

ДВУХУРОВНЕВЫЙ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ МАРШРУТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ МАГИСТРАЛЬНОГО УРОВНЯ

Развитие современных сетевых технологий, а также создание и внедрение новых решений в телекоммуникационных сетях (ТКС) проходит под девизом повышения уровня качества решения всего комплекса управленческих задач в двух основных сегментах сети – магистральном и абонентском. В свою очередь, эффективность функционирования магистрального сегмента (МС) ТКС, представляющего собой сеть связи уровня WAN (Wide Area Network), во многом зависит от согласованности в решении задач маршрутизации и управления доступом со стороны абонентского сегмента (АС), основу которого составляют сети связи уровня MAN (Metropolitan Area Network) и LAN (Local Area Network) [1].

Качественно налаженная маршрутизация является средством оперативно преодоления проблем, связанных с несовершенством проектных решений или выходом из строя отдельных элементов сети. И напротив, изъяны в организации процессов маршрутизации могут служить дополнительным источником возникновения перегрузок сети в целом или ее отдельных подсетей. Следует учесть, что в рамках решения маршрутных задач происходит перераспределение лишь доступных сетевых ресурсов (буферов очередей маршрутизаторов и пропускной способности трактов передачи данных) гарантировать отсутствие перегрузки ТКС при росте нагрузки отдельных абонентских сетей практически невозможно. Однако, организовав должным образом процесс управления доступом и согласовав его с решением маршрутных задач, перегрузку сети или отдельных ее подсетей можно в большинстве случаев избежать. Подобное утверждение базируется на том, что на практике сети связи АС для повышения показателей эксплуатационной надежности и живучести обычно коммутируются к двум и более приграничным маршрутизаторам МС ТКС [2], что особенно характерно для

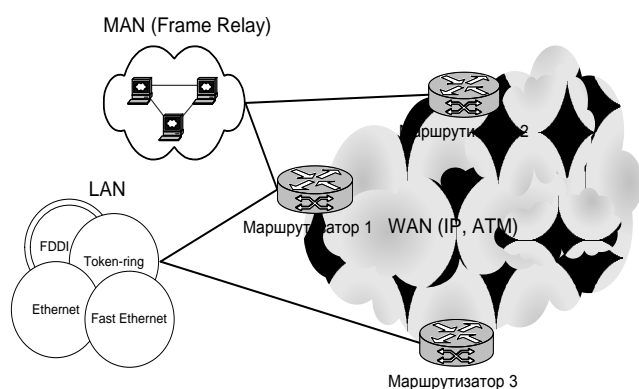


Рис.1

сетей связи военного назначения (рис.1). Обеспечив оптимальное в рамках выбранных критериев распределение нагрузки АС по приграничным маршрутизаторам МС ТКС, перегрузочные явления можно упредить и по возможности предотвратить путем перекоммутации трафика абонентов с перегруженных участков МС на маршрутизаторы наименее загруженных подсетей телекоммуникационной сети.

Приходится констатировать, что в рамках существующих моде-

лей маршрутизации и управления доступом, реализованных в соответствующих протоколах ведущих сетевых технологий IP (Internet Protocol) и ATM (Asynchronous Transfer Mode), вопросы согласованности получаемых решений напрямую не затрагиваются [1]. В этой связи особую актуальность получают задачи разработки моделей ТКС и алгоритмов ее оптимизации в рамках рассмотренных выше комплексных решений.

В процессе синтеза алгоритма оптимизации процессов маршрутизации и управления доступом в телекоммуникационных сетях за основу была взята математическая модель ТКС [3], полученная на основании усовершенствования модели решения маршрутных задач [4], адаптированной для дейтаграммных сетей и сетей, ориентированных на виртуальные соеди-

нения [5], для гибридных сетей [6] и сетей с комбинированным типом маршрутизации [7], а также для сетей с иерархической маршрутизацией [8].

В рамках этой модели структуру ТКС можно представить в виде ориентированного графа $\Gamma(R, Z)$ (рис.2), множество вершин которого $R = A \cup V$ составляют сети АС ($A_i, i = \overline{1, M}$) и узлы (маршрутизаторы) МС ($V_j, j = \overline{1, N}$) ТКС, где M – общее количество абонентских сетей, а N – число узлов в МС ТКС; $Z = B \cup D$ – множество дуг, моделирующее линии доступа ($B_{i,j}; i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N}$) и тракты передачи данных между узлами МС ТКС ($D_{i,j}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j$).

