

ИГРОВАЯ ТРАКТОВКА ЗАДАЧИ ИЕРАРХИЧЕСКО-КООРДИНАЦИОННОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Введение

Современные территориально-распределенные телекоммуникационные системы (ТКС) характеризуются иерархическим структурно-функциональным построением. Необходимость иерархического строения ТКС продиктована необходимостью повышения, во-первых, масштабируемости решений по управлению трафиком, маршрутизацией, сетевыми ресурсами, а во-вторых, показателей надежности (живучести), качества обслуживания и производительности системы в целом. В этой связи ряд наиболее распространенных сетевых технологий, таких как IP (Internet Protocol), ATM (Asynchronous Transfer Mode) и MPLS (MultiProtocol Label Switching), поддерживают в том или ином виде многоуровневые решения в области маршрутизации. Например: в рамках технологии IP телекоммуникационная система на структурном уровне декомпозируется на автономные системы, а маршрутизирующие протоколы функционально подразделяются на IGP (Interior Gateway Protocols) и EGP (Exterior Gateway Protocol) группы [1, 2]. В ATM-сетях также предусмотрено деление на кластеры узлов сети (peer group) с использованием протоколов иерархической маршрутизации PNNI (Private Network-to-Network Interface) или I-PNNI (Integrated PNNI) [3, 4]. При этом допустимые размеры автономной системы или кластера сетевых узлов определяются объемом памяти и вычислительной мощностью маршрутизаторов (коммутаторов), что позволяет проектировать и эксплуатировать ТКС достаточно высокой размерности.

Отличительной особенностью иерархических систем управления является присутствие нескольких центров принятия решений, то есть расчет маршрутных таблиц происходит одновременно на нескольких маршрутизаторах, которые функционируют в интересах той или иной подсети (кластера или автономной системы). Эффективность функционирования иерархических ТКС во многом определяется качеством решения задач координации тех решений, которые получены в подсетях с целью недопущения (устранения) перегрузки сетевых (буферных и канальных) ресурсов между подсетями. К сожалению, декларирование реализации принципов иерархической маршрутизации в IP и ATM технологиях не снимает общей проблемы получения скоординированных решений, т.к. распределение функций между протоколами IGP и EGP маршрутизации носит преимущественно статический и эвристический характер [2], а моделирование кластеров сети в виде логических узлов верхнего уровня маршрутизации в протоколе PNNI значительно огрубляет получаемые решения [5]. В этой связи актуальной представляется задача выбора или разработки адекватных математических моделей и методов иерархической маршрутизации в ТКС, обеспечивающих динамическую координацию решений, полученных в подсетях.

Выбор математической модели маршрутизации в ТКС и ее декомпозиционное представление

Математическое описание ТКС в соответствии с реализацией требований системного подхода должно сопровождаться разработкой системы моделей, каждая из которых отображает одну или несколько сторон функционирования сети. Структура ТКС может быть представлена в виде неориентированного графа $\Gamma(V, D)$ (рис.1). Множество вершин $\{V\}$ данного графа составляют узлы (маршрутизаторы) ТКС $(V_j, j = \overline{1, N})$, N – общее число узлов; $\{D\}$ – множество трактов передачи между узлами ТКС $(D_{i,j}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j)$. В соответствии с иерархическим представлением сети в виде совокупности взаимодействующих Q подсетей,

представим каждую из них в виде подграфа $\Gamma_q(V_{(q)}, D_{(q)})$ графа $\Gamma(V, D)$, в котором $V_{(q)}$ – подмножество узлов, образующих q -ю подсеть ТКС с количеством узлов в ней – N_q . Кроме того, $D_{(q)}$ – множество трактов передачи ТКС, инцидентных узлам q -й подсети.

