

$$-1,07 \cdot \left(|f| - \frac{1-\alpha}{2 \cdot T} \right)^6 + 0,47 \cdot \left(|f| - \frac{1-\alpha}{2 \cdot T} \right)^8 - \dots$$

4. Заключение

Научная новизна проведенных исследований состоит в том, что на основе функции типа «приподнятый косинус» получен класс функций, обладающих лучшим убыванием энергии боковых лепестков.

Практическая значимость полученных результатов обусловлена возможностью использования приведенных сглаживающих функций в современных модемах, вместо функции типа «приподнятый косинус», что позволит повысить помехоустойчивость цифровых систем связи.

Литература: 1. *Ильина Д.Ю.* Повышение эффективности систем с парциальным кодированием. Автореф.

дис., Одесса, 2002. 2. *Прокис Дж.* Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000.

Поступила в редколлегию 28.06.2005

Рецензент: д-р физ.-мат.наук Кивва Ф.В.

Астраханцев Андрей Анатольевич, аспирант каф. “Сети связи” ХНУРЭ. Научные интересы: сети абонентского доступа, методы обработки сигналов, IP-телефония. Адрес: Украина, 61000, Харьков, пр. Героев Сталинграда, 154, кв.114, тел. 70-21-429.

Омельченко Анатолий Васильевич, канд. техн. наук, доцент каф. “Сети связи” ХНУРЭ. Научные интересы: методы обработки сигналов и распознавание образов. Адрес: Украина, 61115, Харьков, ул. 17-го Партсъезда, 8, кв.33, тел. 70-21-429.

Пресняков Игорь Николаевич, д-р техн. наук, проф. “Сети связи” ХНУРЭ. Научные интересы: теория эл. связи, технологии сетей связи, цифровая связь. Адрес: Украина, Харьков, пр. Победы, 54-б, кв.44.

УДК 621.391

ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННАЯ ТЕНЗОРНАЯ МОДЕЛЬ ДОСТАВКИ ОДИНОЧНЫХ СООБЩЕНИЙ (ПАКЕТОВ) В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ С ЗАДАННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА СВЯЗИ

ЛЕМЕШКО А.В., КРАВЧУК А.А., РУДЕНКО В.Н.

Предлагается математическая модель телекоммуникационной сети (ТКС), полученная с использованием возможностей аппарата тензорного анализа сетей. Модель описывает процесс доставки одиночных сообщений (пакетов) в ТКС с заданными показателями качества связи: среднее время доставки и вероятности правильной доставки сообщения (пакета).

1. Введение

Обеспечение мультисервиса и гарантированного качества обслуживания QoS (Quality of Service) для разнотипных трафиков пользователей является основным требованием для современных телекоммуникационных сетей (ТКС). По этой причине на рынке связи существует жесткая конкуренция между сетевыми технологиями преимущественно пакетной коммутации — Internet Protocol (IP), Asynchronous Transfer Mode (ATM) и MultiProtocol Label Switching (MPLS), которые в разной степени удовлетворяют вновь выдвигаемым требованиям [1].

Цель настоящей работы связана с решением проблемы обеспечения QoS и заключается в необходимости комплексного учета и контроля в рамках используемых моделей ТКС одновременно как вероятностных, так и временных показателей каче-

ства обслуживания, например, вероятности правильной и (или) своевременной доставки пакета, средней задержки его доставки, джиттера и др.

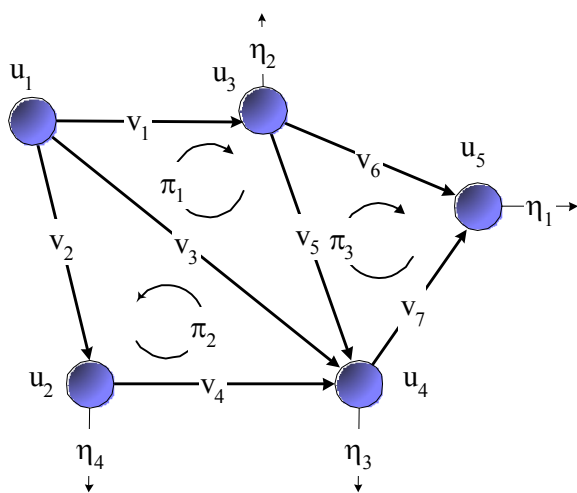
Ограниченность графокомбинаторных моделей ТКС [2] заключается в том, что они ориентированы на учет лишь одного показателя качества, в роли которого обычно выступала пропускная способность тракта передачи сети. Попытки учета двух показателей ограничивались лишь однофазными математическими моделями ТКС [3, 4], которые не учитывали возможности переприема пакетов, транзитных функций узлов сети, а также использования обходных путей доставки пакетов. В этой связи заслуживает внимания подход к моделированию ТКС, основанный на тензорном представлении уравнения поведения сети, в рамках которого удалось адекватно формализовать процессы многопутевой доставки одиночных пакетов и сообщений с обеспечением QoS по временным показателям [5].

