

А.И. Купин, Б.А. Поддубный, И.О. Музыка

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАФИКА
В ГЕТЕРОГЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ**

Аннотация. Приведена математическая модель поиска оптимального маршрута и его стоимости при наличии разнородных требований к маршрутизации в гетерогенной информационно-коммуникационной сети произвольной нестабильной структуры, позволяющий максимально эффективно использовать ресурсы сети, уменьшая количество блокировок и задержек трафика.

Ключевые слова: маршрутизация, управление трафиком, планирование ресурсов, управление информационными коммуникациями, распределенные гетерогенные сети.

Введение

Любая распределенная информационная система прежде всего подразумевает сеть узлов. Поэтому одной из важнейших задач в распределенной сети является маршрутизация. В настоящее время существует большое количество алгоритмов маршрутизации, удовлетворяющих требованиям к передаче трафика, к параметрам качества обслуживания, соглашениям об уровне обслуживания и др. [1-5]. При этом практически все алгоритмы рассчитаны на стабильную сеть и не учитывают мобильные узлы и гетерогенность структуры. В настоящей статье рассматривается математическая модель маршрутизации для современных гетерогенных информационно-коммуникационных сетей с нестабильной структурой.

Все величины, определенные в данной статье, являются нормированными (условными) и могут быть использованы для различных размерностей и условий: пропускная способность и объем трафика измеряется в удобных для конкретной задачи единицах измерения (биты, байты, пакеты и т.д.), стоимость передачи определяет некоторый показатель затрат на передачу: время передачи, энергетические или экономические затраты на передачу и т.д.

© Купин А.И., Поддубный Б.А., Музыка И.О., 2017

Математическая модель маршрутизации

Рассмотрим распределенную информационную систему (РИС) и соответствующий ей полный ориентированный граф $G = (V, E)$, где V – множество узлов, E – множество коммуникационных линий (маршрутов) между каждой парой узлов.

Определим множество R , такое что $R \subset V \times V$. Пары узлов из множества R соответствуют парам конечных узлов сети, между которыми осуществляется передача трафика.

Для $\forall (v_i, v_j) \in R$ определим множество всех возможных маршрутов $L_{ij} = \{l_1(v_i, v_j), l_2(v_i, v_j), \dots, l_n(v_i, v_j)\}$ между узлами (v_i, v_j) , где $l_r(v_i, v_j)$ – некоторый уникальный маршрут между узлами (v_i, v_j) .

В работе [6] были определены для каждой пары узлов $(v_i, v_j) \in R$ функция $f(v_i, v_j) \geq 0$, описывающая объем трафика, передаваемого между этими узлами, и условия для такой функции без учета весовых долей пропускной способности каждого отдельного маршрута. Определим условия, удовлетворяющие функции $f(v_i, v_j)$ с учетом весовых долей пропускной способности маршрута w :

$$F(p, v_i, v_j) = \sum_k f_{ij}(p, v_i, v_k) = \sum_k f_{ij}(p, v_k, v_j);$$

$$\forall (v_k) \in V \setminus \{v_i, v_j\};$$
(1)

$$F_{ij}(p, v_k, v_l) \leq \frac{w_{kl}}{w_{ij}} f(p, v_i, v_j) - \sum_{m,n} F_{mn}(p, v_k, v_l);$$

$$(v_m, v_n) \in R \setminus (v_i, v_j),$$
(2)

где $F_{ij}(v_k, v_l)$ – доля трафика $F(v_i, v_j)$, протекающего между узлами (v_k, v_l) ; $w_{kl} \geq 0$ – пропускная способность маршрута между узлами (v_k, v_l) , p – идентификатор потока данных.

Условие (1) определяет, что объем трафика, передаваемого по сети из узла v_i , будет равен объему трафика, поступающего в узел v_j . Условие (2) означает, что объем трафика, передаваемого по какому-либо маршруту, не превышает пропускной способности этого маршрута.

