УДК 004.7:621.39

ИТЕРАЦИОНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК СЕТЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ РАССЫЛКИ ПАКЕТОВ НАПРАВЛЕННОЙ ВОЛНЫ

С. Л. Гавлиевский

Поволжский государственный университет

Поступила в редакцию 18.08.2011 г.

Аннотация. Составлена система нелинейных алгебраических уравнений, описывающая потоки на ветвях и узлах сети в стационарном режиме при использовании для рассылки пакетов направленной волны. Решение системы позволяет рассчитать время задержки и вероятности потерь пакетов между каждой парой узлов сети, а также потоки на ветвях и узлах сети, задержки, вероятности блокировок и уровни загрузок каналов. Приведен алгоритм решения системы и расчета характеристик.
Ключевые слова: направленная волна, маршрутизация, топология, система нелинейных алгебраических уравнений.
Annotation. In this article was made the system of nonlinear algebraic equations describing the flow in the branches and nodes in the steady state by using packets directed to send a wave. Solution of the system can calculate the time delay and the probability of packet loss between each pair of nodes, and flows in the branches and nodes of the network, delay, probability, and block levels download channels. An algorithm for the calculation and performance.
Keywords: Directional wave, routing, topology, the system of nonlinear algebraic equations

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАПРАВЛЕННОЙ ВОЛНЫ ДЛЯ РАССЫЛКИ ПАКЕТОВ

Широко используемые на практике табличные методы маршрутизации, входящие в класс последовательных методов, не всегда обеспечивают требуемые показатели качества обслуживания. Их эффективность значительно снижается при работе на сильно перегруженных сетях, сетях с ненадежными каналами, а также на сетях, образованных радиоканалами, работающими в режиме неустойчивого радиоприема или воздействия радиопомех. При работе в этих условиях передача одной копии не всегда гарантирует успешную доставку пакета адресату за приемлемое время, поэтому естественным решением в подобных ситуациях является передача в сторону искомого узла нескольких копий одного и того же пакета.

Принципиальным отличием параллельных методов маршрутизации от последовательных является то, что при их использовании по сети передается не одна, а сразу несколько копий одного и того же пакета. К классу параллельных методов относится волновой метод (ВМ). Не задаваясь целью углубляться в особенности этого метода маршрутизации, отметим только то, что при ВМ пакеты распространяются во все стороны от искомого узла. Модели распространения волны на сетях рассмотрены в работах [1, 2]. Ясно, что нагрузка, оказываемая на сеть процессом передачи пакетов при использовании ВМ, существенно выше нагрузки, оказываемой на сеть при использовании последовательных методов.

Известны некоторые модификации ВМ и, в частности, локально-волновой метод маршрутизации (ЛВМ) [3], отличительной особенностью которого является распространение волны не по всем направлениям, а только в сторону искомого узла. Назовем методом направленной волны (МНВ) [4–7] такую разновидность ЛВМ, при которой копии одного и того же пакета распространяются от исходного узла в сторону искомого по всем кратчайшим маршрутам (КМ). Из выше сказанного следует, что МНВ позволяет доставить пакет в узел назначения при условии, что между исходным и искомым узлами существует хотя бы один КМ. При этом очевидно, что нагрузка на сеть при использовании МНВ намного меньше, чем нагрузка, оказываемая ВМ.

СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ И ВРЕМЕНИ УСПЕШНОЙ ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТОВ МЕЖДУ ЗАДАННОЙ ПАРОЙ УЗЛОВ

Рассмотрим фрагмент сети, приведенный на рис. 1. Обозначим через

n_u – общее число узлов сети; $[k]$ – узел-источник пакета; (l) – узел-адресат пакета;

i, j – номера транзитных узлов; (ij) – ветвь, соединяющую узлы i и j;

$\Gamma_i = \{j_1, .., j_v, .., j_{r_i}\}$ – множество узлов-соседей узла i; r_i – ранг узла i;

$\rightarrow$ направление распространения пакета от узла-источника к узлу-адресату;

π_{ij} – вероятность блокировки ветви (ij);

τ_{ij} – время задержки, которую претерпевает пакет при передаче по ветви (ij);

$\mathrm{v}_{ij}^{(l)}$ – вес пути между узлом i и l при условии, что пакет выводится из узла i по ветви (ij); $\overline{\mathrm{v}}_{\mathrm{i}}^{(l)}$ l – вектор-столбец таблицы маршрутных весов [5] для узла i.