Задача данного исследования заключается в расширении возможностей тензорных моделей ТКС на случай обеспечения QoS не только по временным, но и по вероятностным показателям.

2. Тензорная модель ТКС

В рамках тензорного анализа сетей [6] при моделировании структуры ТКС одномерным симплициальным 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 ТКС, а ветви — тракты передачи (ТП). 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_5 и v_3 (рисунок), 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 рисунке 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.



Структурная модель ТКС, представленная одномерной $\pi\eta$ -сетью

Полюсами называются те узлы сети, через которые в сеть поступает или убывает из нее определенный информационный трафик. Все остальные узлы называют внутренними. Далее основное внимание будет уделено именно двухполюсным сетям, т.е. сетям, в которых во множестве узлов выделяется два полюса: один исток и один сток, между которыми осуществляется доставка сообщения.

Важным моментом при рассмотрении путей в сети, контуров и узловых пар является то, что с любым из них тесно связано понятие «направление» или «ориентация». При этом 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. Далее сеть, представленная как совокупность контуров и узловых пар, будет именоваться как $\pi\eta$ -сеть.

Пусть связная сеть S , т.е. сеть, не содержащая несвязных компонент, состоит из n ветвей и m узлов. Тогда [7] ранг сети $\rho(S)$ и цикломатическое

число $\mu(S)$ определяют в ней соответственно число базисных контуров и узловых пар

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

$$\mu(S) = n - m + 1, \quad (2)$$

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

Структура сети определяет пространство, размерность которого соответствует числу ветвей сети [5, 6]. 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 (см. рисунок), 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) количество базисных узловых пар (ρ) соответствует четырем, а численность базисных контуров (μ) равняется трем, что определяет в сумме общее число ветвей в сети.

За основу функционального описания ТКС в рамках предлагаемой тензорной модели возьмем следующую систему скалярных уравнений, характеризующую взаимосвязь основных вероятностно-временных параметров сети:

$$h_v^i = l_{ii}^v \tau_i^v \quad (i = \overline{1, n}); \quad (3)$$

$$p_i^n = (1 - p_{BER}^i)^{h_v^i} \quad (i = \overline{1, n}), \quad (4)$$

где l_{ii}^v – величина пропускной способности (ПС) ветви v_i , выделенной от общей ПС моделируемого ТП сети, например, в рамках механизма обслуживания очередей CBWFQ (Class-Based Distributed Weighted Fir Queuing), и измеряется в бит/с; h_v^i – длина передаваемого пакета в ветви v_i , измеряемая в битах; τ_i^v – временная задержка передачи пакета в ветви v_i , измеряемая в секундах; p_i^n – вероятность правильной передачи пакета в ветви v_i ; p_{BER}^i – вероятность ошибки на бит (BER – Bit Error Rate).

В соответствии со вторым и третьим постулатом обобщения Г. Крона [6] уравнение (3) в тензорной форме можно представить в виде [5]

$$H = L T, \quad (5)$$

где H – контравариантный тензор величин пакетов, передаваемых в базисных путях сети; T – ковариантный тензор временных задержек передачи пакетов в базисных путях сети; L – дважды контравариантный тензор пропускных способностей базисных путей.