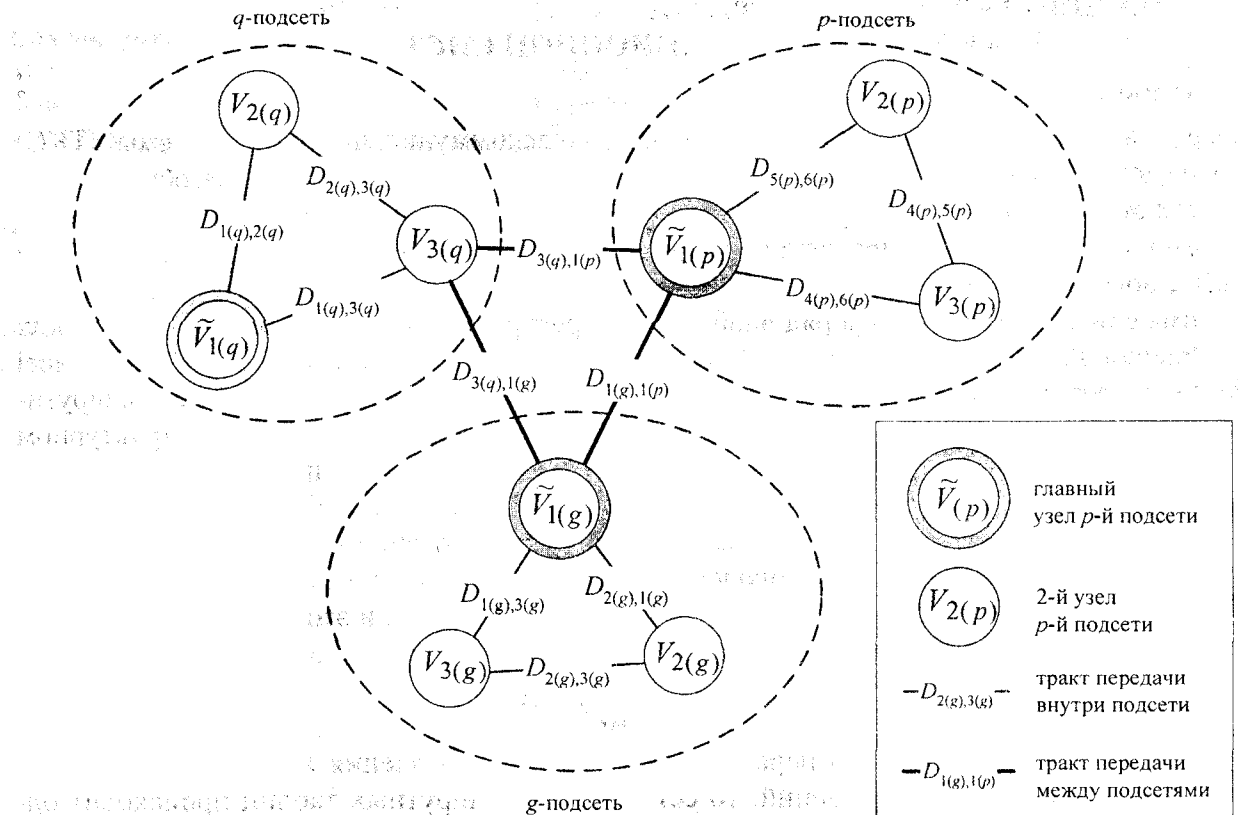


Рис. 1

С учетом динамического характера процессов информационного обмена и маршрутизации в территориально-распределенных ТКС ее функциональная модель может быть представлена системой неавтономных разностных уравнений состояния системы вида [6, 7]

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

где $b_{m,i(q)}(k) = c_{m,i(q)}(k) \Delta t$, $y_{i(q),j(g)}(k) = \xi_{i(q),j(g)}(k)$ ($\Delta t = t_{k+1} - t_k$); $x_{i(q),j(g)}(k)$ – объем данных, находящихся на узле $V_{i(q)}$ и предназначенных для передачи узлу $V_{j(g)}$ в момент времени t_k ; $u_{i(q),l}^{j(g)}(k)$ – 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 маршрутная управляемая переменная; $c_{i(q),j(p)}(k)$ – скорость передачи данных от узла $V_{i(q)}$ к узлу $V_{j(g)}$ в момент времени t_k в тракте $D_{i(q),j(g)}$; $\xi_{i(q),j(g)}(k)$ – интенсивность поступления данных на узлы ТКС в момент времени t_k с адресатом узла $V_{j(g)}$.

