

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПАКТНОЙ КОРПОРАТИВНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

к.т.н. Г.А. Кучук, к.т.н. Н.А. Королёва,
к.т.н. Ю.А. Акимова, к.т.н. Д.П. Пашков
(представил д.т.н., проф. В.А. Краснобаев)

Предложен подход к построению математической модели офисной компактной корпоративной вычислительной сети (ККВС).

Введение. Отдельные офисные компоненты территориально распределенной большой корпоративной вычислительной сети (БКВС) можно рассматривать как компактные корпоративные вычислительные сети, состоящие из локальных вычислительных сетей (ЛВС). При изменении структуры БКВС необходимо предварительное моделирование возможных вариантов структуры как самой БКВС, так и ее офисных компонент для выбора нового оптимального варианта.

Задачи моделирования структуры сетей различных классов существенно различаются по своей сложности. В первую очередь это связано с размерами сетей. Наиболее просто решается задача моделирования структуры *локальной вычислительной сети*. Так как такая сеть имеет небольшое число абонентов, то количество коммуникационных элементов (коммутаторов, концентраторов) не превышает одного-трех устройств, т.е. задача выбора способа подключения абонентов предельно проста и не требует разработки специальных алгоритмов. Задачу моделирования структуры *больших корпоративных вычислительных сетей* можно разбить на две подзадачи. Первая – это моделирование магистральной подсети, включающей в себя используемые глобальные соединения и магистральные каналы связи. Вторая – моделирование абонентских подсетей, которые, как правило, представляют собой ЛВС или *компактные корпоративные вычислительные сети* (иногда применяют другой термин – *кампусные сети* [1]) различной степени сложности. Методы построения моделей структур ЛВС и БКВС подробно рассмотрены во многих источниках [2 – 4], однако область моделирования и оптимизации структуры ККВС изучена плохо, и при проектировании таких сетей используются в основном эмпирические методы. Поэтому создание моделей структур ККВС в настоящее время является **актуальной**

задачей.

ККВС, являющиеся компонентами территориально распределенной БКВС имеют ряд особенностей, отличающих их от сетей других классов:

- **компактность** территориального расположения сети, что позволяет использовать для передачи данных высокоскоростные технологии локальных сетей и не применять для передачи данных внутри сети глобальные соединения;

- **большое количество** (иногда до нескольких тысяч) **узлов** на большой территории, что значительно усложняет проектирование сети;

- **гетерогенность**, т.е. наличие подсетей, основанных на различных сетевых технологиях;

- **коммутаторы** являются основными коммуникационными устройствами ККВС (маршрутизаторы или концентраторы очень редки [5]);

- кабельная система ККВС обычно проектируется в виде **структурированной кабельной системы** (СКС) [6] с древовидной топологией;

- пропускные способности каналов связи ККВС могут принимать определенные дискретные значения, зависящие от используемой сетевой технологии и, обычно, отличающиеся несколькими порядками (например, 10 Мбит/с, 100 Мбит/с, 1 Гбит/с), что не позволяет проводить аппроксимацию пропускной способности при проектировании, на которой основываются многие алгоритмы оптимизации структуры ЛВС и БКВС [7, 8].

Следовательно, задача моделирования структуры ККВС, формализация которой и является **целью данной статьи**, достаточно сложна из-за большого количества абонентов и коммуникационных устройств, общее число которых может достигать нескольких тысяч. Дополнительные трудности возникают при моделировании структур подчиненных гетерогенных ЛВС, так как в этом случае требуется не только определить способы соединения узлов сети, но и выбрать сетевую технологию, с использованием которой подключается абонент. При создании модели сети необходимо учитывать большое число параметров: скорость передачи и стоимость каналов связи, стоимость коммуникационного оборудования, характеристики коммуникационных устройств, требования абонентов сети к пропускным способностям линий связи, требования к надежности сети и к задержке передачи пакетов данных.

1. Критерий оптимизации и структура данных. Важнейшим этапом формализации задачи выбора оптимальной модели является выбор критерия оптимальности системы. Существует три основных подхода к синтезу вычислительных сетей – синтез по критерию времени, по критерию надежности

и по критерию стоимости [9]. Критерий надежности применяется в основном при проектировании специализированных сетей управления. Критерий времени применяется для систем реального времени. При выборе критерия оптимизации офисных и промышленных сетей наиболее часто используют затраты на создание и эксплуатацию сети. Такой подход к оценке оптимальности проектируемой сети предлагается, например, в работах [7, 10]. В данном случае, рассматривая офисную ККВС, в качестве критерия оценки оптимальности модели выберем суммарные затраты на создание сети.

