

УДК 004.735:004.738

Ф.С. Шапо, канд. техн. наук, доц., Одес. нац. политехн. ун-т,

В.Ф. Шапо, канд. техн. наук, Одес. нац. мор. акад.

## КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

*Ф.С. Шапо, В.Ф. Шапо.* **Комплексний метод побудови територіально розосереджених комп'ютерних мереж.** Розроблено методи розрахунку об'ємів трафіка та пропускних здатностей каналів зв'язку, вибору топологічної структури мережі з урахуванням співвідношення ціна-живучість та розрахунку часу транзакції через інтермережу з довідною топологічною структурою. Створено програмний комплекс, що реалізує запропоновані методи.

*F.S. Shapo, V.F. Shapo.* **Complex method of wide area computer networks building.** Methods of traffic volumes and channels capacity calculation, choosing of network topology structure with registering of price-vitality correlation and transaction time calculation through internetwork with arbitrary topology structure, are developed. Software complex which is realizing the proposed methods is created.

В настоящее время чрезвычайно быстро растут количество, размеры и сложность компьютерных сетей, и наблюдается тенденция еще более быстрого дальнейшего их развития. При этом построение ряда сетей, особенно региональных и территориально распределенных, в большинстве случаев выполняется эвристически, на базе накопленного опыта подобных решений. Поэтому сложные сети часто имеют неоптимальные стоимость, быстродействие и живучесть, нерационально выбранные структуру и тип сетевого оборудования [1, 2].

Предлагается комплексный метод построения региональных, территориально распределенных, корпоративных и сложных локальных компьютерных сетей (ЛКС), позволяющий формализовать и автоматизировать этот процесс. Метод заключается в последовательном выполнении ряда взаимосвязанных этапов. *На первом этапе* проектирования разрабатывается информационная модель территориально распределенной сети (ТРС) на основе анализа связей между входящими в нее ЛКС, и анализа типов и объемов циркулирующих в ней трафиков. Полный трафик ТРС

$$W = f(W_p, W_v, W_g, W_f, W_d, W_e, W_a), \quad (1)$$

где  $W_p$  — трафик при использовании IP-телефонии;  
 $W_v$  — трафик при проведении видеоконференций;  
 $W_g$  — трафик при использовании Интернет;  
 $W_f$  — трафик при передаче факсов и телексов;  
 $W_d$  — трафик при работе с удаленными базами данных;  
 $W_e$  — трафик при работе с электронной почтой;  
 $W_a$  — трафик при работе с бизнес-приложениями.

Все типы трафиков можно разделить на 2 класса: синтетические трафики (ТСТ), зависящие от объема выполняемых пользователем работ, если размер временной задержки при передаче данных не имеет принципиального значения, и трафики реального времени (ТРВ), возникающие при использовании IP-телефонии и проведении видеоконференций, требующие определенной пропускной способности сети и чувствительные к размеру временных задержек при передаче данных. Тогда полный трафик ТРС

$$W_{RS} = W_R + W_S, \quad (2)$$

где  $W_R$  — трафик реального времени;  
 $W_S$  — синтетический трафик.  
 Полный трафик реального времени

$$W_R = \sum_{i=1}^k n_i W_{ti} \tag{3}$$

где  $k$  — количество типов ТРВ, генерируемых пользователем;  
 $W_{ti}$  — требуемая пропускная способность ТРС для одного рабочего места для  $i$ -го типа ТРВ, Мбит/с;  
 $n_i$  — количество рабочих мест, генерирующих  $i$ -й тип ТРВ.  
 Полный синтетический трафик

$$W_S = \sum_{j=1}^m n_j V_j f_j \tag{4}$$

где  $m$  — количество типов ТСТ, генерируемых пользователем;  
 $n_j$  — количество рабочих мест, генерирующих  $j$ -й тип ТСТ;  
 $V_j$  — передаваемый и принимаемый объем данных  $j$ -го типа, Мбит;  
 $f_j$  — интенсивность передачи ТСТ  $j$ -го типа,  $c^{-1}$ .

