

УДК 004.722.25

Ю.И. ВОРОТНИЦКИЙ, Д.А. СТРИКЕЛЕВ

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА СЕРВИСА ПРОТОКОЛОВ ТРАНСПОРТНОГО УРОВНЯ В ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЯХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ДРЕВОВИДНОЙ СТРУКТУРЫ. Ч. 1*

Data structures for representing arbitrary tree-like switch-based network topologies are proposed. Three classes of network routes are discussed (addressed, broadcast, multicast), algorithms for complete path calculation of each class are proposed. Transport layer effects of TCP/IP protocol stack are studied, estimates for UDP-datagram loss probability and TCP-segment transmission time are given. Results of channel layer and transport layer effects are calculated, compared and analyzed.

Для размещения ресурсов в компьютерных сетях, содержащих значительное количество узлов (от нескольких сотен до нескольких тысяч), эффективным является метод декомпозиции объединенной сети на множество локальных вычислительных сетей (ЛВС), связанных посредством маршрутизаторов. При этом взаимодействие на канальном уровне в каждой ЛВС рассматривается независимо [1]. В случае, когда ЛВС построена на основе коммутаторов, исследователями была предложена модель оценки времени доступа к ее узлам [2]. В то же время представляется возможным внести в эту модель ряд дополнений, увеличивающих ее универсальность:

1) включить в рассмотрение неравномерные и несимметричные сетевые топологии (коммутаторы имеют неравное количество портов, рабочие станции могут подключаться к коммутаторам произвольного уровня иерархии, порты коммутаторов могут оставаться свободными);

2) учитывать не только специфику работы коммутатора на канальном уровне модели OSI (состояние коммутаторов за передающую среду, управление средой

* Авторы статьи - сотрудники кафедры кибернетики.

передачи алгоритмами «обратного давления» и «агрессивного захвата» [3]), но и дополнительные эффекты, возникающие при сетевом взаимодействии посредством протоколов TCP и UDP, которые используются большинством информационных ресурсов ГР-сети.

Реализация первого дополнения требует изменения способа задания топологии ЛВС в численной модели. Так как технологии ЛВС исключают наличие активных циклических маршрутов (петель), то обобщенная топология сети представляет собой дерево [4]. Наиболее распространенным способом задания сетевой топологии является матрица смежностей Z , имеющая размеры $N \times N$ (N — количество узлов в сети). Элемент z_{ij} равен единице в том случае, если узлы i и j смежны друг с другом, и равен нулю в противном случае. Сведения об иерархии узлов в данном случае отсутствуют.

В качестве альтернативы предлагается хранение списка всех узлов ЛВС в виде вектора V , элемент которого v_i , характеризует полный путь от узла i до корня дерева. При нумерации узлов сети необходимо сначала пронумеровать промежуточные (коммутаторы), а затем конечные (рабочие станции) узлы. При этом у узлов-коммутаторов более низкого уровня (находящихся дальше от корня дерева) должны быть номера большие, чем у узлов-коммутаторов, расположенных ближе к корню. Для сети, представленной на рисунке, список узлов следующий: $\{\{1\}, \{1, 2\}, \{1, 3\}, \{1, 2, 4\}, \dots, \{1, 3, 8\}, \{1, 9\}\}$. При выбранной схеме обозначения узлов номер ребра k , соединяющего узел i (рабочую станцию или коммутатор) с портом родительского коммутатора, всегда можно найти как $k = i - 1$.

Максимальное количество рабочих станций в ЛВС на основе Ethernet - 1024. Если фактическое количество рабочих станций N_N и применяется стандартная 3-уровневая схема подключения (корневой коммутатор - коммутаторы отделов - коммутаторы рабочих групп) [3], то необходимое количество коммутаторов можно оценить как

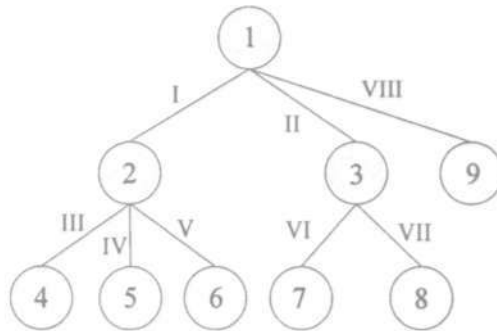
$$N_S = \left\lceil \frac{N_N}{N_{wkg}} \right\rceil + \left\lceil \frac{N_N}{N_{wkg} \cdot N_{dpt}} \right\rceil + 1,$$

где N_{wkg} и N_{dpt} - количество портов коммутатора рабочей группы и коммутатора отдела соответственно. Общее количество узлов в ЛВС (включая коммутационное оборудование) при этом $N_N + N_S$, а ребер (каналов связи) - $N_N + N_S - 1$.

