

УДК 621.391

ТЕНЗОРНАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА МУЛЬТИПРОТОКОЛЬНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

А.В. ЛЕМЕШКО

В работе предложена формализация задач структурного синтеза мультипротокольных телекоммуникационных сетей в рамках аппарата тензорного анализа. Полученные решения ориентированы на реализацию в сети многопутевой стратегии маршрутизации с адаптивной фрагментацией (дефрагментацией) пакетов в транзитных узлах.

In this paper the formalization of problems of structural synthesis of multiprotocol telecommunication networks with context of tensor analysis is presented. The obtained solutions are oriented for implementation in network of QoS-based multipath routing.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно фундамент эффективного функционирования телекоммуникационных сетей (ТКС) закладывался на этапе их проектирования. Стадия структурного синтеза сети, наряду с предпроектной стадией, стадиями проектирования нестандартных технических средств сети, разработки программного и информационного обеспечения, имитационного моделирования с уточнением и обоснованием основных проектных решений, является ключевой в общем процессе проектирования ТКС различного назначения [1]. И если для локальных сетей существует ограниченное число структурных конфигураций (общая шина, звезда, кольцо), то проблема структурного синтеза территориально-распределенных сетей связи, т.е. ТКС уровня WAN (*Wide Area Network*), является одной из важнейших и наиболее сложных проблем проектирования не только в плане разработки самих методов синтеза, но и в плане ее удовлетворительной математической постановки.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЦЕССУ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА

А. Технологические требования. Ключевым моментом при формализации и решении проблемы структурного синтеза является необходимость учета функционального аспекта, т.е. искомые решения должны быть ориентированы на вполне конкретные технологические особенности проектируемой ТКС. Особенности реально функционирующих и перспективных телекоммуникационных сетей определили следующий комплекс факторов, накладывающих значительный отпечаток на формулировку частных задач синтеза, выбор исходных данных, а также на форму и содержание результатов решения проблемы структурного синтеза ТКС.

Во-первых, современные ТКС строятся, преимущественно, как мультисервисные сети *MSN (Multi-*

service network), которые способны обслуживать на базе универсальной транспортной платформы различные по своей природе виды трафика (речь, данные, потоковое видео и т.д.) с использованием различных протоколов передачи [2]. В этой связи перспективным является направление по созданию сетей следующего поколения *NGN (Next Generation Network)*. При этом важным условием является обеспечение каждому виду трафика требуемых гарантий качества обслуживания *QoS (Quality of Service)* с их дифференциацией и широкой градацией.

Во-вторых, в отсутствие единой сетевой архитектуры, способной удовлетворить весь спектр услуг связи, в настоящее время широко применяются разнообразные комбинации телекоммуникационных технологий в рамках гибридных ТКС. Сама же сеть строится как мультипротокольная ТКС, в транспортном ядре которой параллельно функционируют протоколы таких широко распространенных технологий, как *ATM (Asynchronous Transfer Mode)*, *IP/IntServ/DiffServ* и *MPLS (Multi Protocol Label Switching)*. Причем трафики транзакций, постоянной скорости или реального времени будут обслуживаться в рамках различных протоколов обмена [2].

Необходимость учета особенностей мультипротокольного построения ТКС связана со спецификой обслуживания разнотипных пользовательских трафиков с помощью того или иного протокола. Это проявляется, например, в реализации различных стратегий маршрутизации, в выборе величин пакетов, на которые разбивается поступающий в сеть пользовательский трафик, в возможности фрагментации пакетов, а также в необходимости предоставления дифференцированных услуг связи, т.к. объемы обслуживаемых трафиков, их приоритетность и запрашиваемые гарантии качества связи могут существенно различаться. Например, в *ATM*-сетях реализуется однопутевая стратегия маршрутизации ячеек фиксированной длины

(53 байта) без возможности их дальнейшей фрагментации. В IP-сетях может применяться многопутевая стратегия маршрутизации пакетов различной длины с возможностью их фрагментации.

В-третьих, наряду с базовыми телекоммуникационными технологиями (*ATM, IP, MPLS*) на практике имеют место и постоянно обновляются те или иные сетевые концепции, являющиеся прототипами перспективных протоколов и технологий будущего. Наиболее яркими из них являются концепции инжиниринга трафика – *Traffic Engineering (TE)* и активных сетей – *Active Network (AN)*. Задача *TE* и *AN* состоит в оптимизации использования имеющихся сетевых ресурсов, что напрямую связано с приданием «интеллектуальных» свойств узлам сети, которые, адаптивно и координировано отслеживая состояние ТКС, должны обеспечить обработку разнородного по своему составу трафика в соответствии с установленными приоритетами и показателями *QoS*. Особенность *TE* состоит в отказе от однопутевых схем маршрутизации с переходом к многопутевым стратегиям как средству сбалансированной загрузки имеющихся сетевых ресурсов [3]. Специфика *AN* заключается в наделении уже самих приложений способностью определять полностью или частично порядок своей обработки, что связано с возможностью дополнительной настройки функций сети под текущие потребности отдельных графиков пользователей [4]. Концепция активных сетей вводит активные технологии в самое ядро сети, распространяя их действие на отдельные маршрутизаторы, коммутаторы и серверы с повышением их интеллектуальности на новый уровень.

В рамках концепции *AN* в функции узла сети может быть включена процедура адаптивной фрагментации или дефрагментации пакетов. Процедура фрагментации может разбить исходный пакет на фрагменты произвольной длины и затем восстановить его в первоначальном виде. Стоит отметить, что необходимость фрагментации должна быть продиктована состоянием сети, что позволит в процессе транспортировки отдельных фрагментов использовать тракты передачи, которые, например, ввиду их низкой пропускной способности для доставки пакетов исходной длины с заданными показателями качества не могли быть использованы.

Б. Методологические требования. В условиях высокой динамики развития современных сетевых технологий требования к качеству методов решения проблемы структурного синтеза лишь повышаются. Проектировщику необходимо иметь в своем распоряжении адекватные математические и программные модели, действенные методы и эффективно вычислительно реализуемые алгоритмы топологического синтеза и анализа ТКС, которые позволили бы обосновать выбор оптимального варианта структурного построения сети в соответствии с заданными критериями, выделенными средствами и в указанные сроки.

Сложность рассматриваемой проблемы определила необходимость ее декомпозиционного рассмотре-

ния на уровне следующих трех основных задач топологического и функционального синтеза: выбор топологии (ВТ), выбор пропускных способностей (ВПС), выбор топологии и пропускных способностей (ВТПС) и распределение потоков (РП) [1, 5], которые должны решаться скоординированно и в комплексе.