На базе проведенного анализа типов и расчета объемов всех типов трафика строятся модифицированные DFD-диаграммы  $D$  с указанием типов и объемов трафика на дугах и множество двудольных графов  $Z_G = \{G_1 \dots G_z\}$ ,  $D \rightarrow Z_G$ , характеризующих обмен данными между ЛКС через ТРС (рис. 1). Узлы ЛКС генерируют трафик нескольких типов, описанный выражениями (1)...(4). Трафик  $a$ -й ЛКС,  $a = 1 \dots z$ , описывается двудольным графом;  $L_1 \dots L_z$  — ЛКС, входящие в ТРС;  $n_a$  — число узлов ЛКС $_a$ ;  $U_{1a} \dots U_{n_a}$  — узлы  $a$ -й ЛКС.

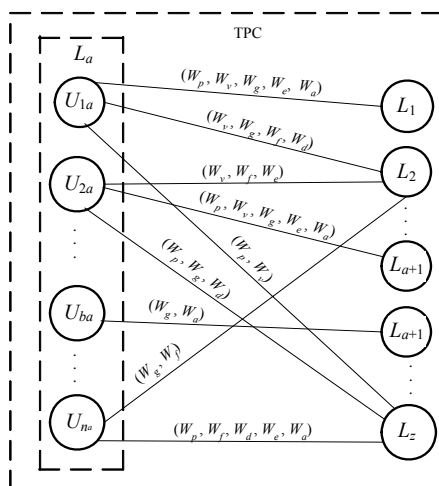


Рис. 1. Двудольный граф, описывающий трафик между ЛКС через ТРС

Каждый граф описывается множеством матриц трафика  $M = \{M_T, M_R, M_S, M_L\}$ , определяющих трафик  $b$ -го узла  $a$ -й ЛКС через ТРС, и полный трафик  $a$ -й ЛКС в ТРС. Матрицы имеют следующие типы и размерности.

Множество матриц, соответствующих всем типам трафика  $a$ -й ЛКС  $M_T = \{M_p, M_v, M_g, M_f, M_d, M_e, M_a\}$ .

Тогда каждая из матриц может быть представлена как

$$M_l = \| \| W_{abc} \| \|_{n_a \times z} = \begin{vmatrix} W_{a1l1} & \dots & W_{a1lc} & \dots & W_{a1lz} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{ab1l} & \dots & W_{ablc} & \dots & W_{ablz} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{an_l1} & \dots & W_{an_lc} & \dots & W_{an_lz} \end{vmatrix} ,$$

где  $l \in \{p, v, g, f, d, e, a\}$ .

Матрицы: ТРВ  $a$ -й ЛКС  $\mathbf{M}_R = \mathbf{M}_p + \mathbf{M}_v$ , ТСТ  $a$ -й ЛКС  $\mathbf{M}_S = \mathbf{M}_g + \mathbf{M}_f + \mathbf{M}_d + \mathbf{M}_e + \mathbf{M}_a$ , полного трафика  $a$ -й ЛКС  $\mathbf{M}_L = \mathbf{M}_p + \mathbf{M}_v + \mathbf{M}_g + \mathbf{M}_f + \mathbf{M}_d + \mathbf{M}_e + \mathbf{M}_a = \mathbf{M}_R + \mathbf{M}_S$ . Матрицы имеют размер  $n_a \times z$ .

Полный трафик  $l$ -го типа, генерируемый  $b$ -м узлом  $a$ -й ЛКС и передающийся в ТРС,

$$\mathbf{W}_{abl} = \sum_{c=1}^z W_{ablc} \quad (5)$$

Полный трафик  $l$ -го типа  $a$ -й ЛКС, передающийся в ТРС,

$$\mathbf{W}_{al} = \sum_{j=1}^{n_a} \sum_{m=1}^z W_{ijlm} \quad (6)$$

Вектор  $\mathbf{W}_{al} = (W_{abl1}, \dots, W_{ablc}, \dots, W_{ablz})$  определяет величины отправляемого трафика  $l$ -го типа из  $b$ -го узла  $a$ -й ЛКС во все ЛКС, входящие в ТРС, а вектор  $\mathbf{W}_{cl} = (W_{al1c}, \dots, W_{ablc}, \dots, W_{an_alc})$  — величину трафика  $l$ -го типа из всех узлов  $a$ -й ЛКС, получаемого  $c$ -й ЛКС, входящей в ТРС.

Построение матриц трафика  $l$ -го типа позволяет оценить полный трафик каждого типа и его влияние на ТРС. В соответствии с числом типов трафика может быть построено не более семи таких матриц для каждой ЛКС. Построение матриц полного ТРВ и полного ТСТ позволяет формализовать выбор сетевой технологии для построения ТРС с учетом преобладания соответствующего типа трафика.

