УДК 621.391.3

Лемешко А.В., д.т.н., проф., Харьковский нац. унив-т радиоэлектроники
Евсеева О.Ю., к.т.н., с.н.с., Харьковский нац. унив-т радиоэлектроники
Симоненко Д.В., Харьковский нац. унив-т радиоэлектроники

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ЦЕЛЕВОЙ КООРДИНАЦИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМИ РЕСУРСАМИ В ТЕРРИТОРИАЛЬНО- РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В статье предложен модифицированный метод координации решения задач управления сетевыми ресурсами в территориально-распределенных телекоммуникационных системах (ТКС). Модификация метода состоит в применении процедуры оценки устойчивости функционирования ТКС, основанной на использовании стохастических функций Ляпунова. Реализация метода позволит обеспечить более высокие показатели масштабируемости решений по управлению сетевыми ресурсами.

У статті запропоновано модифікований метод координації розв'язання задач управління мережними ресурсами в територіально-розподілених телекомунікаційних системах (ТКС). Модифікація методу полягає в застосуванні процедури оцінки стійкості функціонування ТКС, заснованої на використанні стохастичних функцій Ляпунова. Реалізація методу дозволить забезпечити більш високі показники масштабованості рішень щодо управління мережними ресурсами.

The modified method of coordination in solving of the problem network resources control in the geographically distributed telecommunication system (TS) is offered. Modification consists in using of the procedure of TS functioning stability estimating. This procedure is based on the using of the Lyapunov's stochastic functions. The implementation of the offered method allows to heighten of control decisions scalability.

Обеспечение качества обслуживания в современных и перспективных телекоммуникационных системах (ТКС) неразрывно связано с эффективным решением задач по управлению доступным и вновь вводимым сетевым (буферным, канальным, процессорным и информационным) ресурсом, к которым, прежде всего, относят буферную емкость и производительность (процессорное время) сетевых узлов, пропускную способность трактов передачи, а также информационный трафик, принятый к обслуживанию. Решение данного класса задач в рамках существующих сетевых технологий

возложено на соответствующие механизмы управления очередями и распределения пропускной способности трактов передачи, протоколы маршрутизации, сигнализации и резервирования ресурсов.

Однако все чаще при технологической реализации функций управления сетевыми ресурсами в территориально-распределенных ТКС приходится сталкиваться с проблемой повышения масштабируемости управленческих решений. Под масштабируемостью, в данном случае, понимается способность технологий, протоколов или механизмом управления выполнять возложенные на них функции (сохранять заданную эффективность своей работы) в условиях роста размерности ТКС (числа узлов и трактов передачи), увеличения количества трафиков пользователей и расширения перечня показателей качества их обслуживания. Например, низкая масштабируемость протокола резервирования сетевых ресурсов RRSP (Resource ReServation Protocol) существенно ограничивает область его использования в современных транспортных сетях [1], а для существующих протоколов маршрутизации явно или неявно установлен верхний предел числа узлов в поддерживаемых их ТКС: для протокола RIP (Routing Information Protocol) – 16 узлов, а для протокола OSPF (Open Shortest Path First) – 30÷50 узлов [2].

Попытки повышения масштабируемости средств управления и маршрутизации на технологическом уровне, как правило, сопровождается усложнением их практической реализации, поэтому одним из основных направлений решения поставленной проблемы следует считать пересмотр математических моделей и методов, положенных в основу того или иного управляющего протокола или механизма. С теоретической точки зрения для повышения оперативности и устойчивости управления сложными (большими) системами необходимо использовать преимущества иерархических решений, основанных на декомпозиции исходной задачи на ряд задач меньшей размерности с их последующим решением и многоуровневой координацией [3, 4].

