УДК 681.324

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОРЯДКА ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ В УЗЛАХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ТРАФИКА

П.Е. ПУСТОВОЙТОВ, Л.Г. РАСКИН

Для узла компьютерной сети предложен метод решения задачи определения порядка передачи совокупности пакетов с учетом известного распределения динамики занятости элементов сети. Для решения задачи предложен критерий — максимальная продолжительность доставки пакета, которая минимизируется. Предложенная задача редуцируется к решению совокупности двухиндексных задач назначения. Выполнено вычисление оценки целесообразности использования метода оптимизации порядка передачи пакетов. Выигрыш, получаемый при оптимизации порядка передачи пакетов, растет с увеличением числа передаваемых сообщений и повышением уровня вариабельности длины очереди пакетов, ожидающих обслуживания в промежуточных узлах. Получены соотношения для вычисления уровня вариабельности длин очередей. Используя имитационную модель узла сети были построены графики, показывающие выигрыш применения метода оптимизации порядка передачи сообщений в узлах сети для различного числа очередей.

Анализ литературы. В современных компьютерных сетях (КС) в связи с непрерывным ростом объемов трафика между корреспондентами и ограниченностью пропускных способностей линий связи и узлов сети высокую актуальность приобретает проблема маршрутизации [1–3].

Задача маршрутизации состоит в отыскании для каждого передаваемого сообщения маршрута с указанием всех промежуточных пунктов между исходным и конечным пунктами, оптимального с точки зрения выбранного критерия.

На практике наиболее часто используемый критерий — минимизация суммарной задержки при прохождении маршрута, отождествляется с длиной маршрута. При этом традиционные алгоритмы решения задачи отыскания кратчайшего маршрута учитывают только задержки, возникающие при прохождении линий связи между узлами сети, с учетом их пропускной способности, игнорируя задержки в собственно узлах [4, 5]. Этот недостаток устраняется в [6], где поставлена и решена задача отыскания маршрута, минимизирующего соответствующую ему суммарную задержку. В этой работе рассмотрена методика расчета законов изменения во времени длины очереди сообщений, ожидающих начала обслуживания в каждом из узлов сети. Отыскиваемые законы используются в дальнейшем для построения маршрута с минимальной задержкой передаваемых сообщений. Полученный в [6] результат, помимо непосредственной полезности его использования, важен еще и потому, что выявил проблему, не рассматривавшуюся ранее. Дело в том, что при учете различий в уровне занятости узлов сети возникает необходимость отыскания рационального порядка передачи сообщений. Эта задача ранее не рассматривалась.

Цель работы — отыскание рациональной организации работы при передаче совокупности пакетов от одного источника разным адресатам.

Пусть имеется источник сообщений, которые необходимо передать разным потребителям. Поставим задачу отыскания оптимального порядка передачи этих сообщений в предположении, что каждое из них будет доставлено адресату по оптимальному маршруту.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При решении задачи маршрутизации для совокупности m передаваемых пакетов информации будем исходить из того, что для каждого из промежуточных узлов обработки информации известен закон изменения во времени $g_k(t),\ k=1,2,\dots,K$ и длины очереди пакетов, ожидающих начала обслуживания в этом узле. Тогда, используя технологию [6], для любого из передаваемых пакетов можно найти маршрут, минимизирующий время доставки пакета получателю. Пусть при необходимости передачи m пакетов выбрана некоторая последовательность их передачи. Такая последовательность может быть задана следующим образом. Введем индикатор

$$x_{ij}=\begin{cases}1, & \text{если } i-\text{й пакет предается } j-\text{м по порядку},\\ 0 & \text{в противном случае.}\end{cases}$$

Тогда матрица $X=(x_{ij})$ однозначно задает последовательность передачи пакетов, если для совокупности (x_{ij}), $i=1,2,\dots,m$, $j=1,2,\dots,m$, выполняются ограничения

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij}=1,\ j=1,2,\dots,m, \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij}=1,\ i=1,2,\dots,m, \tag{2}$$

$$x_{ij}\in\{0;1\},\ i=1,2,\dots,m,\ j=1,2,\dots,m.$$

Выполнение совокупности ограничений (1) означает, что на каждое, например, j-е место в последовательности передаваемых пакетов назначен для передачи один пакет. Совокупность ограничений (2) определяет, что каждому пакету в общем порядке передачи назначено какое-то одно место.

Пусть теперь для конкретной пары (i,j) значение $x_{ij}=1$. Примем, что длины пакетов не слишком сильно отличаются друг от друга и продолжительность передачи для любого из них равна Δ. Тогда при передачи i-го пакета j-м по порядку с использованием [6] найдем кратчайший маршрут, начинающийся в момент $T_j=T_0+(j-1)\Delta$, и соответствующее этому маршруту время задержки доставки T_{ij} пакета потребителю (T_0 — момент начала передачи набора пакетов). Решая задачу для всех пар (i,j), $i=1,2,\dots,m$, $j=1,2,\dots,m$, составим матрицу $T=(T_{ij})$.