Проектирование ККВС состоит из двух стадий: архитектурной и телекоммуникационной [6]. На *архитектурной* стадии определяются пути прохождения кабельных каналов, размещение технических помещений (кроссовых и аппаратных), рабочих мест пользователей сети. Эти задачи решаются при разработке проекта нового или реконструируемого здания специализированными проектными организациями. На *телекоммуникационной* стадии проектирования определяется структура кабельной системы, перечень и размещение коммуникационных устройств. Поскольку при решении задач архитектурной стадии проектирования офисной ККВС в первую очередь учитываются не требования оптимальности сети, а правила противопожарной и электробезопасности, а также эстетические соображения, то результаты выполнения данной стадии будем рассматривать как исходные данные для формализуемой модели, т.е. оптимизацию структуры ККВС начнем с телекоммуникационной стадии. Таким образом, в исходные данные модели должны быть включены следующие данные:

- размещение рабочих мест пользователей сети;
- возможные места расположения коммуникационных устройств;
- пути прохождения кабельных каналов (они позволят определить стоимость создания связи между каждой парой узлов сети);
- используемые сетевые технологии, определяющие возможный набор пропускных способностей каналов связи (выбор сетевых технологий осуществляется исходя из требований по масштабируемости, надежности, управляемости, совместимости, требований поддержки различных видов трафика);
- описание модельного ряда коммутаторов, доступных для использования при проектировании сети;
- сетевые приложения, которые будут использоваться абонентами (для определения предполагаемой интенсивности обмена данными между абонентами сети).

Требуется найти наименьшую по стоимости структуру сети, пропускные способности каналов связи, число, расположение и модели коммуникационных устройств. При этом должны выполняться заданные ограничения

на показатели эффективности функционирования сети. Структура связей должна иметь древовидную форму с пропускными способностями каналов, удовлетворяющими предположительным запросам пользователей.

С учетом особенностей ККВС и выбранного критерия оптимизации проведем формализацию задачи моделирования сети. При составлении математической модели сети используем подход, предложенный в [10], в соответствии с которым система представляется в виде объекта с входными сигналами, выходными сигналами, управляющими сигналами и системой ограничений. В случае представления ККВС в виде такой математической модели входными будут параметры сети, описанные выше. Выходными параметрами будут показатели надежности, производительности и стоимости сети. Управляющими параметрами, т.е. параметрами, которые мы можем менять при проектировании, влияя при этом на выходные параметры, будут параметры, определяющие структуру сети.

Опишем структуру ККВС неориентированным графом $G = (V, R)$, где V – множество вершин графа, соответствующих узлам сети; R – множество ребер графа, соответствующих каналам связи сети. Множество V состоит из двух непересекающихся подмножеств $V = V_A \cup V_K$, где V_A – множество абонентов сети; V_K – множество коммутационных устройств сети.

2. Входные параметры. Входные параметры сети разделим на три группы:

- 1) параметры, характеризующие узлы сети;
- 2) параметры, характеризующие каналы связи;
- 3) параметры, описывающие используемые модели коммутаторов.

К **первой группе** параметров отнесем следующие:

– **общее число узлов** сети – n ($V = \{v_i, i = \overline{1, n}\}$), причем в число узлов сети входят как абоненты сети, так и все предполагаемые места размещения коммутаторов, т.е. $n = n_A + n_K$, где n_A – число абонентов сети или мощность множества V_A , n_K – число коммутаторов сети или мощность множества V_K ;

– **число различных сетевых устройств** i -го абонента сети с различными сетевыми адресами – m_i (например, если абонент представляет собой ЛВС с m_i ПЭВМ);

– **интенсивность информационных потоков** пакетов данных между узлами сети (практически в офисной сети это потоки между рабочими станциями и серверами ККВС) – $\Lambda = (\lambda_{ij}), i, j = \overline{1, n}$, описанная квадратной симметричной матрицей порядка n , элементы которой пред-

ставляют собой предполагаемую среднюю интенсивность информационного потока в пакетах между узлами v_i и v_j (если между какими-либо двумя абонентами информационный обмен не предполагается, то соответствующий элемент матрицы равен нулю; расчет предполагаемых интенсивностей информационного обмена производится на основе информации о сетевых приложениях, с которыми работают абоненты сети);

– **множество скоростей передачи**, поддерживаемых узлом $v_i \in V_A$ – это подмножество $W_i = \{w_{ij} \in W, j \leq \text{card}(W)\}$ множества W , включающего все допустимые в ККВС скорости передачи (w_{ij} определяются набором сетевых технологий, поддерживаемых i -м абонентом).