Исходные данные для структурного синтеза ТКС включают в себя следующие основные данные:

- места размещения узлов сети, их технико-экономические характеристики;
- комплекс требований к структуре сети (степень связности, стоимость и др.);
- характеристики информационных трафиков пользователей (направление транспортировки, интенсивность и др.) и требования к показателям качества их обслуживания (полоса пропускания, временная задержка, степень достоверности и т. д.).

Ввиду отсутствия в настоящее время целостной теории синтеза сетей, не существует и универсальных рекомендаций, на основании которых с общих позиций могли бы быть сформулированы и решены задачи структурного синтеза. Это, в свою очередь, связано с тем, что даже точное решение некоторых задач в отделимости сопряжено со значительными трудностями описательного и вычислительного характера и зачастую для их решения могут быть использованы лишь приближенные эвристические методы [1, 5, 6].

2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве основных подходов к решению задач структурного синтеза ТКС выделяются комбинаторный подход [6] и подход, основанный на использовании сетевых моделей теории массового обслуживания [5]. Комбинаторный подход опирается на представление сети в виде конечного графа без петель и кратных ребер, вершины которого соответствуют узлам ТКС, а ребра – трактам передачи. Удобство такого представления продиктовано возможностью изучения характеристик сети по эквивалентным им инвариантам графа, исследование которых ведется методами хорошо разработанной теории графов. Применение теории перечисления графов для решения задач топологической оптимизации связано с необходимостью анализа значительного числа возможных вариантов соединения ребер графа [6]. При этом высокая точность комбинаторных методов синтеза позволяет их использовать на начальных этапах макропроектирования сети лишь с невысокой размерностью.

В рамках моделей, представленных сетями массового обслуживания [5], характерной является следующая постановка задачи синтеза структуры сети. Заданы размещение узлов сети Ψ_i ($i = \overline{1, m}$), поступающий в сеть (внешний) трафик

$$\gamma = \sum_{j=1}^m \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq j}}^m \gamma_{jk},$$

где γ_{jk} – интенсивность трафика (пакетов/с), поступающего в сеть от внешних источников на узел Ψ_j с последующей передачей узлу Ψ_k .

Необходимо определить структуру S сети с указанием необходимых величин пропускных способностей (ПС) трактов сети $l_{i,j}$ путем минимизации суммарных затрат W на ее проектирование

$$W = \sum_{(i,j) \in S} v_{i,j}(l_{i,j}) \rightarrow \min \quad (1)$$

при условиях

$$\lambda_{i,j} \leq l_{i,j}, (i,j) \in S; \quad (2)$$

$$T^{cp} = \frac{1}{\gamma} \sum_{(i,j) \in S} \left[\frac{\lambda_{i,j}}{(l_{i,j} - \lambda_{i,j})} \right] \leq T^{\max}, \quad (3)$$

где $v_{i,j}(l_{i,j})$ – удельная стоимость проектирования тракта передачи (ТП) между узлами Ψ_i и Ψ_j с пропускной способностью $l_{i,j}$; $\lambda_{i,j}$ – компоненты вектора мультипотока $\lambda = [\lambda_{i,j}]$, $(i,j) \in S$, характеризующие величину суммарного потока, протекающего при выбранной стратегии маршрутизации в тракте между узлами Ψ_i и Ψ_j ; $T^{cp}, T^{\max}$ – средняя и максимально допустимая задержка пакета в сети.

В общем случае для обеспечения заданных показателей надежности модель может быть дополнена ограничениями на связность узлов. С учетом современных требований к дифференциации качества предоставляемых услуг связи различным пользовательским трафикам ограничение (3), выполнение которого обеспечивает негарантированную доставку данных (*best effort service*) или доставку данных по возможности, может быть заменено системой ограничений вида

$$T_{ij}^{cp} = \frac{1}{\gamma} \sum_{(i,j) \in M} \left[\frac{\lambda_{i,j}}{(l_{i,j} - \lambda_{i,j})} \right] \leq T_{ij}^{\max}, \quad (4)$$

где $T_{ij}^{cp}, T_{ij}^{\max}$ – средняя и максимально допустимая задержка пакета, передаваемого вдоль маршрута M между узлами Ψ_i и Ψ_j . Выполнение условий (4) ориентирует на обеспечение гарантированного качества обслуживания.

Поставленная задача представляет наиболее общий случай проблемы структурного синтеза, связанного с необходимостью получения комплексного решения задач ВПС, РП и ВТ. Для решения оптимизационной задачи, связанной с минимизацией функции (1) с ограничениями (2) и (3) или (4), нашел свое применение целый ряд методов [1], основными из которых являются метод замены ветвей, метод устранения ветвей, метод насыщенного сечения, а также всевозможные модификации перечисленных методов, например, метод M -структур, связанные с попытками снижения сложности их вычислительной реализации.

Основные недостатки изложенного подхода к решению задач синтеза структуры территориально-распределенных ТКС непосредственно касаются адекватности модели (1)–(4). Модель ТКС, представленная сетью массового обслуживания, по признанию ее авторов [5], имеет ряд допущений, которые не всегда имеют место в реальности – независимость длин передаваемых в сети сообщений и их распределение по показательному закону, неизменность процедур выбора маршрутов, независимость времени обслуживания отдельных сообщений. Принятие этих предположений обосновано для сетей с коммутацией сообщений, для сетей же пакетной коммутации, составляющих основу современных ТКС, выдвинутые гипотезы при многофазном обслуживании сообщений практически не выполняются, что неминуемо приводит к серьезным погрешностям в процессе проектирования.

Следует также отметить, что модификация модели (1)–(4), предложенная в работе [6], действительно ориентирует на принятие многопутевой стратегии маршрутизации. Однако вопрос гарантий качества связи вдоль каждого из рассчитанных маршрутов передачи остается открытым.

Подытоживая сказанное, следует отметить, что особую актуальность приобретают вопросы научной и прикладной направленности, связанные с необходимостью обеспечения адекватной формализации задач структурного синтеза мультипротокольных ТКС с учетом требований современных сетевых концепций и технологий – ориентированность на реализацию в сети различных, в том числе многопутевых, стратегий маршрутизации с поддержкой услуг связи гарантированного качества и, при необходимости, механизмов фрагментации (дефрагментации) пакетов.

3. ТЕНЗОРНАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИПРОТОКОЛЬНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

С точки зрения практики, мультисервисность предоставляемых услуг, определив множество одновременно циркулирующих в ТКС разнотипных информационных потоков, требует перехода к моделям, представленным многопродуктовыми многополосными сетями (ММС). Под ММС в дальнейшем будет пониматься модель сети связи, обслуживающей одновременно несколько пользовательских трафиков (продуктов) между множеством пар узлов (полосами) сети. В этой связи особое внимание должно быть уделено поиску нового эффективного математического аппарата, способного обеспечить удовлетворение всевозрастающих требований системного характера к многосторонности и адекватности описания структурно-функционального построения ТКС. Как показали результаты проведенных исследований, на эту роль обоснованно претендует математический аппарат тензорного анализа сетей, основы которого разработаны американским ученым Г. Кроном [7, 8].