В рассматриваемой ситуации имеется $m!$ различных последовательностей передачи пакетов. Понятно, что при реальных значениях m их перебор бесперспективен. С целью отыскания наилучшего каким-либо разумным образом выбранного порядка передачи пакетов введем следующий естественный критерий — максимальное время доставки пакета, соответствующее этому выбранному порядку передачи пакетов. При этом для конкретного плана $X = (x_{ij})$ значение критерия определяется соотношением

$$\eta(X) = \max_{i,j} \{T_{ij} x_{ij}\} . \qquad (3)$$

Тогда задача выбора рационального порядка передачи пакетов сводится к следующей: найти план $X = (x_{ij})$, минимизирующий (3) и удовлетворяющий ограничениям (1)–(2). Полученная задача является минимаксной задачей назначения. Для ее решения предлагается следующая методика. Упорядочим множество значений T_{ij}, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, m$ следующим образом:

$$T_{i_1 j_1} \geq T_{i_2 j_2} \geq \dots \geq T_{i_q j_q} \geq \dots \geq T_{i_{mm} j_{mm}} .$$

С каждым элементом $T_{i_q j_q}$, $q \in \{1, 2, \dots, m^2\}$, свяжем двухиндексную матрицу $D^{(q)} = (d_{ij}^{(q)})$, компоненты которой зададим соотношением:

$$d_{ij}^{(q)} = \begin{cases} T_{ij}, & \text{если} \ \ T_{ij} < T_{i_q j_q}, \\ M, & \text{если} \ \ T_{ij} \geq T_{i_q j_q}, \end{cases}$$

где M — достаточно большое число (например, $M = m^2 \max\limits_{ij} \{T_{ij}\}$).

Пусть $q = 1$. При этом в матрице $D^{(1)} = (d_{ij}^{(1)})$ будет один элемент, равный M, стоящий на месте i_1, j_1. Решим теперь задачу отыскания набора $X = (x_{ij})$, минимизирующего

$$L(X) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} d_{ij}^{(1)} x_{ij} \qquad (4)$$

и удовлетворяющего (1)–(2). Это обычная задача назначения, решаемая «венгерским» методом [7–9]. Если при этом значение $L(X_1^*)$ на оптимальном плане задачи (1)–(2), (4) меньше M, то это означает, что существует порядок передачи пакетов, при котором максимальное время передачи меньше $T_{i_1 j_1}$.

Положим теперь $q = 2$. В соответствующей матрице $D^{(2)} = (d_{ij}^{(2)})$ будут два элемента, находящиеся на местах (i_1, j_1), (i_2, j_2), равные M. Вновь решим задачу назначения с матрицей $D^{(2)}$. Аналогично предыдущему, из выполнения неравенства $L(X_2^*) < M$ следует, что полученный на этом шаге порядок передачи пакетов X_2^* обеспечивает их передачу за время, не превосходящее $T_{i_2 j_2}$.

Продолжим решение задачи. Ясно, что рано или поздно найдется некоторое $q = \tilde{q}$ такое, что $L(X_{\tilde{q}}) < M$, но $L(X_{\tilde{q}+1}) > M$. Это означает, что существует порядок передачи пакетов, в котором максимальное время передачи не превосходит $T_{i_{\tilde{q}}, j_{\tilde{q}}}$, но не существует порядка, для которого максимальное время меньше или равно $T_{i_{\tilde{q}+1}, j_{\tilde{q}+1}}$. Следовательно, план $X^*_{\tilde{q}}$ является искомым решением минимаксной задачи (1)–(3).

Проведем оценку степени целесообразности оптимизации порядка передачи пакетов. С этой целью осуществим имитационное моделирование [10] процесса функционирования узла КС на интервале передачи m пакетов для различных законов $g_k(t)$ изменения во времени длины очереди пакетов, ожидающих начала обслуживания в промежуточных узлах. Понятно, что использование рационального порядка передачи пакетов тем более целесообразно, чем выше вариабельность функции $g_k(t)$, проявляющаяся в различиях величины задержки доставки T_{ij} для пакетов, передаваемых разными по порядку. Уровень вариабельности оценивается показателем

$$\xi = \frac{\max\limits_{i} \{\max\limits_{j} T_{ij} - \min\limits_{j} T_{ij}\}}{\frac{1}{m^2} \sum\limits_{i=1}^{m} \sum\limits_{j=1}^{m} T_{ij}} . \tag{5}$$

Для оценки степени целесообразности оптимизации порядка передачи пакетов используется показатель

$$\zeta(X^*) = \frac{\max\limits_{i} T_{ij}}{\max\limits_{ij} T_{ij} x^*_{ij}} . \tag{6}$$

Числитель этого соотношения определяет максимальную задержку доставки в случае, когда пакеты передаются в соответствии с их порядковыми номерами. В знаменателе (6) стоит максимальная задержка доставки, соответствующая оптимальному порядку передачи пакетов. Результаты имитационного моделирования для разных значений числа m передаваемых пакетов приведены на рисунке.