Тогда при использовании МНВ для элементов маршрутной таблицы

будет справедливо

$$m_{ij}^{(l)} = \begin{cases} 1, \text{если } \mathrm{v}_{ij}^{(l)} = \min\limits_{j \in \Gamma_i} \overline{\mathrm{v}}_i^{(l)} \\ 0, \text{если } \mathrm{v}_{ij}^{(l)} > \min\limits_{j \in \Gamma_i} \overline{\mathrm{v}}_i^{(l)} \end{cases}.$$

На рис. 1. показан процесс распространения направленной волны между исходным узлом k и искомым l.

Пусть i – некоторый транзитный узел, в котором может оказаться копия передаваемого пакета. Узел i удален от исходного узла k на расстояние $\mathrm{v}_i^{[k]}$ переприемов. Множество $F_i^{[k]\to(l)}$ содержит узлы, в которых могут оказаться копии пакета перед попаданием в узел i. Через $G_i^{[k]\to(l)}$ обозначено множество узлов, в которые следует передать копии находящегося в узле i пакета при движении в сторону узла l.

Обозначим через $\xi_{ki}^{(l)}$ вероятность попадания пакета в узел i. По определению $\xi_{kk}^{(l)} = 1$, поскольку пакет введен в сеть в узле k.

Также по определению $\xi_{kl}^{(l)}$ показывает вероятность успешной доставки при передаче пакета между узлами k и l. Получим соотношения, позволяющие рассчитать $\xi_{ki}^{(l)}$ [5–7]. Обозначим через $\xi_{ki}^{(l)}(j)$ условную вероятность попадания одной из копий пакета в узел i при движении его из узла k в узел l при условии, что предыдущим транзитным узлом был узел j. Поскольку блокировка ветви (ji) и поступление конкретного пакета в узел j являются событиями независимыми, то $\xi_{ki}^{(l)}(j)$ будет равна произведению вероятностей поступления рассматриваемого пакета в узел j на вероятность того, что ветвь (ji) будет не заблокирована, т.е

$$\xi_{ki}^{(l)}(j) = \xi_{kj}^{(l)} \cdot (1 - \pi_{ji}), \tag{1}$$

где π_{ji} – вероятность блокировки ветви (ji).

Одной из особенностей МНВ является то, что одновременно из узла k в сторону узла l