Система скалярных уравнений динамики информационного обмена между отдельными

узлами q -й подсети ($q = \overline{1, Q}$) (1) может быть представлена в векторно-матричном виде, характеризующем динамику информационного обмена в рамках q -й подсети

$$X_q(k+1) = X_q(k) + B'_q(k)U'_q(k) + B''_q(k)U''_q(k) + Y_q(k), \quad (2)$$

где $X_q(k)$ – вектор состояния q -й подсети ($q = \overline{1, Q}$), 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 маршрутами в 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 $V_i \in V_{(q)}$, $V_l \in V_{(g)}$, $q \neq g$, $V_j \in V$; матрицы $B'_q(k)$ и $B''_q(k)$ формируются на основе величин $\pm b_{i(q),j(q)}(k)$ в уравнении (1) (матрица $B'_q(k)$) и $\pm b_{i(q),j(g)}(k)$, $q \neq g$ в уравнении (1) (матрица $B''_q(k)$).

Причем $U'_q(k)$ – вектор управления маршрутами передачи данных в q -й подсети размерности $N_q(N_q-1)(N-1)$; $U''_q(k)$ – вектор взаимодействия между узлами q -й подсети ТКС и узлами других подсетей размерности $2N_q(N-N_q)(N-1)$, рассчитываемый в q -й подсети.

Система уравнений (2) может быть обобщена и представлена в виде

$$X(k+1) = X(k) + \sum_{q=1}^Q B_q(k)U_q(k) + Y(k), \quad (3)$$

где матрица $B_q = [B'_q, B''_q]$ имеет блочную структуру, а векторы состояния ТКС и управления маршрутами представляются в виде

$$X(k) = \begin{bmatrix} X_1(k) \\ \vdots \\ X_q(k) \\ \vdots \\ X_Q(k) \end{bmatrix} \text{ и } U_q(k) = \begin{bmatrix} U'_q(k) \\ U''_q(k) \end{bmatrix}.$$

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

$$0 \leq x_{i(q),j(g)}(k) \leq x_{i(q),j(g)}^{\max}, \quad (4)$$

$$0 \leq u_{i(q),l}^{j(g)}(k), \sum_{j=1}^N u_{i(q),l}^j(k) \leq 1, \quad (5)$$

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

Исходя из условия идентичности управления общими (совместными) сетевыми ресурсами маршрутизаторами различных подсетей на вектор взаимодействия подсетей накладываются ограничения вида [7]

$$U''_q(k) = \sum_{p=1}^Q F_{qp}U''_p(k), \quad (6)$$

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

Таким образом, задача иерархическо-координационной (ИК) маршрутизации свелась к задаче оптимального управления, связанной с расчетом векторов $U'_q(k)$ и $U''_q(k)$ в соответствии с ограничением на взаимодействие подсетей (6).

Игровая постановка задачи иерархическо-координационной маршрутизации в ТКС

В связи с тем, что вектор $U_q(k)$ составляют основу маршрутных таблиц q -й подсети, его расчет в целом или расчет его отдельных координат для обеспечения необходимой масштабируемости получаемых решений должен осуществляться на главных маршрутизаторах $\tilde{V}_{(q)}$ ($q = \overline{1, Q}$). При этом, каждый маршрутизатор $\tilde{V}_{(q)}$ ($q = \overline{1, Q}$) стремится максимизировать (минимизировать) свою целевую функцию (функционал), связанный, например, с повышением производительности подсети или снижением стоимости используемых сетевых (буферных и канальных) ресурсов. Выполнение условия (6) гарантирует отсутствие перегрузки межсетевых канальных ресурсов. Таким образом, задача иерархическо-координационной маршрутизации приобретает игровой вид, а известные ранее методы ИК-маршрутизации представляют собой частные случаи формализации исхода неантагонистической рекурсивной игры с векторными критериями [12–14], где в качестве игроков выступают отдельные сетевые узлы (главные маршрутизаторы) телекоммуникационной системы. Ниже остановимся на определении места в классификации игр, характер которых определяется тем или иным методом решения ИК-маршрутизации.