В предлагаемой работе будет осуществлена формализация задач структурного синтеза мультипротоко-

ных ТКС в рамках тензорного подхода, хорошо себя зарекомендовавшего при описании моделей многопродуктовых многополюсных сетей [9, 10]. Отличие предлагаемой тензорной модели ММС состоит в том, что в ней учтена потоковая модель трафика, а получаемые на ее основе решения задач структурного синтеза будут ориентированы, в том числе, на реализацию в сети многопутевой стратегии маршрутизации пользовательских трафиков с адаптивной фрагментацией (дефрагментацией) его пакетов в узлах.

При моделировании ММС процесс возбуждения сети будет носить смешанный характер, предполагая описание структуры ТКС одномерной ортогональной сетью [7, 8], множество сетевых узлов которой составляют маршрутизаторы, где m – их общее количество, а множество ветвей сети моделирует n трактов передачи в телекоммуникационной сети.

В рамках ортогонального представления тензорной модели ТКС [8] структура сети определяет анизотропное пространство, образованное ветвями сети, размерность которого численно равна количеству ветвей. Совокупность независимых путей в сети – контуров и узловых пар образует системы координат, в связи с чем такие пути будут именоваться базисными, или координатными [7]. Преобразование структуры сети с сохранением численности ветвей или переход от одной совокупности независимых контуров и пар узлов 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 (СК).

Во введенном пространстве модель ММС может быть представлена в виде геометрического объекта

$$G = G^{(1)} \otimes \dots \otimes G^{(z)} \otimes \dots \otimes G^{(Z)}, \quad (5)$$

именуемого в тензорном исчислении объектом смешанного измерения, а в терминах тензорного анализа сетей носит название мультитензора. Его компоненты, в свою очередь, определяются согласно следующему выражению:

$$G^{(z)} = \Lambda_{(1)}^{(z)} \otimes \dots \otimes \Lambda_{(k)}^{(z)} \otimes \dots \otimes \Lambda_{(K_{(z)})}^{(z)} \otimes \\ \otimes H_{(1)}^{(z)} \otimes \dots \otimes H_{(k)}^{(z)} \otimes \dots \otimes H_{(K_{(z)})}^{(z)} \otimes \\ \otimes T_{(1)}^{(z)} \otimes \dots \otimes T_{(k)}^{(z)} \otimes \dots \otimes T_{(K_{(z)})}^{(z)}, \quad (6)$$

где $\otimes$ – знак прямого тензорного умножения; $K_{(z)}$ – общее количество трафиков, циркулирующих между z -й парой узлов, при рассмотрении ТКС как ММС. Выражение (6) задает смешанный тензор $G^{(z)}$ валентности $3K_{(z)}$, $K_{(z)}$ раз ковариантный и $2K_{(z)}$ раз контравариантный, компоненты которого

$$\Lambda_{(k)}^{(z)} = \begin{bmatrix} \lambda_{1k}^{(z)} \\ \lambda_{2k}^{(z)} \\ \vdots \\ \lambda_{n_k}^{(z)} \end{bmatrix}; \quad H_{(k)}^{(z)} = \begin{bmatrix} h_{1k}^{(z)} \\ h_{2k}^{(z)} \\ \vdots \\ h_{n_k}^{(z)} \end{bmatrix}; \quad T_{(k)}^{(z)} = \begin{bmatrix} \tau_{1k}^{(z)} \\ \tau_{2k}^{(z)} \\ \vdots \\ \tau_{n_k}^{(z)} \end{bmatrix}$$

представляют собой одновалентные контравариантные ($\Lambda_{(k)}^{(z)}$ и $H_{(k)}^{(z)}$) и ковариантные ($T_{(k)}^{(z)}$) тензоры, а сам тензор $G^{(z)}$ в индексной записи представим в форме

$$g_{j_1^{(z)} \dots j_{K_{(z)}}^{(z)}}^{i_1^{(z)} \dots i_{K_{(z)}}^{(z)}} = \lambda_{j_1}^{i_1} \lambda_{j_2}^{i_2} \dots \lambda_{j_k}^{i_k} \dots \lambda_{j_{K_{(z)}}}^{i_{K_{(z)}}} \times \\ \times h_{j_1}^{i_1} h_{j_2}^{i_2} \dots h_{j_k}^{i_k} \dots h_{j_{K_{(z)}}}^{i_{K_{(z)}}} \tau_{j_1}^{i_1} \tau_{j_2}^{i_2} \dots \tau_{j_k}^{i_k} \dots \tau_{j_{K_{(z)}}}^{i_{K_{(z)}}}, \quad (7)$$

где $\lambda_{j_k}^{i_k}$ – интенсивность k -го трафика, передаваемого по l -му координатному пути между z -й парой узлов, измеряемая в байт/с; $h_{j_k}^{i_k}$ – величина пакета (фрагмента) k -го трафика, переданного через i -й координатный путь между z -й парой узлов, измеряемая в байтах; а координаты $\tau_{j_k}^{i_k}$ отражают величину временных задержек пакетов этого же трафика в базисных путях сети, с.

При мультитензорном описании ТКС вводится множество индексов, относящихся к различным системам координат [7, 8]. При этом индексы разделяются на открытые и закрытые, вдоль которых координаты рассматриваемого тензора, соответственно, изменяются или не изменяются. Вдоль различных направлений число индексов может быть различно. Закрытые индексы, для отличия, далее записываемые в скобках, будут служить для идентификации координатной системы рассмотрения того или иного тензора. Место записи открытых индексов напрямую зависит от валентности индексируемых величин – для ковариантных величин открытые индексы записываются как нижние, а для контравариантных – как верхние [7]. Для закрытых индексов место их записи несущественно и трактуется соображениями наглядности и удобства восприятия.

