

УДК 621.391.266, 517.972.8

А.А. Подорожняк

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БАЗОВОЙ СЕТИ НАВИГАЦИОННО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Предложена формализация задачи оптимального построения структуры базовой сети навигационно-временного обеспечения при ликвидации чрезвычайных ситуаций.

базовая сеть, навигационно-временное обеспечение, чрезвычайная ситуация

Введение

Постановка задачи. Аварийно-спасательные работы (АСР) при ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС), осуществляемые подразделениями гражданской защиты и нацеленные на поиск, спасение и защиту людей, требуют соответствующего информационного обеспечения, одной из необходимых составляющих которого является навигационно-временное обеспечение (НВО), рассматриваемое как один из видов обеспечения при ЧС. В свою очередь, оперативность получения НВО зависит от качества функционирования базовой сети поддержки дифференциальной подсистемы (ДПС), обеспечивающей повышение точности, устойчивости, целостности и

непрерывности навигационно-временных определений на территории ликвидации ЧС [1, 2].

В состав ДПС входят наземная контрольно-корректирующая станция (ККС) и навигационные устройства потребителей. Средства ККС включают аппаратуру потребителей для накопления измерений и фильтрации погрешностей, аппаратуру формирования и передачи дифференциальных корректирующих поправок (ДКП) и сигналов целостности. У пользователей размещается аппаратура потребителя, предусматривающая возможность приема ДКП.

Структура базовой сети (БС), поддерживающей рассмотренную систему, зависит от варианта ее построения. Будем рассматривать систему НВО как иерархическую сетевую структуру, на верхнем

уровне которой находится единый центр контроля и обработки (ЕЦКО), далее – региональные ДПС (РДПС), затем – локальные ДПС (ЛДПС), а на нижнем уровне – средства потребителей. Региональные ДПС могут состоять из одной или нескольких ККС.

Анализ литературы и актуальность задачи.

В соответствии с предложенной структурой системы задачу моделирования структуры базовой сети НВО при ликвидации ЧС (БС НВО ЛЧС) можно разбить на две подзадачи.

Первая – это моделирование подсети обеспечения ЕЦКО и РДПС, включающей в себя используемые глобальные соединения и магистральные каналы связи. Вторая – моделирование кампусных подсетей (КПС) обеспечения ЛДПС [3] различной степени сложности. Методы построения моделей соответствующих сетевых структур подробно рассмотрены во многих источниках [4 – 6], однако область моделирования и оптимизации структуры подсетей БС НВО при ликвидации ЧС, имеющая ряд особенностей (специфика требований к системным транзакциям БС, большое количество узлов КПС на небольшой территории, что значительно усложняет проектирование сети; гетерогенность БС, т.е. наличие подсетей, основанных на различных сетевых технологиях; коммутаторы являются основными коммуникационными устройствами КПС (маршрутизаторы или концентраторы очень редки [7]; пропускные способности каналов связи КПС могут принимать определенные дискретные значения, зависящие от используемой сетевой технологии и, обычно, отличающиеся несколькими порядками, что не позволяет проводить аппроксимацию пропускной способности при проектировании, на которой основываются многие алгоритмы оптимизации сетевых структур [8, 9]) изучена плохо, и при проектировании таких сетей используются в основном эмпирические методы. Поэтому создание модели структуры БС НВО ЛЧС в настоящее время является **актуальной задачей**. 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 к пропускным способностям линий связи, требования к надежности сети и к задержке передачи пакетов данных.

Целью данной статьи является формализация задачи оптимального построения структуры базовой сети навигационно-временного обеспечения при ликвидации чрезвычайных ситуаций, учитывающей как особенности подсети обеспечения ЕЦКО и РДПС и КПС обеспечения ЛДПС, так и вышеперечисленные требования.

Результаты исследований

Опишем структуру БС НВО ЛЧС 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.

1. Входные параметры БС НВО ЛЧС. Входные параметры 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:

– **общее число узлов** сети (абонентов и коммутаторов) – n ($V = \{v_i, i = \overline{1, n}\}$), причем в число узлов сети входят как потребители сети, так и все сетевые устройства ДПС, т.е. $n = n_A + n_K$, где n_A – число потребителей или мощность множества V_A , n_K – число сетевых устройств ДПС или мощность множества V_K ;

– **число различных сетевых устройств** i -го абонента сети с различными сетевыми адресами – m_i ;

– **интенсивность информационных потоков** пакетов данных между узлами сети, описанная квадратной симметричной матрицей порядка n $\Lambda = (\lambda_{ij}), i, j = \overline{1, n}$, элементы которой представляют 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);

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

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

Ко второй группе параметров, характеризующих каналы связи БС отнесем:

– **множество возможных скоростей**, на которых может вестись передача данных в БС НВО – $W = \{w_j\}$; Скорости выбираются в зависимости от допустимых сетевых технологий;

– **стоимости создания каналов связи** опишем следующим семейством квадратных матриц: $C^{(i)} = (c_i^{(ij)}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, \text{card}(W)}$, в котором каждая матрица соответствует определенной скорости передачи.