– **множество моделей коммутаторов**, разрешенных в данной ККВС – $H = \{h_k, k = \overline{1, \text{card}(H)}\}$.

Во **вторую группу** параметров скорости и стоимости каналов связи:

– **множество возможных скоростей** $W = \{w_j\}$, на которых может вестись передача данных. Скорости выбираются в зависимости от допустимых сетевых технологий (например, если при проектировании сети используется семейство технологий *Ethernet*, то скорости передачи будут составлять 10 Мбит/с, 100 Мбит/с, 1 Гбит/с, а если при проектировании этой же сети используется технология *Token Ring*, то во множество W добавляются скорости 4 Мбит/с, 16 Мбит/с);

– **стоимости создания каналов связи** опишем семейством квадратных матриц $C^{(j)} = (c_i^{(j)}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, \text{card}(W)}$, в котором каждая матрица соответствует определенной скорости передачи (тип канала связи, а, следовательно, и его стоимость, зависит от сетевой технологии, которая использует данный канал связи, т.е. стоимость создания каналов связи должна задаваться для каждой сетевой технологии, используемой при проектировании сети, идентифицируемой скоростью передачи; стоимость канала зависит от длины канала связи, кабельной трассы, по которой проходит канал, категории используемого кабеля, материала, из которого изготовлен кабель и т.п.; если между отдельными элементами сети связь невозможна (например, из-за отсутствия кабельной трассы), то считается, что стоимость связи равна ∞).

И, наконец, каждую k -ю модель коммутатора $h_k \in H, k = \overline{1, \text{card}(H)}$, опишем следующими параметрами, составляющими **третью группу** параметров:

– **стоимость** k -й модели коммутатора – $c_k^{(H)}$;

- *общее количество портов* k -й модели коммутатора – $m_k^{(H)}$;
- *возможность объединения* коммутаторов k -й модели в стек определяется булевой переменной $\zeta_k^{(H)}$, равной 1, если подключение в стек поддерживается и равной нулю при отсутствии поддержки;
- *средняя длина кадра* в битах для k -й модели коммутатора – $\ell_k^{(H)}$;
- *максимальная скорость продвижения кадров* k -й модели – $v_k^{(H)}$;
- *пропускная способность системной шины* k -й модели – $\gamma_k^{(H)}$;
- *число портов* k -й модели, работающих со скоростью w_j – $\pi_{jk}^{(H)}$;
- возможность агрегирования связей характеризуется булевой переменной $\beta_k^{(H)}$, равной 1, если коммутатор поддерживает агрегирование связей и равной нулю при отсутствии поддержки;
- размер адресной таблицы k -й модели коммутатора – $M_k^{(H)}$.

К этой же группе параметров отнесем размер средней длина пакета в сети, который обозначим как $\ell^{(P)}$.

3. Управляющие и выходные параметры. Опишем управляющие параметры, определяющие структуру сети, следующими тремя группами.

Параметры, определяющие *топологию сети*, сосредоточим в квадратной симметричной матрице $X = (x_{ij})$, $i, j = \overline{1, n}$. Элемент матрицы x_{ij} равен числу однотипных каналов связи между соответствующими узлами, при этом необходимо учитывать, что установка нескольких каналов связи между двумя узлами сети допускается только в случае поддержки обоими узлами технологии агрегирования связей.

Пропускные способности каналов связи будем определять с помощью матрицы идентификаторов скоростей передачи каналов связи $Z = (z_{ij})$, $i, j = \overline{1, n}$, элементы которой равны скорости передачи одного канала связи между соответствующими узлами, при этом суммарная скорость, с которой могут передаваться данные между этими узлами, будет составлять $z_{ij}^{(\Sigma)} = x_{ij} \cdot z_{ij}$.

Третья группа параметров связана с варьированием моделями коммутаторов. Здесь каждому элементу множества V_K ставится в соответствие один из элементов множества моделей H :

$$V_K = \left\{ v_k^{(K)}, v_k^{(K)} \in H \right\}.$$

К выходным параметрам сети отнесём суммарные затраты на созда-

ние сети, задержку передачи пакета данных между каждой парой абонентов и показатель надёжности сети.

Выходными параметрами сети будем считать следующие показатели.

