нутого контура автоматизированного управления с периодичностью 0,01 Гц может быть использована ЭВМ типа СМ-1420.

Библиографический список

1. Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. Препринт МТПМ СО АН СССР. Новосибирск, 1987. № 1.

2. Максимов В.В., Оришич А.М., Пахомов Л.М., Пономаренко А.Г. //Квантовая электроника. 6. 513 (1979).

3. Пахомов Л.М. Автоматизация измерений физических величин в быстропротекающих процессах //Взаимодействие лазерного излучения с веществом. ИТПМ СО АН СССР, 1980.

4. Бахвалов Л.А., Прахова Р.А. Регрессионный анализ многомерных полиноминальных моделей //Автоматизация обработки экспериментальных данных в химии и химической технологии /Под ред. проф. А.В.Нетушила. М., 1976.

5. Хемминг Р.В. Численные методы. М.: Наука, 1972.

УДК 621.39:681.324

С.Л.Гавлиевский

МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК СЕТЕЙ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

(г. Куйбышев)

Сокращение сроков и улучшение качества проектирования сетей связи (вычислительных сетей, сетей ЭВМ) может быть обеспечено только за счет широкого использования САПР на всех этапах проектирования, начиная с самых ранних. Ядром САПР являются модели для расчета характеристик сетей. В настоящей работе рассмотрены эффективные с вычислительной точки зрения и простые с точки зрения программной реализации аналитические модели, ориентированные на использование в соответствующих САПР.

Известные децентрализованные методы маршрутизации могут быть разбиты на два класса: последовательные и параллельные /1/. При использовании последовательных методов по сети передается одна копия каждого пакета, а сам маршрут строится последовательно: от исходного узла через промежуточные к искомому узлу. При использовании параллельных методов по сети передаются, как правило, одновременно несколько копий одного и того же пакета. Типичными представителями параллельных методов являются волновой и локально-волновой методы маршрутизации.

При использовании последовательных методов траектория пакета на сети является случайной, а сам процесс транспортировки является типично марковским. В работах /I–3/ приводятся и интерпретируются применительно к задаче анализа процесса транспортировки по сети одиночного сообщения соотношения из теории конечных дискретных цепей Маркова. Ключевым моментом анализа с использованием этого аппарата является получение матриц переходных вероятностей. В работе /3/ разрабатывается процедура построения таких матриц.

Обозначим: $\lambda = \|\lambda(k,\ell)\|$ – матрица интенсивностей поступления пакетов между узлами сети; $\bar{\lambda}_u^{(\ell)}$ – вектор адресованных искомому узлу $УК_\ell$ интенсивностей поступления пакетов на узлы сети; $\lambda_u^{(\ell)}(i)$ – элемент вектора $\bar{\lambda}_u^{(\ell)}$, соответствующий узлу $УК_i$; $\lambda^{(\ell)} = \|\lambda^{(\ell)}(i,j)\|$ матрица интенсивностей поступления пакетов, адресованных $УК_\ell$ и пропущенных по ветвям сети; $\lambda^* = \|\lambda^*(i,j)\|$ – матрица суммарных интенсивностей поступления пакетов на ветви сети; $\pi = \|\pi(i,j)\|$ – матрица вероятностей блокировок ветвей сети; $P^{(\ell)} = \|P^{(\ell)}(i,j)\|$ матрица переходных вероятностей, описывающая процесс транспортировки одиночного пакета на сети марковской цепью /3/; $N^{(\ell)} = \|n^{(\ell)}(k,i)\|$ – фундаментальная матрица /4/. Тогда, как показано в работах /I,2/, будут иметь место следующие соотношения:

$$\lambda_u^{(\ell)}(i) = \sum_{\substack{k=[1,n_u] \\ k\neq\ell}} \lambda(k,\ell)\, n^{(\ell)}(k,i); \tag{I}$$

$$\lambda^{(\ell)}(i,j) = \lambda_u^{(\ell)}(i)\, P^{(\ell)}(i,j); \tag{2}$$

$$\lambda^*(i,j) = \frac{1}{1-\pi(i,j)} \sum_{\ell=[1,n_u]} \lambda^{(\ell)}(i,j). \tag{3}$$

Линейные алгебраические уравнения из теории конечных дискретных цепей Маркова справедливы для изучения одиночных траекторий сообщений при фиксированных значениях вероятностей блокировок ветвей. В реально функционирующей сети появление требований на передачу пакетов носит массовый характер, что приводит к конфликтным ситуациям, блокировкам ветвей сети. Из теории массового обслуживания известны соотношения, связывающие время обслуживания заявки и вероятность блокировки обслуживающих приборов с параметрами поступающей нагрузки и характеристиками обслуживающих приборов. Вероятности блокировок ветвей сети находятся в зависимости от распределения потоков, т.е. от процессов маршрутизации. В свою очередь,параметры маршрутизации на сети зависят от вероятностей блокировок. Таким образом, система уравнений, описывающая массовые процессы маршрутизации, становится нелинейной.