Переход от обычного тензорного [8] к мультитензорному способу описания моделей ММС [9, 10] продиктован рядом важных обстоятельств. Во-первых, в ряде случаев существенную роль играет порядок выбора пространства и искомой СК представления тензора как модели сети для каждой группы трафиков, передаваемых между различными парами узлов сети. Отличие СК состоит в различной нумерации вершин, контуров и пар узлов, выступающих в роли координатных осей. Отличие подобных пространств может проявляться в их различной размерности, т.е. они могут быть образованы различными множествами ветвей. Для практики характерным является случай, когда обслуживание трафиков z -й пары узлов может производиться посредством заранее определенного множества ветвей $n^{(z)}$ ($n^{(z)} \leq n$), определяющих в исходном пространстве размерности n z -е подпространство размерности $n^{(z)}$. Сеть со структурой, отвечающей z -му подпространству рассмотрения тензора $G^{(z)}$, будет именоваться (z)-сетью. Таким образом, каждый из тензоров $G^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}$) задается в своем z -м подпространстве, образованном соответствующими вет-

вами (z) -сети, а индексы i, j в выражении (7) могут принимать независимо друг от друга все значения от 1 до $n^{(z)}$. Уменьшение размерности подпространств соответствует понижению размерности соответствующих тензоров, что, в конечном итоге, приведет к существенному снижению вычислительной сложности тензорных методов анализа и синтеза ТКС как ММС.

Наличие ряда различных подпространств и их СК в представлении геометрического объекта (5) и определили его название. Исходя из валентности компонентов $G^{(z)}$, валентность мультитензора (6) в целом равна $\sum_{z=1}^Z K_{(z)}$, где Z – максимальное число узловых пар в ММС, которое составляет $m(m-1)/2$.

При рассмотрении функциональной стороны тензорной модели ТКС будут приняты во внимание структура сети с указанием величин доступных пропускных способностей трактов передачи, а также основные параметры трафиков, принимаемых сетью к обслуживанию. В рамках потоковой модели k -го трафика, передаваемого между z -й парой узлов, к его основным параметрам относятся интенсивность поступления пакетов $\lambda_k^{(z)}$, измеряемая в байт/с; пакетная интенсивность трафика $d_k^{(z)}$, измеряемая в пакетах/с; изначальный размер пакета $h_k^{(z)}$, измеряемый в байтах, и время обслуживания трафика $\tau_k^{(z)}$, измеряемое в секундах, под которым будет пониматься требуемая задержка передачи одного пакета данного пользовательского трафика.

Функциональную сторону моделируемой телекоммуникационной сети можно отразить системой инвариантных уравнений поведения сети [8–10]

$$H_{(k)}^{(z)} = L_{(k)}^{(z)} T_{(k)}^{(z)}, \quad (8)$$

а также, с учетом потоковой модели трафика, системой уравнений

$$\Lambda_{(k)}^{(z)} = D_{(k)}^{(z)} H_{(k)}^{(z)} \quad (k = \overline{1, K_{(z)}}, z = \overline{1, Z}), \quad (9)$$

где $L_{(k)}^{(z)}$ – дважды контравариантный метрический тензор z -го подпространства, координаты $j^{(z)}_{i^{(z)}}$ ($i, j = \overline{1, n^{(z)}}$) которого численно характеризуют величины пропускных способностей координатных путей сети, выделенных для обслуживания k -го трафика между z -й парой узлов, и измеряются в байт/с; $D_{(k)}^{(z)}$ – двухвалентный тензор пакетной интенсивности трафика, проекции которого в произвольной системе координат имеют вид матрицы $\|d^{ij}\|$ ($i, j = \overline{1, n^{(z)}}$) размера $n^{(z)} \times n^{(z)}$.

Инвариантность систем уравнений (8) и (9) в соответствии с постулатом второго обобщения Г. Крона [7] позволяет получить целостное представление о свойствах ТКС на основе ее многоаспектного анализа, где каждый аспект отвечает принятой к рассмотрению системе координат. При этом в зависимости от аспекта рассмотрения, т.е. принятой СК, каждое из уравнений систем (8) и (9) принимает вид частного векторно-матричного уравнения, сохраняя размерность входя-

щих в него величин. В этой связи сложность решения ряда важных прикладных задач по анализу и расчету сети может быть значительно снижена за счет удачного выбора систем координат представления мультитензора (5), в рамках которых удалось бы получить предельно полную информацию о моделируемой ТКС, связанной с особенностями решаемой задачи. Таким образом, к рассмотрению должны быть приняты все информативные системы координат, в которых представлены те или иные известные или искомые координаты мультитензора (5).

Структуре примитивной сети, т. е. структуре с несоединенными между собой ветвями, определившей систему координат ветвей, отвечает система функциональных векторно-матричных уравнений вида

$$H_{(k)a}^{(z)} = L_{(k)a}^{(z)} T_{(k)a}^{(z)}; \quad (10)$$

$$\Lambda_{(k)a}^{(z)} = D_{(k)a}^{(z)} H_{(k)a}^{(z)} \quad (k = \overline{1, K_{(z)}}, z = \overline{1, Z}), \quad (11)$$

где $H_{(k)a}^{(z)}$, $\Lambda_{(k)a}^{(z)}$, $T_{(k)a}^{(z)}$ и $L_{(k)a}^{(z)}$, $D_{(k)a}^{(z)}$ – проекции тензоров $H_{(k)}^{(z)}$, $\Lambda_{(k)}^{(z)}$, $T_{(k)}^{(z)}$ и $L_{(k)}^{(z)}$, $D_{(k)}^{(z)}$ в системе координат ветвей сети.

Матрица $L_{(k)a}^{(z)}$ в выражении (10) имеет диагональную форму, ненулевые элементы которой равны пропускным способностям ветвей сети, выделенных для обслуживания k -го трафика между z -й парой узлов. В свою очередь, реальной структуре сети соответствует система координат независимых контуров и пар узлов ($к.п.у$), в которой система инвариантных уравнений (8) имеет вид

$$H_{(k)к.п.у}^{(z)} = L_{(k)к.п.у}^{(z)} T_{(k)к.п.у}^{(z)} \quad (k = \overline{1, K_{(z)}}, z = \overline{1, Z}), \quad (12)$$

где $H_{(k)к.п.у}^{(z)}$, $T_{(k)к.п.у}^{(z)}$ и $L_{(k)к.п.у}^{(z)}$ – проекции тензоров $H_{(k)}^{(z)}$, $T_{(k)}^{(z)}$ и $L_{(k)}^{(z)}$ в системе координат независимых контуров и пар узлов.

Характер тензоров, входящих в выражения (10–12), подтверждается законами их координатного преобразования при переходе от одной СК к другой

$$H_{(k)a}^{(z)} = C_{(z)} H_{(k)к.п.у}^{(z)}; \quad (13)$$

$$\Lambda_{(k)a}^{(z)} = C_{(z)} \Lambda_{(k)к.п.у}^{(z)}; \quad T_{(k)a}^{(z)} = A_{(z)} T_{(k)к.п.у}^{(z)};$$

$$L_{(k)a}^{(z)} = C_{(z)} L_{(k)к.п.у}^{(z)} C_{(z)}^t; \quad L_{(k)к.п.у}^{(z)} = A_{(z)}^t L_{(k)a}^{(z)} A_{(z)}, \quad (14)$$

где матрицы ко- и контравариантного преобразования $A_{(z)}$ и $C_{(z)}$ связаны условием ортогональности

$$C_{(z)}^t A_{(z)} = I_{(z)}, \quad (15)$$

а $I_{(z)}$ – единичная матрица размера $n^{(z)} \times n^{(z)}$, $[o]^t$ – символ транспонирования.

