

УДК 519.6: 629.7.036.3

В.И. КОРТУНОВ, А.В. ВОРОБЬЕВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦИИ

Приведены современные требования, предъявляемые к решению задач маршрутизации. Рассмотрены основные подходы к математической постановке задач управления ресурсами сети передачи данных. Показана необходимость перехода от эвристических схем и статических моделей к динамическим описаниям. Среди возможных способов математического моделирования, наиболее плодотворным оказался подход, основанный на использовании методов пространства состояний. Предложена усовершенствованная динамическая модель сети передачи данных в форме уравнений состояния с учетом приоритетности. Рассмотрено решение задачи управления сетью на основе предложенной модели. Приведен пример решения задачи маршрутизации.

Ключевые слова: оптимизация, динамическое управление, маршрутизация, моделирование, приоритетность, распределение ресурсов.

Введение

В настоящее время большим и динамично развивающимся сектором мировой экономики является рынок телекоммуникаций. Хотя основной вклад вносят оплата телекоммуникационных услуг и продажа оборудования, по темпам роста впереди оказался сектор систем управления сетями передачи данных (СПД) [1].

Эффективность функционирования СПД во многом зависит от решения задач управления на сетевом уровне и в частности задачи маршрутизации.

Требования к решению задач маршрутизации

В связи с изменениями, которые произошли в СПД в последнее время, расширился перечень и содержание требований, к постановке и решению задач маршрутизации [2, 3]. Так, в частности, необходимо учитывать следующие:

- гибридный характер современных сетей с интеграцией разных технологий (в том числе с разными режимами пакетной коммутации);
- разнородность трафиков пользователей;
- обеспечение гарантированного качества обслуживания (Quality of Service (QoS)) с отслеживанием не только номинальной, но и доступной пропускной способности трактов передачи;
- расширение перечня требований к QoS, что проявляется в необходимости поддержки дифференциальных услуг связи одновременно по нескольким показателям качества (скорость передачи, сред-

няя задержка доставки пакетов, джитер, вероятность правильной или своевременной доставки пакета и др.);

- эффективное использование отдельных сетевых ресурсов и СПД в целом;
- многопутевой (многопоточный) способ транспортирования сообщений и отказоустойчивость;
- балансировка нагрузки;
- адаптивность и интеллектуальность сетевых систем управления;
- иерархическая стратегия управления.

Таким образом, анализ состояния современных требований к маршрутизации показывает, что задача маршрутизации должна рассматриваться как комплексная задача касательно оптимизации доступных сетевых ресурсов [4, 5]. Особое значение наряду с существующими задачами приобретает задача обеспечения гарантированного качества обслуживания в гибридных СПД и учета задержек, вносимых узлами и каналами сети, решение которой предполагает разработку соответствующих моделей и методов маршрутизации [6, 7].

Математическая основа современных протоколов управления

В ряде работ связанных с управлением сетевыми ресурсами при решении потоковых задач наблюдается использование статических моделей, в рамках которых не отслеживается изменение состояния СПД во времени. Общим недостатком, свойственным статическим моделям является невысокое качество получаемых решений, особенно в условиях их

реализации в протоколах управления реального времени. Отсутствие учета динамики изменения характеристик трафика, загруженности канальных и буферных ресурсов, как правило, вызывает заикливание пакетов в ходе их маршрутизации, а также способствует необоснованному принятию решений при резервировании сетевых ресурсов и ограничении трафика на приграничных и транзитных узлах.

Некоторым выходом из сложившейся ситуации, связанной с применением статических математических моделей, является обеспечение уже на технологическом уровне периодического или аperiodического (по требованию) перерасчета управляющих воздействий (маршрутных таблиц, порядка использования канальных и буферных ресурсов) в соответствии с текущим изменением состояния СПД – ее топологии (например, в протоколах RIP, OSPF), загруженности сетевых узлов и производительности различных участков (сегментов) СПД (например, в протоколах EIGRP, IS-IS, PNNI). Как правило, при реализации данного подхода учитывается незначительное число параметров системы, значения которых устанавливаются административно, либо задаются путем статистического усреднения результатов измерений.

