

Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной

Tensor Model of Multipath Routing of the Aggregated Flows with Reservation of Network Resources, Represented in Space with Curvature

Аннотация Предложена математическая модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная тензорами пространства с кривизной. Модель маршрутизации ориентирована на использование в сетях с поддержкой услуг связи гарантированного качества. Исследование модели подтвердило эффективность получаемых на ее основе решений.

Abstract The mathematical model of multipath routing of the aggregated flows with reservation of network resources, represented by tensors of space with curvature is offered. Model of routing oriented on usage in networks with support of guaranteed quality of services. The probing of model has confirmed efficiency of the decisions, received on its basis.

Введение

На протяжении последнего десятилетия в соответствии с динамикой требований пользователей подходы к постановке и решению маршрутных задач в телекоммуникационных сетях (ТКС) претерпели значительное изменение. Это, прежде всего, связано с мультисервисностью предоставляемых услуг связи и необходимостью обеспечения дифференцированных гарантий качества обслуживания – QoS (Quality of Service) [1]. В современных сетях связи стало нормой, что предоставление "hard" QoS связано так или иначе с резервированием сетевых ресурсов вдоль прокладываемого пути передачи трафика. Поэтому вновь разрабатываемые протоколы маршрутизации функционируют согласованно с сигнальными протоколами резервирования сетевых ресурсов, например, RSVP (Resource Reservation Protocol) и SCR-LDP (Signalling Constraint-based Routed Label Distribution Protocol) соответственно в сетях IP (Internet Protocol) и MPLS (Multiprotocol Label Switching), а в ATM-сетях применяется маршрутизирующий протокол PNNI (Private Network-to-Network Interface), выполняющий одновременно и функции протокола сигнализации при установлении соединений [2]. С другой стороны преобладающее положение на рынке протокольных решений занимают протоколы однопутевой маршрутизации – PNNI, OSPF (Open Shortest Path First) и IS-IS (Intermediate System-to-Intermediate System), которые весь трафик от отправителя к получателю маршрутизируют вдоль одного, обычно кратчайшего в выбранной метрике, пути. Причина этого кроется, во-первых, в относительной простоте организации процесса резервирования сетевых ресурсов, а во-вторых, в отсутствии приемлемых решений задач многопутевой маршрутизации, которые остро востребованы, в том числе, в рамках концепции TE (Traffic Engi-

neering), реализация которой направлена на обеспечение сбалансированной загрузки всех имеющихся сетевых ресурсов.

С целью получения многопутевых решений комбинаторные модели поиска кратчайшего пути, положенные в основу большинства протоколов однопутевой маршрутизации, в настоящее время существенно видоизменяются [3], что также характерно для математических моделей решения маршрутных задач, представленных сетями массового обслуживания [4]. Однако в рамках данных подходов расчет множества маршрутов обслуживания трафика подчинено лишь самоцели – реализации многопутевой стратегии маршрутизации, а вот задачи контроля качества вдоль проложенных путей остаются нерешенными. По этой причине актуальной представляется научная задача, связанная с разработкой моделей, методов и протоколов многопутевой маршрутизации с поддержкой услуг связи гарантированного качества.

Для решения поставленной задачи путем резервирования сетевых ресурсов для каждого пользовательского трафика в отдельности хорошо себя зарекомендовал тензорный подход [5, 6], связанный с применением методов тензорного анализа сетей [7]. Однако низкая масштабируемость подобных решений вызвала необходимость расширения тензорных моделей маршрутизации для агрегированных потоков, т.е. объединенных в единый поток однотипных пользовательских трафиков, как правило, с одинаковыми требованиями к гарантиям качества своего обслуживания. По этой причине целью данной статьи является разработка тензорной модели многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов и поддержкой QoS.

Тензорная модель ТКС, представленная одномерной сетью

В рамках тензорного анализа сетей [7] при моделировании структуры ТКС одномерным симплицальным комплексом вводится понятие одномерной сети $S = (U, V)$, состоящей из двух множеств: конечного множества $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$ нульмерных симплексов – узлов сети, и конечного множества $V = \{v_j, j = \overline{1, n}\}$, одномерных

симплексов – ветвей сети. Узлы сети моделируют коммутаторы, маршрутизаторы (Мр) ТКС, а ветви – тракты передачи. Упрощенным представлением одномерной сети является ориентированный граф, поэтому при анализе одномерных сетей вводимые ниже важные сетевые термины и понятия, в ряде случаев, имеют близкие по смыслу аналоги в теории графов.