Рассмотрим РИС как граф, каждой паре узлов (v_i, v_j) и маршрута между ними (v_i, v_j) которого приписан кортеж:

$$[w_{ij}, prob_{ij}, L_{ij}, f(v_i, v_j, t)],$$
(3)

где $prob_{ij}$ – значение вероятности существования хотя бы одного маршрута между узлами (v_i, v_j) , $f(v_i, v_j, t) \geq 0$ – функция, соответствующая общему объему трафика, передаваемого между узлами (v_i, v_j) в каждый момент времени t :

$$f(p, v_i, v_j, t) = \frac{dF(p, v_i, v_j)}{dt} \quad (4)$$

Каждому отдельному маршруту $l_r \in L_{ij}$ соответствует кортеж:

$$\begin{aligned} [w_r(v_i, v_j), prob_r(v_i, v_j), cost_r(v_i, v_j), f_r(p, v_i, v_j, t)]; \\ 0 \leq prob_r(v_i, v_j) \leq 1; \\ 0 \leq cost_r(v_i, v_j), \end{aligned} \quad (5)$$

где $prob_r(v_i, v_j)$ – значение вероятности существования маршрута l_r между узлами (v_i, v_j) , $cost_r(v_i, v_j)$ – значение стоимости передачи условной единицы информации по маршруту l_r между узлами (v_i, v_j) , $f_r(p, v_i, v_j, t) \geq 0$ – функция, соответствующая объему трафика, передаваемого по маршруту l_r в каждый момент времени t . Будем при этом считать, что значение $prob_{ij}$, $prob_r(v_i, v_j)$ и $cost_r(v_i, v_j)$ одинаковы при передаче трафика в обе стороны (т.е. вероятность существования маршрута и стоимость передачи по этому маршруту в прямом направлении равны вероятности существования этого маршрута и стоимости передачи по этому маршруту в обратном направлении).

Вероятностью существования маршрута между двумя узлами каждого уникального маршрута l_r будем считать вероятностное произведение всех промежуточных маршрутов (включенных в этот маршрут) между соседними звеньями на этом маршруте:

$$\begin{aligned} prob_r(v_i, v_j) = \prod_{m,n} prob_r(v_m, v_n); \\ \forall l_r(v_m, v_n) \in l_r(v_i, v_j), \end{aligned} \quad (6)$$

где r – условный номер уникального маршрута между каждой парой узлов (v_i, v_j) . Здесь и далее будем учитывать только маршруты с вероятностью, отличной от нуля, т.к. маршрут с вероятностью равной нулю не сможет себя никогда реализовать.

Общей вероятностью существования хотя бы одного маршрута между парой узлов (v_i, v_j) будем считать сумму вероятностей существования всех уникальных маршрутов между этими узлами:

$$\begin{aligned} \text{prob}(v_i, v_j) &= 1 - \prod_{\forall r} (1 - \text{prob}_r(v_i, v_j)); \\ \forall l_r(v_i, v_j) &\in L_{ij}, \end{aligned} \quad (7.1)$$

$$\begin{aligned} \text{prob}(v_i, v_j) &= 1 - \prod_{\forall r} \left(1 - \prod_{m,n} \text{prob}_r(v_m, v_n) \right); \\ \forall l_r(v_m, v_n) \in l_r(v_i, v_j) &\in L_{ij} \end{aligned} \quad (7.2)$$

Формула (7.2) дает возможность рассчитать вероятность существования хотя бы одного маршрута между двумя узлами гетерогенной сети, основываясь на вероятностях существования каждого отдельного фрагмента сети.

Остаточная пропускная способность участка маршрута l_r между промежуточными узлами (v_m, v_n) – величина, показывающая, на какое значение может быть увеличен поток данных p^* по этому маршруту после вычета всех сторонних потоков данных:

$$w_r^*(p^*, v_m, v_n, t) = w_r(v_m, v_n) - \sum_{\forall g \in G} f_r(p, v_m, v_n, t), \forall p \in P \setminus p^* \quad (8.1)$$