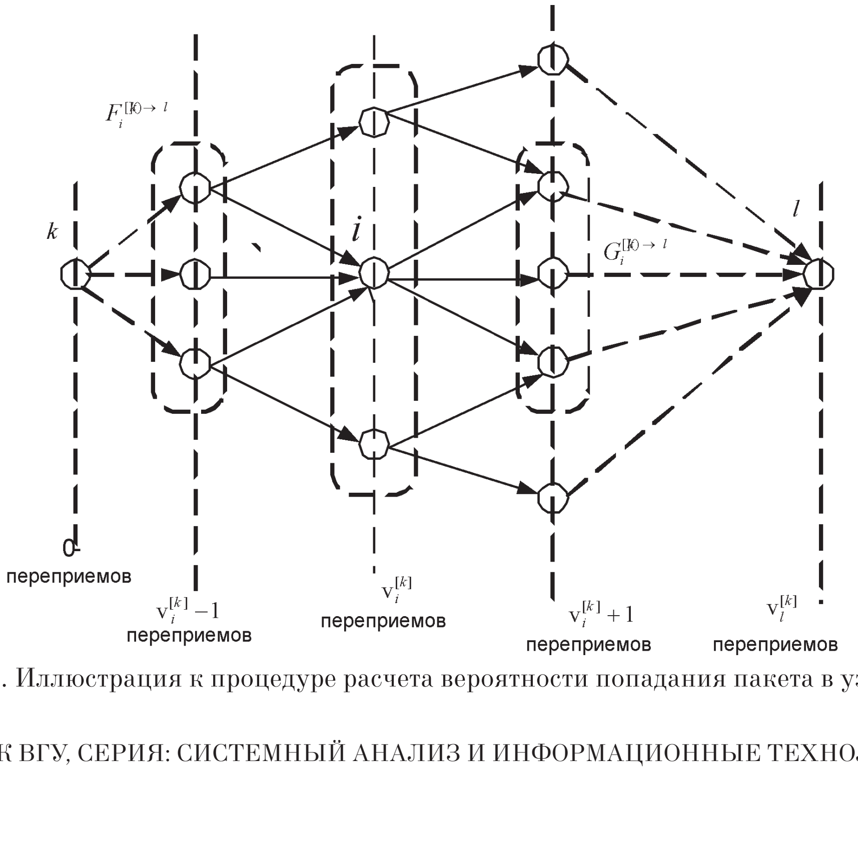

Рис. 1. Иллюстрация к процедуре расчета вероятности попадания пакета в узел i

могут передаваться несколько копий одного и того же пакета. При этом из каждого транзитного узла i, куда попадает копия передаваемого пакета, она размножается и выводится через все направления, входящие во множество $G_i^{(l)}$ (см. рис. 1). Заметим, что в узел i могут поступить несколько копий одного и того же пакета. Введем в рассмотрение множество $F_i^{[k]\to(l)}$, образованное узлами, удовлетворяющими требованию:

$$F_i^{[k]\to(l)} = \{j_1,..,j_\nu,..,j_s\} = \\ = \{j_\nu \mid j_\nu \in \Gamma_i \ \& \ \mathrm{v}_{j_\nu}^{(l)} = \mathrm{v}_i^{(l)} - 1\},$$

где $s = |F_i^{[k]-(l)}|$, а $\mathrm{v}_i^{(l)}$ и $\mathrm{v}_{j_\nu}^{(l)}$ – расстояния в числе переприемов, соответственно, между узлами k и i и узлами k и j_ν. Из последнего выражения следует, что элементами $F_i^{[k]-(l)}$ являются узлы j_ν, которые могут предшествовать узлу i в цепочке $k,..,j_v\ ,i,..,l$, образующей КМ между узлами k и l. Используя соотношения теории вероятности можно записать:

$$\xi_{ki}^{(l)} = 1 - \prod_{\nu=1}^{s}[(1-\xi_{kj_\nu}^{(l)} \cdot (1-\pi_{j_\nu i})]. \qquad (2)$$

Это выражение позволяет рассчитать вероятность попадания пакета в любой узел сети, который может быть транзитным в маршруте между узлами k и l. Определим теперь возникающую при этом задержку, которую обозначим через $t_{ki}^{(l)}$. Обозначим через $t_{ki}^{(l)}(j)$ условное математическое ожидание величины задержки достижения транзитного узла i при условии, что копия пакета поступает в этот узел по ветви (ji). Пусть копия пакета поступила в узел i через транзитный узел j_ν, тогда возникающая при этом условная задержка будет равна:

$$t_{ki}^{(l)}(j_\nu) = t_{kj_\nu}^{(l)} + \tau_{j_\nu i}, \qquad (3)$$

где $\tau_{j_\nu i}$ – время задержки, которую претерпевает пакет при передаче по ветви $(j_\nu i)$. В [3] показано, что для $t_{ki}^{(l)}$ будет справедливо следующее выражение:

$$t_{ki}^{(l)} = \frac{\sum\limits_{\nu=1}^{s} t_{ki}^{(l)}(j_\nu)\cdot \xi_{ki}^{(l)}(j_\nu)\cdot \prod\limits_{\mu=1}^{(\nu-1)\&\nu\ge 2}[1-\xi_{ki}^{(l)}(j_\mu)]}{\sum\limits_{\nu=1}^{s}\xi_{ki}^{(l)}(j_\nu) - \prod\limits_{\nu=1}^{s}\xi_{ki}^{(l)}(j_\nu)}. \qquad (4)$$

РАСЧЕТ ПОТОКОВ НА ВЕТВЯХ И УЗЛАХ СЕТИ

Обозначим через $\Lambda = [\Lambda_{kl}]$ матрицу интенсивностей поступления пакетов, которые необходимо передать по сети при помощи МНВ. Тогда элемент Λ_{kl} будет равен потоку, который необходимо передать по сети между рассматриваемой парой узлов k и l. Распределяясь по сети, этот поток создаст на ветвях нагрузку, которую опишем при помощи матрицы $\lambda^{[k]\to(l)} = [\lambda_{ij}^{[k]\to(l)}]$. Обозначим через $\lambda = [\lambda_{ij}]$ суммарную интенсивность поступления пакетов на ветви сети, через $\lambda_i^{[k]\to(l)}$ – транзитный поток, втекающий в узел i и обусловленный передачей пакетов между узлами k и l. Тогда вектор $\overline{\lambda}_i^{[k]\to(l)}$ будет содержать транзитные потоки, возникающие при передаче пакетов между узлами k и l и втекающие в каждый узел сети.