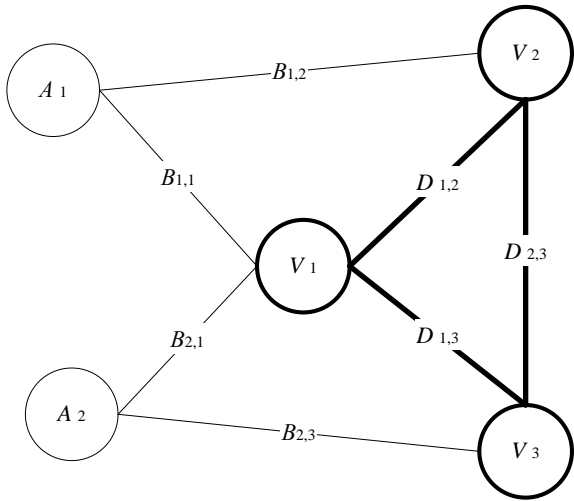


Рис.2

Трафик, создаваемый сетями АС ТКС, значительно более предсказуем по средней величине своей интенсивности и параметрам возможных пульсаций, чем трафик отдельных абонентов. Это, в свою очередь, позволяет рассматривать величину трафика абонентских сетей как управляемый ресурс. С точки зрения требований системного подхода заслуживает особого внимания подход к функциональному описанию ТКС в пространстве состояний системой неавтономных разностных управляемых уравнений, отражающей динамику загруженности буферов очередей на узлах МС ТКС [3]:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq i}}^N b_{i,l}^{(m)}(k) u_{i,l}^{j(m)}(k) + \sum_{\substack{m=1, \\ m \neq i, j}}^N b_{m,i}^{(m)}(k) u_{m,i}^{j(m)}(k) + \sum_{p=1}^M b_{p,i}^{j(\kappa)}(k) u_{p,i}^{j(\kappa)}(k), \quad (1)$$

где $x_{i,j}(k)$ – объем данных, находящийся на узле V_i и предназначенный для передачи узлу V_j в момент времени t_k , трактуемый в дальнейшем как переменная состояния; $u_{i,l}^{j(m)}(k)$ – доля пропускной способности тракта $D_{i,l}$, выделенная абонентскому трафику с адресатом V_j в момент времени t_k и трактуемая в дальнейшем как маршрутная переменная; $u_{p,i}^{j(\kappa)}(k)$ – доля абонентской нагрузки, которая поступила от p -й абонентской сети на узел V_i в момент времени t_k с адресатом V_j и трактуемая дальше как коммутационная переменная; $b_{i,j}^{(m)}(k) = c_{i,j}(k) \Delta t$ ($k=0,1,2,\dots$), $c_{i,j}(k)$ – скорость передачи данных между узлами V_i и V_j в момент времени t_k в тракте $D_{i,j}$; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – период перерасчета маршрутных и коммутационных переменных; $b_{p,i}^{j(\kappa)}(k) = \zeta_{p,i}^j(k) \Delta t$, $\zeta_{p,i}^j$ – интенсивность поступления данных к узлу V_i в момент времени t_k с адресатом V_j от p -й абонентской сети.

Для предотвращения перегрузки элементов ТКС ввиду ограниченности величин буферов очередей на узлах сети и пропускных способностей трактов передачи данных на переменные состояния и маршрутные переменные накладываются ограничения вида

$$0 \leq x_{i,j}(k) \leq x_{i,j}^{\max}, \quad (2)$$

$$0 \leq u_{i,l}^{j(m)}(k); \sum_{n=1}^N u_{i,l}^{n(m)}(k) \leq 1, \quad (3)$$

где $x_{i,j}^{\max}$ – емкость буфера очередей на узле V_i для трафиков с адресатом V_j . Выполнение условий (3) гарантирует отсутствие перегрузки канальных ресурсов сети путем ограничения трафика внутри сети.

Требование к сохранению объема абонентского трафика при его распределении по приграничным маршрутизаторам МС ТКС накладывает на коммутационные переменные следующие ограничения:

$$0 \leq u_{p,i}^{j(\kappa)}(k); \sum_{i=1}^N u_{p,i}^{j(\kappa)}(k) = 1 \quad (p = \overline{1, M}; i, j = \overline{1, N}). \quad (4)$$

Динамику информационного обмена в ТКС в целом на основе системы скалярных уравнений состояния (1) можно представить линейным векторно-матричным уравнением

$$X(k+1) = X(k) + B^{(m)}(k)U^{(m)}(k) + B^{(\kappa)}(k)U^{(\kappa)}(k), \quad (5)$$