Для анализа ТКС как ММС в рамках ортогональной тензорной модели каждое уравнение системы (12) удобно представить в компаунд-тензорном виде [7]

$$\begin{bmatrix} H_{(k)\kappa}^{(z)} \\ \vdots \\ H_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle 1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \\ \vdots & & \vdots \\ \langle 3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{(k)\kappa}^{(z)} \\ \vdots \\ T_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где $H_{(k)\kappa}^{(z)}$ и $T_{(k)\kappa}^{(z)}$ – контурные слагаемые, а $H_{(k)n.y}^{(z)}$ и $T_{(k)n.y}^{(z)}$ – узловые слагаемые векторов, соответственно $H_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}$ и $T_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}$, т. е.

$$\begin{bmatrix} H_{(k)\kappa}^{(z)} \\ \vdots \\ H_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = H_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}; \quad \begin{bmatrix} T_{(k)\kappa}^{(z)} \\ \vdots \\ T_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = T_{(k)\kappa.n.y}^{(z)};$$

$$\begin{bmatrix} \langle 1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \\ \vdots & & \vdots \\ \langle 3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}.$$

Размерность слагаемых $H_{(k)\kappa}^{(z)}$ и $T_{(k)\kappa}^{(z)}$ равна $r^{(z)}$, что соответствует количеству в (z) -сети независимых контуров. Размерность слагаемых $H_{(k)n.y}^{(z)}$ и $T_{(k)n.y}^{(z)}$, отвечающая числу в (z) -сети независимых пар узлов, равна $s^{(z)}$ и на единицу меньше, чем общее количество узлов в (z) -сети. При этом справедливо тождество

$$n^{(z)} = r^{(z)} + s^{(z)}.$$

Наряду с частными характеристиками сети, относящимися к каждой конкретной паре узлов и (или) пользовательскому трафику, сеть обладает и интегральными характеристиками. К таким характеристикам относится, например, вектор интенсивности обобщенного трафика (мультипотока [5]) в ветвях сети в целом Λ_g размерности n .

Для расчета интегральных характеристик сети необходимо располагать средствами приведения результатов расчета к единой системе координат, в качестве которой целесообразно выбрать СК в пространстве максимальной размерности, т.е. в пространстве, отвечающему полносвязной структуре сети. Таким образом, вектор Λ_g рассчитывается согласно выражению

$$\Lambda_g = \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^{K(z)} \langle F_{(z)} | \Lambda_{(k)g}^{(z)} \rangle, \quad (17)$$

где $F_{(z)}$ – матрица пересчета сетевых характеристик из СК ветвей z -го подпространства рассмотрения тензора $G^{(z)}$ как модели МДС в единую СК ветвей сети размерности $n \times n^{(z)}$; $|\cdot|$ – знак модуля.

Важным этапом формализации задач синтеза структуры ТКС является формулировка условий резервирования сетевых ресурсов с учетом обеспечения QoS.

В рамках предлагаемой мультитензорной модели ТКС параметры пользовательских трафиков задаются в виде соответствующих координат векторов $H_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}$ и $T_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}$. Причем, выбор СК независимых контуров и пар узлов путем их соответствующей нумерации необходимо осуществлять таким образом, чтобы выполнялся следующий ряд условий. Во-первых, в каждой (z) -сети первой координате вектора $H_{(k)n.y}^{(z)}$ должна соответствовать величина пакета пользовательского трафика, поступающего в сеть или убывающего из нее через узел «отправитель» или «получатель» соответственно, т.е. $h_k^{(z)}$. Во-вторых, остальные $s^{(z)} - 1$ координат того же вектора, оставаясь нулевыми, должны относиться к неактивным узлам, т.е. к узлам, через которые осуществляется лишь транзит трафика. Подобный выбор СК представления каждого из тензоров $G^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}$) определяет в качестве первой координаты вектора $T_{(k)n.y}^{(z)}$ требуемое время обслуживания k -го трафика между z -й парой узлов, т.е. $\tau_k^{(z)}$.

При решении задач структурного синтеза ТКС неизвестными величинами выступают координаты матриц $L_{(k)g}^{(z)}$ ($k = \overline{1, K(z)}$, $z = \overline{1, Z}$). По значениям этих матриц, с одной стороны, можно определить порядок распределения сетевых ресурсов между каждым из трафиков (решение задачи РП), а с другой, с учетом выражений (17) и (14) устанавливается вид диагональной матрицы пропускных способностей ветвей сети в целом Λ_g размерности $n \times n$, т.е.

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^{K(z)} \langle F_{(z)} | I_{(k)g}^{(z)} F_{(z)} \rangle = \Lambda_g, \quad (18)$$

определив тем самым решение задач ВТ и ПС.

С целью устранения контуров (петель) в рассчитываемых маршрутах транспортирования того или иного трафика координаты векторов $T_{(k)\kappa}^{(z)}$ ($k = \overline{1, K(z)}$, $z = \overline{1, Z}$) приравниваются к нулю. По этой причине, согласно выражению (16), имеет место соотношение

$$H_{(k)n.y}^{(z)} = \langle 4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} T_{(k)n.y}^{(z)},$$

которое можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \langle 1 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} \\ \vdots \\ \langle 2 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle 4/1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4/2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \\ \vdots & & \vdots \\ \langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \\ \vdots \\ \langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где

$$\begin{bmatrix} \langle 1 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} \\ \vdots \\ \langle 2 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = H_{(k)n.y}^{(z)}; \quad \begin{bmatrix} \langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \\ \vdots \\ \langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = T_{(k)n.y}^{(z)};$$

$$\begin{bmatrix} \langle 4/1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4/2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \\ \hline \langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = \langle 4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}.$$

В выражении (19) в рамках выбранной СК имеем

$$\langle 1 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} = h_{(k)}^{(z)}; \langle 2 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} = 0; \langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} = \tau_{(k)}^{(z)},$$

а $\langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)}$ считается неизвестной величиной.