Используя информацию об иерархии коммутаторов сети относительно друг друга, содержащуюся в векторе V , можно задать матрицу подключения рабочих станций к коммутаторам C , матрицу соподчиненности коммутаторов H , а также полную карту маршрутов между коммутаторами M .

Сведения о подключении рабочих станций к коммутаторам задаются с помощью матрицы C размера $N_N \times N_S$ элементы которой c_{ij} равны единице, если рабочая станция i подключена к коммутатору j , и нулю - в противном случае.

Матрица H размера $N_N \times N_N$ содержит информацию о том, какие коммутаторы являются дочерними по отношению к данному; и ее элементы h_{ij} равны единице, если коммутатору является дочерним по отношению к коммутатору i или i и j совпадают, и нулю - в противном случае.



Нумерация узлов и ребер в ЛВС на основе коммутаторов (затененные узлы – коммутаторы, светлые – рабочие станции)

Для определения карты сетевых маршрутов между коммутаторами необходимо рассмотреть присутствующие в ЛВС типы сетевого трафика. При взаимодействии множества устройств в ЛВС выделяют несколько классов трафика: адресатный, широковещательный и групповой. *Адресатный* трафик характеризуется тем, что логической схемой взаимодействия узлов является модель «точка - точка». Применение коммутаторов в этом случае обеспечивает возможность организации выделенного маршрута на канальном уровне модели OSI. Источником *широковещательного* трафика является один узел, но адресован он всем узлам сети, и коммутаторы ретранслируют широковещательные Ethernet-кадры во все порты без ограничений, т. е. широковещательный трафик передается по всем ребрам дерева, представляющего собой топологию ЛВС. Третий тип трафика - *групповой*, специфика которого заключается в том, что его источником является один узел, а получателем - группа узлов. В зависимости от способа реализации групповой рассылки (с помощью широковещательной или многоадресной передачи на канальном уровне) в качестве маршрутов движения группового трафика могут использоваться маршруты широковещательного трафика или может возникнуть необходимость составления отдельного набора маршрутов, передача по которым ведется только между теми коммутаторами, к которым подключены члены многоадресных групп.

Если в сети присутствует N_s коммутаторов, то матрица M , хранящая все маршруты между ними, будет иметь размеры $N_R(N_s - 1)$, где N_R можно определить как

$$N_R = \underbrace{(N_s - 1)N_s}_{\text{адресатные маршруты}} + \underbrace{N_s}_{\text{широковещательные маршруты}} + \underbrace{N_{MC} \cdot N_s}_{\text{многоадресные маршруты}},$$

а N_{MC} - количество многоадресных групп в ЛВС. Элементы M задаются следующим образом:

$$m_{l,k} = \begin{cases} -1, & \text{если в маршруте } l \text{ передача по ребру } k \text{ происходит в направлении «от корня»,} \\ 1, & \text{если в маршруте } l \text{ передача по ребру } k \text{ происходит в направлении «к корню»,} \\ 0, & \text{если в маршруте } k \text{ передача по ребру } k \text{ не используется.} \end{cases}$$

Направление передачи данных по ребру при каком-либо маршруте учитывается потому, что конструктивной особенностью коммутатора является различие им входящего и исходящего трафика при ретрансляции кадров через порт [3].

При наличии в ЛВС 1024 рабочих станций и применении 32-портовых коммутаторов необходимое количество коммутаторов составит 33 устройства, а размер таблицы маршрутов - $(11\,904 + 384 \cdot N_{MC})$ байт. Количество адресатных маршрутов можно уменьшить вдвое, если учесть, что при использовании адресатных передач $m_{ij} = m_{ji}$.