ТРВ, генерируемый  $b$ -м узлом  $a$ -й ЛКС и передаваемый в ТРС,

$$W_{Rab} = \sum_{i=1}^k \sum_{c=1}^z W_{Rabic} \quad (7)$$

где  $k$  — число типов ТРВ;

$W_{Rabic}$  — ТРВ  $i$ -го типа, генерируемый  $b$ -м узлом  $a$ -й ЛКС, передающийся в  $c$ -ю ЛКС через ТРС.

Полный ТРВ, генерируемый  $a$ -й ЛКС и передающийся в ТРС,

$$W_{Ra} = \sum_{b=1}^{n_a} \sum_{i=1}^k \sum_{c=1}^z W_{Rabic} \quad (8)$$

Матрица полного ТРВ между узлами  $a$ -й ЛКС и ТРС

$$\mathbf{M}_R = \parallel W_{Rabic} \parallel_{n_a \times z} = \begin{vmatrix} W_{Ra11} & \dots & W_{Ra1c} & \dots & W_{Ra1z} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{Rab1} & \dots & W_{Rabc} & \dots & W_{Rabz} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{Ran_a1} & \dots & W_{Ran_a c} & \dots & W_{Ran_a z} \end{vmatrix}.$$

Аналогично выполняется построение матрицы  $\mathbf{M}_S$  полного ТСТ между узлами  $a$ -й ЛКС и ТРС.

Векторы  $\mathbf{W}_{Ra} = (W_{Rab1}, \dots, W_{Rabc}, \dots, W_{Rabz})$  и  $\mathbf{W}_{Sa} = (W_{Sab1}, \dots, W_{Sabc}, \dots, W_{Sabz})$  определяют соответственно величины отправляемого ТРВ и ТСТ из  $b$ -го узла  $a$ -й ЛКС во все ЛКС, входящие в ТРС, а векторы  $\mathbf{W}_{Rc} = (W_{Ra1c}, \dots, W_{Rabc}, \dots, W_{Ran_a c})$  и  $\mathbf{W}_{Sm} = (W_{Sa1c}, \dots, W_{Sabc}, \dots, W_{San_a c})$  — величину соответственно ТРВ и ТСТ из всех узлов  $a$ -й ЛКС, получаемого  $c$ -й ЛКС, входящей в ТРС.

Полный трафик, генерируемый  $a$ -ой ЛКС и передающийся в ТРС,

$$W_{RSa} = W_{Ra} + W_{Sa} = \sum_{c=1}^z \sum_{b=1}^{n_a} \left( \sum_{i=1}^k W_{Rabic} + \sum_{j=1}^m W_{Sabjc} \right) \quad (9)$$

Тогда полный трафик через ТРС

$$W_{RS} = \sum_{c=1}^z \sum_{c=1}^z \sum_{b=1}^{n_i} \left( \sum_{i=1}^k W_{Rabic} + \sum_{j=1}^m W_{Sabjc} \right). \quad (10)$$

Матрица полного трафика через ТРС между узлами  $a$ -ой ЛКС и ТРС

$$\mathbf{M}_{RS} = \| W_{RSabc} \|_{n_a \times z} = \begin{vmatrix} W_{Ra11} + W_{Sa11} & \dots & W_{Ra1c} + W_{Sa1mc} & \dots & W_{Ra1z} + W_{Sa1z} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{Rab1} + W_{Sab1} & \dots & W_{Rabc} + W_{Sabc} & \dots & W_{Rabz} + W_{Sabz} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{Ran_a1} + W_{San_a1} & \dots & W_{Ran_a c} + W_{San_a c} & \dots & W_{Ran_a z} + W_{San_a z} \end{vmatrix}.$$

На базе полученного множества матриц трафика, аналитических выражений (5)...(10), векторов  $\mathbf{W}_{Ra}$ ,  $\mathbf{W}_{Sa}$ ,  $\mathbf{W}_{Rc}$ ,  $\mathbf{W}_{Sm}$  и временных ограничений выполняется расчет пропускных способностей каналов связи ТРС и строится матрица  $\mathbf{M}_B$  размером  $z \times z$  необходимых пропускных способностей каналов связи между узлами ТРС

$$\mathbf{M}_B = \| B_{ij} \|_{z \times z} = \begin{vmatrix} \dots & \dots & B_{1j} & \dots & B_{1z} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{i1} & \dots & \dots & \dots & B_{iz} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{z1} & \dots & B_{zi} & \dots & \dots \end{vmatrix}.$$

где  $B_{ij}$  — пропускная способность каналов связи ТРС между входящими в нее ЛКС.