Согласно выражению (19) можно получить систему двух матричных уравнений

$$\begin{aligned} \langle 1 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} &= \left(\langle 4/1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \left(\langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right) + \\ &+ \left(\langle 4/2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \left(\langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right); \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \langle 2 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} &= \left(\langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \left(\langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right) + \\ &+ \left(\langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \left(\langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Равенство нулю вектора $\langle 2 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)}$ позволяет из уравнения (21) получить выражение

$$\langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} = - \left[\langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right]^{-1} \left(\langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \left(\langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right),$$

подставляя которое в уравнение (20), вид последнего приобретает форму

$$\begin{aligned} \langle 1 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} &= \left(\langle 4/1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} - \left(\langle 4/2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \times \right. \\ &\times \left. \left[\langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right]^{-1} \left(\langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \right) \left(\langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

В конечном итоге условие предоставления сетью требуемой полосы пропускания k -му трафику, передаваемому между z -й парой узлов, за счет резервирования необходимых сетевых ресурсов согласно выражению (22) приобретает вид

$$\begin{aligned} \frac{h_{(k)}^{(z)}}{\tau_{(k)}^{(z)}} &= \left(\langle 4/1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} - \left(\langle 4/2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \times \right. \\ &\times \left. \left[\langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right]^{-1} \left(\langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Ограничение (23) является аналогом ограничения (3) в рамках модели сети массового обслуживания. Аналогом же ограничения (2) служит условие

$$\text{diag}(\Lambda_{(k)\sigma}^{(z)}) \leq L_{(k)\sigma}^{(z)}, \quad (24)$$

которое вводится для предотвращения перегрузки ветвей сети, т. е. интенсивность суммарного трафика в каждой из них не должна превышать пропускной способности ветви. В выражении (10) $H_{(k)\sigma}^{(z)}$ рассчитывается согласно зависимости (13), в которой

$$H_{(k)\kappa}^{(z)} = \left[\langle 2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right] \left[\langle 4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right]^{-1} H_{(k)n.y}^{(z)}. \quad (25)$$

С учетом (25) и (18) ограничение (24) принимает вид

$$\text{diag} \left(D_{(k)\sigma}^{(z)} C_{(z)} \begin{bmatrix} H_{(k)\kappa}^{(z)} \\ \vdots \\ H_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} \right) \leq L_{\sigma}. \quad (26)$$

Стоит отметить, что получить в аналитическом виде условия резервирования (22) и предотвращения перегрузки ветвей сети (26) удалось лишь благодаря мультитензорному описанию многопродуктовой многополюсной модели ТКС, где для представления каждого из тензоров $G^{(z)}$ выбирались вышеописанным образом свои пространство и множество СК. Обычное тензорное описание, основываясь на едином пространстве представления тензора G , делало бы невозможным дальнейшее упрощение выражения (19).

Расчет искоемых координат матриц $L_{(k)\sigma}^{(z)}$ ($k = \overline{1, K_{(z)}}$, $z = \overline{1, Z}$) можно осуществить путем решения оптимизационной задачи с целевой функцией

$$W = f(L_{\sigma}^v), \quad (27)$$

где

$$L_{\sigma}^v = \begin{bmatrix} L_{(1)\sigma}^{(1)v} \\ \vdots \\ L_{(k)\sigma}^{(z)v} \\ \vdots \\ L_{(K_{(z)})\sigma}^{(Z)v} \end{bmatrix}$$

– составной вектор величин зарезервированных пропускных способностей ветвей сети для каждого из трафиков, обслуживаемых сетью, в котором каждый из подвекторов $L_{(k)\sigma}^{(z)v}$ последовательно составленный из диагональных элементов матриц $L_{(k)\sigma}^{(z)}$, т. е.

$$L_{(k)\sigma}^{(z)} = \text{diag}(L_{(k)\sigma}^{(z)v}).$$

На вид зависимости (27) накладывается ряд важных требований, в том числе, чтобы величина стоимости являлась ступенчатой функцией от дискретных значений ПС ветвей. В простейшем случае функция (27) может иметь линейный вид

$$W = \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^{K_{(z)}} V_{(k)\sigma}^{(z)} L_{(k)\sigma}^{(z)v}, \quad (28)$$

где V – вектор-строка весовых коэффициентов размерности $n^{(z)}$, координаты v_i ($i = \overline{1, n^{(z)}}$) которого характеризуют удельную стоимость резервирования еди-

ницы пропускной способности i -й ветви в (z) -сети. Использование линейной целевой функции (28) позволяет весь процесс расчета распараллелить, что актуально ввиду высокой размерности вектора $L_a^{(z)}$. Возможность распараллеливания вычислений основана на возможности производить расчет векторов $L_{(k)a}^{(z)v}$ ($k = \overline{1, K_{(z)}}$, $z = \overline{1, Z}$) независимо друг от друга.

При решении задачи важно также отслеживать выполнение условия

$$h_k^{(z)} \geq \bar{h}_k^{(z)},$$

где $\bar{h}_k^{(z)}$ – минимальная, т. е. не подлежащая дальнейшей фрагментации, величина пакета k -го трафика, передаваемого между z -й парой узлов. В случае, если $\bar{h}_k^{(z)} = h_k^{(z)}$, то в соответствии с ограничением (23) в ТКС будет реализована однопутевая стратегия маршрутизации без фрагментации пакетов в ее узлах.

В зависимости от условий постановки сформулированной оптимизационной задачи может обеспечиваться решение задач структурного синтеза ВТ, ВПС и РП в различных комбинациях с использованием итерационных методов – метода замены ветвей (МЗВ), метода устранения ветвей (МУВ), метода насыщенного сечения (МНС) и метода М-структур.

В случае, если необходимо решить задачу ВТПС и РП, первоначально принимается к рассмотрению сеть полносвязной (МЗВ, МУВ, МНС) или специальным образом сгенерированной структуры (метод М-структур) с дальнейшим расчетом необходимого количества ветвей в сети и их ПС. При этом для каждой текущей итерации, связанной с удалением или введением ветви, размерность введенных пространств, систем координат и матриц координатного преобразования подлежат изменению.

Для осуществления решения задачи РП по известным величинам $L_{(k)a}^{(z)}$ ($k = \overline{1, K_{(z)}}$, $z = \overline{1, Z}$) необходимо рассчитать координаты векторов $H_{(k)a}^{(z)}$ и $\Lambda_{(k)a}^{(z)}$ для каждого из трафиков в сети. Решение задачи РП состоит в последовательном вычислении контурных компонентов вектора $H_{(k)a}^{(z)}$ (25) с дальнейшим расчетом координат вектора $H_{(k)a}^{(z)}$ (13), определяющих величины пакетов (фрагментов) трафика в каждой ветви сети. Вычисление вектора интенсивности трафика $\Lambda_{(k)a}^{(z)}$ производится из выражения (9) по известным величинам $H_{(k)a}^{(z)}$ и $D_{(k)a}^{(z)}$. При этом диагональные элементы $D_{(k)a}^{(z)}$ предварительно рассчитываются из условия:

$$d_{(k)a}^{(z)} = \lambda_{(k)a}^{(z)} / h_{(k)a}^{(z)}.$$

4. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА МУЛЬТИПРОТОКОЛЬНОЙ ТКС

Продemonстрируем формализацию задачи структурного синтеза мультипротокольной ТКС, обслужи-

вающей одновременно несколько трафиков между множеством узлов, на следующем примере. Пусть структура ТКС задана одномерной сетью (рис. 1) и содержит четыре узла (У1–У4) и шесть ветвей (В1–В6), определив тем самым $n = 6$.