Путь в сети представляет собой конечную последовательность ветвей. Путь π называется контуром или замкнутым путем, если его конечные узлы одинаковы. Например, путь, проходящий последовательно по ветвям v_1, v_3 и v_2 (рис. 1) является контуром (π_1). Частным, но важным в тензорном анализе сетей случаем представления разрезающего множества является узловая пара, которая формально представляет собой два различных узла связной сети и определяется всецело инцидентными ко второму узлу ветвями. На рис. 1 узлы u_1 и u_5 определяют узловую пару под номером один (η_1), но с точки зрения разрезающих множеств узловая пара η_1 образована ветвями v_6 и v_7 . Узел u_1 , относительно которого определяются узловые пары, называется опорным.

Продуктом в сети называется однородная информационная нагрузка – пользовательский трафик, обслуживаемый ТКС. Полюсами называются те узлы сети, через которые в сеть поступает или через которые убывает из сети определенный продукт. Все остальные узлы называют внутренними. Далее основное внимание будет уделено двухполюсным однопродуктовым сетям, т.е. сетям в которых во множестве узлов выделяется два полюса: один исток и один сток, между которыми обслуживается (передается) один тип трафика – продукт сети.

Важным моментом при рассмотрении путей в сети, контуров и узловых пар, является то, что с любым из них тесно связано понятие "направление" или "ориентация". Причем для контура ориентация устанавливается за или против хода часовой стрелки, а для разрезающих множеств (узловых пар) направление задается от одной образованной ими (разрезанной) подсети к другой. Например, контур π_1 имеет ориентацию противоположную контуру π_2 , а разрез (узловая пара) η_1 совпадает с ориентацией образующих его ветвей v_6 и v_7 . Стоит отметить, что ориентация контуров и узловых пар может задаваться исследователем в общем случае произвольно, и не связана с физикой моделируемой системы как в случае задания ориентированных

графов.

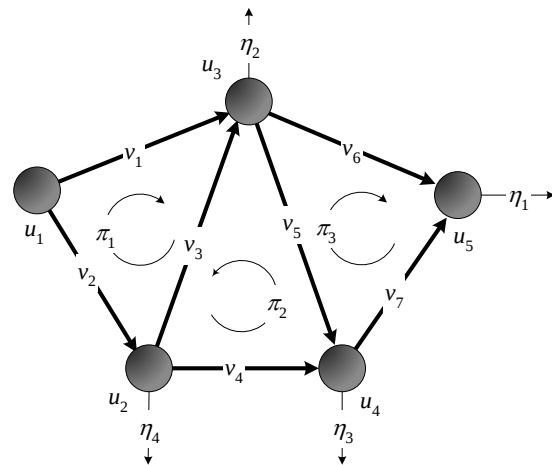


Рисунок 1 – Структурная модель ТКС, представленная одномерной сетью

Пусть сеть S содержит n ветвей, m узлов и α несвязных компонент. Тогда ранг сети $\rho(S)$ и цикломатическое число $\mu(S)$ определяют в ней соответственно число базисных контуров и узловых пар

$$\rho(S) = m - \alpha; \quad (1)$$

$$\mu(S) = n - m + \alpha, \quad (2)$$

обуславливая тождество

$$n = \rho(S) + \mu(S).$$

Структура сети определяет пространство, размерность которого соответствует числу ветвей сети [5, 7]. При этом системы координат (СК) образуют множества базисных контуров и узловых пар, а в роли координатных осей выступают сами базисные контуры и узловые пары. Преобразование структуры сети с сохранением числа ее ветвей может трактоваться как изменение системы координат ее рассмотрения. Например, для ТКС, структура которой представлена топологической моделью одномерной сети (рис. 1), содержащей пять узлов ($u_1 \div u_5, m = 5$) и семь ветвей ($v_1 \div v_7, n = 7$), размерность введенного пространства-структуры равна семи. Вследствие справедливости выражений (1) и (2) число несвязных подсетей (α) равно единице, количество базисных узловых пар (ρ) соответствует четырем, а численность базисных контуров (μ) равняется трем, что определяет в сумме общее число ветвей в сети.