Суммарные затраты на создание сети, которые включают в себя затраты на создание телекоммуникационной инфраструктуры и затраты на используемые коммутационные устройства

$$C_{\Sigma} = \sum_{v_k^{(K)} \in V_k^{(K)}} C_{v_k^{(K)}}^{(H)} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n x_{ij} \cdot c_i^{(j)}. \quad (1)$$

Задержка передачи пакета между каждой парой абонентов. Для расчета задержек в коммуникационных сетях широкое распространение получила модель сети массового обслуживания, предложенная в [11]. В соответствии с этой моделью, каналы связи коммуникационной сети интерпретируются как системы массового обслуживания М/М/1. В соответствии с этой моделью средняя задержка пакета в виртуальном канале связи между узлами p и q будет считаться следующим образом:

$$t_{pq}^{(r)} = \left(\frac{z_{pq}^{(\Sigma)}}{1^{(p)}} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij}^{(pq)}(X) \lambda_{ij} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где булева переменная $d_{ij}^{(pq)}$ зависит от топологии сети и принимает значение 1 только в случае, если ребро $r_{ij} \in \pi_{pq}$; $\pi_{pq} \in \Pi$ – путь от вершины v_p до вершины v_q ; Π – множество всех возможных путей на графе $G(V, R)$. Суммарная задержка продвижения пакета в коммутаторах на пути π_{pq} будет равна

$$t_{pq}^{(K)} = \sum_{v_k^{(K)} \in V_k^{(K)}} \left(V_{v_k^{(K)}}^{(H)} \right)^{-1} \cdot f_{v_k^{(K)}}^{(pq)}(X), \quad (3)$$

где булева переменная $f_{v_k^{(K)}}^{(pq)}$ равна 1 тогда и только тогда, когда соответствующий коммутатор входит в состав пути π_{pq} . Тогда из (2) и (3) определяется полная задержка передачи пакета на пути π_{pq} :

$$t_{pq}^{(\Sigma)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-1} d_{ij}^{(pq)} t_{ij}^{(r)} + t_{pq}^{(K)}. \quad (4)$$

В качестве **показателя надёжности** сети будем использовать число сетевых устройств, отключаемых от основной сети при отказе одного канала связи: $m_i^a(V_{ij}^{is})$, V_{ij}^{is} – множество узлов, отсоединяемых от основной сети при отказе канала связи r_{ij} .

4. Формализация модели. Используя описанные входные, выход-

ные и управляющие параметры, сформулируем ограничения модели.

Ограничение на пропускную способность канала связи. Скорость передачи любого из каналов связи в сети должна быть достаточной для передачи суммарного трафика всех путей передачи, в которые входит этот канал связи. Тогда ограничение на скорость передачи канала связи r_{pq} имеет вид

$$Z_{pq} \geq x_{pq}^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij}^{(pq)}(X) \cdot \lambda_{ij} \cdot l^{(p)} \quad (5)$$

и должно выполняться для каждого из каналов связи в сети.

Ограничения на задержку передачи пакета можно представить как

$$t_{pq}^{\Sigma} \leq t_{\max}^{\Sigma}, \quad (6)$$

где t_{\max}^{Σ} – допустимое время задержки передачи пакета.

Ограничения на производительность коммутаторов связаны с максимальной производительностью (в кадрах) коммутатора h_k :

$$V_k^{(H)} \geq \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \lambda_{ij} \cdot f_k^{(ij)}(X). \quad (7)$$

Ограничение на максимальную производительность системной шины коммутатора h_k будет иметь вид

$$\gamma_k^{(H)} \geq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \lambda_{ij} \cdot l^{(p)} \cdot f_k^{ij}(X). \quad (8)$$

Ограничения на общее число портов коммутаторов $m_k^{(H)}$ заключаются в том, что их должно быть не меньше, чем число подключаемых каналов связи, т.е.

$$m_k^{(H)} \geq \sum_{i=1}^n x_{ik}. \quad (9)$$

Введем булеву переменную $\xi_{ij}(W_s)$, равную 1 только тогда, когда канал связи r_{ij} работает на скорости W_s и равную нулю при любой другой скорости. Тогда для каждого значения скорости W_s число портов коммутатора R_k , работающих на этой скорости, не должно превышать максимального значения:

$$\sum_{i=1}^n y_{ip} d'_{ip}(q_j) \leq m_p^c(q_j), \quad j = \overline{1, n_q}; \quad \sum_{i=1}^n x_{ik} \xi_{ik}(W_s) \forall j. \quad (10)$$

Для описания **ограничения на размер адресной таблицы** коммутато-

ров выделим множество $\Pi' \subseteq \Pi$, элементами которого являются пути π'_{ij} передачи ненулевого трафика, т.е. $\pi_{ij} \in \Pi'$, если $\lambda_{ij} \neq 0$. Определим также множество $U = \{u_i^{(k)}\}$, элемент $u_i^{(k)}$ которого равен 1 только в том случае, если i -й абонент использует для передачи данных любому другому абоненту коммутатор h_k . Тогда ограничение на размер адресной таблицы коммутатора k_s запишется в виде

$$\sum_{v_k^{(K)} \in V_k^{(K)}} u_{v_k^{(K)}}^{(k)} \leq M_{v_k^{(K)}}^{(H)}. \quad (11)$$

Ограничения на топологию сети вытекают из требований древовидности сети.