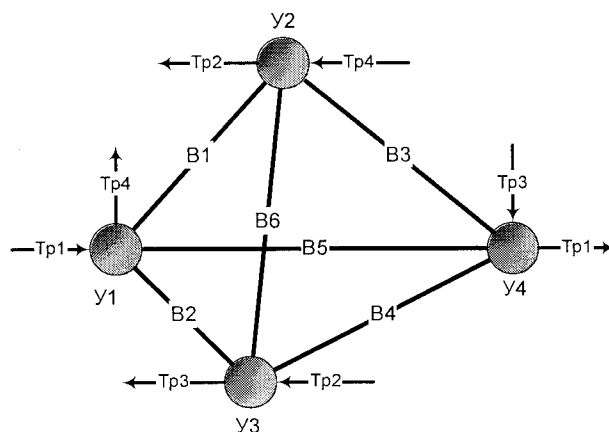


Рис. 1. Топологическая модель ТКС, представленная одномерной сетью

Пусть также по условиям задачи необходимо обеспечить обслуживание четырех информационных трафиков, передаваемых между различными парами узлов ($Z = 4$) с использованием не более одного переприема. Характеристики трафиков и требуемые параметры качества их обслуживания приведены в табл. 1. Приоритетность трафика соответствует его номеру. Условимся, что лишь пакеты третьего трафика должны быть переданы без фрагментации вдоль одного маршрута. Все оставшиеся трафики должны быть обслужены в соответствии с многопутевой стратегией маршрутизации с минимальной величиной фрагментированного пакета (фрагмента) в 100 байт.

Таблица 1

Номер трафика	1	2	3	4
Направление передачи	У1 ⇒ У4	У3 ⇒ У2	У4 ⇒ У3	У2 ⇒ У1
$\lambda_k^{(z)}$ (байт/с)	33000	4000	3000	4000
$h_k^{(z)}$ (байт)	1000	800	50	2000
$\tau_k^{(z)}$ (с)	0.03	0.2	0.01	0.5

Ветви исходной сети, нумерация которых приведена на рисунке, определяют 6-мерное пространство и единую СК, где каждая координатная ось соответствует ветви сети.

В соответствии с условиями задачи первый трафик (Тр1) должен быть передан без использования тракта У2 ⇔ У3, второй (Тр2) – без тракта У1 ⇔ У4, третий (Тр3) – без тракта У1 ⇔ У2, а четвертый (Тр4) – без тракта У3 ⇔ У4, чему соответствуют следующие величины: $n^{(z)} = 5$, $r^{(z)} = 2$, $s^{(z)} = 3$ ($z = \overline{1, 4}$). Выбор базисных (координатных) путей, заданных последова-

тельностью входящих в них узлов, для координатных систем (1)-сети, (2)-сети, (3)-сети и (4)-сети приведен в табл. 2, 3, 4 и 5 соответственно.

Таблица 2

Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	1	2	3
Ветвей сети	$Y1 \Rightarrow Y2$	$Y1 \Rightarrow Y3$	$Y2 \Rightarrow Y4$
Независимых контуров и пар узлов	$Y1 \Rightarrow Y2$	$Y1 \Rightarrow Y3$	Убывает из $Y4$
Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	4	5	
Ветвей сети	$Y3 \Rightarrow Y4$	$Y1 \Rightarrow Y4$	
Независимых контуров и пар узлов	Убывает из $Y2$	Убывает из $Y3$	

Таблица 3

Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	1	2	3
Ветвей сети	$Y3 \Rightarrow Y1$	$Y1 \Rightarrow Y2$	$Y3 \Rightarrow Y4$
Независимых контуров и пар узлов	$Y3 \Rightarrow Y1$	$Y3 \Rightarrow Y4$	Убывает из $Y2$
Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	4	5	
Ветвей сети	$Y4 \Rightarrow Y2$	$Y3 \Rightarrow Y2$	
Независимых контуров и пар узлов	Убывает из $Y1$	Убывает из $Y4$	

Таблица 4

Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	1	2	3
Ветвей сети	$Y4 \Rightarrow Y3$	$Y4 \Rightarrow Y1$	$Y4 \Rightarrow Y2$
Независимых контуров и пар узлов	$Y4 \Rightarrow Y3$	$Y4 \Rightarrow Y1$	Убывает из $Y3$
Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	4	5	
Ветвей сети	$Y2 \Rightarrow Y3$	$Y1 \Rightarrow Y3$	
Независимых контуров и пар узлов	Убывает из $Y1$	Убывает из $Y2$	

Таблица 5

Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	1	2	3
Ветвей сети	$Y2 \Rightarrow Y1$	$Y2 \Rightarrow Y3$	$Y2 \Rightarrow Y4$
Независимых контуров и пар узлов	$Y2 \Rightarrow Y1$	$Y2 \Rightarrow Y3$	Убывает из $Y1$
Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	4	5	
Ветвей сети	$Y4 \Rightarrow Y1$	$Y3 \Rightarrow Y1$	
Независимых контуров и пар узлов	Убывает из $Y3$	Убывает из $Y4$	

В соответствии с определенными выше базисами представления (z)-сетей, матрицы, формализующие законы ковариантного и контравариантного преобразования, имеют вид

$$A_{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C_{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C_{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad C_{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad C_{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

с выполнением условий ортогональности (15).

Выбор СК в (z)-сетях определил следующий вид матриц пересчета $F_{(z)}$, ($z = \overline{1,4}$)

$$F_{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad F_{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа современных сетевых технологий и концепций их развития сформулирован комплекс требований, которому должны удовлетворять постановка задач структурного синтеза и их решения. Обоснована необходимость поиска новых подходов к формализации задач синтеза структуры телекоммуникационных сетей с разработкой соответствующих моделей и методов. По этой причине произведено тензорное описание ТКС путем задания ее модели – многопродуктовой многополюсной сети в анизотропном евклидовом пространстве с помощью смешанного мультитензора, валентность которого напрямую зависит от количества обслуживаемых сетью пользовательских трафиков, а также от числа параметров трафика, принимаемых к рассмотрению в процессе моделирования.