Для составления адресатных маршрутов между коммутаторами на основе вектора, характеризующего узлы сети V , следует, рассматривая только узлы-коммутаторы, воспользоваться следующим алгоритмом:

- 1) если путь от получателя j до источника i уже найден, то путь от источника i до получателя j совпадает с ним, но с инвертированными направлениями передачи;
- 2) в противном случае необходимо сравнить метки коммутатора-источника и коммутатора-получателя из вектора V , представляющие путь к ним от корня дерева;
- 3) удалить из меток всю общую часть, кроме самого правого общего узла;
- 4) произвести слияние меток источника и получателя по общей метке;
- 5) определить номер маршрута r по номерам коммутаторов источника i и получателя j по формуле $r = (i - 1)N_s + j$;

6) двигаясь слева направо, сформировать маршрут (список ребер и направлений передачи), учитывая следующую особенность: если номер узла слева меньше номера узла справа (левый узел расположен ниже по иерархии), то используется передача по направлению «к корню», в противном случае (левый узел расположен выше по иерархии) - направление «от корня»;

7) задать значения $(-1, 0, 1)$ элементов $m_{r,k}$ ($k = \overline{1 \dots N_s}$) карты маршрутов исходя из включения ребра k в маршрут r и направления передачи по нему.

После определения всех адресатных маршрутов можно задать широковещательные и многоадресатные маршруты для всех коммутаторов ЛВС. С целью широковещательного маршрута от коммутатора i следует воспользоваться следующим алгоритмом:

1) определить номер маршрута z по номеру коммутатора-источника i по формуле $r = (N_s - 1)N_s + i$;

2) получить маршрут m_r : $m_r = \sum_{j=1}^{N_s} m_{(i-1)N_s+j}$;

3) все элементы $m_{r,k}$ ($k = \overline{1 \dots N_s}$), по абсолютной величине превышающие единицу, уменьшить до единицы, не изменяя знака.

Для определения многоадресатных маршрутов необходимо иметь сведения о включенности рабочих станций в различные многоадресатные группы, задаваемые матрицей Q размера $N_N \times N_{mc}$. Элемент $q_{i,l}$ равен единице в том случае, если станция i входит в многоадресатную группу l , и нулю - в противном случае. Для получения многоадресатного маршрута от коммутатора i в рамках многоадресатной группы l следует воспользоваться алгоритмом:

1) определить номер маршрута r по номеру коммутатора-источника i и номеру многоадресатной группы l по формуле $r = N_s^2 + (l - 1)N_s + i$;

2) получить маршрут $m_r = \sum_{j=1}^{N_s} q_{j,l} m_{(i-1)N_s+j}$;

3) все элементы $m_{r,k}$ ($k = \overline{1 \dots N_s}$), по абсолютной величине превышающие единицу, уменьшить до единицы, не изменяя знака.

Полный маршрут от рабочей станции до получателя (другой рабочей станции, всех рабочих станций ЛВС или многоадресатной группы) строится на основе матрицы маршрутов между коммутаторами и представляет собой вектор длиной $N_N + N_s - 1$ элементов:

$$R = (\underbrace{r_1; r_2; \dots; r_{N_s-1}}_{N_s-1 \text{ элементов связи коммутаторов}}; \underbrace{r_{N_s}; r_{N_s+1}; \dots; r_{N_s+N_N-2}}_{N_N \text{ элементов каналов рабочих станций}}).$$

Для удобства введем также искусственные маршруты:

- маршрут, включающий каналы подключения всех рабочих станций к коммутаторам, передача данных по которым происходит в направлении «от корня»:

$$A \stackrel{\text{def}}{=} (\underbrace{0; 0; \dots; 0}_{N_s-1}; \underbrace{-1; -1; \dots; -1}_{N_N});$$

- маршрут, включающий канал подключения i -й рабочей станции к коммутатору, передача данных по которому происходит в направлении «к корню»:

$$E_i \stackrel{\text{def}}{=} (\underbrace{0; 0; \dots; 0}_{N_s-1}; \underbrace{0; 0; \dots; 0; e_{N_s-1+i} = 1; 0; \dots; 0}_{N_N}), i = \overline{1, N_N}.$$