где P – множество потоков данных, протекающих по маршруту l_r . Остаточная пропускная способность участка маршрута l_r между промежуточными узлами (v_i, v_j) будет соответствовать сегменту маршрута с наименьшей пропускной способностью:

$$\begin{aligned} w_r^*(p^*, v_i, v_j, t) &= \min_{\forall (v_m, v_n)} (w_r^*(p^*, v_m, v_n, t)), \\ \forall (v_m, v_n) &\in (v_m, v_n) \end{aligned} \quad (8.2)$$

Количество информации, переданной в потоке p^* по маршруту l_r между парой узлов (v_i, v_j) за время T :

$$F_r(p^*, v_i, v_j) \leq \int_0^T w_r^*(p^*, v_i, v_j, t) dt \quad (9)$$

Стоимостью передачи единицы информации для пары узлов (v_i, v_j) по каждому уникальному маршруту l_r будем считать сумму стоимостей передачи части этих данных по каждому фрагменту этого маршрута:

$$\text{cost}_r(v_i, v_j) = \sum_{m,n} \text{cost}_r(v_m, v_n) \frac{F_r(p^*, v_m, v_n)}{F_r(p^*, v_i, v_j)} \quad (10)$$

Относительную стоимость передачи трафика по каждому уникальному маршруту l_r будем считать как отношение стоимости пере-

дачи информации по этому маршруту к вероятности существованию этого маршрута:

$$\begin{aligned} cost_r^*(v_i, v_j) &= \frac{cost_r(v_i, v_j)}{prob_r(v_i, v_j)}; \\ prob_r(v_i, v_j) &> 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Очевидно, что маршрут с наиболее низкой относительной стоимостью будет являться наиболее оптимальным маршрутом передачи информации: такой маршрут может иметь более высокую стоимость, чем маршрут с минимальной стоимостью, однако вероятностные потери будут в таком маршруте намного ниже:

$$\begin{aligned} cost_o(v_i, v_j) &= \min_r (cost_r^o(v_i, v_j)) = \min_r \left(\frac{cost_r(v_i, v_j)}{prob_r(v_i, v_j)} \right); \\ prob_r(v_i, v_j) &> 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где $cost_o$ – стоимость передачи данных между узлами (v_i, v_j) по наиболее оптимальному маршруту.

Выводы

Решена задача нахождения оптимального маршрута для передачи трафика с учетом нагрузки на сеть, остаточной пропускной способности ее звеньев и требований к маршрутизации при условии непостоянной структуры сети, стоимости передачи трафика и возможности его разделения.

Предложенная математическая модель может быть применена для разработки методов и алгоритмов маршрутизации, поиска решения задачи маршрутизации в информационно-коммуникационных сетях сложной структуры. Реализация модели осуществляется посредством разбиения графа сети на компоненты, для каждого из которых применяется изложенная модель маршрутизации с последующей композицией общего решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Capone A., Fratta L., Martignon F. Dynamic online QoS routing schemes: performance and bounds // Computer Networks. 2006. No. 50. P. 966-981.
2. Capone A., Fratta L., Martignon F. Dynamic routing of bandwidth guaranteed connections in MPLS networks // Intern. Journal on Wireless & Optical Communications. 2003. No. 1. pp. 75-86
3. Kwong Kin-Wah, Guerin R., Shakh A., Shu Tao. Balancing performance, robustness and flexibility in routing systems // Proc. of ACM CoNEXT. Madrid, 2008. pp. 372-383.
4. Hadjiona M., Georgiou C., Papa M., Vassiliou V. A hybrid fault-tolerant algorithm for MPLS networks // Proc. of WWIC. Tampere. 2008. pp. 41-52.
5. Ефремов А. С., Зеленцов В. А., Миронов А. С., Уласень С. Н. Прогнозирование остаточного ресурса коммуникационного оборудования // Вестн. связи. 2004. №4. С. 93-99.
6. Зеленцов В. А., Цивирко Е. Г., Чукарин А. В. Метод маршрутизации трафика в информационно-коммуникационной гетерогенной сети // Известия высш. учебных заведений. 2010. №11. Том 53. С. 56-61.
7. Березко М. П., Вишневский В. М., Левнер Е. В., Федотов Е. В. Математические модели исследования алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных // Информационные процессы. 2001. Т. 1, №2. С. 103-125.