Для приведения уравнения (4) к тензорному виду необходимо предварительно провести ряд преобразований и учесть, что вероятность p_i^n правильной

передачи пакета по пути, состоящего из α ветвей, рассчитывается как

$$p_{\Pi} = \prod_{i=1}^{\alpha} p_i^{\Pi}. \quad (6)$$

Выражение (6) путем логарифмирования можно привести к аддитивной форме для дальнейшего определения ко- и контравариантных величин в выводимом тензорном уравнении. Тогда

$$\log_2 p_{\Pi} = \sum_{i=1}^{\alpha} \log_2 p_i^{\Pi}. \quad (7)$$

Выражение (7) после логарифмирования примет вид $\log_2 p_i^{\Pi} = [\log_2(1 - p_{\text{BER}}^i)] h_v^i$, которое можно записать в матричной форме:

$$P_v = Y_v H_v, \quad (8)$$

где $P_v = [p_1^v \ p_2^v \ \dots \ p_i^v \ \dots \ p_n^v]^t$ при $p_i^v = \log_2 p_i^{\Pi}$ ($i = \overline{1, n}$); $Y_v = \parallel y_{ij}^v \parallel$ — диагональная матрица размерности $n \times n$, элементы главной диагонали которой определяются как $y_{ii}^v = \log_2(1 - p_{\text{BER}}^i)$; $[\cdot]^t$ — операция транспонирования.

Выражение (8) уже в тензорной форме примет следующий вид:

$$P = Y H, \quad (9)$$

в котором P — одновалентный ковариантный тензор и в соответствии с обратным тензорным признаком [6] Y — дважды ковариантный тензор.

Введем в рассмотрение две координатные системы. Первая — система координат ветвей сети, а вторая — система координат контуров сети. При этом в первой системе координат в качестве базисных путей непосредственно выступают отдельные ветви сети, а во второй — базисные пути представлены базисными контурами и узловыми парами. Подобный выбор СК обусловлен тем, что в системе координат ветвей сети необходимо рассчитать неизвестные величины — информационную загрузку и временные задержки пакетов в каждом тракте передачи ТКС. В системе координат базисных контуров и узловых пар проекции тензоров H , T и P определяют исходные данные для решения расчетных задач: исходную длину сообщения (пакета) $h_{\Pi}^{\text{сх}}$, требуемую задержку доставки $\tau_{\text{трб}}^{\Pi}$ и требуемую вероятность правильной доставки пакета $p_{\text{трб}}^{\Pi}$ между заданной парой узлов сети.

В соответствии с постулатом второго обобщения Г. Крона [6], в качестве функционального инварианта предлагаемой модели выступают тензорные уравнения (5) и (9), сохраняющие свою форму неизменной независимо от координатной системы рассмотрения сети. В СК ветвей сети тензорное уравнение (9) принимает вид выражения (8), а тензорное уравнение (5) приобретает вид

$$H_v = L_v T_v, \quad (10)$$

где H_v и T_v — векторы, соответственно, величин пакетов и задержек передачи в ветвях сети размерности n ; $L_v = \parallel l_{ij}^v \parallel$ — матрица пропускных способностей ветвей сети, которая имеет диагональную структуру и размерность $n \times n$.

В системе координат базисных контуров и узловых пар сети уравнения (5) и (9) примут соответственно вид

$$H_{\pi\eta} = L_{\pi\eta} T_{\pi\eta} \quad (11)$$

$$\text{и} \quad P_{\pi\eta} = Y_{\pi\eta} H_{\pi\eta}, \quad (12)$$

в которых величины $T_{\pi\eta}$, $H_{\pi\eta}$, $P_{\pi\eta}$, $L_{\pi\eta}$ и $Y_{\pi\eta}$ — проекции тензоров T , H , P , L и Y в системе координат базисных контуров и узловых пар сети.

В дальнейшем к рассмотрению будет принят следующий аналог выражения (12):

$$H_{\pi\eta} = X_{\pi\eta} P_{\pi\eta}, \quad (13)$$

где $X_{\pi\eta} = [Y_{\pi\eta}]^{-1}$ — проекция дважды контравариантного тензора X в системе координат базисных контуров и узловых пар, а $[\cdot]^{-1}$ — операция обращения матрицы.