Пропускная способность канала связи ТРС  $B_m$  выбирается на базе рассчитанной  $B_{ij}$  следующим образом: имеется  $q$  значений стандартных пропускных способностей каналов связи, отсортированных по возрастанию,  $B = (B_1, B_2, \dots, B_m, \dots, B_q)$ . Тогда  $\forall i, \exists B_m, B_{m-1} < B_{ij} \& B_m > B_{ij}$ .

В связи с быстрым увеличением объемов передаваемой информации выполняется прогнозирование развития ТРС и вводятся коэффициенты запаса трафика для расчета пропускной способности каналов связи ТРС  $\tilde{B}_m$ . Полный трафик через ТРС с учетом прогнозирования

$$\tilde{W}(y+1) = k_p W_p(y) + k_e W_e(y) + k_g W_g(y) + k_a W_a(y) + k_d W_d(y) + k_v W_v(y) + k_f W_f(y), \quad (11)$$

где  $y$  — год, для которого выполняется прогноз;

$y + 1$  — следующий год;

$k_p, k_v, k_g, k_f, k_d, k_e, k_a$  — коэффициент запаса для соответствующих видов из выражения (1).

Тогда с учетом прогнозирования в общем случае пропускная способность канала связи ТРС

$$\tilde{B}_m(y+1) = k_p B_p(y) + k_e B_e(y) + k_g B_g(y) + k_a B_a(y) + k_d B_d(y) + k_v B_v(y) + k_f B_f(y), \quad (12)$$

где  $B_p, B_v, B_g, B_f, B_d, B_e, B_a$  — пропускная способность для соответствующих видов трафика.

На втором этапе проектирования разрабатывается топологическая структура ТРС  $S_T = f(C, E)$  с учетом заданного при постановке задачи проектирования уровня живучести и соотношения ее стоимости  $C$  и живучести  $E$ . Для этого выполняется анализ размещения имеющихся узлов сети и особенностей прокладки линий связи с учетом возможных ограничений по типу сетевого оборудования и структуры местности, и выбирается оптимальная топология ТРС, имеющая требуемую живучесть при минимально возможной стоимости.

Предлагаемый метод повышения живучести топологии ТРС содержит следующие шаги:

— вычисление числа  $m$  экстремальных деревьев графа сети

$$m = C_{n-1}^k = \frac{(n-1)!}{k!(n-1-k)!}, \quad (13)$$

где  $k$  — количество возможных разрывов линий связи;

$n$  — число вершин графа сети;

— формирование списка ограничений из связей, которые не могут существовать;

- построение экстремального дерева графа сети без использования связей, попавших в список, в предположении, что такие соединения не могут существовать;
- повторение необходимого количества раз второго и третьего шагов;
- получение результирующего графа путем объединения всех полученных экстремальных деревьев графа сети.

На следующем этапе проектирования осуществляется выбор сетевой технологии и типов шлюзов для ТРС, для чего на базе множества матриц трафика  $M = \{M_T, M_R, M_S, M_L\}$  рассчитывается объем входящего  $W_{in}$  и исходящего  $W_{out}$  трафика в ТРС. При  $W_{in} \neq W_{out}$  выбирается шлюз с неоднородной структурой, такой, что  $\exists k, i, j (v_{ki} \neq v_{kj})$ , после чего возможен выбор сетевой технологии с несимметричными скоростями передачи данных, иначе возможен выбор шлюза с однородной структурой  $\forall k, i, j (v_{kj} = v_{ki} = \text{const})$ . При  $W_R > W_S$  необходимо выбирать сетевую технологию, учитывающую требования к времени доставки пакетов (ATM, FDDI, WideBand), или имеющую существенный запас по скорости передачи данных (Gigabit Ethernet, 10 Gigabit Ethernet), иначе возможен выбор сетевой технологии без учета требований ко времени доставки пакетов или технологии со сравнительно низкой (по сравнению с другими) пропускной способностью.