Анализ известных технологических решений и постановка научной задачи

На практике первые шаги в направлении реализации иерархических схем уже сделаны и связаны со структурно-функциональной декомпозицией территориально-распределенной ТКС на ряд подсетей, которые в IP-технологии именуется автономными системами (Autonomous Systems, AS), а в технологии ATM – кластерами. В первом случае в рамках одной AS маршрутизация организована с использованием протоколов внутреннего шлюза IGP (Interior Gateway Protocols), а между AS – с помощью протоколов внешнего шлюза EGP/BGP (Exterior/Border Gateway Protocols). В технологии ATM маршрутизация осуществляется с использованием протокола иерархической маршрутизации PNNI (Private Network – to – Network Interface) [2]. Несмотря на довольно четкое распределение функций маршрутизации внутри и между подсетями, координация полученных в них решений на практике не производится, уровень взаимодействия протоколов внутреннего (IGP) и внешнего шлюза (EGP) достаточно низкий, что, в конечном итоге, существенно влияет на показатели качества обслуживания и снижает производительность телекоммуникационной системы в целом.

Причина сложившейся ситуации состоит в том, что положенные в основу современных протоколов маршрутизации графовые модели и комбинаторные алгоритмы расчета кратчайшего пути (RIP, IGRP – алгоритм Беллмана-Форда; OSPF, PNNI – алгоритм Дейкстры), не ориентированы на решение задач координации. В этой связи актуальной представляется задача обоснованного выбора и, при необходимости, разработки новых математических моделей и методов управления сетевыми ресурсами, которые бы кроме традиционных требований, касающихся учета динамичности и стохастичности протекающих в ТКС процессов информационного обмена [5], также ориентировали на реализацию иерархическо-координационной стратегии управления.

Математическая модель иерархическо-координационного управления ресурсами

В общем случае структура ТКС может быть представлена в виде графа $\Gamma(V, D)$, множество вершин которого составляют сетевые узлы-маршрутизаторы $(V_j, j = \overline{1, N})$, N – число узлов в ТКС; а множество дуг $(D_{i,j}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j)$ моделирует тракты передачи между маршрутизаторами. В соответствии с иерархическим представлением ТКС в виде совокупности взаимодействующих подсетей (автономных систем, кластеров), представим каждую из них в виде подграфа $\Gamma_q(V^q, D^q)$ графа $\Gamma(V, D)$, в котором V^q и N_q – соответственно подмножество маршрутизаторов и их общее число в q -й подсети ТКС; D^q – множество трактов передачи ТКС, принадлежащих q -й подсети. Пусть общее число подсетей равно Q . Условимся, что подмножества V^q не пересекаются, а различные подмножества D^q ($q = \overline{1, Q}$) могут иметь общие элементы.

С функциональной точки зрения в соответствии с вышеперечисленными требованиями заслуживает внимания математическая модель маршрутизации и распределения канальных и буферных ресурсов, развивающая модель [6] и представленная системой разностных стохастических уравнений состояния ТКС

$$\begin{aligned}
 x_{i(q),j(g)}(k+1) = & x_{i(q),j(g)}(k) - \sum_{\substack{V_l \in V^q \\ l \neq i(q)}}^{N_q} b_{i(q),l}(k) u_{i(q),l}^{j(g)}(k) + \sum_{\substack{V_l \in V^q \\ m \neq i(q),j(g)}}^{N_q} b_{m,i(q)}(k) u_{m,i(q)}^{j(g)}(k) + \\
 & + \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq q}}^Q \left[\sum_{\substack{V_n \in V^p \\ n \neq j(g)}}^{N_p} b_{n,i(q)}(k) u_{n,i(q)}^{j(g)}(k) - \sum_{V_r \in V^p} b_{i(q),r}(k) u_{i(q),r}^{j(g)}(k) \right] + y_{i(q),j(g)}(k), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $b_{m,i(q)}(k) = c_{m,i(q)}(k) \Delta t$; $c_{i(q),j(p)}(k)$ – скорость передачи данных от узла V_i^q к узлу V_j^p в момент времени t_k ; $x_{i(q),j(g)}(k)$ – объем данных, находящихся на узле V_i^q и предназначенных для передачи узлу V_j^g в момент времени t_k ; $u_{i(q),l(g)}^{j(p)}(k)$ – доля пропускной способности тракта передачи $D_{i(q),l(g)}$, выделенная информационному потоку с адресом V_j^p в момент времени t_k и трактуемая в дальнейшем как управляющая переменная; $y_{i(q),j(g)}(k) = \xi_{i(q),j(g)}(k) \Delta t$, $\xi_{i(q),j(g)}(k)$ – интенсивность поступления данных от абонентов ТКС на узел V_i^q в момент времени t_k с адресатом узла V_j^g ; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – период перерасчета управляющих переменных.