Во введенном n -мерном пространстве произведем тензорное описание ТКС с помощью одновалентного тензора интенсивностей трафиков Λ с компонентами λ^i , одновалентного тензора временных задержек передачи пакетов T с компонентами τ_j , а также тензора второй валентности Q , координаты которого рассчитываются исходя из выражения

$$q_j^i = \lambda^i \tau_j, (i, j = \overline{1, n}), \quad (3)$$

где λ^i – интенсивность трафика, передаваемого через i -й базисный путь, измеряемая в пакетах/с; τ_j – временная задержка передачи пакета в j -м базисном пути, измеряемая в секундах.

В прямом обозначении или безиндексной записи выражение (3) принимает вид

$$Q = \Lambda \otimes T,$$

где $\otimes$ – знак тензорного умножения.

Для обеспечения многоаспектного (многостороннего) описания ТКС в рассматриваемом n -мерном дискретном пространстве-структуре могут быть приняты во внимание целый ряд систем координат. Основное требование, которое должно удовлетворяться в процессе выбора, это информативность этих систем координат, т.е. в этих СК должны быть искомые или известные проекции различных компонент тензора Q , опираясь на которые, можно рассчитать необходимые компоненты в той или иной СК. По этой причине введем в рассмотрение две координатные системы. Первая – система координат ветвей сети, которой отвечает структура с отдельными несоединенными между собой ветвями. Вторая – система координат базисных контуров и узловых пар сети, отвечающая реальной структуре сети. Подобный выбор СК обусловлен тем, что в системе координат ветвей сети необходимо рассчитать неизвестные величины: интенсивность трафика и величину временной задержки в каждом тракте передачи ТКС. В системе координат базисных контуров и узловых пар проекции тензоров Λ и T определяют исходные данные для решения расчетных задач – интенсивность внешнего трафика λ_v^{in} и требуемую задержку передачи τ_{trb} .

При обслуживании агрегированного потока в основу функционального построения тензорной модели ТКС будет положено уравнение поведения отдельно взятого элемента системы, полученное путем моделирования каждой ветви сети системой массового обслуживания типа $M/M/1$ – одноканальной моделью с пуассоновским потоком заявок и показательным законом распределения времени обслуживания [4],

$$\tau_i^v = \frac{1}{\phi_v^i - \lambda_v^i}, (i = \overline{1, n}), \quad (4)$$

в котором ϕ_v^i – величина пропускной способности (ПС) ветви v_i (1/с), выделенная для обслуживания агрегированного потока с интенсивностью λ_v^i , τ_i^v – задержка передачи одного пакета в этой ветви.

Отличительной особенностью зависимости (4) является то, что в ней фигурирует не номинальная ПС ветви v_i , а именно выделенная, т.е. подлежащая дальнейшему резервированию, величина пропускной способности.

Подобный подход, основанный на резервировании сетевых ресурсов в интересах агрегирован-

ных потоков, является компромиссом между резервированием ресурсов для каждого конкретного пользовательского трафика и отсутствием резервирования как такового. В пользу компромиссного подхода говорит тот факт, что в настоящее время, например, в маршрутизирующих протоколах Constrained OSPF (CSPF) и IS-IS расширен перечень используемых метрик путем включения новых типов объявлений для распространения по сети информации о номинальной и нерезервированной (доступной) пропускной способности каждого тракта передачи в MPLS-сетях. Такие же расширения коснулись и протокола RSVP, которые уже прописаны рабочей группой по инженерным проблемам сети IETF (Internet Engineering Task Force) в виде соответствующих рабочих документов (Internet Draft) [2].

