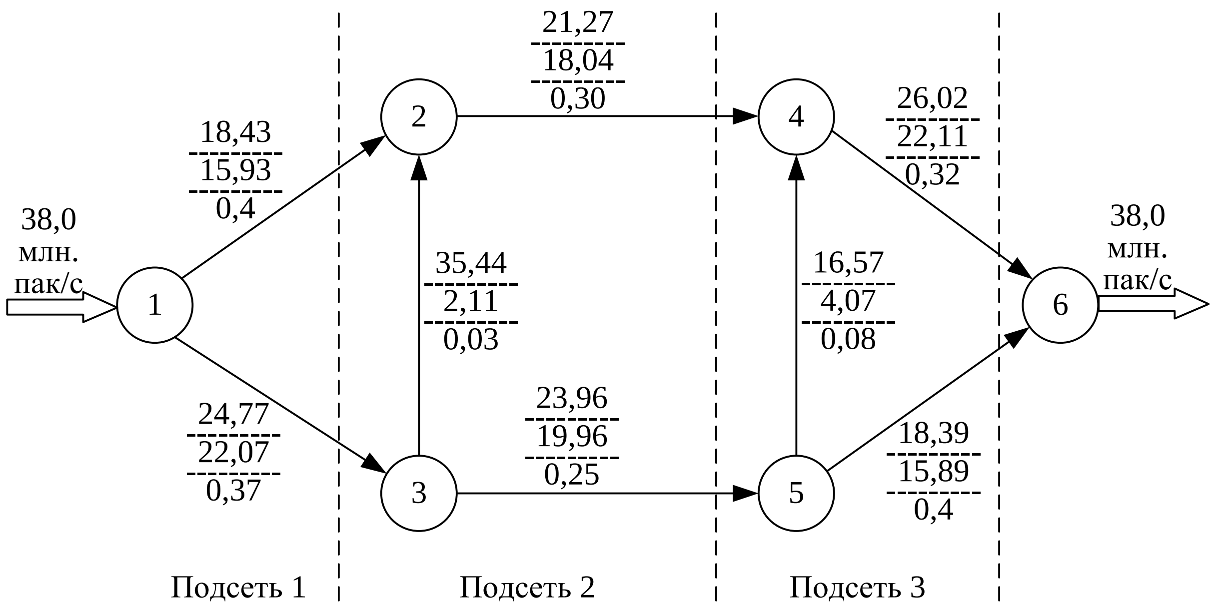

Рис. 5. Результат решения задачи многопутевой маршрутизации с ограничениями на допустимые значения задержек

Выводы

Таким образом, в работе предлагается временная тензорная модель ТКС, представленная в римановом пространстве ортогональной однопродуктовой двухполюсной сетью. Отличительной чертой предлагаемой модели, в отличие от ранее полученных, является введение системы координат базисных контуров и базисных сечений и дальнейшее рассмотрение ТКС как ортогональной сети в данном пространстве. Возможность перехода между проекциями одного тензора в различных системах координат, свойственная всем тензорным моделям, позволила связать координаты используемых в данной модели тензоров интенсивности трафика и задержки в пространствах ветвей, контуров и сечений. В результате удалось формализовать требования к качеству обслуживания в терминах межконцевой средней задержки передачи данных или средней задержки передачи по отдельным подсетям между парой отправитель-получатель с учетом потокового характера трафика.

Проведенная формализация параметров передачи (в данном случае только в терминах задержки) по подсетям позволяет решить две сетевые задачи. В прямой постановке это задача распределения трафика и соответственно сетевых ресурсов с выполнением норм (требований) на параметры качества передачи, заданных по отдельным подсетям. Другая задача предполагает наличие количественно выраженных требований к межконцевым параметрам и решение задачи распределения трафика с последующим контролем параметров качества передачи по отдельным подсетям. В результате при использовании в качестве интенсивности входящего трафика некоторых усредненных в рамках данного класса обслуживания значений, зная требования данного класса трафика к параметрам качества обслуживания, представляется возможным определение распределения этих требований по подсетям.

В целом рассмотренной в статье модели свойственны ориентация на многопутевой способ доставки, обеспечение одинаковой величины средней задержки по всему множеству маршрутов между заданной парой отправитель-получатель, исключение петель в маршрутах доведения. Введенная возможность оперирования с параметрами качества в пределах подсетей способствует повышению масштабируемости решений, получаемых с помощью тензорных моделей, и является очередным шагом в развитии моделей данного класса. Дальнейшее развитие изложенной в статье модели видится в ее обобщении на несколько показателей качества обслуживания путем перехода к моделированию ТКС мультитензором более высокой валентности.

Литература

1. Kota, Sastri L. Quality of service for broadband satellite internet - ATM and IP services // Department of Electrical and Information Engineering, Telecommunication Laboratory, University of Oulu. – OULU, 2002. – P. 272.

2. Лемешко А.В., Дробот О.А. Модель многопутевой QoS-маршрутизации в мультисервисной телекоммуникационной сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2006. – Вып. 144. – С. 16-22.

3. Дробот О.А. Комплексная модель обеспечения гарантированного качества обслуживания с реализацией динамических стратегий распределения сетевых ресурсов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – № 148. – С.43-54.

4. Крон Г. Тензорный анализ сетей. – М.: Сов. радио, 1978. – 719 с.

5. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров: Пер. с фр. – М.:Наука, 1965. – 780 с.

6. Поповский В.В., Лемешко А.В. Тензорный анализ в задачах системного исследования телекоммуникационных систем // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 125. – С. 156-164.