Характерной особенностью данной модели является то, что именно численные значения управляющих переменных $u_{i(q),l(g)}^{j(p)}(k)$ обуславливают конечный результат решения задач маршрутизации, распределения канального ресурса, а также непосредственно определяют порядок решения задач управления очередями (1).

В общем случае процесс мониторинга состояния ТКС носит стохастический характер, т.к. происходит в условиях запаздывания и наличия шумов измерения, т.е. с математической точки зрения уместно ввести уравнения наблюдения переменных состояния

$$z_{i(q),j(g)}(k) = x_{i(q),j(g)}(k) + \omega_{i(q),j(g)}(k), \quad (2)$$

где $\omega(k)$ – гауссовский шум измерения переменных состояния (загруженности буфера очереди).

Система скалярных разностных уравнений динамики информационного обмена между отдельными узлами q -й подсети ($q = \overline{1, Q}$) ТКС (1) может быть представлена в векторно-матричной форме, характеризующей динамику информационного обмена в рамках данной подсети

$$X_q(k+1) = X_q(k) + B'_q(k)U'_q(k) + B''_q(k)U''_q(k) + Y_q(k) \quad (q = \overline{1, Q}), \quad (3)$$

где $X_q(k)$ – вектор состояния q -й подсети который объединяет переменные $x_{i,j}(k)$ такие, что $V_i \in V^q$, $V_j \in V$ и имеет размерность $N_q(N-1)$; $U'_q(k)$ – вектор управления ресурсами q -й подсети, объединяющий переменные $u_{i,l}^j(k)$ такие, что $V_i, V_l \in V^q$, $V_j \in V$, $i \neq l, j$; $U''_q(k)$ – вектор управления взаимодействием q -й подсети с другими подсетями, объединяющий переменные $u_{i,l}^j(k)$ такие, что $V_i \in V^q$, $V_l \in V^g$ или $V_l \in V^q$, $V_i \in V^g$, $q \neq g$, $V_j \in V$; матрицы $B'_q(k)$ и $B''_q(k)$ формируются на основе величин $\pm b(k)$ из уравнения (1); $Y_q(k)$ – вектор абонентской нагрузки на узлы q -й подсети.

Система уравнений (3) может быть далее обобщена и представлена в виде

$$X(k+1) = X(k) + B(k)U(k) + Y(k), \quad (4)$$

где матрица $B = \text{blocdiag} [B'_1, B''_1, \dots, B'_q, B''_q, \dots, B'_Q, B''_Q]$ имеет блочно-диагональную структуру, а векторы состояния и управления представляются в виде

$$X(k) = \begin{bmatrix} X_1(k) \\ \cdot \\ X_q(k) \\ \cdot \\ X_Q(k) \end{bmatrix}; \quad U(k) = \begin{bmatrix} U_1(k) \\ \cdot \\ U_q(k) \\ \cdot \\ U_Q(k) \end{bmatrix}; \quad U_q(k) = \begin{bmatrix} U'_q(k) \\ U''_q(k) \end{bmatrix}.$$

По аналогии с выражением (4) в векторно-матричной форме может быть представлено и уравнение наблюдения (2)

$$Z(k) = X(k) + \Omega(k), \quad (5)$$

С целью предотвращения перегрузки сетевых элементов (узлов и трактов передачи) на переменные состояния и управления накладываются ограничения вида [6]

$$0 \leq x_{i(q),j(g)}(k) \leq x_{i(q),j(g)}^{\max}, \quad (6)$$

$$0 \leq u_{i(q),l}^{j(g)}(k), \quad \sum_{j=1}^N u_{i(q),l}^j(k) \leq 1, \quad (7)$$

где $x_{i(q),j(g)}^{\max}$ – емкость буфера очередей на узле V_i^q для потоков с адресатом V_j^g .