Выпишем ее в явном виде, обозначив: $M$ – совокупность маршрутных таблиц, $P$ – совокупность матриц переходных вероятностей, $N$ – совокупность фундаментальных матриц, $I$ – единичная матрица, $\tau$ – матрица задержек на ветвях сети, через $n_V$ – число ветвей, $n_u$ – число узлов сети, тогда система нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), описывающая массовые процессы маршрутизации, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \tau = f_1(\lambda^*) \\ \pi = f_2(\lambda^*) \\ \lambda^* = f_3(P, N, \pi, \lambda) \\ P^{(l)} = f_4(M, \pi), \quad l = [\overline{1, n_u}] \\ M = f_5(\tau) \text{ или } M = const \\ N^{(l)}(I - Q^{(l)}) = I, \; l = [\overline{1, n_u}]. \end{cases} \tag{4}$$

Данная система записана в матричном виде. При записи ее в виде отдельных уравнений получается система, содержащая $2n_V + n_u(n_u-1)^2$ уравнений с таким же числом неизвестных, в качестве которых будут фигурировать переменные типа $\pi(i,j)$, $\tau(i,j)$, $n^{(l)}(k,l)$.

Стандартным методом решения таких систем является итерационный метод. Ядро итерационного процесса выглядит следующим образом:

$$\begin{array}{l} \lambda \\ \tau^{(n-1)} \longrightarrow M \longrightarrow P^{(l)} \longrightarrow N^{(l)} \longrightarrow \bar{\lambda}_u^{(l)} \longrightarrow \lambda^{(l)} \longrightarrow \lambda^* \nearrow \tau^{(n)}, \ \searrow \pi^{(n)} \\ \pi^{(n-1)} \nearrow P^{(l)} \end{array} \tag{5}$$

где $n$ – номер итерации.

Некоторые модификации локально-волнового метода маршрутизации рассмотрены в работе /5/. Здесь будем рассматривать только одну модификацию этого метода, при которой копии пересылаемого по сети пакета движутся одновременно по всем кратчайшим (по числу переприемов) маршрутам. Эта модификация локально-волнового метода гарантирует доставку пакета на сети при условии, что между искомой парой узлов имеется хотя бы один кратчайший маршрут.

Обозначим через $\psi^{(\ell)}(\kappa,i)$ и $\tau^{(\ell)}(\kappa,i)$ соответственно вероятность попадания и задержку, которая при этом возникает в $УК_i$ при движении пакета из $УК_\kappa$ в $УК_\ell$. По определению $\psi^{(\ell)}(\kappa,\kappa)=1$, $\tau^{(\ell)}(\kappa,\kappa)=0$, так как пакет вводится в сеть в узел $УК_\kappa$. Также по определению, величины $\psi^{(\ell)}(\kappa,\ell)$ и $\tau^{(\ell)}(\kappa,\ell)$ показывают вероятность успешной доставки пакета и возникающую при этом задержку.

Рассмотрим некоторый узле $УК_i$, в который может попасть пакет, следующий из $УК_\kappa$ в $УК_\ell$. Обозначим через $F(i)$ множество узлов $УК_1,\dots,УК_u,\dots,УК_r$, инцидентных $УК_i$, в которых может побывать пакет перед попаданием в $УК_i$. Обозначим через $\psi_u^{(\ell)}(\kappa,i)$ и $\tau_u^{(\ell)}(\kappa,i)$ вероятность попадания пакета в $УК_i$ по ветви $\beta(u,i)$ и возникающую при этом задержку. Можно показать, что при принятых обозначениях будут иметь место следующие выражения:

$$\psi^{(\ell)}(\kappa,i)=1-\prod_{u\in F(i)}\left[1-\psi^{(\ell)}(\kappa,u)(1-\pi(u,i))\right]; \qquad (6)$$

$$\tau^{(\ell)}(\kappa,i)=\frac{\tau_1^{(\ell)}(\kappa,i)\psi_1^{(\ell)}(\kappa,i)+\dots+\tau_u^{(\ell)}(\kappa,i)(1-\psi_1(\kappa,i))\times\dots\times(1-\psi_{u-1}(\kappa,i))\times\psi_u^{(\ell)}(\kappa,i)+\dots+\tau_r^{(\ell)}(\kappa,i)(1-\psi_1(\kappa,i))\times\dots\times\psi_r^{(\ell)}(\kappa,i)}{\psi_1^{(\ell)}(\kappa,i)+\dots+\psi_u^{(\ell)}(\kappa,i)+\dots+\psi_r^{(\ell)}(\kappa,i)-\psi_1^{(\ell)}(\kappa,i)\times\dots\times\psi_u^{(\ell)}(\kappa,i)\times\dots\times\psi_r^{(\ell)}(\kappa,i)}, \qquad (7)$$

где $\tau_1^{(\ell)}(\kappa,i)<\dots<\tau_u^{(\ell)}(\kappa,i)<\dots<\tau_r^{(\ell)}(\kappa,i)$.