Ввиду одинаковой размерности введенных координатных систем существуют однозначные правила преобразования координат любых геометрических объектов из одной системы координат в другую, которые формализуются с помощью невырожденных квадратных матриц размера $n \times n$. При рассмотрении $\pi\eta$ -сетей [6] искомые матрицы ко- и контравариантного преобразования A и C определяются из соотношений, соответственно

$$H_v = C H_{\pi\eta} \quad (14)$$

$$\text{и} \quad T_v = A T_{\pi\eta} \quad \text{или} \quad P_v = A P_{\pi\eta}. \quad (15)$$

Выражение (14) характеризует взаимосвязь проекций тензора величин пакетов H в системах координат ветвей сети и базисных контуров и узловых пар, а выражения (15) определяют зависимость координат ковариантных величин T и P в тех же системах координат. Матрица ковариантного преобразования A связана с матрицей контравариантного преобразования C условием ортогональности:

$$A C^t = I, \quad (16)$$

где I — единичная матрица размера $n \times n$. Отметим, что векторы H_v и $H_{\pi\eta}$ имеют составляющие

$$H_v = \begin{bmatrix} h_v^1 \\ h_v^2 \\ \vdots \\ h_v^i \\ \vdots \\ h_v^n \end{bmatrix}; \quad H_{\pi\eta} = \begin{bmatrix} H_{\pi} \\ \dots \\ H_{\eta} \end{bmatrix}; \quad H_{\pi} = \begin{bmatrix} h_{\pi}^1 \\ h_{\pi}^2 \\ \vdots \\ h_{\pi}^j \\ \vdots \\ h_{\pi}^{\mu} \end{bmatrix}; \quad H_{\eta} = \begin{bmatrix} h_{\eta}^1 \\ h_{\eta}^2 \\ \vdots \\ h_{\eta}^k \\ \vdots \\ h_{\eta}^{\rho} \end{bmatrix},$$

здесь H_π , H_η – векторы величин пакетов, возникающих в контурах сети и поступающих на ее узлы размерностей μ и ρ соответственно; h_π^j – величина пакета в j -м контуре сети; h_η^k – величина пакета, поступающего в сеть и убывающего из нее через k -ю пару узлов.

В свою очередь, векторы T_v , $T_{\pi\eta}$ и $P_{\pi\eta}$ имеют размерность n и следующую структуру:

$$T_v = \begin{bmatrix} \tau_1^v \\ \tau_2^v \\ \vdots \\ \tau_i^v \\ \vdots \\ \tau_n^v \end{bmatrix}; T_{\pi\eta} = \begin{bmatrix} T_\pi \\ - \\ T_\eta \end{bmatrix}; T_\pi = \begin{bmatrix} \tau_1^\pi \\ \tau_2^\pi \\ \vdots \\ \tau_j^\pi \\ \vdots \\ \tau_\mu^\pi \end{bmatrix}; T_\eta = \begin{bmatrix} \tau_1^\eta \\ \tau_2^\eta \\ \vdots \\ \tau_k^\eta \\ \vdots \\ \tau_\rho^\eta \end{bmatrix}; P_{\pi\eta} = \begin{bmatrix} P_\pi \\ - \\ P_\eta \end{bmatrix};$$

$$P_\pi = \begin{bmatrix} p_1^\pi \\ p_2^\pi \\ \vdots \\ p_j^\pi \\ \vdots \\ p_\mu^\pi \end{bmatrix}; P_\eta = \begin{bmatrix} p_1^\eta \\ p_2^\eta \\ \vdots \\ p_k^\eta \\ \vdots \\ p_\rho^\eta \end{bmatrix}.$$

Здесь τ_j^π , τ_k^η – задержки передачи данных в j -м контуре и между k -й парой узлов сети. Также p_j^π , p_k^η – выраженные в логарифмической форме вероятности правильной доставки пакета вдоль j -го контура и между k -й парой узлов сети. Векторы T_π , P_π и T_η , P_η имеют размерность μ и ρ соответственно.

Проекция дважды контравариантных тензоров L и χ при смене координатной системы преобразуются следующим образом:

$$L_{\pi\eta} = A^t L_v A \quad \text{и} \quad X_{\pi\eta} = A^t X_v A,$$

где X_v – проекция тензора χ в СК ветвей сети.