Таким образом, анализ основных подходов к математической постановке задач управления ресурсами СПД демонстрирует необходимость перехода от эвристических схем и статических моделей к динамическим описаниям, что является залогом улучшения качества синтезируемого управления и повышения эффективности функционирования системы в целом. Причем среди возможных способов математического моделирования, как показывает анализ, наиболее плодотворным является подход, основанный на использовании методов пространства состояний. Модели данного типа наряду с учетом связи состояний системы во времени трактуют СПД как многосвязную архитектуру, в рамках которой согласуется описание особенностей ее структурного и функционального построения [5, 7].

Однако в связи со сложностью решения задач маршрутизации и тем, что математический аппарат еще не достаточно развит, появляется множество публикаций по этим вопросам [4, 5].

Постановка задачи исследования

Задача данной статьи усовершенствовать динамическую математическую модель СПД в форме уравнений состояния, путем учета задержек и приоритетности в обработке поступающей нагрузки. Рассмотреть решение задач управления сетью на основе усовершенствованной модели с реализацией равномерной загрузки всей сети.

Динамическая модель СПД в форме уравнений состояния с учетом приоритетности

Для эффективного исследования и решения задач маршрутизации важно адекватно математически описать СПД и ее работу. Математическую модель СПД можно представить структурной и функциональной моделями [8].

Структура сети описывается с помощью ориентированного взвешенного графа $G = (V, H)$, где вершины V_i , $i = \overline{1, N}$ – моделируют узлы СПД, а дуги $H_{i,j}$, $i, j = \overline{1, N}$, $i \neq j$, – тракты передачи. Основной характеристикой узлов выбрано объем их буферной памяти $x_i^{\max}$ (общий объем), а трактов передачи – их пропускную способность $c_{i,j}$.

На сегодняшний день функциональную модель сети, как сложную динамическую систему, с целью обеспечения оптимального управления сетевыми ресурсами, можно представить марковским случайным процессом в форме дифференциально-разностных уравнений состояния в дискретные моменты времени t_k , $k = 0, 1, \dots$, с интервалом дискретизации $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

Принятие гипотезы о детерминированном характере структурно-функциональных параметров системы приводит к постановке задачи управления ресурсами СПД в виде оптимизационной задачи, связанной с поиском экстремума некоторой целевой функции в условиях наличия полной априорной информации о состоянии системы, ее параметрах и внешних воздействиях [5, 8].

Динамическая модель маршрутизации в СПД может быть представлена в виде системы из $N(N-1)$ несвязанных линейных разностных уравнений состояния

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{l=1, l \neq i}^N b_{i,l}(k) u_{i,l}^j(k) + \sum_{m=1, m \neq i,j}^N b_{m,i}(k) u_{m,i}^j(k) + y_{i,j}(k), \quad (1)$$

где $i, j = \overline{1, N}$, $i \neq j$; $x_{i,j}(k)$ – объем данных, который находится в момент времени t_k на узле V_i и предназначенный узлу V_j ; $b_{i,l}(k) = c_{i,j}(k) \Delta t$, (t_k , $k = 0, 1, \dots$, $\Delta t = t_{k+1} - t_k$); $u_{i,l}^j(k)$ – часть пропускной способности тракта $H_{i,j}$, которая выделяется в момент времени t_k для передачи трафика, предназначенного узлу V_j ; $y_{i,j}(k) = \zeta_{i,j}(k) \Delta t$,

$\zeta_{i,j}(k)$ – интенсивность поступления нагрузки в момент времени t_k на узел V_i , предназначенная узлу V_j , которая определяется как суммарная интенсивность потоков абонентов, подключенных к узлу V_i .

На введенные переменные с целью исключения возможности перегрузки элементов СПД, что связано с ограниченностью буферных очередей на узлах и пропускных способностей трактов передачи, следует наложить ограничения.

Система уравнений (1) в векторно-матричном виде выглядит следующим образом:

$$\bar{x}(k+1) = A(k)\bar{x}(k) + B(k)\bar{u}(k) + \bar{y}(k), \quad (2)$$

где $\bar{x}(k) = [x_{1,2}(k), \dots, x_{i,j}(k), \dots, x_{N,N-1}(k)]^T$ – вектор переменных состояния; $A(k)$ – матрица, отображающая стратегию отбрасывания пакетов на узлах сети; $B(k)$ – матрица, элементами которой являются величины $\pm b_{i,j}(k)$ с учетом знака в уравнении (1);

$$\bar{u}(k) = [u_{1,2}^2(k), \dots, u_{i,j}^j(k), \dots, u_{N,N-1}^{N-1}(k)]^T$$
 – вектор маршрутных переменных;

тор маршрутных переменных;

$$\bar{y}(k) = [y_{1,2}(k), \dots, y_{i,j}(k), \dots, y_{N,N-1}(k)]^T$$
 – вектор внешней нагрузки.