Выражения (6) и (7) указывают путь вычисления $\psi^{(\ell)}(\kappa,i)$ и $\tau^{(\ell)}(\kappa,i)$ в виде итерационной процедуры. Отдельные элементы $\psi^{(\ell)}(\kappa,i)$ удобно свести в матрицу $\psi^{(\ell)}$. Нетрудно видеть, что физический смысл элементов этой матрицы совпадает с физическим смыслом элементов фундаментальной матрицы, поэтому по аналогии с последовательными методами маршрутизации для локально-волнового метода будет справедливо следующее соотношение:

$$\lambda_{u}^{(\ell)}(i)=\sum_{\substack{k=[1,\bar{n}_u]\\ k\neq\ell}}\lambda(k,\ell)\psi^{(\ell)}(k,i). \qquad (8)$$

Обозначим через $\lambda^{*(\ell)}$ матрицу интенсивностей поступления пакетов на ветви сети, адресованных узлу $УК_{\ell}$. При расчете элементов этой матрицы необходимо учесть, что при локально-волновом методе элементы маршрутных таблиц $m^{(\ell)}(i,j)$ могут принимать только два значения: ноль или единицу, причем в столбце, соответствующем искомому узлу $УК_{\ell}$, может быть одновременно несколько единиц. Тогда соответствующие потоки будут равны:

$$\lambda^{*(\ell)}(i,j)=\lambda_{u}^{(\ell)}(i)\,m^{(\ell)}(i,j); \qquad (9)$$

$$\lambda^{*}(i,j)=\sum_{\ell=[1,\bar{n}_u]}\lambda^{*(\ell)}(i,j). \qquad (10)$$

Из изложенного следует, что

$$\lambda^{*}=f_3(M,\psi,\pi,\lambda), \qquad (11)$$

где $\psi=\{\psi^{(1)},\ldots,\psi^{(i)},\ldots,\psi^{(n_u)}\}$.

СНАУ, описывающая массовые процессы маршрутизации при использовании локально-волнового метода маршрутизации, в матричном виде выглядит следующим образом:

$$\begin{cases}T=f_1(\lambda^{*})\\ \pi=f_2(\lambda^{*})\\ \lambda^{*}=f_3(M,\psi,\pi,\lambda).\end{cases} \qquad (12)$$

Решение СНАУ позволяет рассчитать такие важнейшие характеристики сети, как время и вероятность доставки пакетов, уровни загрузки каналов и т.п. Программная реализация моделей показала их высокую вычислительную эффективность при анализе сетей до 50...80 узлов.

Библиографический список

I. Гладкий В.С., Гавлиевский С.Л. Численный анализ обменных процессов на сетях ЭВМ с коммутацией пакетов //Одиннадцатый всесоюзный семинар по вычислительным сетям. Тезисы докл. Ч. 3. М., 1986. С. 3I-34.

2. Гладкий В.С., Гавлиевский С.Л. Численные методы анализа процессов маршрутизации на сетях ЭВМ //Программирование. 1986. № 3. С. 78–87.

3. Гавлиевский С.Л. О некоторых методах маршрутизации на сетях связи //Техника средств связи. Сер. ВТСС. 1985. С. 55–60.

4. Кемени Д., Снелл Д. Конечные цепи Маркова. М.: Наука, 1970. 272 с.

5. Гладкий В.С. Об одном децентрализованном методе маршрутизации на ячеистых сетях связи //Девятая Всесоюзная школа – семинар по вычислительным сетям: Тезисы докладов. Ч. 3. М., 1984. С.25–30.

УДК 577.352.4+611-018.83-019.577.25

А.Н.Волобуев, А.У.Бахито, Е.Л.Овчинникова,
Л.А.Труфанов

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

(г. Куйбышев)

Передача электрических импульсов (потенциалов действия) в информационно-управляющих нейросистемах можно рассматривать как движение уединенных волн-солитонов по нервным волокнам. До настоящего времени математическое моделирование таких волн осуществляется с помощью модели Ходжкина-Хаксли /5/. Основной недостаток этой модели заключается в том, что в ее основе лежит линейное дифференциальное "телеграфное" уравнение /1/, из которого, строго говоря, нельзя получить решение в виде устойчивой уединенной волны. Кроме того, в этой модели совершенно не учитывается индуктивность мембраны нервных волокон, которая в соответствии с данными Коула и Бейкера /3/ довольно значительна.

Возникающая ЭДС самоиндукции препятствует изменению ионных токов через белковые каналы нейромембраны. Будем считать /5/, что плотность прохождения $i$ -го тока через мембрану нервного волокна, создаваемого соответствующим видом ионов, будет

$$j_i = g_i(\varphi - \varphi_i), \qquad (1)$$