Учитывая введенные определения и используя матрицу маршрутов между коммутаторами, можно задать любой тип маршрута в ЛВС:

- адресатная передача от рабочей станции i к рабочей станции j :

$$R_{i,j}^A = (\underbrace{m_r}_{N_S-1}, \underbrace{0; \dots; 0}_{N_N}) + E_i - E_j, \quad \text{где } r = (\sum_{k=1}^{N_S} c_{i,k} \cdot k - 1)N_S + \sum_{k=1}^{N_S} c_{j,k} \cdot k;$$

- ширококешательная передача от рабочей станции i :

$$R_i^{BC} = (\underbrace{m_r}_{N_S-1}, \underbrace{0; \dots; 0}_{N_N}) + A + 2 \cdot E_i, \quad \text{где } r = (N_S - 1)N_S + \sum_{k=1}^{N_S} c_{i,k} \cdot k;$$

- многоадресная передача от рабочей станции i в рамках многоадресной группы l :

$$R_{i,l}^{MC} = (\underbrace{m_r}_{N_S-1}, \underbrace{0; \dots; 0}_{N_N}) - \sum_{j=1}^{N_N} q_{j,l} E_j + 2 \cdot E_i, \quad \text{где } r = N_S^2 + (l-1)N_S + \sum_{k=1}^{N_S} c_{i,k} \cdot k.$$

Пусть в сети присутствует N_I информационных ресурсов, каждый из которых может использовать трафик определенного типа, что задается матрицей W размера $N_I \times 3$, элементы которой определяются следующим образом:

$$w_i = \begin{cases} (1; 0; 0), & \text{если ресурс } i \text{ использует адресатный трафик,} \\ (0; 1; 0), & \text{если ресурс } i \text{ использует ширококешательный трафик,} \\ (0; 0; 1), & \text{если ресурс } i \text{ использует многоадресный трафик.} \end{cases}$$

Размещение ресурсов по рабочим станциям ЛВС задано матрицей B размера $N_I \times N_N$, элементы которой b_{ij} равны единице, если ресурс i расположен на рабочей станции j , и нулю - в противном случае. Каждому ресурсу соответствует среднее значение востребованной пропускной полосы $D = \{d_i\}$, $i = \overline{1, N_I}$, а для ресурсов, использующих многоадресный трафик, задан также номер многоадресной группы $G = \{g_i\}$, $i = \overline{1, N_I}$.

Потребность рабочих станций (пользователей) в ресурсах задана матрицей U , имеющей размеры $N_N \times N_I$, элементы которой u_{ij} равны единице в том случае, если рабочая станция i испытывает необходимость в информационном ресурсе j , и нулю - в противном случае. Общее количество сетевых взаимодействий можно определить как

$$N_C = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{j=1}^{N_I} u_{i,j}.$$

Суммарный трафик ЛВС по ребрам, обусловленный всеми взаимодействиями, следует рассматривать с двух точек зрения: трафик отсылаемый (т. е. тот, который фактически отправляется в сеть конечными рабочими станциями) и трафик передаваемый (т. е. тот, который будет доставлен с учетом имеющейся загрузки каналов и коммутационного оборудования). Два вида трафика будем задавать матрицами T и $\bar{T}$ соответственно, каждая из которых имеет размер $N_C \times (N_S + N_N - 1)$, а элементы $t_{i,k}$ и $\bar{t}_{i,k}$ характеризуют потоки данных, пересылаемые по ребру k в рамках сетевого взаимодействия i . Разница между T и $\bar{T}$ характеризует потери кадров в сети по причине переполнения буферов коммутаторов и сказывается в возникновении дополнительных эффектов (увеличении временных задержек, потере данных) на транспортном уровне.