тор внешней нагрузки.

Модель с учетом приоритетности. Предлагаемая модель будет выглядеть также как в (2) за исключением того что маршрутный вектор будет разложен на сумму векторов

$$\bar{u}(k) = [\bar{u}^{(\text{приор})}(k)]^T + [\bar{u}^{(\text{без приор})}(k)]^T,$$

позволяющую отдельно учесть части пропускных способностей, которые будут выделяться для трафика с приоритетом и трафика без приоритета. А дискретные моменты времени t_k , $k = 0, 1, \dots$, с интервалом дискретизации $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ учтут запаздывания.

Решение задачи управления сетью на основе усовершенствованной модели. Задача управления ресурсами в рамках приведенной модели может быть рассмотрена как оптимизационная задача минимизации некоторого целевого функционала по переменным управления при наличии ряда ограничений [9, 10].

В качестве критерия оптимизации для решения задачи маршрутизации выбран минимум квадратичного функционала, который отображает оценку качества управления в процессе поиска решения и затраты ресурсов на реализацию этого управления:

$$J = \sum_{k=0}^{K-1} [X^T(k)Q_X X(k) + U^T(k)Q_U U(k)] \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Q_X , Q_U – диагональные соответственно неотрицательно и положительно определенные весовые матрицы, определяемые приоритетностью очередей на узлах и важностью трактов передачи в СПД.

Физически функционал (3) характеризует суммарную стоимость использования сетевых ресурсов в процессе решения задач управления. При этом первое слагаемое определяет затраты по использованию буферных устройств сетевых узлов, а второе – количественно отображает стоимость использования канальных ресурсов СПД [8].

Пример решения задачи маршрутизации

Структура сети состоит из трех узлов и трех дуплексных трактов передачи с соответствующими условными величинами их пропускных способностей (Мб) (рис. 1). Все узлы характеризуются одинаковым объемом буферной памяти равным 128 Мб. Матрица связности $B1$ и матрицы A , Q , R , имеют следующий вид.

$$B1 = \begin{bmatrix} 0 & 100 & 80 \\ 100 & 0 & 60 \\ 80 & 60 & 0 \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0,8 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0,8 \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} 0,2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0,2 \end{bmatrix}.$$

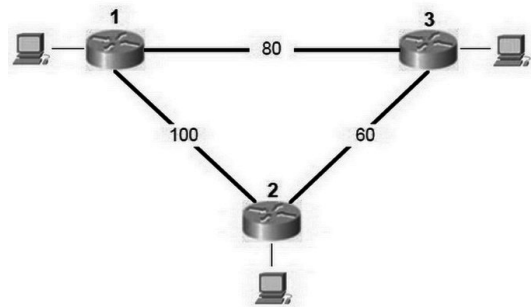


Рис. 1. Топология сети

Начальные условия (значения векторов в момент времени t_0):

$$\bar{x}(0) = [0 \dots 0]^T;$$

$$\bar{y}(0) = [10 \ 20 \ 30 \ 80 \ 50 \ 80]^T \cdot \text{rand},$$

где rand – равномерное случайное распределение в диапазоне от 0 до 1; $\bar{u}(0) = [0 \dots 0]^T$.

Значения векторов $\bar{x}(k)$, $\bar{y}(k)$, $\bar{u}(k)$ записаны в Мб. Время регулирования (моделирования) $T = 100$ с. с шагом 1 с.

Результаты

В рамках приведенной модели под заданные начальные условия были получены следующие результаты моделирования, показанные на рис. 2.

Из полученных результатов видно, что СПД успешно справляется с поступающей нагрузкой и равномерно распределяет ее, с соблюдением заданных ограничений. В случае перегрузки производится ограничение величины поступающего трафика.



Рис. 2. Результаты моделирования

Заклучение

Разработана усовершенствованная модель, которая позволила разграничить выделяемую полосу пропускания отдельно для приоритетного и без приоритетного трафика.

На основе разработанной модели была усовершенствована схема маршрутизации, которая позволила более эффективно управлять ресурсами сети и равномерно загружать узлы и линии связи. При этом, чем больше избыточных линий связи существует в топологии сети, тем больше будет выигрыш по параметрам производительности.