Решение задачи иерархическо-координационной маршрутизации в рамках вышеприведенной модели ТКС в работах [7–9] сводилось в том или ином виде к минимизации следующего квадратичного целевого функционала:

$$J = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=0}^{a-1} \{ X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) \}, \quad (7)$$

где параметр a характеризует количество периодов перерасчета маршрутных таблиц в рамках периода прогнозирования предполагаемого состояния системы T ($T = a\Delta t$); 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 ТКС ($q = \overline{1, Q}$) соответственно.

Решение поставленной оптимизационной задачи, связанной с минимизацией функционала (7) при наличии ограничений (3)–(6), удалось обеспечить декомпозиционными методами, согласующимися с иерархической моделью ТКС и сочетающими преимущества прямых и непрямых методов оптимизации. Декомпозиционные методы обеспечивают решение исходной задачи минимизации с помощью многоуровневой вычислительной структуры, в которой задачи, решаемые на каждом из уровней, являются более простыми по сравнению с исходной. Таким образом, их использование нацеливает на значительное снижение вычислительных затрат при расчете управляющих переменных прежде всего за счет возможности реализации распределенных вычислений и/или распараллеливания вычислений. В работах [7–9] предложены двухуровневые методы решения задач иерархическо-координационной маршрутизации (рис.2) с выделением одного координатора решений маршрутных задач по подсетям ТКС в целом. Для координации решений маршрутных задач по подсетям в работе [8] использовался принцип прогнозирования взаимодействий, в работе [9] – принцип оценки взаимодействий, в работе [7] применялся принцип целевой координации.

При использовании метода целевой координации для решения задачи минимизации функционала (7) необходимо максимизировать по λ функцию $\Phi(\lambda)$, где

$$\Phi(\lambda) = \min_{x, u} L(X, U, \lambda), \quad (8)$$

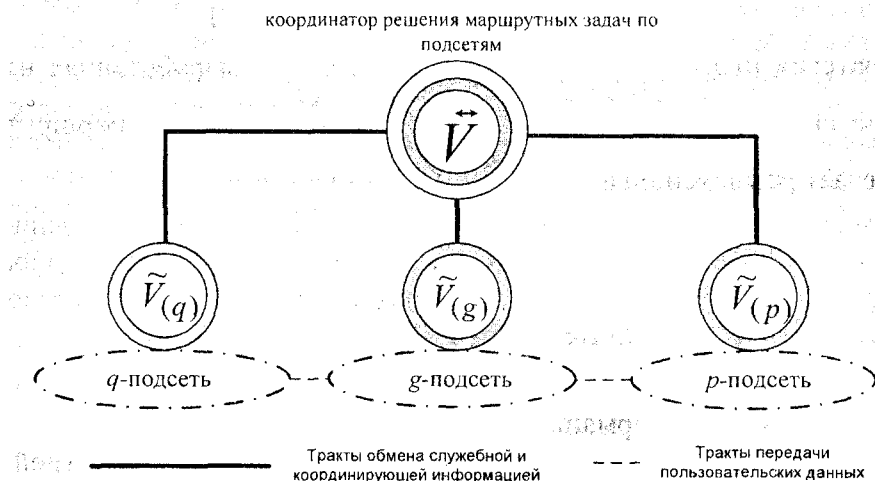


Рис. 2

в соответствии с ограничениями (4, 5), а также динамическими ограничениями (3). При этом

$$L(X, U, \lambda) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=0}^{a-1} \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + \right. \\ \left. + \lambda_q^T(k) \left[U_q''(k) - \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_p''(k) \right] \right\} = \sum_{q=1}^Q L_q, \quad (9)$$

$$L_q = \sum_{k=0}^{a-1} \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + U_q''(k) \left[\lambda_q(k) - \sum_{p=1}^Q \lambda_p^T(k) F_{pq} \right] \right\} \quad (10)$$

с учетом того, что $\sum_{q=1}^Q \lambda_q^T \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_p''(k) = \sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^Q \lambda_p^T F_{pq} U_q''(k)$.