Для дальнейшего удобства тензорной формализации уравнения поведения системы выражение (4) представим в следующем виде

$$\lambda_v^i = (\lambda_v^i (\phi_v^i - \lambda_v^i)) \tau_i^v, (i = \overline{1, n}). \quad (5)$$

Уравнение (5) характеризует процессы информационного обмена, протекающие в отдельных элементах – ветвях сети. Исходя из постулата первого обобщения Г. Крона [7], форма записи уравнений поведения сети в целом должна соответствовать уравнению поведения отдельных элементов, что обуславливает замену системы скалярных уравнений (5) векторно-матричным уравнением вида

$$\Lambda_v = L_v T_v, \quad (6)$$

где $\Lambda_v = \begin{bmatrix} \lambda_v^1 \\ \vdots \\ \lambda_v^i \\ \vdots \\ \lambda_v^n \end{bmatrix}$ и $T_v = \begin{bmatrix} \tau_1^v \\ \vdots \\ \tau_i^v \\ \vdots \\ \tau_n^v \end{bmatrix}$ – векторы, соответ-

ственно, интенсивностей трафиков и задержек передачи пакетов в ветвях сети размерности n ; $L_v = \|l_v^{ij}\|$ – диагональная матрица размерности $n \times n$, элементы главной диагонали которой рассчитываются согласно выражению

$$l_v^{ii} = \lambda_v^i (\phi_v^i - \lambda_v^i), (i = \overline{1, n}). \quad (7)$$

Исходя из второго постулата Г. Крона уравнение поведение ТКС (6), сохраняя неизменным свой вид для различных координатных систем ее рассмотрения, принимает тензорную форму

$$\Lambda = L T. \quad (8)$$

Ввиду одинаковой размерности введенных координатных систем существуют однозначные правила преобразования координат любых геометрических объектов из одной системы координат в другую. Если эти геометрические объекты являются тензорами, то по определению [7] правила

координатного преобразования носят линейный характер и формализуемы с помощью невырожденной квадратной матрицы размера $n \times n$. Матрица контравариантного преобразования C определяется из соотношения

$$\Lambda_v = C \Lambda_{\pi\eta},$$

где Λ_v , $\Lambda_{\pi\eta}$ – представленные в виде векторов размерности n проекции тензора Λ во введенных выше координатных системах отдельных ветвей сети, а также базисных контуров и узловых пар. В свою очередь, вектор $\Lambda_{\pi\eta}$ имеет составляющие

$$\Lambda_{\pi\eta} = \begin{bmatrix} \Lambda_\pi \\ - \\ \Lambda_\eta \end{bmatrix}; \quad \Lambda_\pi = \begin{bmatrix} \lambda_\pi^1 \\ \vdots \\ \lambda_\pi^j \\ \vdots \\ \lambda_\pi^\mu \end{bmatrix}; \quad \Lambda_\eta = \begin{bmatrix} \lambda_\eta^1 \\ \vdots \\ \lambda_\eta^p \\ \vdots \\ \lambda_\eta^\rho \end{bmatrix},$$

где Λ_π , Λ_η – векторы интенсивностей трафика, возникающих в контурах сети и поступающих на ее узлы размерностей μ и ρ соответственно; λ_π^j – интенсивность трафика в контуре π_j сети; λ_η^ρ – интенсивность внешнего трафика, поступающего в сеть и убывающего из сети через узловую пару η_ρ .

Проекция тензора временных задержек T в системе координат ветвей представлена вектором T_v , а в координатной системе базисных контуров и узловых пар – вектором $T_{\pi\eta}$, имеющего размерность и следующую структуру:

$$T_{\pi\eta} = \begin{bmatrix} T_\pi \\ - \\ T_\eta \end{bmatrix}; \quad T_\pi = \begin{bmatrix} \tau_1^\pi \\ \vdots \\ \tau_j^\pi \\ \vdots \\ \tau_\mu^\pi \end{bmatrix}; \quad T_\eta = \begin{bmatrix} \tau_1^\eta \\ \vdots \\ \tau_p^\eta \\ \vdots \\ \tau_\rho^\eta \end{bmatrix}.$$

Здесь τ_j^π , τ_ρ^η – задержки передачи пакетов в контуре π_j и между парой узлов η_ρ сети. Векторы T_π и T_η имеют размерность μ и ρ соответственно. С целью устранения контуров (петель) в рассчитываемых маршрутах обслуживания трафика контурные слагаемые вектора $T_{\pi\eta}$ приравняются к нулю, т.е. $T_\pi = 0$.