Использование предложенной схемы маршрутизации на практике предполагает реализацию централизованного подхода к управлению сетью. Централизованное управление сетью, хотя теоретически дает лучшие результаты, на практике связано с рядом трудностей.

Основным недостатком является медленная сходимость, поскольку такое управление зависит от глобальных параметров, которые трудно узнать априорно.

В реальных сетях используются распределенные подходы управления, которые обладают высокой сходимостью, но при этом приводят к

неравномерной загрузке сети. При имеющихся недостатках полностью децентрализованного и централизованного управления, в дальнейших работах планируется объединить их положительные особенности.

Литература

1. Крук, Б.И. Телекоммуникационные системы и сети. Том 1 [Текст]: учеб. пособие для вузов / Б.И. Крук, В.Н. Понантопуло, В.П. Шувалов; под ред. В.П. Шувалова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 647 с.
2. Остерлох, Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка [Текст]: пер с англ. / Х. Остерлох. – С.Пб.: ВHV, 2002. – 512 с.
3. Хелеби, С. Принципы маршрутизации в Internet [Текст]: пер. с англ. / С. Хелеби, Д. Мак-Ферсон. – М.: Вильямс, 2003. – 448 с.
4. Тимофеев, А.В. Адаптивная маршрутизация и мульти-агентная обработка информации в глобальных СПД [Текст] / А.В. Тимофеев // МСО Всероссийской науч. конференции: сб. науч. тр. МГУ им. М.В. Ломоносова. Вып. 2. – М., 2005. – С. 195 – 201.
5. Поповский, В.В. Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний [Текст] / В.В. Поповский,

А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // *Наукові записки УНДІЗ*. – 1998. – №1(9). – С. 3 – 26.

6. Вегениш, Ш. Качество обслуживания в сетях IP [Текст]: пер. с англ./ Ш. Вегениш. – М.: Вильямс, 2003. – 386 с.

7. Воробьев, А.В. Анализ состояния и перспективы развития маршрутизации сетей передачи данных [Текст] / А.В. Воробьев, В.И. Кортуннов, А.А. Акулиничев // *Радиотехника*. – 2010. – № 163. – С. 136 - 142.

8. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За заг. ред. В.В. Поповського. – Х.: ТОВ СМІТ, 2006. – 564 с.

9. Стрейц, В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления [Текст]: пер. с англ. / В. Стрейц. – М.: Наука, 1985. – 296 с.

10. Сейдж, Э.П. Оптимальное управление системами [Текст]: пер. с англ. / Э.П. Сейдж, Ч.С. Уайт. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.

Поступила в редакцию 5.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Прием, передача и обработка сигналов» А.В. Тоцкий, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ МЕРЕЖІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ МАРШРУТИЗАЦІЇ

В.І. Кортуннов, А.В. Воробйов

Наведено сучасні вимоги, які пред'являються до вирішення задач маршрутизації. Розглянуто основні підходи до математичної постановки задач управління ресурсами мережі передачі даних. Показано необхідність переходу від евристичних схем і статичних моделей до динамічних описів. Серед можливих способів математичного моделювання, найбільш плідним виявився підхід, заснований на використанні методів простору станів. Запропоновано удосконалену динамічну модель мережі передачі даних у формі рівнянь стану з урахуванням пріоритетності. Розглянуто задачу управління мережею на основі запропонованої моделі. Наведено приклад вирішення задачі маршрутизації.

Ключові слова: динамічне управління, маршрутизація, моделювання, пріоритетність, розподіл ресурсів.

DYNAMIC MODEL OF A DATA TRANSMISSION NETWORK FOR SOLVING PROBLEMS ROUTING

V.I. Kortunov, A.V. Vorobyov

Given today's requirements to the solution of routing problems. The basic approaches to the mathematical formulation of problems of resource management data network. The necessity of transition from heuristic schemes and static models to dynamic descriptions. Among the possible methods of mathematical modeling, the most fruitful approach was based on the use of state space. Proposed advanced dynamic model of the data network in the form of equations of state, with priority. The problem of network management based on the proposed model. An example of solving the problem of routing.

Key words: dynamic control, routing, simulation, priority, resource allocation.

Кортуннов Вячеслав Иванович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Проектирование радиоэлектронных систем летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина

Воробьев Андрей Васильевич - аспирант каф. «Прием, передача и обработка сигналов» Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: and_vorobey@hotmail.com.