Исходя из условия идентичности управления общими (совместными) канальными ресурсами в различных подсетях, на вектор управления взаимодействием подсетей накладываются ограничения вида [7]

$$U_q''(k) = \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_p''(k), \quad (8)$$

где F_{qp} – матрица, определяющая взаимосвязь между векторами управления взаимодействием q -й и p -й подсетей, элементы которой выбираются из условия равенства соответствующих компонент векторов $U_q''(k)$ и $U_p''(k)$.

Для последующей разработки метода иерархическо-координационного управления сетевыми ресурсами необходимо определиться с критерием оптимальности получаемых решений. В рамках рассмотренной выше функциональной модели (1)-(8) с учетом стохастической природы интенсивности трафика $\xi(k)$ в качестве критерия выберем минимум среднеквадратичного целевого функционала вида

$$J = M \left\{ \sum_{q=1}^Q J_q \right\}, \quad (9)$$

$$J_q = M \left\{ \sum_{k=0}^{a-1} \sum_{k=0}^{a-1} \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) \right\} | Z(k) \right\}, \quad (10)$$

где параметр a характеризует интервал оптимизации T ($T = (a-1)\Delta t$), который можно трактовать как период прогнозирования процессов маршрутизации и управления канальным, буферным ресурсом; W_q^x – диагональная неотрицательно определенная весовая матрица, определяемая приоритетностью очередей на узлах q -й подсети; W_q' и W_q'' – диагональные неотрицательно определенные весовые матрицы, определяемые важностью отдельных трактов передачи q -й подсети и между подсетями соответственно.

Решение вариационной задачи стохастической оптимизации, связанной с минимизацией функционала (10) при наличии ограничений (4)-(8), достаточно затруднительно ввиду необходимости поиска оптимума с одновременным усреднением полученных решений. Однако квадратичный характер критерия (10), линейность моделей динамики состояния (4) и наблюдения (5) при гауссовских шумах $\xi(k)$ и $\omega(k)$ позволяют применить теорему о разделении [5]. Результатом данной теоремы является сведение решения выше сформулированной задачи стохастической оптимизации к последовательному решению менее сложных задач: стохастического оценивания состояния и оптимального детерминированного управления.

Решение задачи стохастического оценивания связано с получением оценки вектора состояния $\hat{X}(k)$ с использованием фильтра Калмана-Бьюси и его различных модификаций в зависимости от характера формализованной в модели (1)-(8) неопределенности того или иного сетевого параметра или характеристики трафика [5]. В данной работе основное внимание будет уделено особенностям решения второй задачи – задачи детерминированного оптимального управления, связанной с расчетом по известным оценкам вектора состояния $\hat{X}(k)$ вектора управляющих воздействий $U(k)$ и для решения которой ранее было предложено ряд методов.

Обзор методов иерархическо-координационного оптимального управления

Таким образом, решение задачи оптимального управления сетевыми ресурсами состоит в минимизации детерминированного аналога функционала (9)-(10)

$$J = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=0}^{a-1} \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) \right\}, \quad (11)$$

при наличии ограничений (4)-(8), в которых под вектором состояния ТКС будет пониматься его оценка $\hat{X}(k)$, а вектор $Y(k)$ будет сформирован не с текущих (мгновенных), а со средних значений интенсивностей абонентской нагрузки.

С целью реализации иерархическо-координационной стратегии управления сетевыми ресурсами данная задача должна получить многоуровневую трактовку с последующим применением для ее решения декомпозиционных методов [3, 7, 8].