Учитывая то, что при МНВ пакет может побывать в каждом узле только один раз, поток, втекающий в i узел, будет равен:

$$\lambda_i^{[k]\to(l)} = \Lambda_{kl}\cdot \xi_{ki}^{(l)}.$$

Транзитный поток, поступающий на ветвь (ij), определится как:

$$\lambda_{ij}^{[k]\to(l)} = \lambda_i^{[k]\to(l)}\cdot m_{ij}^{(l)},$$

а суммарный поток, поступивший на эту ветвь, будет равен:

$$\lambda_{ij} = \sum_{l=1}^{n_u}\sum_{\substack{k=1\\k\ne l}}^{n_u} m_{ij}^{(l)}\cdot \xi_{ki}^{(l)}\cdot \Lambda_{kl}. \qquad (5)$$

Выражения типа (5) могут быть выписаны для каждой ветви сети, поэтому общее число уравнений данного типа для сети в целом составляет r, где r – суммарный ранг узлов:

$$r = \sum_{i=1}^{n_u}\Gamma_i.$$

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕСЫЛКИ ПАКЕТА ПО СЕТИ ПРИ ПОМОЩИ НАПРАВЛЕННОЙ ВОЛНЫ В ТЕРМИНАХ ТЕОРИИ МНОЖЕСТВ

Ранее были получены соотношения (2) и (4), позволяющие рассчитывать величины $\xi_{ki}^{(l)}$ и $t_{ki}^{(l)}$ – вероятность достижения транзитного узла i и возникающую при этом задержку при передаче пакетов между узлами k и l. При достижении искомого узла l указанные параметры можно записать в виде ξ_{kl} и t_{kl}, поскольку мы имеем дело не с транзитным, а с конечным узлом. Перебрав все пары узлов k и l, можно заполнить матрицы $\Xi = [\xi_{kl}]$ и $\mathrm{T} = [t_{kl}]$ размером $n_u \times n_u$, содержащие, соответственно, вероятности и задержки доставки пакетов между каждой парой узлов.

Обозначим через G_{kl} множество узлов, через которые проходит волна, двигаясь от узла k к узлу l. Нетрудно видеть, что если некоторый узел i является транзитным, то есть $i \in G_{kl}$, то в качестве побочного эффекта расчета $\xi_{ki}^{(l)}$ и $t_{ki}^{(l)}$ оказываются рассчитанными аналогичные значения для $\forall i \in G_{kl}$ так, как если бы узел i был искомым. Это наводит на мысль, что если несколько изменить стратегию просмотра узлов, то можно существенно оптимизировать вычислительный процесс.

Применим описанную в [5] процедуру поярусного просмотра узлов для расчета характеристик сети. Рассмотрим фрагмент сети, приведенный на рис. 2. Пусть задан некоторый узел-источник k, относительно которого необходимо рассчитать основные параметры поиска.

Рассмотрим узел $i \in I_{\text{v}}^{[k]}$. Его узлы-соседи, образующие множество Γ_i, могут принадлежать одному из трех ярусов: (v-1), v, (v+1) ярусу. Введем в рассмотрение множества:

$$G_i^{[k]} = \{j \mid j \in \Gamma_i \ \& \ \text{v}_j^{[k]} = \text{v} + 1\};$$

$$E_i^{[k]} = \{j \mid j \in \Gamma_i \ \& \ \text{v}_j^{[k]} = \text{v}\};$$

$$F_i^{[k]} = \{j \mid j \in \Gamma_i \ \& \ \text{v}_j^{[k]} = \text{v-1}\}.$$

Очевидно, что:

$$G_i^{[k]} \bigcup E_i^{[k]} \bigcup F_i^{[k]} = 0;$$

$$G_i^{[k]} \bigcap E_i^{[k]} \bigcap F_i^{[k]} = 0;$$

$$\bigcup_{\mu=1}^{|I_{\text{v}}|} F_{i_\mu}^{[k]} = I_{\text{v-1}}^{[k]};$$

$$\bigcup_{\mu=1}^{|I_{\text{v}}|} G_{i_\mu}^{[k]} = I_{\text{v+1}}^{[k]}.$$

Будем рассматривать каждый узел яруса, как конечный узел поиска. Это позволит использовать ранее полученные соотношения для расчета характеристик между исходным k узлом и всеми остальными узлами сети.