Ковариантный характер тензора задержек T обуславливает следующий закон координатного преобразования:

$$T_v = A T_{\pi\eta},$$

где A – матрица ковариантного преобразования размера $n \times n$, связанная с матрицей C условием ортогональности

$$CA^t = I, \quad (9)$$

где I – единичная матрица размерности $n \times n$.

В системе координат базисных контуров и узловых пар тензорное уравнение (8) принимает вид:

$$\Lambda_{\pi\eta} = L_{\pi\eta} T_{\pi\eta}. \quad (10)$$

Согласно обратному тензорному признаку тензор L является дважды контравариантным метрическим тензором, проекции которого при смене координатной системы преобразуются следующим образом:

$$L_{\pi\eta} = A^t L_v A,$$

где L_v , $L_{\pi\eta}$ – проекции тензора L в СК ветвей сети и базисных контуров и узловых пар соответственно. Согласно выражению (7) координаты метрического тензора (L_v^{ij}) в общем случае зависят от координат точки пространства (λ_v^i). Это отличительный признак пространств с кривизной, в отличие от евклидовых пространств, рассмотренных в [5, 6].

Для успешного проведения некоторых упрощений целесообразно использовать специальную форму векторов $\Lambda_{\pi\eta}$ и $T_{\pi\eta}$, т.е. уравнение (10) удобно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \Lambda_\pi \\ - \\ \Lambda_\eta \end{bmatrix} \left\| \begin{array}{c|c} L_{\pi\eta}^{(1)} & L_{\pi\eta}^{(2)} \\ \hline L_{\pi\eta}^{(3)} & L_{\pi\eta}^{(4)} \end{array} \right\| \begin{bmatrix} T_\pi \\ - \\ T_\eta \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{где } \left\| \begin{array}{c|c} L_{\pi\eta}^{(1)} & L_{\pi\eta}^{(2)} \\ \hline L_{\pi\eta}^{(3)} & L_{\pi\eta}^{(4)} \end{array} \right\| = L_{\pi\eta}.$$

Исходя из выражения (11), имеет место соотношение

$$\Lambda_\eta = L_{\pi\eta}^{(3)} T_\pi + L_{\pi\eta}^{(4)} T_\eta. \quad (12)$$

Равенство нулю первого слагаемого, ввиду выполнения условия $T_\pi = 0$, преобразует выражение (12) к виду

$$\begin{bmatrix} \Lambda_\eta^{(1)} \\ - \\ \Lambda_\eta^{(2)} \end{bmatrix} \left\| \begin{array}{c|c} L_{\pi\eta}^{(4,1)} & L_{\pi\eta}^{(4,2)} \\ \hline L_{\pi\eta}^{(4,3)} & L_{\pi\eta}^{(4,4)} \end{array} \right\| \begin{bmatrix} T_\eta^{(1)} \\ - \\ T_\eta^{(2)} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где

$$\begin{bmatrix} \Lambda_\eta^{(1)} \\ - \\ \Lambda_\eta^{(2)} \end{bmatrix} = \Lambda_\eta; \quad \begin{bmatrix} T_\eta^{(1)} \\ - \\ T_\eta^{(2)} \end{bmatrix} = T_\eta; \quad \left\| \begin{array}{c|c} L_{\pi\eta}^{(4,1)} & L_{\pi\eta}^{(4,2)} \\ \hline L_{\pi\eta}^{(4,3)} & L_{\pi\eta}^{(4,4)} \end{array} \right\| = L_{\pi\eta}^{(4)}.$$

В выражении (13) компоненты вектора Λ_η изначально известны, при этом первый компонент $\Lambda_\eta^{(1)}$ – относится к полюсам сети, т.е. узлам, через которые трафик поступает в сеть или убывает из нее, и определяет требуемую полосу пропускания $\lambda_{\eta v}$ для трафика. Таким образом, размерность β вектора $\Lambda_\eta^{(1)}$ в рамках решаемой задачи не может быть больше двух. Второй компонент $\Lambda_\eta^{(2)}$ размерности $\langle \rho - \beta \rangle$ имеет отношение к оставшимся (внутренним) узлам сети, внешний трафик через которые ввиду двухполюсности сети по определению равен нулю. Компоненты вектора T_η по усло-

виям задачі частинно відомі – вектор $T_{\eta}^{(1)}$, що визначає вимоги до граничної затримки передачі пакета $\tau_{\text{прб}}$, а частинно ні – вектор $T_{\eta}^{(2)}$.