В зависимости от характера решаемой задачи по расчету искомых параметров, n неизвестных величин в уравнениях (11) или (12) могут произвольно перераспределяться между составляющими векторов $H_{\pi\eta}$ и $T_{\pi\eta}$ или $H_{\pi\eta}$ и $P_{\pi\eta}$ соответственно. Предельными являются случаи, когда полностью известны компоненты одного из каждой пары векторов.

3. Формулировка условий обеспечения QoS

Выражения (12) и (13) с учетом структуры входящих в них векторов и матриц можно записать в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} H_\pi \\ - \\ H_\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\pi\eta}^{(1)} & | & L_{\pi\eta}^{(2)} \\ - & - & - \\ L_{\pi\eta}^{(3)} & | & L_{\pi\eta}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_\pi \\ - \\ T_\eta \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} H_\pi \\ - \\ H_\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\pi\eta}^{(1)} & | & X_{\pi\eta}^{(2)} \\ - & - & - \\ X_{\pi\eta}^{(3)} & | & X_{\pi\eta}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_\pi \\ - \\ P_\eta \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где

$$\begin{bmatrix} L_{\pi\eta}^{(1)} & | & L_{\pi\eta}^{(2)} \\ - & - & - \\ L_{\pi\eta}^{(3)} & | & L_{\pi\eta}^{(4)} \end{bmatrix} = L_{\pi\eta} \quad \text{и} \quad \begin{bmatrix} X_{\pi\eta}^{(1)} & | & X_{\pi\eta}^{(2)} \\ - & - & - \\ X_{\pi\eta}^{(3)} & | & X_{\pi\eta}^{(4)} \end{bmatrix} = X_{\pi\eta}.$$

Контурные компоненты векторов $T_{\pi\eta}$ и $P_{\pi\eta}$ приравниваются к нулю, гарантируя тем самым отсутствие контуров (циклов, петель) в рассчитываемых маршрутах передачи пакетов, т.е. $T_\pi = 0$ и $P_\pi = 0$. Также при рассмотрении двухполосных задач к ρ известным координатам вектора H_η , определяющим исходные величины пакетов, которые поступают или убывают через узлы сети, в выражении (17) добавляются μ известных контурных компонентов вектора $T_{\pi\eta}$, а в выражении (18) – μ известных контурных компонентов вектора $P_{\pi\eta}$. Это позволяет из (17) получить равенство

$$H_\eta = L_{\pi\eta}^{(4)} T_\eta, \quad (19)$$

а из выражения (18) равенство

$$H_\eta = X_{\pi\eta}^{(4)} P_\eta. \quad (20)$$

Для получения условий обеспечения гарантированного качества обслуживания по вероятностно-временным показателям выражения (19) и (20), в свою очередь, удобно представить в форме

$$\begin{bmatrix} H_\eta^{(1)} \\ - \\ H_\eta^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\pi\eta}^{(4,1)} & | & L_{\pi\eta}^{(4,2)} \\ - & - & - \\ L_{\pi\eta}^{(4,3)} & | & L_{\pi\eta}^{(4,4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_\eta^{(1)} \\ - \\ T_\eta^{(2)} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} H_\eta^{(1)} \\ - \\ H_\eta^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\pi\eta}^{(4,1)} & | & X_{\pi\eta}^{(4,2)} \\ - & - & - \\ X_{\pi\eta}^{(4,3)} & | & X_{\pi\eta}^{(4,4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_\eta^{(1)} \\ - \\ P_\eta^{(2)} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

где

$$\begin{bmatrix} H_\eta^{(1)} \\ - \\ H_\eta^{(2)} \end{bmatrix} = H_\eta; \quad \begin{bmatrix} L_{\pi\eta}^{(4,1)} & | & L_{\pi\eta}^{(4,2)} \\ - & - & - \\ L_{\pi\eta}^{(4,3)} & | & L_{\pi\eta}^{(4,4)} \end{bmatrix} = L_{\pi\eta}^{(4)}; \quad \begin{bmatrix} T_\eta^{(1)} \\ - \\ T_\eta^{(2)} \end{bmatrix} = T_\eta;$$

$$\begin{bmatrix} X_{\pi\eta}^{(4,1)} & | & X_{\pi\eta}^{(4,2)} \\ - & - & - \\ X_{\pi\eta}^{(4,3)} & | & X_{\pi\eta}^{(4,4)} \end{bmatrix} = X_{\pi\eta}^{(4)}; \quad \begin{bmatrix} P_\eta^{(1)} \\ - \\ P_\eta^{(2)} \end{bmatrix} = P_\eta.$$