Если размещение информационных ресурсов по рабочим станциям задано, то можно сформировать карту отсылаемого трафика T , обусловленную множеством сетевых взаимодействий (T_l - строка l матрицы T , задающая загрузку каналов передачи данных в пределах одного маршрута):

$$T_l = d_l \left(w_{l,1} \cdot R^A + \sum_{j=1}^{N_N} b_{l,j} \cdot R_j^{BC} + w_{l,3} \cdot R_{j,g_l}^{MC} \right),$$

$$\text{где } l = \sum_{x=1}^{j-1} \sum_{y=1}^{N_l} u_{x,y} + \sum_{y=1}^i u_{j,y}, \quad i = \overline{1, N_l}, \quad j = \overline{1, N_N}.$$

После того как учтены все сетевые взаимодействия в ЛВС, можно оценить прямой и обратный потоки данных, протекающие по каждому из каналов передачи данных κ (T'_k - поток в направлении «к корню», T''_k - поток в направлении «от корня»):

$$T'_k = \sum_{l=1}^{N_C} t_{l,k}, \quad T''_k = \sum_{l=1}^{N_C} t_{l,k}.$$

На основании определенных отправляемых потоков по формулам, предложенным в [2], для каждого ребра κ можно вычислить значения передаваемых потоков:

$$(\overline{T'_k}, \overline{T''_k}) = \begin{cases} (T'_k, T''_k), & \text{если } T'_k + T''_k \leq N_B; \\ (T'_k, N_B - T''_k), & \text{если } T'_k + T''_k > N_B, T'_k \leq N_B/2, T''_k > N_B/2; \\ (N_B - T'_k, T''_k), & \text{если } T'_k + T''_k > N_B, T'_k > N_B/2, T''_k \leq N_B/2; \\ (N_B/2, N_B/2), & \text{если } T'_k > N_B/2, T''_k > N_B/2, \end{cases}$$

где N_B - максимальное число байт, передаваемое в секунду по каналу передачи данных. Подобная зависимость передаваемых потоков от отправляемых обусловлена алгоритмами управления потоком кадров через порт, реализуемыми коммутатором, такими как «обратное давление» и «агрессивный захват» (см. [3]).

Так как технология Ethernet не предполагает использования различных приоритетов при передаче кадров, то данные, передаваемые в рамках различных сетевых взаимодействий, являются равноправными, и в случае, если отправляемый поток кадров по каналу превышает передаваемый, можно ожидать равномерного распределения потерянных кадров по всем взаимодействиям, в маршрутах которых используется данный канал. Исходя из этого, можно вычислить матрицу передаваемого трафика на основе матрицы отправляемого трафика и максимальных значений потоков, передаваемых коммутаторами:

$$\overline{t_{l,k}} = \begin{cases} \overline{T'_k} \frac{t_{l,k}}{T'_k}, & \text{если } t_{l,k} > 0, \\ \overline{T''_k} \frac{t_{l,k}}{T''_k}, & \text{если } t_{l,k} < 0. \end{cases}$$

Разница между значениями отправляемого $t_{l,k}$ и передаваемого $\overline{t_{l,k}}$ трафиков по ребру κ определяет потери данных сетевого взаимодействия / по причине ограниченной пропускной способности. Так как каналы передачи данных в ЛВС имеют различную загрузку, эффективная пропускная способность ребер маршрута каждого из сетевых взаимодействий будет также различаться. Поскольку в стационарном режиме функционирования сети передаваемые данные не накапливаются и не генерируются, необходимо скорректировать пропускные способности всех ребер, включенных в маршрут, согласно пропускным способностям тех из них, которые являются «узкими местами». При корректировке значений отправляемого и проходящего трафиков необходимо учитывать различия типов их маршрутов.

Алгоритмы коррекции пропускных способностей ребер и оценки параметров качества сервиса протоколов транспортного уровня будут обсуждаться во второй части данной статьи.

1. Воротницкий Ю.И., Стрикелев Д.А. // Информационные системы и технологии IST'2004: в 2 ч. Мн., 2004. Ч. 2. С. 18.

2. Воротницкий Ю.И., Стрикелев Д.А. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2004. № 3.

3. Олифер В., Олифер Н. Локальные сети на основе коммутаторов: Информ.-аналит. материалы ЦИТ. [Электронный ресурс]. 2001. Режим доступа: <http://www.citforum.ru/nets/lsok/-contents.shtml>.

4. Столлингс В. Современные компьютерные сети. 2-е изд. СПб., 2003.

Поступила в редакцию 17.04.06.

Юрий Иосифович Воротницкий – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой.

Дмитрий Александрович Стрикелев – старший преподаватель.

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right),$$
$$C_1 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2, \quad C_2 = 1,43 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

$\varepsilon(\lambda, T)$ λ