Компоненти матриць $L_{\pi\eta}^{(4)}$, що визначають величини ПС гілок, підлягають резервуванню, вважаються шуканими величинами.

Виходячи з виразу (13), можна отримати систему двох матричних рівнянь

$$\Lambda_{\eta}^{(1)} = L_{\pi\eta}^{(4,1)} T_{\eta}^{(1)} + L_{\pi\eta}^{(4,2)} T_{\eta}^{(2)}; \quad (14)$$

$$\Lambda_{\eta}^{(2)} = L_{\pi\eta}^{(4,3)} T_{\eta}^{(1)} + L_{\pi\eta}^{(4,4)} T_{\eta}^{(2)}. \quad (15)$$

Рівність нулю вектора $\Lambda_{\eta}^{(2)}$ дозволяє з рівняння (15) отримати вираз для розрахунку $T_{\eta}^{(2)}$, т.е.

$$T_{\eta}^{(2)} = -[L_{\pi\eta}^{(4,4)}]^{-1} L_{\pi\eta}^{(4,3)} T_{\eta}^{(1)},$$

підставляючи яке в рівняння (14), маємо

$$\Lambda_{\eta}^{(1)} \leq \left(L_{\pi\eta}^{(4,1)} - L_{\pi\eta}^{(4,2)} [L_{\pi\eta}^{(4,4)}]^{-1} L_{\pi\eta}^{(4,3)} \right) T_{\eta}^{(1)}. \quad (16)$$

Якщо в процесі розв'язання задачі на етапі побудови моделі і формування вектора Λ_{η} в якості опорного вузла вибрати один з полюсів мережі, то розмірність вектора $\Lambda_{\eta}^{(2)}$ буде рівна одиниці, т.е. $\beta = 1$. Це дозволяє в виразі (16) визначити

$$\Lambda_{\eta}^{(1)} = \lambda_{\text{вн}} \quad \text{і} \quad T_{\eta}^{(1)} = \tau_{\text{прб}}.$$

Виконання умов нерівності (16) спільно з умовою

$$0 \leq \lambda_v^i \leq \phi_v^i \quad (17)$$

гарантує задоволення вимог, що стосуються величин пропускної спроможності і часової затримки передачі пакета в мережі. Крім того, величина ϕ_v^i повинна бути обмежена зверху величиною $\phi_{\text{ном}}^i$ – номінальною ПС гілки v_i , т.е.

$$\phi_v^i \leq \phi_{\text{ном}}^i. \quad (18)$$

На основі отриманих вище результатів можна формалізувати задачу багатопутевої маршрутизації з резервуванням необхідних мережних ресурсів і підтримкою QoS в вигляді оптимізаційної задачі з критерієм, який дає мінімум цільової функції

$$W = \sum_{i=1}^n a_i \phi_v^i, \quad (19)$$

де a_i ($i = \overline{1, n}$) – вагові коефіцієнти, чисельно характеризують вартість резервування одиниць пропускної спроможності гілки v_i . В якості обмежень при мінімізації функції (19) виступають нерівності (16), (17) і (18). Ввиду аналогії сформульованої задачі і задач топологічного синтезу – вибору топології і пропускних спроможностей гілок, для її розв'язання можуть використовуватися методи М-структур, заміни гілок і др. [8].

Исследование предложенной тензорной модели ТКС

Для аналізу запропонованої моделі в якості прикладу проведемо розрахунок ТКС, структура якого представлена топологічною моделлю односторонньої мережі (рис. 1). В якості полюсів мережі виступали вузли u_1 (джерело) і u_5 (споживач). Інтенсивність обслуговуваного трафіку становила 20 л/с, а тре-

буєма затримка передачі пакетів становила 0,22 с.