В выражениях (21) и (22) компоненты вектора H_η изначально известны, при этом первый компонент

$H_{\eta}^{(1)}$ относится к полюсам сети, т.е. узлам, через которые сообщение поступает в сеть или убывает из нее. Таким образом, размерность β вектора $H_{\eta}^{(1)}$ в рамках решаемой задачи не может быть больше двух. Второй компонент $H_{\eta}^{(2)}$ размерности $\langle \rho - \beta \rangle$ равен нулю, так как имеет отношение к оставшимся узлам сети, через которые пакеты сеть покидать не могут ввиду ее двухполюсности.

Компоненты $T_{\eta}^{(1)}$ и $P_{\eta}^{(1)}$ векторов T_{η} и P_{η} по условиям задачи известны и определяют требования к величинам временной задержки передачи и вероятности правильной доставки пакета в сети. Векторы $T_{\eta}^{(2)}$ и $P_{\eta}^{(2)}$ – неизвестные величины.

Компоненты матриц $L_{\pi\eta}^{(4)}$ и (или) $X_{\pi\eta}^{(4)}$, определяющие величины пропускной способности и вероятности битовой ошибки в ТП сети, являются искомыми величинами. Размерность компонентов $L_{\pi\eta}^{(4,1)}$ и $X_{\pi\eta}^{(4,1)}$, $L_{\pi\eta}^{(4,2)}$ и $X_{\pi\eta}^{(4,2)}$, $L_{\pi\eta}^{(4,3)}$ и $X_{\pi\eta}^{(4,3)}$, $L_{\pi\eta}^{(4,4)}$ и $X_{\pi\eta}^{(4,4)}$ матриц $L_{\pi\eta}^{(4)}$ и $X_{\pi\eta}^{(4)}$ составляет соответственно $\beta \times \beta$, $\beta \times \langle \rho - \beta \rangle$, $\langle \rho - \beta \rangle \times \beta$, $\langle \rho - \beta \rangle \times \langle \rho - \beta \rangle$.

Исходя из выражения (21), можно получить систему двух матричных уравнений:

$$H_{\eta}^{(1)} = L_{\pi\eta}^{(4,1)} T_{\eta}^{(1)} + L_{\pi\eta}^{(4,2)} T_{\eta}^{(2)}; \quad (23)$$

$$H_{\eta}^{(2)} = L_{\pi\eta}^{(4,3)} T_{\eta}^{(1)} + L_{\pi\eta}^{(4,4)} T_{\eta}^{(2)}. \quad (24)$$

Равенство нулю вектора $H_{\eta}^{(2)}$ позволяет из уравнения (24) получить выражение для расчета вектора $T_{\eta}^{(2)}$: $T_{\eta}^{(2)} = -[L_{\pi\eta}^{(4,4)}]^{-1} L_{\pi\eta}^{(4,3)} T_{\eta}^{(1)}$, подставляя которое в уравнение (23), получаем

$$H_{\eta}^{(1)} \leq (L_{\pi\eta}^{(4,1)} - L_{\pi\eta}^{(4,2)} [L_{\pi\eta}^{(4,4)}]^{-1} L_{\pi\eta}^{(4,3)}) T_{\eta}^{(1)}, \quad (25)$$

выполнение его гарантирует требуемую временную задержку доставки сообщения (пакета) известной длины.

Согласно той же методике из выражения (22) можно получить условие

$$H_{\eta}^{(1)} \leq (X_{\pi\eta}^{(4,1)} - X_{\pi\eta}^{(4,2)} [X_{\pi\eta}^{(4,4)}]^{-1} X_{\pi\eta}^{(4,3)}) P_{\eta}^{(1)}, \quad (26)$$

выполнение которого гарантирует требуемую вероятность правильной (безошибочной) доставки сообщения (пакета) известной длины. Если в процессе решения задачи на этапе построения модели и формирования вектора H_{η} в качестве опорного узла выбрать один из полюсов сети, то размерность вектора $H_{\eta}^{(1)}$ будет равна единице, т.е. $\beta = 1$. Это позволяет в выражениях (21) и (22) определить

$$H_{\eta}^{(1)} = h_{\pi}^{\text{исх}}, T_{\eta}^{(1)} = \tau_{\text{трб}}^{\pi} \text{ и } P_{\eta}^{(1)} = p_{\text{трб}}^{\pi}.$$

Выполнение условий неравенств (25) и (26) можно обеспечить путем расчета необходимых величин пропускной способности ТП и вероятностей ошибки на бит в этих трактах передачи, как правило, по итогам решения оптимизационной задачи.