В общем случае для учета ограничения на взаимодействие подсетей (8) введем в рассмотрение лагранжиан

$$L(k) = \sum_{q=1}^Q \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + \Lambda_q^T(k) \left[U_q''(k) - \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_p''(k) \right] \right\}, \quad (12)$$

где $\Lambda_q(k)$ – векторы множителей Лагранжа ($q = \overline{1, Q}$).

Учитывая, что

$$\sum_{q=1}^Q \Lambda_q^T \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_q''(k) = \sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^Q \Lambda_p^T F_{pq} U_q''(k),$$

лагранжиан (12) модифицируется к виду

$$L(k) = \sum_{q=1}^Q \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + U_q''^T(k) \left[\Lambda_q(k) - \sum_{p=1}^Q \Lambda_p^T(k) F_{qp} \right] \right\}, \quad (13)$$

В данном случае составляющие лагранжиана (13) имеют вид

$$L_q(k) = X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + U_q''^T(k) \left[\Lambda_q(k) - \sum_{p=1}^Q \Lambda_p^T(k) F_{qp} \right], \quad (14)$$

а также выполняется равенство

$$L(k) = \sum_{q=1}^Q L_q(k).$$

Отметим, что каждая из составляющих $L_q(k)$ является функцией векторов состояния, управления, взаимодействия подсетей и векторов множителей Лагранжа, которые относятся

только к q -й подсети. Таким образом, в соответствии с проведенными преобразованиями задача оптимального управления сетевыми ресурсами в ТКС в целом оказалась декомпозированной на Q подзадач, каждая из которых может решаться независимо одна от другой. Решение оптимизационных задач (14) обуславливает нижний (декомпозиционный) уровень решения оптимизационной задачи (11). А вот в зависимости от содержания задач верхнего уровня различают методы целевой координации, прогнозирования и оценки взаимодействий, а также их всевозможные модификаций.

В методе целевой координации на верхнем (координирующем) уровне осуществляется лишь определение оптимальных значений $\Lambda_q(k)$ с использованием градиентных процедур [4], при которых достигается минимум функционала (11), а достаточно трудоемкий расчет векторов $U'_q(k)$ и $U''_q(k)$ осуществляется на нижнем уровне в ходе минимизации выражения (14).

В методе прогнозирования взаимодействий в качестве координирующих переменных уже выступают векторы $\Lambda_q(k)$ и $U''_q(k)$, что несколько усложняет работу верхнего уровня координации, но разгружает нижний уровень, т.к. минимизация (14) осуществляется лишь по переменным $U'_q(k)$. Метод прогнозирования взаимодействий обладает значительными преимуществами только в случае возможности аналитического решения задачи верхнего уровня по расчету $\Lambda_q(k)$ и $U''_q(k)$ при фиксированных значениях векторной переменной $U'_q(k)$, рассчитанной на нижнем уровне управления. Однако наличие ограничений на переменные состояния (6) и управления (7) практически исключает получение аналитического решения задачи верхнего уровня.

В методе оценки взаимодействий в отличие от метода прогнозирования взаимодействий на верхнем уровне осуществляется лишь определение границ для варьирования численных значений вектора $U''_q(k)$ в ходе решения оптимизационной задачи на нижнем иерархическом уровне (14) по переменным $U'_q(k)$ и $U''_q(k)$.

К общим недостаткам перечисленных методов относится сложность решения задач нижнего уровня по минимизации выражений (14) при ограничениях (6) и (7) с использованием классических методов оптимального управления – метода Эйлера-Лагранжа, принципа максимума Понтрягина, метода динамического программирования Беллмана, параметрических методов. Вследствие возникающих вычислительных проблем при решении оптимизационных задач нижнего уровня применение вышеизложенных иерархическо-координационных методов без их модификации для решения общей оптимизационной задачи по минимизации (14) не представляется возможным. Преодоление указанной трудности обеспечивается модификацией метода целевой координации [4, 7], суть которой состоит в возможности решения задачи нижнего уровня путем введения дополнительного уровня управления. Это позволит свести исходную задачу оптимизации функциональной в задачу параметрической оптимизации, что значительно упростит нахождение вектора $U'_q(k)$ за счет возможности организации параллельных вычислений при решении поставленной задачи.