Решение поставленной задачи, связанной с расчетом $U_q'(k)$ и $U_q''(k)$, методом целевой координации сводится к игре, в ходе которой выделяется $Q+1$ игроков. В качестве игроков выступают главные маршрутизаторы и один координатор. Игра классифицируется как неантоганистическая коалиционная игра, которая носит четко выраженный динамический характер. Динамический характер игры определяет итерационность процесса координации решений маршрутных задач по подсетям.

Первый ход одновременно проводят игроки-маршрутизаторы $\vec{V}_{(q)}$ коалиции путем расчета векторов

$$U_q(k) = \begin{bmatrix} U_q'(k) \\ U_q''(k) \end{bmatrix} \quad (q = \overline{1, Q})$$

за счет минимизации лагранжиана (10). При этом вектор $U_q(k)$ полностью определяет стратегию игрока $\vec{V}_{(q)}$, а лагранжиан (10) обуславливает общий вид функции выигрыша (проигрыша) q -го игрока. Следующий ход производит координатор $\vec{V}_{(q)}$, определяя множество векторов множителей Лагранжа $\lambda_q(k)$ ($q = \overline{1, Q}$) с использованием процедур градиентного типа

Таким образом, задача иерархическо-координационной (ИК) маршрутизации свелась к задаче оптимального управления, связанной с расчетом векторов $U'_q(k)$ и $U''_q(k)$ в соответствии с ограничением на взаимодействие подсетей (6).

Игровая постановка задачи иерархическо-координационной маршрутизации в ТКС

В связи с тем, что вектор $U_q(k)$ составляют основу маршрутных таблиц q -й подсети, его расчет в целом или расчет его отдельных координат для обеспечения необходимой масштабируемости получаемых решений должен осуществляться на главных маршрутизаторах $\tilde{V}_{(q)}$ ($q = \overline{1, Q}$). При этом, каждый маршрутизатор $\tilde{V}_{(q)}$ ($q = \overline{1, Q}$) стремится максимизировать (минимизировать) свою целевую функцию (функционал), связанный, например, с повышением производительности подсети или снижением стоимости используемых сетевых (буферных и канальных) ресурсов. Выполнение условия (6) гарантирует отсутствие перегрузки межсетевых канальных ресурсов. Таким образом, задача иерархическо-координационной маршрутизации приобретает игровой вид, а известные ранее методы ИК-маршрутизации представляют собой частные случаи формализации исхода неантагонистической рекурсивной игры с векторными критериями [12–14], где в качестве игроков выступают отдельные сетевые узлы (главные маршрутизаторы) телекоммуникационной системы. Ниже остановимся на определении места в классификации игр, характер которых определяется тем или иным методом решения ИК-маршрутизации.

Решение задачи иерархическо-координационной маршрутизации в рамках вышеприведенной модели ТКС в работах [7–9] сводилось в том или ином виде к минимизации следующего квадратичного целевого функционала:

$$J = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=0}^{a-1} \{ X_q^T(k) W_q^x X_q(k) + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) \}, \quad (7)$$

где параметр a характеризует количество периодов перерасчета маршрутных таблиц в рамках периода прогнозирования предполагаемого состояния системы T ($T = a\Delta t$); 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 ТКС ($q = \overline{1, Q}$) соответственно.

Решение поставленной оптимизационной задачи, связанной с минимизацией функционала (7) при наличии ограничений (3)-(6), удалось обеспечить декомпозиционными методами, согласующимися с иерархической моделью ТКС и сочетающими преимущества прямых и непрямых методов оптимизации. Декомпозиционные методы обеспечивают решение исходной задачи минимизации с помощью многоуровневой вычислительной структуры, в которой задачи, решаемые на каждом из уровней, являются более простыми по сравнению с исходной. Таким образом, их использование нацеливает на значительное снижение вычислительных затрат при расчете управляющих переменных прежде всего за счет возможности реализации распределенных вычислений и/или распараллеливания вычислений. В работах [7-9] предложены двухуровневые методы решения задач иерархическо-координационной маршрутизации (рис.2) с выделением одного координатора решений маршрутных задач по подсетям ТКС в целом. Для координации решений маршрутных задач по подсетям в работе [8] использовался принцип прогнозирования взаимодействий, в работе [9] – принцип оценки взаимодействий, в работе [7] применялся принцип целевой координации.