где $X(k) = x_{1,2}(k), \dots, x_{i,j}(k), \dots, x_{N,N-1}(k) \overset{\bar{T}}{_}$ – вектор загрузки буферных устройств на узлах МС ТКС в момент времени t_k размерности $N(N-1)$; $U^{(m)}(k) = u_{1,2}^{2(m)}(k), \dots, u_{i,l}^{j(m)}(k), \dots, u_{N,N-1}^{N-1(m)}(k) \overset{\bar{T}}{_}$ – вектор маршрутных переменных в момент времени t_k размерности $N(N-1)^2$; $B^{(m)}(k)$ – матрица пропускных способностей трактов передачи данных МС ТКС в момент времени t_k размерности $N(N-1) \times N(N-1)^2$, элементы которой формируются из величин $b_{i,j}^{(m)}(k)$ выражения (1); $B^{(\kappa)}(k)$ – матрица объемов абонентской нагрузки, которая поступает на узлы магистрального сегмента ТКС в момент времени t_k размерности $N(N-1) \times MN^2$, элементы которой отвечают величинам $b_{p,i}^{j(\kappa)}(k)$ согласно выражению (1); $U^{(\kappa)}(k) = u_{1,1}^{1(\kappa)}(k), \dots, u_{i,l}^{j(\kappa)}(k), \dots, u_{M,N}^{N(\kappa)}(k) \overset{\bar{T}}{_}$ – вектор коммутационных переменных в момент времени t_k размерности MN^2 ; \bar{T} – знак транспонирования.

Размерность вектора $U^{(m)}$, соответствующая полностью связанной структуре МС ТКС, и размерность вектора $U^{(\kappa)}$, соответствующая коммутации каждой сети АС на каждый маршрутизатор МС ТКС, на практике может быть значительно снижена ввиду неполностью связанной структуры ТКС, а также по причине физической коммутации абонентских сетей не больше, чем к двум приграничным маршрутизаторам магистрального сегмента сети. Например, в случае связности каждого из маршрутизаторов МС ТКС с q ($q \leq N-1$) соседними, размерность вектора маршрутных переменных составляет $qN(N-1)$. А при коммутации каждой сети АС ТКС к двум маршрутизаторам МС размерность вектора коммутационных переменных существенно уменьшается и составит $2MN$.

В общем случае динамика состояния ТКС соответственно выражению (5) может быть описана в форме линейного векторно-матричного уравнения

$$X(k+1) = X(k) + B(k)U(k), \quad (6)$$

где $B = B^{(m)}B^{(\kappa)}$; $U = \begin{bmatrix} U^{(m)} \\ U^{(\kappa)} \end{bmatrix}$.

В качестве критерия оптимальности решения комплексной задачи маршрутизации и управления абонентским доступом выберем минимум квадратичного функционала вида

$$J = \sum_{k=0}^{v-1} X^T(k)G_x X(k) + U^T(k)G_u U(k), \quad (7)$$

где G_x – диагональная положительно определенная весовая матрица, обусловленная приоритетностью очередей на узлах МС ТКС; $G_u = \begin{bmatrix} G_u^{(m)} & 0 \\ 0 & G_u^{(k)} \end{bmatrix}$ – блок-диагональная положительно определенная весовая матрица, в которой компоненты матрицы $G_u^{(m)}$ определяются важностью трактов передачи данных в ТКС, а компоненты матрицы $G_u^{(k)}$ характеризуют относительную стоимость доступа к узлам МС; v – количество интервалов Δt перерасчета маршрутных и коммутационных переменных.

Квадратичный функционал (7) характеризует суммарные затраты относительно загрузки буферных устройств узлов, пропускных способностей трактов передачи данных ТКС, а также стоимость доступа к МС ТКС на протяжении цикла оптимизации $W = v\Delta t$ и функционально связанный с объемом своевременно доставленных абонентских данных. Формулирование функционала (7), подлежащего минимизации, позволяет реализовать свойство прогнозирования предполагаемого состояния ТКС на некотором упреждающем временном интервале – периоде прогнозирования, который совпадает по своему смыслу с величиной интервала оптимизации W .

В основу разрабатываемого алгоритма оптимизации может быть положено решение вариационной задачи по минимизации функционала (7) с динамическими ограничениями (1) или (6), ограничениями на переменные состояния (2), маршрутные (3) и коммутационные переменные (4) с расчетом векторов маршрутных $U^{(m)}(k)$ и коммутационных переменных $U^{(k)}(k)$. Для решения сформулированной задачи существуют не прямые методы, основанные на использовании необходимых и (или) достаточных условий оптимальности, и прямые методы вариационного исчисления, которые непосредственно подобные условия не используют [9]. К основным методам первой группы относятся метод Эйлера-Лагранжа, принцип максимума Понтрягина, метод динамического программирования Беллмана. Ко второй группе методов принадлежат численные методы параметрической оптимизации, основанные на идеях поиска.