Кроме того, применение в «чистом» виде любого из перечисленных методов приводит к выполнению координации периодически, т.е. при каждом пересчете управляющих переменных (например, маршрутных таблиц), что на практике сопряжено с достаточно высокой инерционностью в принятии решений и ростом объемов создаваемого служебного трафика – данных о состоянии подсетей и координирующей информации. В этой связи предлагается осуществить еще одну модификацию метода целевой координации, предполагающую переход к аperiodической координации решений, полученных в подсетях ТКС.

Периодическая координация является тем эффективнее, чем выше взаимозависимость оптимизируемых подсистем. Можно предположить, что в территориально-распределенных ТКС, в которых связность маршрутизаторов внутри подсетей значительно выше связности маршрутизаторов различных подсетей, общая эффективность системы в большей степени будет определяться качеством организации управления по подсетям и в меньшей – ее координацией верхним уровнем управления. Это обусловлено тем, что координация происходит главным образом путем изменения порядка использования пропускных способностей трактов передачи между подсетями ТКС. Если управление ресурсами подсетей обеспечивает информационные потребности абонентов, то тракты передачи между подсетями используются преимущественно для обмена данными между абонентами различных подсетей. В этом случае ввиду низкой связности маршрутизаторов различных подсетей порядок использования трактов передачи между ними со временем изменяться практически не будет.

Апериодическая координация может быть вызвана перегрузкой одной или группы подсетей, что обусловлено неудовлетворительным уровнем осуществляемого в них управления сетевыми ресурсами. Причиной тому могут послужить, например, нарушение структуры подсети или существенное изменение интенсивностей абонентских потоков, что, в свою очередь, может быть вызвано изменением порядка подключения абонентов или изменением структуры сетей доступа. Апериодичность координации в данном случае обусловлена случайным характером перечисленных факторов и подразумевает переориентирование порядка использования межсетевых ресурсов ТКС преимущественно в интересах "нуждающихся" подсетей. Это возможно за счет перерасчета векторных переменных $U_q''(k)$, определяющих порядок использования трактов передачи между подсетями ТКС.

Модифицированный метод целевой координации

В соответствии с предлагаемым подходом исходная задача минимизации выражения (11), как и ранее, заменяется двойственной (12), выделяя верхний и нижний уровни управления. Модификация метода целевой координации заключается в том, что для заданной траектории $\Lambda^*(k)$ ($k = \overline{1, a-1}$) задачу нижнего уровня, которая состоит в минимизации $L_q(k)$ (14) в соответствии с ограничениями (6), (7) и (3), можно также рассматривать как двойственную и декомпозируемую. Это возможно, если учесть, что лагранжиан (13) сам может быть декомпозирован по индексу k . Для этого определим двойственную задачу минимизации $L_q(k)$ в выражении (14) в соответствии с уравнением (3) как задачу максимизации по $R_q(k)$ функции $P_q(R)$, где

$$P_q(R) = \min_{X, U', U''} \sum_{k=0}^{a-1} \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + R_q^T \left(-X_q(k+1) + X_q(k) + B_q'(k) U_q'(k) + B_q''(k) U_q''(k) + Y_q(k) \right) + U_q^T(k) \left[\Lambda_q(k) - \sum_{p=1}^Q \Lambda_p^T(k) F_{qp} \right] \right\}, (15)$$

Для численного решения задачи необходимо найти значение функции $P_q(R)$ для заданных величин $R = R^*$ и затем максимизировать $P_q(R)$, используя градиентную процедуру

$$R_q^{m+1}(k) = R_q^m(k) - \alpha_R \cdot \text{grad}(P_q(k)), \quad (16)$$

где α_R – рабочий шаг градиентной процедуры (16), а градиент функции $P_q(R)$ определяется выражением

$$\text{grad}(P_q(k)) = -X_q^*(k+1) + X_q^*(k) + B_q'(k)U_q'^*(k) + B_q''(k)U_q''^*(k) + Y_q(k), \quad (17)$$