Згідно орієнтації гілок, базисних контурів і вузлових пар матриць ко- і контраваріантного перетворення з виконанням умов ортогональності (9) мають наступний вигляд:

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

Результати розрахунку мережі наведені на рис. 2, причому в кожній гілці вказано (зверху вниз) її пропускна спроможність, інтенсивність передаваного трафіку і затримка передачі. В рядках табл. 1 наведені записи маршрутних таблиць на відповідних маршрутизаторах ТКС, елементи яких визначають частку вихідного трафіку, маршрутизованого на сусідній маршрутизатор.

Таблиця 1 – Записи маршрутних таблиць ТКС

Номер маршрутизатора мережі	1	2	3	4	5
Мр1	0	0,55	0,45	0	0
Мр2	0	0	0,32	0,68	0
Мр3	0	0	0	0,3	0,7
Мр4	0	0	0	0	1

Решение задачи определило распределение исходного трафика по четырем путям, причем путь $\{v_1, v_6\}$ обеспечил обслуживание трафика интенсивностью 8,75 1/с, путь $\{v_1, v_5, v_7\}$ – 0,29 (1/с), путь $\{v_2, v_3, v_5, v_7\}$ – 3,48 (1/с) и путь $\{v_2, v_4, v_7\}$ – 7,48 1/с. При этом задержка передачи пакетов вдоль каждого из них составляла 0,22 с.

Кроме того, получены результаты расчетов для двух основных стратегий маршрутизации – однопутевой и многопутевой (табл. 2). При однопутевой стратегии путь обслуживания трафика определялся как кратчайший в метрике обратной пропускной способности сети и результаты представлены вектором Λ_v^{on} . При решении задачи многопутевой маршрутизации использовалась выше предложенная тензорная модель ТКС и результаты расчета представлены вектором Λ_v^{mt} . Расчеты проводились для четырех вариантов параметров сети и обслуживаемых трафиков. Качество решений оценивалось по величине задержки передачи пакетов трафика $\tau_{прд}$.

По результатам проведенного сравнительного анализа можно сделать ряд важных выводов. Во-первых, в случае, когда интенсивность трафика невысока по сравнению с доступными ресурсами (пропускными способностями) сети ($\lambda^{in}=10$ 1/с), то реализация многопутевой стратегии маршрутизации позволяет уменьшить задержку в среднем до 20 %. Во-вторых, при соизмеримых величинах запрашиваемой и доступной ПС выигрыш многопутевой маршрутизации составлял от 80 % ($\lambda^{in}=20$ 1/с) до 93 % ($\lambda^{in}=30$ 1/с). В-третьих, при недостатке ресурсов в случае реализации однопутевой стратегии маршрутизации трафик ($\lambda^{in}=50$ 1/с) получил бы отказ в обслуживании, т.к. ограничение (16) ни по одному пути от узла u_1 к u_5 не выполняется. Использование преимуществ многопутевой маршрутизации в рамках предложенной модели позволило обслужить этот трафик с заданными показателями качества связи ($\tau_{прд}=0,25$ с).