Анализ приведенных кривых позволяет сделать следующий вывод: выигрыш, получаемый при оптимизации порядка передачи пакетов растет с увеличением числа передаваемых пакетов и повышением уровня вариабельности длины очереди пакетов, ожидающих обслуживания в промежуточных узлах.

Задача существенно усложняется, если в результате естественных, неизбежных погрешностей оценки функций $g_k(t)$ расчет точных значений задержек T_{ij}, $i = 1, 2, \ldots, m$, $j = 1, 2, \ldots, m$, нереализуем, однако возможно описание этих задержек в виде нечетких чисел с соответствующими функциями принадлежности $M(T_{ij})$. При этом стержневая задача методики оптимизации порядка передачи пакетов должна решаться в нечеткой постановке. Метод решения задачи назначения при нечетких исходных данных изложен в [11].

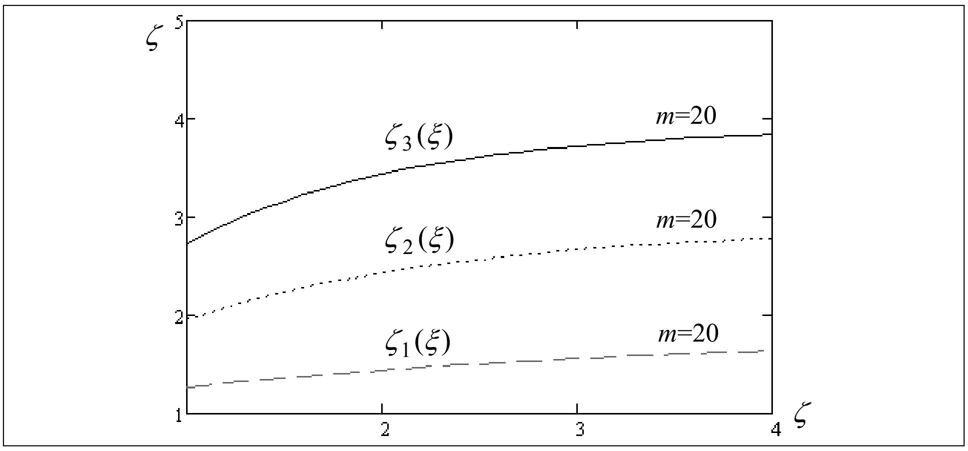

Рисунок. Выигрыш, получаемый при оптимизации порядка передачи пакетов

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложен метод решения задачи оптимизации порядка передачи совокупности пакетов с учетом динамики занятости элементов компьютерной сети. При решении задачи предложен минимаксный критерий. Показано, что поставленная задача сводится к последовательности двухиндексных задач назначения. Целесообразность оптимизации порядка передачи подтверждена имитационным моделированием. Направление дальнейших исследований может быть связано с решением сформулированной задачи при учете различий в длине передаваемых пакетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ирвин Дж, Харль Д.* Передача данных в сетях: инженерный подход: пер. с англ. — СПб.: БХВ–Петербург, 2003. — 448 с.
2. *Иртегов Д.В.* Введение в сетевые технологии. — СПб.: БХВ–Петербург, 2004. — 560 с.
3. *Куроуз Дж., Росс К.* Компьютерные сети. — СПб.: Питер, 2004. — 765 с.
4. *Столлингс В.* Современные компьютерные сети. — СПб.: Питер, 2003. —783 с.
5. *Таненбаум Э.* Компьютерные сети. — СПб.: Питер, 2003. — 992 с.
6. *Пустовойтов П.Е., Ящук Н.И.* Динамическая маршрутизация в компьютерных сетях высокой размерности // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2006. — № 3. — С. 68–71.
7. *Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г.* Задачи и методы линейного программирования. — М.: Сов. Радио, 1961. — 384 с.
8. *Раскин Л.Г.* Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. — М.: Сов. Радио, 1976. — 344 с.
9. *Мину М.* Математическое программирование. — М.: Наука, 1990. — 485 с.
10. *А.с.* № 39374 від 26.07.2011, Україна, ДДІВ. Комп'ютерна програма «Імітаційна модель комп'ютерної мережі із різними за властивостями потоками пакетів» / Пустовойтов П.Є.; Заявка №39622 від 23.05.2011.
11. *Раскин Л.Г., Серая О.В.* Нечеткая математика. Основы теории. Приложения. — Х.: Парус. — 2008. — 352 с.

Поступила 19.03.2012