В рамках мультитензорной модели обеспечена адекватная формализация задачи структурного синтеза ТКС, отвечающая сформулированным требованиям и представленная в виде соответствующей оптимизационной задачи математического программирования. В зависимости от особенностей ее постановки, выбора исходных данных и порядка решения модель ориентирована на получение согласованного решения задач ВПС и РП при известной топологии, а также обеспечивает скоординированное решение задач ВТПС и РП.

Предложенная формализация задач структурного синтеза мультипротокольных ТКС предполагает возможность использования всего комплекса ранее разработанных методов их решения. Благодаря использованию тензорного подхода, удалось получить ряд важных преимуществ относительно традиционных методов [1, 5]. Использование ортогональной модели сети позволило получить в аналитическом виде условия реализации в ТКС многопутевой стратегии маршрутизации с фрагментацией (дефрагментацией) пакетов трафика в узлах сети и с поддержкой заданных показателей качества связи. В качестве подобных показателей выступали требуемая полоса пропускания и требуемое время обслуживания трафика заданной интенсивности, что отвечает принятым на практике в рамках технологий IP/IntServ, MPLS и ATM категориям обеспечения QoS. Подобное решение также отвечает требованиям современных концепций оптимизации ТКС – Traffic Engineering и Active Network, способствуя, тем самым, сбалансированному использованию всех доступных сетевых ресурсов.

В качестве критерия структурной оптимизации выбран минимум стоимости проектирования ТКС заданной структуры. Результат решения сформулированной оптимизационной задачи составила структура ТКС с указанием требуемых величин ПС каждого тракта передачи между узлами сети, а также порядок резервирования части ПС для каждого из обслуживаемых трафиков в соответствии с заданной стратегией маршрутизации (РП). Формализация задачи структурного синтеза ТКС и особенности ее решения продемонстрированы на численном примере расчета сети.

$$F_{(3)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad F_{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В качестве допустимого решения задачи ВТПС и РП можно принять результаты, приведенные в табл. 6, 7 и 8. При этом в табл. 6 приведены величины ПС ветвей сети (диагональные элементы матрицы L_{θ}), в табл. 7 показан порядок их распределения для обслуживания каждого из четырех трафиков, а в табл. 8 указаны характеристики трафиков – величины пакетов (фрагментов) и интенсивности в каждой из ветвей сети.

Таблица 6

Номер ветви	Ветвь	Величина пропускной способности ветви (байт/с)
1	Y1 ⇔ Y2	18300
2	Y1 ⇔ Y3	23000
3	Y2 ⇔ Y4	17800
4	Y3 ⇔ Y4	26000
5	Y1 ⇔ Y4	18000
6	Y2 ⇔ Y3	4500

Таблица 7

Номер трафика	Y1 ⇔ Y2	Y1 ⇔ Y3	Y2 ⇔ Y4	Y3 ⇔ Y4	Y1 ⇔ Y4	Y2 ⇔ Y3
Тр1	14000	18000	14000	18000	17000	–
Тр2	2300	2000	2800	3000	–	1500
Тр3	–	–	–	5000	–	–
Тр4	2000	3000	1000	–	1000	3000

Таблица 8

Номер трафика	Параметры трафика	Y1 ⇔ Y2	Y1 ⇔ Y3	Y2 ⇔ Y4	Y3 ⇔ Y4	Y1 ⇔ Y4	Y2 ⇔ Y3
Тр1	$\Lambda_{(1)}^{(1)}$	7000	9000	7000	9000	$17 \cdot 10^3$	–
	$H_{(1)}^{(1)}$	212	273	212	273	515	–
Тр2	$\Lambda_{(2)}^{(2)}$	1065	1065	1442	1442	–	1493
	$H_{(2)}^{(2)}$	213	213	288	288	–	299
Тр3	$\Lambda_{(3)}^{(3)}$	–	–	–	3000	–	–
	$H_{(3)}^{(3)}$	–	–	–	50	–	–
Тр4	$\Lambda_{(4)}^{(4)}$	2000	1500	500	–	500	1500
	$H_{(4)}^{(4)}$	1000	750	250	–	250	750

Несмотря на то, что задача синтеза структуры не относится к задачам реального времени, важное преимущество предложенной модели проявляется, в свою очередь, в возможности распараллеливания вычислений при расчете ПС трактов передачи и порядка распределения информационных потоков для каждого трафика в отдельности в случае линейного вида стоимостной функции (27).

При необходимости результаты решения поставленных задач для современных и перспективных сетей пакетной коммутации, полученные в рамках их тензорных моделей, могут быть уточнены с помощью соответствующих средств имитационного моделирования и натурных испытаний.

Развитие в теоретическом плане предложенного подхода к решению задач структурного и функционального синтеза ТКС видится в переходе к тензорным моделям неевклидовых пространств, например, риманова пространства. Это должно значительно расширить спектр решаемых с их помощью научных и прикладных задач анализа и расчета моделей ТКС, учитывающих динамику информационного обмена, задержки распространения и коммутации.

Литература: 1. *Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В.* Структурная оптимизация сетей ЭВМ. — К.: Техника, 1986. — 168 с. 2. *Гургендзе А.Т., Кореш В.И.* Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа. — СПб.: Наука и Техника, — 2003. —

400 с. 3. *Simha A., Osborne E.* Traffic Engineering with MPLS. Cisco Press, 2002. 608 p. 4. *Иванов П.* Активные сети // Сети. — 1999. — №10. — С. 14–24. 5. *Клейнрок Л.* Вычислительные системы с очередями. — М.: Мир, 1979. — 600 с. 6. *Вишневецкий В.М.* Теоретические основы проектирования компьютерных систем. — М.: Техносфера, 2003. — 512 с. 7. *Крон Г.* Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. — М.: Сов. радио, 1978. — 719 с. 8. *Лемешко А.В.* Особенности моделирования двухполюсной сети связи ортогональной сетью в рамках тензорного анализа // Радиотехника, 2002. Вып. 128. — С. 16–25. 9. *Лемешко А.В.* Мультитензорное представление многопродуктовой многополюсной модели телекоммуникационной сети // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. — Харьков: НАКУ «ХАИ», 2003. Вып. 21. — С. 92–101. 10. *Лемешко А.В.* Мультитензорная интерпретация решения маршрутных задач в телекоммуникационных сетях, представленных многопродуктовыми многополюсными моделями евклидового пространства // Радиоэлектронные и компьютерные системы, 2003. Вып. 3. — С. 115–126.

Поступила в редколлегию 08.04.2004



Лемешко Александр Витальевич, кандидат технических наук, докторант Харьковского института Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба. Научные интересы: системный анализ и оптимизация телекоммуникационных сетей.