где X_q^* , $U_q'^*$, $U_q''^*$ – решения, получаемые после минимизации $L_q(k)$ в соответствии с ограничениями (6), (7) и (3) для заданных значений $R = R^*$, $\Lambda(k) = \Lambda^*(k)$. Вычисление $P_q(R)$ для заданных $R = R^*$, $\Lambda(k) = \Lambda^*(k)$ может быть выполнено посредством минимизации функции независимо для каждого момента времени, определяемого индексом k . Для этого определим гамильтониан q -й подсистемы в виде

$$H_q(k) = X_q^T(k)W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k)W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k)W_q'' U_q''(k) + \\ + R_q^T \left(X_q(k) + B_q'(k)U_q'(k) + B_q''(k)U_q''(k) + Y_q(k) \right) + U_q''^T(k) \left[\Lambda_q(k) - \sum_{p=1}^Q \Lambda_p^T(k) F_{qp} \right]. \quad (18)$$

Тогда с учетом выражения (18) уравнение (15) принимает вид

$$P_q(R) = \min_{X, U', U''} \sum_{k=0}^{a-1} \left\{ H_q(k) - R_q^{*T}(k-1) X_q(k) \right\} = \sum_{k=0}^{a-1} P_q^k(R), \quad (19)$$

где $R_q(-1)$ полагается равным нулю, а

$$P_q^k(R) = \min_{X, U', U''} \left[H_q(k) - R_q^{*T}(k-1) X_q(k) \right] \quad (q = \overline{1, Q}, k = \overline{1, a-1}). \quad (20)$$

Минимизация выражений $P_q^k(R)$ ($k = \overline{1, a-1}$) (20) может быть осуществлена независимо друг от друга. Данная особенность позволяет значительно сократить временные и вычислительные затраты на решение поставленной задачи путем организации параллельного вычисления искомых векторов $U_q'(k)$ и $U_q''(k)$ для различных значений k . По своей сути задача минимизации функции $P_q^k(R)$ с ограничениями на переменные состояния (6) и управления (7) является параметрической задачей оптимизации. Для решения подобного класса задач разработан широкий спектр методов нелинейного программирования.

После нахождения оптимальных значений векторов $U_q'(k)$ и $U_q''(k)$ путем минимизации выражения (14) значение вектора множителей Лагранжа $\Lambda(k)$ модифицируется на верхнем уровне при использовании процедуры градиентного типа

$$\Lambda_q^{l+1}(k) = \Lambda_q^l(k) - \alpha_\Lambda \cdot \text{grad}(L(\Lambda)), \quad (21)$$

где α_Λ – рабочий шаг градиентной процедуры (21), а сам градиент рассчитывается согласно выражению

$$\text{grad}(L(\Lambda)) = \left[U_q''(k) - \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_p''(k) \right] \quad (q = \overline{1, Q}; k = \overline{1, a-1}). \quad (22)$$

Общий оптимум выражения (11) достигается, когда оба градиента (17) и (22) приблизятся к нулю.

Как было выше отмечено, координацию второго уровня (21)-(22) целесообразно проводить аperiodически, например, в случае перегрузки отдельных подсетей ТКС. В связи особую важность приобретает задача своевременного определения тенденции подсети к перегрузке. Стоит отметить, что формально склонность подсети к перегрузке можно охарактеризовать как потерю последней устойчивости своего функционирования. По этой причине необходимо дополнить синтезируемый метод процедурой оценки устойчивости функционирования подсетей.

Процедура оценки устойчивости функционирования подсетей ТКС

В качестве метода оценки устойчивости процесса функционирования подсетей ТКС целесообразным является применение второго метода Ляпунова, расширенного для класса стохастических систем [9, 10], путем введения стохастических функций Ляпунова. Для решения поставленной задачи в качестве векторной стохастической функции Ляпунова $E_q(k)$ определим квадратичную форму вектора состояния подсети $X_q(k)$, т.е.

$$E_q(k) = X_q^T(k)G_qX_q(k), \quad (23)$$

где G_q – симметричная положительно определенная матрица.