В случае аналитического решения вариационных задач с помощью метода Эйлера-Лагранжа и принципа максимума Понтрягина удастся получить законы управления замкнутого типа [10]. Однако наличие интегральных ограничений на маршрутные (3) и коммутационные переменные (4) не позволяет получить необходимые решения в аналитической форме, а необходимость решения возникающей краевой задачи еще больше усложняет решения поставленной оптимизационной задачи данными методами. Метод динамического программирования Беллмана обеспечивает решение вариационных задач оптимального управления при наличии практически любых ограничений, но при этом возникают трудности вычислительного характера, связанные с необходимостью запоминания большого объема промежуточной информации при решении задач большой размерности по причине необходимости представления функции нескольких переменных на множестве дискретных значений ее аргумента [10]. Следует учесть, что компоненты векторов X и U величины по своей сути непрерывные, а необходимость их дискретизации требует довольно большой емкости запоминающих устройств вычислительных систем, что делает нецелесообразным использование метода динамического программирования при решении поставленной оптимизационной задачи.

Использование численных методов как основных представителей прямых методов решения вариационных задач обусловлено возможностью получения явного решения уравнения (1) относительно вектора X , подставив его компоненты в виде функций вектора U и начальных условий $X(0)$ [9; 10]. В этом случае размерность задачи увеличивается пропорционально параметру v , что в большинстве случаев неприемлемо.

Таким образом, непосредственно использовать не прямые и прямые методы решения сформулированной выше вариационной задачи не представляется возможным. В этой связи заслуживает внимания поиск комбинированного подхода, сочетающего преимущества прямых и не прямых методов. На основании проведенного анализа для решения исходной оптимизационной задачи воспользуемся иерархическо-координационным методом целевой координации [11]. Его реализация нацеливает на значительное снижение вычислительных затрат при расчете маршрутных и коммутационных переменных за счет возможности распараллеливания вычислений.

В соответствии с выбранным методом решение исходной задачи минимизации функционала (7) может быть заменено решением двойственной задачи максимизации по λ функционала $\Phi(\lambda)$, где

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

$$L(x, U, \lambda) = \sum_{k=0}^{v-1} X^T(k)G_x X(k) + U^T(k)G_u U(k) + \lambda^T(k) [X(k+1) - X(k) - B(k)U(k)]. \quad (8)$$

Многоуровневый характер решения задачи позволяет обеспечить вычисление лагранжиана $L(x, U, \lambda)$ для заданных на вышестоящем уровне $\lambda = \lambda^*$ независимо для каждого момента времени, определяемого индексом k . С этой целью определим гамильтониан

$$H(x, U, \lambda) = X^T(k)G_x X(k) + U^T(k)G_u U(k) + \lambda^T(k) [X(k) - B(k)U(k)]. \quad (9)$$

Тогда с учетом выражения (9) уравнение (8) принимает вид

$$L(x, U, \lambda) = \min_{x,u} \sum_{k=0}^{v-1} H(x, U, \lambda) - \lambda^T(v-1)X(v-1) = \sum_{k=0}^{v-1} L_k(\lambda),$$

$$L_k(\lambda) = \min_{x,u} H(x, U, \lambda) - \lambda^T(k-1)X(k-1). \quad (10)$$

Для получения численного решения задачи необходимо рассчитать независимо друг от друга значения функций L_k для заданных $\lambda = \lambda^*$ и затем максимизировать L , используя градиентные процедуры, где градиент функции L имеет вид

$$\nabla L(\lambda) \Big|_{\lambda = \lambda^*} = -X^*(v-1) + X^*(0) + B(v-1)U^*(v-1), \quad (11)$$

где X^* , U^* – решения, минимизирующие L_k при $\lambda = \lambda^*$.

Задача минимизации L_k в выражении (10) при наличии ограничений (2), (3), (4) в отсутствие динамических ограничений (6) является задачей параметрической оптимизации и может быть решена с помощью соответствующих численных методов [12].

Таким образом, задача минимизации целевого функционала (7) может быть решена с использованием на первом этапе необходимых условий оптимальности, а на втором – прямых методов минимизации выражений (10). Реализация метода целевой координации для решения поставленной вариационной задачи обусловила двухуровневый алгоритм оптимизации (рис.3).