Обозначим через $\bar{\xi}^{[k]}$ и $\bar{t}^{[k]}$ векторы, содержащие вероятности успешной доставки пакетов и возникающие при этом задержки между исходным узлом k и всеми остальными узлами сети. Эти векторы будут содержать следующие элементы:

$$\bar{\xi}^{[k]} = \{\xi_1, .., \xi_k, .., \xi_{n_u}\},$$

$$\bar{t}^{[k]} = \{t_1, .., t_k, .., t_{n_u}\}.$$

Заменим в выражениях (1)–(5) $\xi_{ki}^{(l)}$ на $\xi_i^{[k]}$, $t_{ki}^{(l)}$ на $t_i^{[k]}$, $\xi_{ki}^{(l)}(j_\nu)$ на $\xi_i^{[k]}(j_\nu)$, $t_{ki}^{(l)}(j_\nu)$ на $t_i^{[k]}(j_\nu)$, $\lambda_i^{[k]-(l)}$ на $\lambda_i^{[k]}$. Тогда (2) и (4) для узла i относительно исходного узла k будут выглядеть следующим образом:

$$\xi_i^{[k]} = 1 - \prod_{\nu=1}^{s} [(1 - \xi_{j_\nu}^{[k]} \cdot (1 - \pi_{j_\nu i})];$$

$$t_i^{[k]} = \frac{\sum_{\nu=1}^{s} t_i^{[k]}(j_\nu) \cdot \xi_i^{[k]}(j_\nu) \cdot \prod_{\mu=1}^{(\nu-1)\&\nu\geq 2} [1 - \xi_i^{[k]}(j_\mu)]}{\sum_{\nu=1}^{s} \xi_i^{[k]}(j_\nu) - \prod_{\nu=1}^{s} \xi_i^{[k]}(j_\nu)}.$$

Эти выражения позволяют рассчитать вероятность успешной доставки пакета и возникающую при этом задержку при передаче его между узлами k и i.

Поскольку каждый узел i может быть как конечным, так и транзитным для узлов, удален-

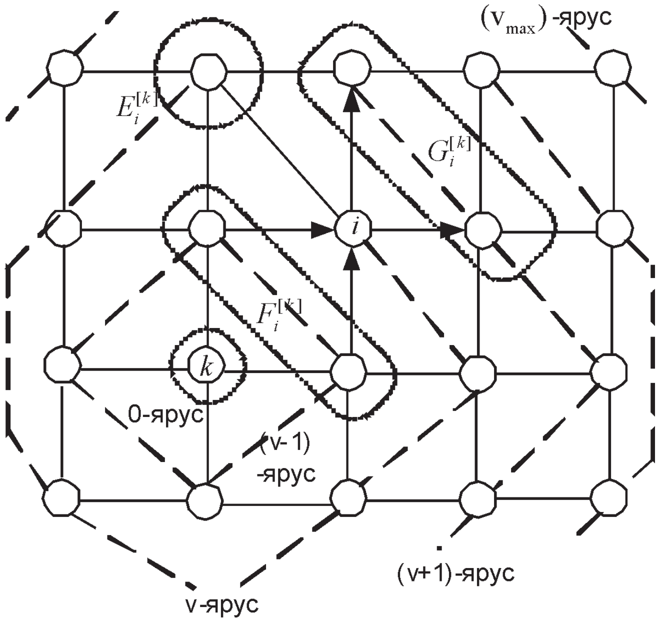

Рис. 2. Иллюстрация к процедуре поярусного просмотра узлов

ных от искомого узла k на большее число ярусов, то суммарный поток, поступающий в узел, будет равен:

$$\lambda_i^{[k]} = \sum_{i=1}^{n_u} \Lambda_{ki} \cdot \xi_i^{[k]},$$

а поток, поступающий на ветвь (ji) с учетом введенных обозначений:

$$\forall j \in F_i^{[k]} \to \lambda_{ji}^{[k]} = \xi_j^{[k]} \cdot \Lambda_{ki}$$