При использовании метода целевой координации для решения задачи минимизации функционала (7) необходимо максимизировать по λ функцию $\Phi(\lambda)$, где

$$\Phi(\lambda) = \min_{X, U} L(X, U, \lambda), \quad (8)$$

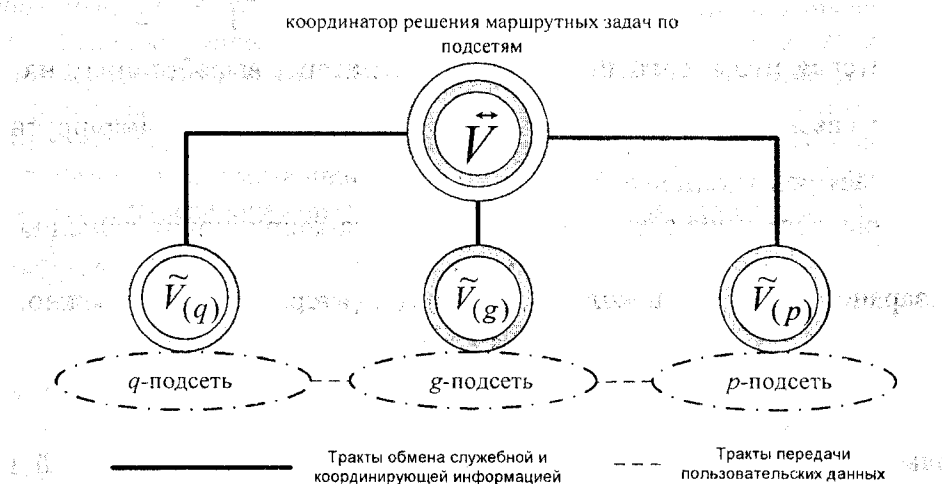


Рис. 2

в соответствии с ограничениями (4, 5), а также динамическими ограничениями (3). При этом

$$L(X, U, \lambda) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=0}^{a-1} \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + \right. \\ \left. + \lambda_q^T(k) \left[U_q''(k) - \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_p''(k) \right] \right\} = \sum_{q=1}^Q L_q, \quad (9)$$

$$L_q = \sum_{k=0}^{a-1} \left\{ X_q^T(k) W_q^x X_q + U_q'^T(k) W_q' U_q'(k) + U_q''^T(k) W_q'' U_q''(k) + U_q''(k) \left[\lambda_q(k) - \sum_{p=1}^Q \lambda_p^T(k) F_{pq} \right] \right\} \quad (10)$$

с учетом того, что $\sum_{q=1}^Q \lambda_q^T \sum_{p=1}^Q F_{qp} U_p''(k) = \sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^Q \lambda_p^T F_{pq} U_q''(k)$.

Решение поставленной задачи, связанной с расчетом $U_q'(k)$ и $U_q''(k)$, методом целевой координации сводится к игре, в ходе которой выделяется $Q+1$ игроков. В качестве игроков выступают главные маршрутизаторы и один координатор. Игра классифицируется как неантоганистическая коалиционная игра, которая носит четко выраженный динамический характер. Динамический характер игры определяет итерационность процесса координации решений маршрутных задач по подсетям.

Первый ход одновременно проводят игроки-маршрутизаторы $\vec{V}_{(q)}$ коалиции путем расчета векторов

$$U_q(k) = \begin{bmatrix} U_q'(k) \\ U_q''(k) \end{bmatrix} \quad (q = \overline{1, Q})$$

за счет минимизации лагранжиана (10). При этом вектор $U_q(k)$ полностью определяет стратегию игрока $\vec{V}_{(q)}$, а лагранжиан (10) обуславливает общий вид функции выигрыша (проигрыша) q -го игрока. Следующий ход производит координатор $\vec{V}_{(g)}$, определяя множество векторов множителей Лагранжа $\lambda_q(k)$ ($q = \overline{1, Q}$) с использованием процедур градиентного типа