В графе сети не должно быть изолированных вершин:

$$\forall(i, j) \exists \pi_{ij} \in \Pi, \quad \pi_{ij} \neq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \quad (12)$$

В структуре сети не должно быть циклов:

$$\forall(i, j) \exists \text{ только один } \pi_{ij} \in \Pi, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \quad (13)$$

Ограничения надёжности запишем как

$$m_i^a (V_{ij}^{is}) \leq n_{\max}^a, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \quad (14)$$

где n_{\max}^a – максимально допустимое число устройств, отключаемых при единичном обрыве в сети.

Теперь можно перейти к определению целевой функции и к окончательной формулировке математической модели.

Решением задачи оптимизации компактной корпоративной (кампусной) вычислительной сети является граф

$$G^* = \arg \left(\min_{G' \in \Gamma} E(G') \right), \quad (15)$$

где Γ – множество всех возможных структур проектируемой сети, для которых выполняются ограничения (5) – (15); $E(G')$ – функция суммарных затрат на создание сети (1).

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Полученная математическая модель с целевой функцией (15) и ограничениями (5) – (14) позволяет найти структуру компактной корпоративной вычислительной сети, входящей в состав территориально распределенной БКВС, которая учитывает специфику данной сети и с наименьшими затратами удовлетворяет требуемым характеристикам.

Для нахождения оптимального или квазиоптимального решения можно использовать методы дискретного математического программирования. В дальнейшем предполагается при получении выражения для

средней задержки (выражение (2) для офисных ККВС) снять условие пуассоновости, что позволит использовать предложенный подход не только для офисных ККВС, т.е. расширить его область применения для моделирования структуры как группы компонент БКВС так и для всей БКВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы* / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – С.-Пб.: Питер, 1999. – 672 с.
2. *Корнышев Ю.Н., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. Теория телетрафика.* – М.: Радио и связь, 1996. – 272 с.
3. *Королёв А.В., Кучук Г.А., Пашнев А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях.* – Х.: ХВУ, 2003. – 224 с.
4. *Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекомунікаційні мережі.* – К.: Техніка, 2001. – 392 с.
5. *Кульгин М.В. Технологии корпоративных сетей. Энциклопедия.* – С.-Пб.: Питер, 1999. – 704 с.
6. *Семёнов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы. Стандарты, компоненты, проектирование, монтаж и техническая эксплуатация.* – М.: Компьютер Пресс, 1999. – 482 с.
7. *L. Berry, B. Murtagh. Optimization models for communication network design // Proceedings of the Fourth International Meeting Decision Sciences Institute, Sydney, Australia.* – 1997. – P. 218 – 241.
8. *Королёв А.В., Кучук Г.А., Пашнев А.А. Управление сетевыми ресурсами.* – Х.: ХВУ, 2004. – 272 с.
9. *Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ.* – К.: Техніка, 1986. – 168 с.
10. *Янбых Г.Ф., Столяров Б.А. Оптимизация информационно-вычислительных сетей.* – М.: Радио и связь, 1987. – 232 с.
11. *Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями.* – М.: Мир, 1979. – 600 с.

Поступила 23.07.2004

КУЧУК Георгий Анатольевич, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., начальник НИО ИВЦ ХВУ. Окончил мехмат Московского государственного университета в 1977 году. Область научных интересов – обработка информации.

КОРОЛЁВА Наталья Анатольевна, канд. техн. наук, доцент УкрГАЖТ. В 1999 году окончила ХарГАЖТ. Область научных интересов – обработка и передача информации.

ПАШКОВ Дмитрий Павлович, канд. техн. наук, ст. научн. сотр. НАОУ. В 1993 году окончил КВИРТУ, в 2000 году – ХВУ. Область научных интересов – обработка информации.

АКИМОВА Юлия Александровна, канд. техн. наук, доцент ХФ УАБД. В 1996 году окончила мехмат ХГУ. Область научных интересов – оптимизация информационных систем.