Может быть получено три типа решений поставленной задачи. Первый подразумевает разбивку сообщения на пакеты или фрагментацию (дефрагментацию) самих пакетов в узлах сети, когда в процессе решения задачи необходимо отслеживать выполнение условия

$$h_v^i \geq h_{\min} \quad (i = \overline{1, n}), \quad (27)$$

где h_{\min} – минимальная величина пакета, передаваемого в сети, не подлежащая фрагментации.

Второй тип решения, также предполагающий разбивку сообщения на пакеты или фрагментацию (дефрагментацию) самих пакетов, основывается на том, что размер пакета в рамках того или иного транспортного протокола может принимать строго определенную величину, т.е.

$$h_v^i \in \{h_1, \dots, h_g, \dots, h_G\} \quad (g = \overline{1, G}), \quad (28)$$

где G – количество вариантов величин пакетов, которые поддерживаются в ТКС.

Третий тип решений не предполагает проведение разбивки сообщений на пакеты и фрагментацию (дефрагментацию) пакетов, т.е. необходимо, чтобы в процессе доставки длина сообщений (пакета) не изменялась. Тогда вместо условий (27) и (28) необходимо обеспечить выполнение условия

$$h_v^i \in \{0, h_{\pi}^{\text{исх}}\} \quad (i = \overline{1, n}).$$

4. Выводы

Научная новизна полученных результатов состоит в применении аппарата тензорного анализа сетей для синтеза математической модели ТКС, направленного на расширение ее функциональных возможностей на случай обеспечения QoS одновременно как по временным, так и по вероятностным показателям.

Практическое использование предложенной модели доставки одиночных сообщений и (или) пакетов может быть целесообразно в рамках существующих сетевых технологий. Например, в IP-сетях, поддерживающих фрагментацию пакетов, при обеспечении QoS в модели IntServ с помощью протокола резервирования сетевых ресурсов RSVP (Resource Reservation Protocol); в MPLS-сетях для оптимизации работы сигнального протокола распределения меток SCR-LDP (Signalling Constraint-based Routed Label Distribution Protocol), а также в ATM-сетях с фиксированной величиной передаваемых пакетов (ячеек) в рамках маршрутизирующего и одновременно сигнального протокола PNNI (Private Network – to – Network Interface).

Литература: 1. Вегениа III. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 386с. 2. Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J. J. An Algorithm for Multipath Computation Using Distance-Vectors with Predecessor Information // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Boston, 1999. P. 534-539. 3. Арунов М.Н. Проектирование и техническая эксплуатация сетей передачи дискретных сообщений. М.: Радио и связь, 1988. 285с. 4. Дымарский Я.С.,

Нурмиева М. В. Оптимальное распределение ресурсов в сети с разнородными потоками // Вестник МАИСУ. 2002. №6. С. 31-35. 5. Лемешко А.В. Особенности моделирования двухполюсной сети связи ортогональной сетью в рамках тензорного анализа // Радиотехника. 2002. Вып. 128. С.16-25. 6. КронГ. Тензорный анализ сетей. М.: Сов. радио, 1978. 719с. 7. Свами М, Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы. М.: Мир, 1984. 455 с.

Поступила в редколлегию 03.07.2005

Рецензент: д-р техн.наук,проф. Поповский В.В.

Лемешко Александр Витальевич, канд. техн. наук, доцент Харьковского университета Воздушных Сил.

Научные интересы: системный анализ сетей связи. Адрес: Украина, 61165, Харьков, ул. Клочковская, 228. Контактные телефоны: 330-82-19 (раб.).

Кравчук Александр Анатольевич, инженер Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: оптимизация сетей связи. Адрес: Украина, 61165, Харьков, ул. Клочковская, 228. Контактные телефоны: 330-82-19 (раб.).