К третьей группе параметров отнесем параметры, описывающие каждую k-ую модель коммутатора $h_k \in H, k = \overline{1, \text{card}(H)}$:

- стоимость k-й модели коммутатора – $c_k^{(H)}$;
- общее количество портов – $m_k^{(H)}$;
- 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 – $\ell_k^{(H)}$;
- максимальная скорость продвижения кадров k-й модели – $v_k^{(H)}$;
- пропускная способность системной шины k-й модели – $\gamma_k^{(H)}$;
- число портов, 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 – $M_k^{(H)}$.

К этой же группе параметров отнесем размер средней длины пакета в сети – $\ell^{(P)}$.

2. Управляющие параметры БС НВО ЛЧС.

Опишем управляющие параметры, определяющие структуру БС, 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, равна $z_{ij}^{(\Sigma)} = x_{ij} \cdot z_{ij}$.

Третья группа параметров связана с **варьированием моделями коммутаторов**. Здесь каждому элементу множества V_K ставится в соответствие один из элементов H (множества моделей) $V_K = \{v_k^{(K)}, v_k^{(K)} \in H\}$.

3. Выходные параметры БС НВО ЛЧС. Выходными параметрами сети будем считать нижеперечисленные 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 [10], в соответствии с которой каналы связи коммуникационной сети интерпретируются как системы массового обслуживания M/M/1, т.е. средняя задержка пакета в виртуальном канале связи между узлами p и q равна

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

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} , т.е. полная задержка передачи пакета на пути π_{pq} равна

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

В качестве **показателя надёжности** БС НВО 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 структуры БС НВО ЛЧС. Используя описанные входные, управляющие и выходные параметры, сформулируем следующие 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:

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

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 g_{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:

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

Для описания **ограничения на размер адресной таблицы** коммутаторов выделим множество $P' \subseteq P$, элементами которого являются пути π'_{ij} передачи ненулевого трафика, т.е. $\pi_{ij} \in P'$, 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 БС НОВ ЛЧС.

В графе сети не должно быть изолированных вершин, т.е.

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

В структуре сети не должно быть циклов:

$$\forall (i, j) \exists \text{ только один } \pi_{ij} \in P, \quad i \neq j. \quad (13)$$

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.

Тогда с учетом вышеприведенных ограничений решением задачи оптимизации БС НВО ЛЧС является граф

$$G^* = \arg \left(\min_{p, q \in V(\Gamma)} t_{pq}^{\Sigma} \right). \quad (15)$$

где Γ – множество всех возможных структур проектируемой сети, для которых выполняются ограничения (5) – (15).

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Полученная математическая модель с целевой функцией (15) и ограничениями (5) – (14) позволяет найти структуру базовой сети навигационно-временного обеспечения при ликвидации чрезвычайных ситуаций, которая учитывает специфику данной системы и с наименьшими задержками транзакций удовлетворяет требуемым характеристикам.

Для нахождения оптимального или квазиоптимального решения можно использовать методы дискретного математического программирования. В дальнейшем предполагается при получении выражения для средней задержки снять условие пуассоновости, что позволит расширить область применения предложенного в статье подхода.

Список литературы

1. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 267 с.
2. Кашиаев И.А., Подорожная А.А. Оптимизация структуры дифференциальной подсистемы навигационно-временного обеспечения с помощью генетических алгоритмов // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ, 2002. – Вып. 2(18). – С. 248-251.
3. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – С.-Пб.: Питер, 1999. – 672 с.
4. Корнышев Ю.Н., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. Теория телетрафика. – М.: Радио и связь, 1996. – 272 с.
5. Королёв А.В., Кучук Г.А., Пашиев А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях. – Х.: ХВУ, 2003. – 224 с.
6. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекоммунікаційні мережі. – К.: Техніка, 2001. – 392 с.
7. Кульгин М.В. Технологии корпоративных сетей. Энциклопедия. – С.-Пб.: Питер, 1999. – 704 с.
8. 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.

9. L. Berry, B. Murtagh. *Optimization models for communication network design // Proc. of the 4 Int.Meeting Decision Sciences Institute, Sydney, Australia. – 1997. – P. 218 – 241.*

10. Королёв А.В., Кучук Г.А., Пашинев А.А. *Управление сетевыми ресурсами. – Х.: ХВУ, 2004. – 272 с.*

Поступила в редколлегию 16.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Центральный научно-исследовательский институт навигации и управления, Киев.