На заключительном этапе выполняется расчет среднего  $T_{trav}$  времени транзакции для шлюзов с однородной и неоднородной структурой.

При однородной  $S_o$  и неоднородной  $S_{но}$  структуре шлюза среднее время транзакции  $T_{trav}$  по ТРС с  $n$  промежуточными шлюзами запишется соответственно в виде

$$\begin{aligned}
 T_{trav} &= \frac{f_{inp}}{B_1 - \lambda f_{inp}} + \frac{f_{inp}}{B_1 / K_{BM} - \lambda_c f_{inp}} + \frac{f_{inp} + f_{add}}{B_1 - \lambda_{serv} (f_{inp} + f_{add})} + \sum_{j=1}^n T_{tr_j} + \\
 &\quad \frac{f_{inp} + f_{add}}{B_2 - \lambda_{serv} (f_{inp} + f_{add})} + \frac{f_{inp}}{B_2 / K_{BM} - \lambda_c f_{inp}} + \frac{f_{inp}}{B_2 - \lambda f_{inp}} \text{ для } S_o; \\
 T_{trav} &= \frac{f_{inp}}{B_1 - \lambda f_{inp}} + \frac{f_{inp}}{B_1 / K_{BM} - \lambda_c f_{inp}} + \frac{f_{inp} + f_{add}}{B_1 / K_{СП} - \lambda_{serv} (f_{inp} + f_{add})} + \sum_{j=1}^n T_{tr_j} + \\
 &\quad \frac{f_{inp} + f_{add}}{B_2 / K_{СП} - \lambda_{serv} (f_{inp} + f_{add})} + \frac{f_{inp}}{B_2 / K_{BM} - \lambda_c f_{inp}} + \frac{f_{inp}}{B_2 - \lambda f_{inp}} \text{ для } S_{но},
 \end{aligned} \tag{14}$$

где  $B_1$  — пропускная способность порта шлюза-отправителя, к которому подключается ЛКС-отправитель;

$B_2$  — пропускная способность порта шлюза-получателя, к которому подключается ЛКС-получатель;

$K_{BM} \approx 0,01$  — коэффициент, определяющий соотношение пропускных способностей входного порта шлюза и его внутренней магистрали;

$K_{СП} \approx 0,1$  — коэффициент, определяющий соотношение пропускных способностей входного порта шлюза и скоростного порта, к которому подключается серверная группа;

$T_{tr_j}$  — время транзакции через  $j$ -й промежуточный шлюз;

$\lambda$  — входной трафик порта шлюза-отправителя;

$\lambda_c$  — суммарный трафик портов шлюза;

$\lambda_{serv}$  — суммарный трафик серверной группы;

$f_{inp}$  — исходный размер обслуживаемого пакета;

$f_{add}$  — размер добавляемых к пакету в шлюзе заголовка и хвостовика.

Число входных и выходных портов шлюза определяется на базе графа сети, построенного в результате выполнения второго этапа проектирования.

Если рассчитанное среднее время транзакции  $T_{trav}$  больше предельно допустимого  $T_{trl}$ , необходимо увеличить пропускную способность входных и выходных портов шлюза, выбрав

ближайшее большее ее значение  $V_i$  среди  $m$  стандартных пропускных способностей портов, отсортированных по возрастанию:  $V = (V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_m)$ . Если  $T_{trav} \leq T_{trl}$ , выполняется окончательный выбор шлюза соответствующей структуры с необходимым числом и типом выходных портов.

Предложенный формальный метод позволяет реализовать комплексное решение ряда задач, возникающих при построении региональных, территориально распределенных и корпоративных компьютерных сетей. Построение топологии сети с заданной живучестью и минимальной стоимостью, расчет времени транзакции между ее узлами и выбор сетевого оборудования позволяют избежать излишних финансовых затрат при построении сети и прогнозировать ее развитие.

Метод апробирован при реализации ряда сетевых проектов и реализован в программном комплексе инструментальных средств.

### Литература

1. Клименко О. DataCom стремительно развивает всеукраинскую сеть передачи данных // Компьютер. обозрение. — 2001. — № 39. — С. 48 — 49.
2. Компания WNet [Электронный ресурс]. — [www.wnet.ua](http://www.wnet.ua). — 30.08.2006 г.

Поступила в редакцию 11 сентября 2006 г.

---