Руденко Владислав Николаевич, канд. техн. наук, доцент Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: моделирование сложных систем. Адрес: Украина, 61165, Харьков, ул. Клочковская, 228. Контактные телефоны: 330-82-19 (раб.).

УДК 681.7.069.24:681.7.064.45

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БРЭГГОВСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В КОМПЛЕКСЕ С ОКСИДНЫМ ОКНОМ

*КОВБАСА А.А., ЗИНЬКОВСКАЯ И.О.,
ЛЫСАК В.В., ШУЛИКА А.В.,
СУХОИВАНОВ И.А.*

С позиций физических эффектов задержки отражения и дисперсии проводится анализ оптических свойств многослойных зеркал лазеров с вертикальным резонатором и оксидным окном. Получены спектральные зависимости коэффициента отражения и фазы отражения брэгговского зеркала с оксидным слоем и без него. Обсуждается влияние включения оксидного окна в распределенное брэгговское зеркало на спектр его отражения, фазовую глубину проникновения света и электромагнитное поле в резонаторе лазера.

1. Введение

В настоящее время периодические полупроводниковые структуры применяются для усовершенствования широкого спектра оптоэлектронных компонентов. Например, в таких устройствах как лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР) [1], полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглотителем [2] и резонансные фотодетекторы [3] успешно используются распределенные брэгговские отражатели (РБО). Особый интерес здесь представляют ЛВР — полупроводниковые лазеры, у которых направление лазерного излучения нормально к плоскости составляющих слоев. В этих лазерах используются как полупроводниковые [4], так и аморфные диэлектрические зеркала [5]. К основным преимуществам такой конструкции лазера относятся: высокая скорость модуляции (до 12 Гбит/с), малые рабочие токи (пороговые токи менее 1 мА), малые размеры резонатора (длина резонатора до 10 мкм, а диаметр — до 20 мкм), возможность устойчивой одномодовой генерации, круглое сечение светового пучка, высокие надежность и КПД [6]. Такие высокие показатели ЛВР достигаются за счет использования оксидного окна, назначение которого состоит в локализации и более равномерном

распределении носителей заряда в центре активной области резонатора ЛВР. Таким образом, применение оксидных окон позволяет в значительной степени снизить пороговый ток лазера и, кроме того, дает возможность получать одномодовое излучение в широком диапазоне изменения тока накачки за счет фокусировки электромагнитного поля в центре резонатора ЛВР. Типичная схема формирования оксидного окна состоит в следующем. При изготовлении РБО один из его периодов выращивают с повышенным содержанием арсенида алюминия. После завершения стадии роста следует процесс подготовки прибора, в котором структуру помещают в среду с высоким содержанием кислорода при температуре порядка 400°С [7]. При таких условиях арсенид алюминия окисляется до оксида алюминия. Соблюдая необходимый временной режим и зная скорость окисления [8], можно получить оксидное окно заданных размеров. Как правило, оксидные окна располагают со стороны движения дырок или с обеих сторон от активной области. Расстояние между активной областью и оксидным окном должно быть минимальным, чтобы обеспечить наилучшую фокусировку потока носителей. В то же время оксидное окно должно располагаться в минимуме интенсивности продольной моды, чтобы как можно меньше влиять на распределение светового поля вдоль резонатора ЛВР и уменьшить потери рассеяния излучения и дифракционные потери в резонаторе.

Из-за распределенного и периодического характера брэгговские отражатели вносят конечную задержку отражения [9] и дисперсию [10,11] в отраженный сигнал, которые зависят от параметров каждого слоя РБО. Поэтому внесение оксидного окна ведет не только к фокусировке носителей заряда и оптического поля, но и к изменению отражательных свойств как отдельно взятого РБО, так и резонатора ЛВР в целом. Дисперсия приводит к расширению импульса и его искажению [10], а задержка отражения влияет на время прохода импульса в резонаторе ЛВР, и определяет эффективную длину резонатора лазера. Таким образом, изменение фазовых условий распространения света в РБО с оксидным окном может привести как к иному распределению электромагнитной моды в резонаторе ЛВР, так и к сдвигу частоты лазерной