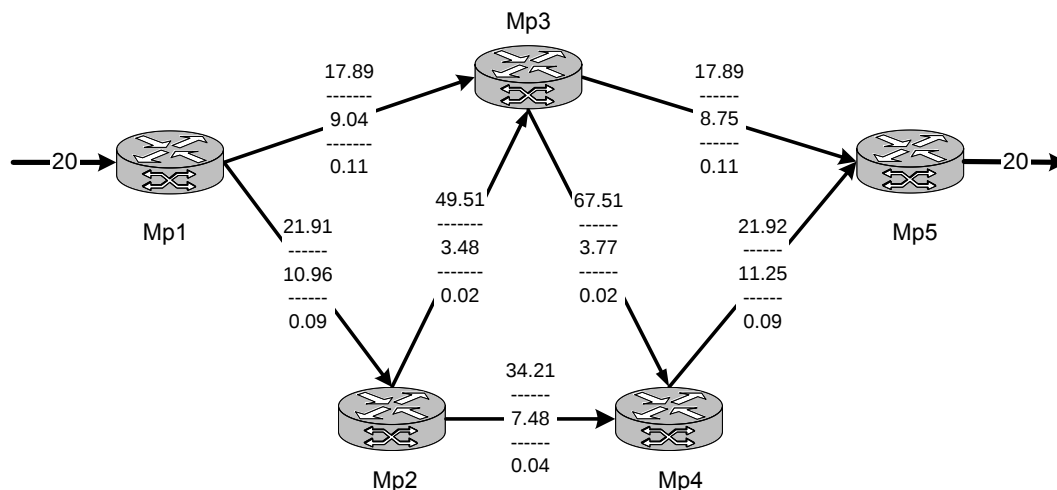


Рисунок 2 – Результаты расчета сети

Заключение

Таким образом, в работе предложена тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной. Получаемые в рамках синтезированной модели маршрутизации решения ориентированы на предоставление услуг связи гарантированного качества, где в качестве показателей качества обслуживания выступали требуемые полоса пропускания и временная задержка передачи пакетов.

Новизна модели состоит в том, что с учетом физики обслуживания агрегированных потоков уравнение поведения ТКС в рамках модели М/М/1 теории массового обслуживания было представлено в тензорной форме. Причем образующие

данную модель тензоры были представлены в пространстве с кривизной.

Результаты расчета подтвердили целесообразность реализации многопутевой стратегии маршрутизации в соответствии с предложенной моделью, особенно в условиях дефицита сетевых ресурсов. Синтезированная модель маршрутизации в дальнейшем может получить свое развитие путем обобщения на случай многополюсных и многопродуктовых сетей как моделей ТКС. В прикладном плане предложенная модель многопутевой маршрутизации может быть непосредственно использована в сетях, ориентированных на обслуживание агрегированных потоков с поддержкой QoS, например, в MPLS-сетях.

Таблиця 2 – Результаты сравнительного анализа различных стратегий маршрутизации

№ п/п	Интенсивность трафика $\lambda^{ин}$ (1/с)	Результаты расчетов	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	$\tau_{прд}$
1	10	ПС	21,51	28,22	62,96	34,25	62,96	21,51	28,22	–
		$\Lambda_v^{мп}$	4,78	5,22	1,63	3,59	1,63	4,78	5,22	0,119
		$\Lambda_v^{оп}$	–	10	10	–	10	–	10	0,148
2	20	ПС	17,89	21,91	49,51	34,21	67,51	17,89	21,92	–
		$\Lambda_v^{мп}$	9,04	10,96	3,48	7,48	3,77	8,75	11,25	0,22
		$\Lambda_v^{оп}$	–	20	20	–	20	–	20	1,10
3	30	ПС	30,47	27,24	49,02	36,26	87,99	35,8	23,4	–
		$\Lambda_v^{мп}$	18,72	11,28	4,49	6,79	0,8	22,41	7,59	0,159
		$\Lambda_v^{оп}$	30	–	–	–	–	30	–	2,285
4	50	ПС	37,68	29,78	32,71	21,93	23,83	42,20	34,65	–
		$\Lambda_v^{мп}$	30,45	19,55	8,14	11,41	5,44	33,16	16,84	0,25
		$\Lambda_v^{оп}$	–	–	–	–	–	–	–	–

Литература

- 1 Гургенидзе А. Т., Кореш В. И. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа – СПб Наука и техника, 2003. – 400 с.
- 2 Вегенша Ш. Качество обслуживания в сетях IP / Пер с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 386 с.
- 3 Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J. J. A Multipath Framework Architecture for Integrated Services / Proc of GLOBECOM, 2000.
- 4 Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных систем. – М.: Техносфера, 2003 – 512 с.
- 5 Лемешко А. В. Особенности моделирования двухполосной сети связи ортогональной сетью в рамках тензорного анализа // Радиотехника. – Всеукр. межвед. науч-техн. сб. – 2002. – Вып. 128. – С. 16 – 25.
- 6 Лемешко А. В. Мультитензорная интерпретация решения маршрутных задач в телекоммуникационных сетях, представленных мнопродуктовыми многополюсными моделями евклидового пространства // Радиоэлектронные и компьютерные системы, 2003. -Вып. 3. – С. 115 – 126.
- 7 Крон Г. Тензорный анализ сетей / Пер. с англ. – М.: Сов радио, 1978. – 719 с.
- 8 Зайченко Ю. П., Гонта Ю. В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – К.: Техника, 1986. – 168 с.