Важным вопросом при оценке устойчивости функционирования отдельных подсетей является определение критерия устойчивости. Его выбор зависит от специфики как непосредственно процесса функционирования подсетей, так и от организованного в них управления сетевыми ресурсами. Анализ возможных критериев устойчивости позволяет выбрать в качестве искомого критерий асимптотической устойчивости в целом по вероятности процесса функционирования подсети [10]. Данный критерий учитывает стохастический характер функционирования подсетей, а его выполнение гарантирует убывание во времени общего количества пакетов в подсетях. Это полностью отвечает смыслу решаемой задачи по оценке устойчивости, т.к. именно постоянный рост количества пакетов на маршрутизаторах является основным признаком перегрузки ТКС.

Асимптотическая устойчивость процесса функционирования q -й подсети, управление в которой организовано в рамках вычислительной процедуры (15)-(20), достигается выполнением следующего условия:

$$M [E_q(k+1) - E_q(k)] < S(|X_q|), \quad (24)$$

где $S(c)$ – скалярная неубывающая функция такая, что $S(c) > 0$ при $c > 0$ и $S(0) = 0$.

Выбор вида функции $S(c)$ определяется требуемой скоростью убывания общего количества циркулирующих в подсети пакетов, а в конечном итоге средней задержкой пакетов в подсети. Нарушение условия (24) свидетельствует о том, что управление сетевыми ресурсами в q -й подсети не обеспечивает ее устойчивое функционирование. В этом случае возникает необходимость в координации функционирования подсетей верхним уровнем управления.

Выводы

Таким образом, метод иерархическо-координационного управления сетевыми ресурсами в ТКС с учетом введенных модификаций предполагает выполнение следующей последовательности действий:

- организация децентрализованного управления сетевыми ресурсами в подсетях ТКС в соответствии с вычислительной процедурой (15)-(20);

- оценка устойчивости функционирования отдельных подсетей в соответствии с процедурой (23)-(24);
- аperiodическая целевая координация управления по подсетям (21)-(22) в случаях неустойчивого функционирования подсетей.

К достоинствам предложенного метода можно отнести следующее:

- сочетание преимуществ децентрализованного и централизованного управления, что позволит обеспечить более высокую масштабируемость и оперативность в принятии решений, а также существенно снизить объемы передаваемой служебной информации – пропорционально сокращаемому числу итераций координирующей процедуры;
- обеспечение оптимизации процесса управления с учетом предполагаемых изменений состояния ТКС на некотором упреждающем интервале ($T = (a-1)\Delta t$), благодаря реализованному в методе свойству прогнозирования;
- возможность организации параллельных вычислений при расчете управляющих векторов $U'_q(k)$ и $U''_q(k)$, что существенно снижает возникающие на маршрутизаторах трудности вычислительного характера и нацеливает на реализацию предложенного метода управления в реальном масштабе времени.

Развитие предложенного подхода видится в использовании нелинейных математических моделей управления сетевыми ресурсами, на которых можно было бы более детально проанализировать как функциональную, так и структурную устойчивость подсетей и ТКС в целом.

Литература

1. Вегенша Ш. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
2. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. – С.Пб.: ВHV-С.Пб., 2002. – 512 с.
3. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
4. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. – М.: Машиностроение, 1986. – 494 с.
5. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загал. ред. В.В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
6. Segall A. The modeling of adaptive routing in data-communication networks // IEEE Trans. on communication. – 1977. – Vol. 25, № 1. – P. 85-95.
7. Лемешко А.В. Алгоритм иерархическо-координационного управления информационным обменом в сети передачи данных // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 1998. – Вып. №1. – С. 323-328.
8. Евсеева О.Ю. Решение задачи иерархическо-координационной маршрутизации в телекоммуникационных сетях методом предсказания взаимодействия // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2003. – Вып.21. – С. 102-111.
9. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высш. шк., 1989. – 447 с.
10. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.