Выше были приведены соотношения, необходимые для расчета характеристик сети относительно исходного узла k при передаче пакетов при помощи МНВ. В дополнение к ранее введенным обозначениям, введем следующие:

$\Gamma = \{\Gamma_1, .., \Gamma_i, .., \Gamma_{n_u}\}$ – совокупность множеств узлов-соседей;

μ – интенсивность обслуживания;

$C = [c_{ij}]_{n_u \times n_u}$ – матрица пропускных способностей каналов сети;

$\omega = [\omega_{ij}]_{n_u \times n_u}$ – матрица количества буферов – числа мест ожидания, закрепленных за каналами сети;

$\rho = [\rho_{ij}]_{n_u \times n_u}$ – матрица уровней загрузки ветвей сети;

$n_{i\max}$ – номер текущей итерации; $n_{i\max}$ – максимально допустимое число итераций.

Рассмотрим взаимосвязь между используемыми для расчета переменными, векторами и матрицами при использовании МНВ (рис. 3). На диаграмме четко просматривается взаимосвязь между элементами матриц и векторов λ, π, τ, $\bar{\xi}^{[k]}$, $\bar{t}^{[k]}$, $\lambda^{[k]}$. Перебрав все узлы k, которые могут быть исходными, можно заполнить все элементы матриц Ξ, T, λ.

Как известно из теории массового обслуживания, элементы матриц π и τ являются функциями от соответствующих элементов матрицы λ. Учитывая эту особенность, ниже будет использован итерационный алгоритм решения системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), описывающей потоки в стационарном режиме. Схема итерационного процесса следующая. Задаются начальные условия – потоки на ветвях сети. Перед началом первой итерации они могут быть нулевыми. Затем, перебирая все узлы, которые могут быть искомыми и, используя взаимосвязь, приведенную на рис. 3, вычисляются новые потоки.

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК СЕТИ

Используя полученные ранее выражения, выпишем СНАУ [5,7], решая которую можно определить потоки на узлах и ветвях сети, а также рассчитать показатели качества обслуживания в стационарном режиме:

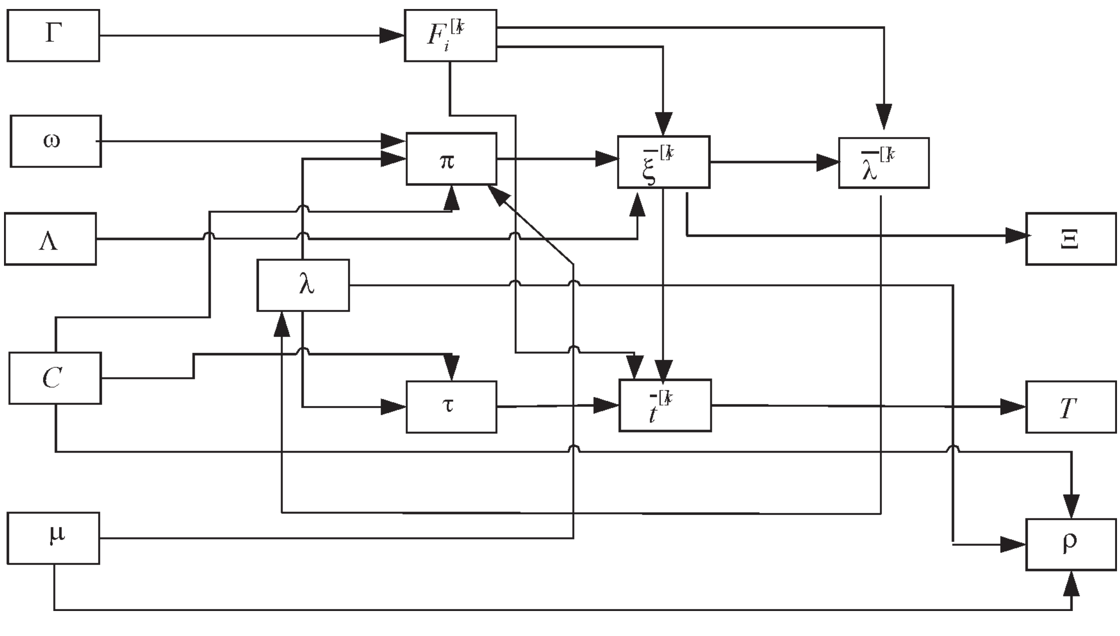

Рис. 3. Взаимосвязь между отдельными переменными, векторами и матрицами при использовании для передачи пакетов МНВ