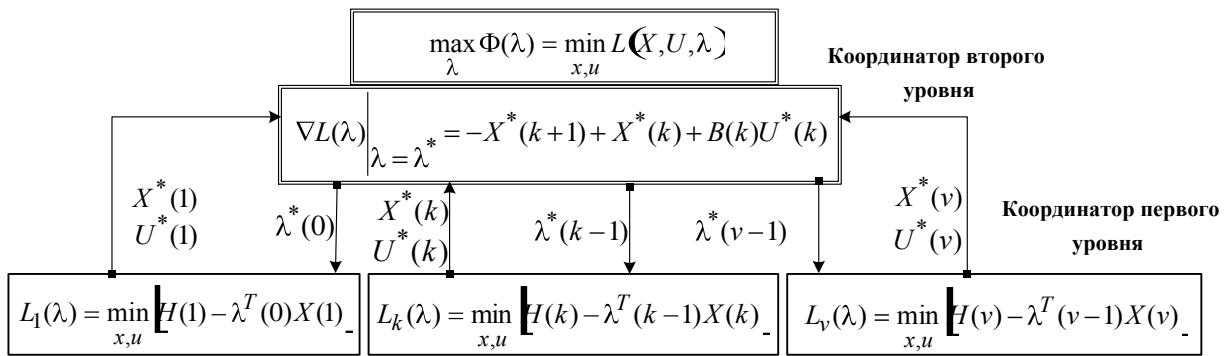


Рис.3

Координатором первого (нижнего) иерархического уровня при заданных $\lambda = \lambda^*$ минимизируются вне зависимости друг от друга функции L_k , $k = \overline{0, v-1}$ в выражении (10). Полученные оптимальные решения X^* , U^* используются координатором второго (верхнего) уровня для вычисления градиента (11), который, в свою очередь, применяется для нахождения вектора λ , максимизирующего L . Общий оптимум функционала J достигается при близости градиента (11) к нулю.

Таким образом, в работе предложен двухуровневый алгоритм оптимизации процессов маршрутизации и управления доступом в телекоммуникационных сетях магистрального уровня. В основу алгоритма положено решение вариационной задачи векторной оптимизации по минимизации функционала (7) с ограничениями на переменные состояния (2), маршрутные (3) и коммутационные переменные (4) методом целевой координации, относящегося к классу иерархическо-координационных методов. Решение оптимизационной задачи базируется на использовании динамической модели ТКС, обеспечивающей комплексный учет процессов маршрутизации и управления доступом. К достоинствам предлагаемого алгоритма следует отнести эффективность его вычислительной реализации, предполагающей распараллеливание процесса вычисления с использованием на маршрутизаторах многопроцессорных вычислителей. Реализация в рамках рассмотренной модели ТКС свойства прогнозирования предполагаемого состояния сети позволяет нацелить решения взаимосвязанных между собой задач маршрутизации и управления доступом именно на предотвращение перегрузки сети или ее отдельных подсетей, а не только на ликвидацию ее последствий.

Список литературы: 1. *Руководство по технологиям объединенных сетей / Настольный справочник специалиста по сетевым технологиям: 3-е издание.* М.: Изд-й дом «Вильямс», 2002. 1040 с. 2. *Мизин И.А., Богатырев В.А. Кулешов А.П.* Сети коммутации пакетов / Под ред. В.С. Семенихина. М.: Радио и связь, 1986. 408 с. 3. *Лемешко А.В., Беленков А.Г.* Динамическая модель комплексного решения задач маршрутизации и абонентского доступа в территориально-распределенных телекоммуникационных сетях // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского „ХАИ“. Харьков: НАКУ. 2003. Вып. 18. С. 134-139. 4. *Segall A.* The modeling of adaptive routing in data-communications networks // IEEE Trans. on communications, 1975. Vol. 25. №1. P. 85-95. 5. *Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Гема Н.И.* Динамическая маршрутизация в пакетных сетях с гарантированным качеством обслуживания // Радиотехника: Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 123. С. 45-50. 6. *Евсеева О.Ю.* Динамическая маршрутизация в гибридных телекоммуникационных сетях // Радиотехника: Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2002. Вып. 128. С. 86-90. 7. *Лемешко А.В., Евсеева О.Ю.* Функциональная модель адаптивной маршрутизации комбинированного типа // Радиотехника: Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2002. Вып.127. С. 152-159. 8. *Лемешко А.В.* Алгоритм иерархическо-координационного управления информационным обменом в сети передачи данных // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. ХАИ. Харьков: Харьк. Авиаци. Ин-т. 1998. Вып. 1. С. 323-328. 9. *Мусеев Н.Н.* Численные методы в теории оптимальных систем. М.: Наука, 1971, 424 с. 10. *Брайсон А., Хо Ю-ши* Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. 544 с. 11. *Сингх М., Титли А.* Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. М.: Машиностроение, 1986. 494 с. 12. *Растрингин Л.А.* Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. 632 с.