$$\lambda = \lambda_0$$

$$\begin{cases} \overline{\xi}^{[1]} = f_\xi(\overline{\xi}^{[1]}, \pi, \Gamma) \\ \overline{t}^{[1]} = f_t(\overline{\xi}^{[1]}, \overline{t}^{[1]}, \pi) \\ \lambda^{[1]} = f_\lambda(\overline{\xi}^{[1]}, \Lambda) \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \overline{\xi}^{[k]} = f_\xi(\overline{\xi}^{[k]}, \pi, \Gamma) \\ \overline{t}^{[k]} = f_t(\overline{\xi}^{[k]}, \overline{t}^{[k]}, \pi) \\ \lambda^{[k]} = f_\lambda(\overline{\xi}^{[k]}, \Lambda) \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \overline{\xi}^{[n_u]} = f_\xi(\overline{\xi}^{[n_u]}, \pi, \Gamma) \\ \overline{t}^{[n_u]} = f_t(\overline{\xi}^{[n_u]}, \overline{t}^{[n_u]}, \pi) \\ \lambda^{[n_u]} = f_\lambda(\overline{\xi}^{[n_u]}, \Lambda) \\ \lambda = f_\lambda(\lambda^{[1]}, .., \lambda^{[k]}, .., \lambda^{[n_u]}) \\ \pi = f_\pi(\lambda, C, \mu) \\ \tau = f_\tau(\lambda, C, \mu) \end{cases}$$

Перепишем эту систему в более компактной матричной форме:

$$\lambda = \lambda_0$$

$$\begin{cases} \Xi = f_\Xi(\Xi, \pi, \Gamma) \\ T = f_t(\Xi, T, \pi, \tau) \\ \lambda = f_\lambda(\Xi, \Lambda) \\ \pi = f_\pi(\lambda, C, \mu) \\ \tau = f_\tau(\lambda, C, \mu) \end{cases},$$

где

$$\Xi = [\overline{\xi}^{[1]}, .., \overline{\xi}^{[k]}, .., \overline{\xi}^{[n_u]}\}$$

$$T = \{\overline{t}^{[1]}, .., \overline{t}^{[k]}, .., \overline{t}^{[n_u]}\}$$

Тип, число уравнений заданного вида, типы и число переменных СНАУ сведены в табл. 1. Из приведенной таблицы видно, что число уравнений системы совпадает с числом переменных и равно $2 \cdot n_u \cdot (n_u - 1) + 3 \cdot r$.

На рис. 4 приведен алгоритм расчета характеристик сети и нагрузки, оказываемой на сеть

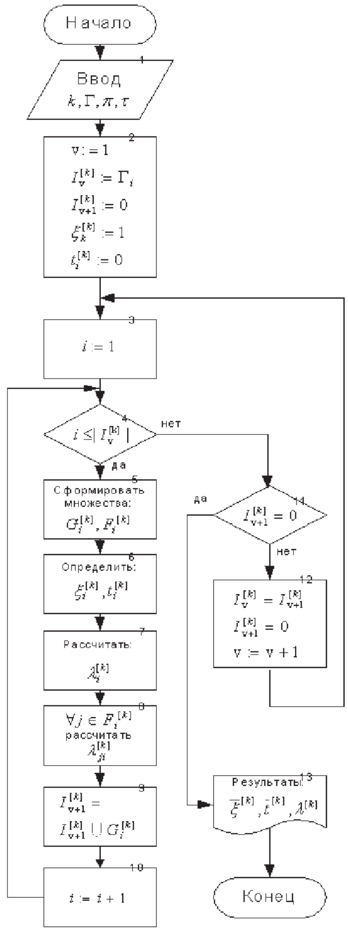

Рис. 4. Алгоритм расчета характеристик относительно узла k при рассылке пакетов при помощи МНВ

Таблица 1

Число уравнений и переменных в системе

Тип уравнений	Число уравнений	Число переменных типа				
		$\xi_i^{[k]}$	$t_i^{[k]}$	λ_{ij}	π_{ij}	τ_{ij}
$\Xi = f_\Xi(\Xi, \pi, \Gamma)$	$n_u \cdot (n_u - 1)$	$n_u \cdot (n_u - 1)$	0	0	r	0
$T = f_t(\Xi, T, \pi, \tau)$	$n_u \cdot (n_u - 1)$	$n_u \cdot (n_u - 1)$	$n_u \cdot (n_u - 1)$	0	r	r
$\lambda = f_\lambda(\Xi, \Lambda)$	r	$n_u \cdot (n_u - 1)$	0	r	0	0
$\pi = f_\pi(\lambda, C, \mu)$	r	0	0	r	r	0
$\tau = f_\tau(\lambda, C, \mu)$	r	0	0	r	0	r

при передаче пакетов при помощи МНВ (относительно исходного узла k), а на рис. 5 показан алгоритм решения СНАУ и расчета характеристик сети.

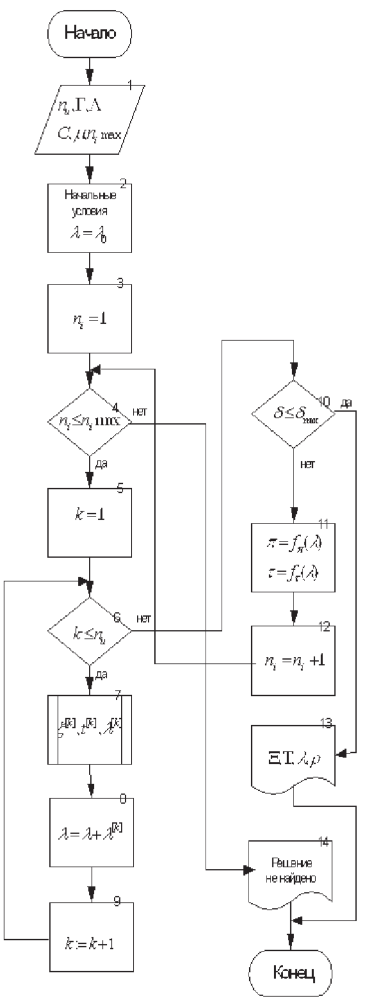

Рис. 5. Алгоритм решения СНАУ и расчета характеристик сети при рассылке пакетов при помощи МНВ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копытин А. В.* Моделирование процесса распространения волн на сети /А.В. Копытин // Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии. 2008. – №1. – С. 11–13.

2. *Копытин А. В.* Об одной особенности распространения волн на сети /А.В. Копытин // Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии. 2009. – №2. – С. 10–12.

3. *Гладкий В.С.* Об одном децентрализованном методе маршрутизации на ячеистых сетях связи / В.С. Гладкий // Тез. докл. 9-я Всесоюзная школа-семинар по вычислительным сетям. – М.: Пущино, 1984. – С. 90–95.

4. *Гавлиевский С.Л.* Об одном децентрализованном методе маршрутизации для сетей микроЭВМ с ненадежными каналами /С.Л. Гавлиевский / Сб. научн. Трудов : Теория и практика проектирования микропроцессорных систем. – Куйбышев, 1989. – С. 13–17.

5. *Гавлиевский С.Л.* Методы анализа мультисервисных сетей связи с несколькими классами обслуживания. – М.: ИРИАС, 2010. – 365 с.

6. *Гавлиевский С.Л.* Соотношения для расчета характеристик сетей при использовании метода направленной волны / С. Л. Гавлиевский //Телекоммуникации. – 2007. – №1. – С. 19–24.

7. *Гавлиевский С.Л.* Математическая модель для расчета характеристик сетей при использовании метода направленной волны / С.Л. Гавлиевский // Телекоммуникации. – 2007. – №2. – С. 26–30.

Гавлиевский С. Л. – к.т.н., Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. E-mail: gsl@gs7.ru

Gavlievskiy S. L. – Ph.D. in Engineering, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Information. E-mail: gsl@gs7.ru