

*А.В. ЛЕМЕШКО, д-р техн. наук, О.Ю. ЕВСЕЕВА, канд. техн. наук,
О.В. КОПЕЙКА, канд. техн. наук, А.Г. БЕЛЕНКОВ*

РЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЕЕ СТАЦИОНАРНОГО СОСТОЯНИЯ

Введение

Эффективность современных телекоммуникационных систем (ТКС), которая тесно связана с предоставлением услуг гарантированного качества, во многом определяется составом и результативностью решений задач сетевого управления [1, 2]. Особенно это проявляется в условиях ограниченности сетевых ресурсов и неопределенности характеристик трафика, которые изменяются в соответствии с требованиями абонентов ТКС. В подобных условиях особая роль в рамках современных и перспективных систем сетевого управления отводится средствам реструктуризации ТКС, которые должны обеспечивать качественное решение широкого круга задач структурно-параметрической адаптации и управления, т.е. задач управления сетевым ресурсом, приоритетами, трафиком, маршрутизацией, а при необходимости и самой структурой системы. К числу основных факторов, приводящих к необходимости реструктуризации современных телекоммуникационных систем, как показывает практика, можно отнести:

- деградацию структуры системы ввиду низкой эксплуатационной надежности сетевых элементов или антагонистического внешнего воздействия;
- непредвиденное, как правило скачкообразное, изменение абонентской нагрузки на узлы транспортной сети ТКС от сетей доступа;
- «несанкционированное» изменение параметров производительности сетевых узлов и пропускной способности трактов передачи, обусловленное сбоями сетевого программного и аппаратного обеспечения;
- аппаратную несовместимость, обусловленную широким спектром используемого в операторских сетях оборудования связи различных производителей (Lucent, Avaya, Nortel, Ericsson, Siemens, Alcatel, Tellabs, Memotec, ECI, RAD, Cisco, Newbridge и др.);
- технологическую несовместимость отдельных подсетей ТКС, так как в большинстве компаний-операторов используется множество технологий, особенно канального и сетевого уровня – SDH (Synchronous Digital Hierarchy), PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy), WDM/DWDM (Wavelength Division Multiplexing), ATM (Asynchronous Transfer Mode), IP (Internet Protocol), frame relay, X.25, MPLS (MultiProtocol Label Switching), xDSL (Digital Subscriber Line), DPT (Dynamic Pocket Transport) и др.

В дальнейшем под реструктуризацией будет пониматься, прежде всего, процесс гибкого реагирования на изменение условий функционирования системы путем адаптивного управления структурно-функциональными параметрами и характеристиками ТКС в условиях априорной неопределенности ее состояния [3, 4]. Таким образом, процесс реструктуризации можно рассматривать как адекватную реакцию систем сетевого управления на случайное изменение условий функционирования ТКС.

1. Формулировка требований к перспективным решениям задач реструктуризации в современных ТКС

Стоит отметить, что современные средства реструктуризации ТКС, которые положены в основу существующих телекоммуникационных технологий, не носят превентивный характер, обеспечивая адаптацию, как правило, лишь к топологическим параметрам сети [1, 2]. Динамика же изменения состояния ТКС и характеристик абонентского трафика практически не учитывается, что приводит в современных условиях обеспечения мультисервиса и качества обслуживания к перегрузке отдельных сетевых узлов и трактов передачи или к не всегда обоснованному ограничению внешней на-

грузки. Причина этой ситуации заключается в том, что основу существующих средств реструктуризации ТКС составляют решения, которые базируются преимущественно на эвристических схемах и упрощенных математических моделях, определяя в том или ином виде содержание и эффективность соответствующего протокола управления [2].

Перспективные модели и методы реструктуризации должны обеспечивать необходимую системность решений, учитывать динамический, нестационарный характер процессов реструктуризации, стохастичность изменения состояния системы, а также необходимость расширения перечня структурно-функциональных параметров и характеристик, по которым осуществляется адаптация к изменению условий функционирования ТКС. Как показал проведенный анализ, одним из достаточно конструктивных является подход, основанный на описании процессов реструктуризации динамическими моделями, представленными дифференциальными или разностными уравнениями состояния. Использование такого подхода позволяет применить достаточно мощный математический аппарат методов переменных состояния, процедур рекурсивной оценки и управления для учета широкого перечня требований относительно качества решений в области реструктуризации, выдвинутых в ходе реализации перспективных концепций и технологий сетевого управления.

В связи с этим особую актуальность приобретает задача, связанная с усовершенствованием средств реструктуризации ТКС в условиях неопределенности ее состояния путем разработки соответствующих математических моделей и методов со стохастическим изменением их отдельных структурных и функциональных параметров для повышения производительности системы в целом.

2. Анализ известных подходов и формулировка требований к математической формализации процессов реструктуризации ТКС

При решении частных задач реструктуризации (маршрутизации, управления ресурсами, приоритетами и др.) нашел свое применение достаточно широкий перечень математических моделей ТКС. При этом наблюдается устойчивая тенденция к усложнению и расширению информативности моделей, используемых при описании тех или иных свойств и характеристик ТКС. В настоящее время при математическом описании задач реструктуризации ТКС активно используются графовые модели, модели и методы потокового программирования, системы и сети массового обслуживания, модели, представленные сетями Петри и интегрально-дифференциальными (разностными) уравнениями состояния [3]. В результате математического описания процессов реструктуризации ТКС, как правило, формулируется в том или ином виде оптимизационная задача, где в качестве целевой функции (функционала) выступают или представленные в обобщенном виде стоимостные показатели, или непосредственно скоростные и вероятностно-временные показатели качества обслуживания. В качестве ограничений используются условия предотвращения перегрузки отдельных сетевых узлов и трактов передачи, а также условия ограниченности сетевых ресурсов, доступных в процессе реструктуризации ТКС. Для решения подобного рода задач применяются различные средства и методы, среди которых по-прежнему значительное место занимают эвристические схемы и комбинаторные методы расчета. Параллельно к этому все большее внимание уделяется методам математического (линейного и нелинейного) программирования, игровым методам и методам оптимального управления динамическими системами [2, 3], которые смогли в различной степени адаптировать к современным требованиям по формализации процессов реструктуризации в ТКС.

Однако известные модели и методы реструктуризации не обеспечивают необходимую системность решений, не учитывают динамический характер процессов реструктуризации, стохастичность изменения состояния системы, а также необходимость расширения перечня структурных и функциональных параметров и характеристик, по

которым происходит адаптация к условиям функционирования ТКС. Использование таких моделей также не позволяет в должной степени учесть широкий перечень требований к качеству решения задач реструктуризации, выдвигаемых в ходе реализации правил системной политики, концепций инжиниринга трафика, маршрутизации на основе качества обслуживания, сбалансированной загрузки сети и быстрой перемаршрутизации. Решение поставленной задачи подразумевает необходимость детального и всестороннего анализа ТКС, что сопряжено с трактовкой ее как сложной организационно-технической системы. Это требует применения системотехнического подхода к исследованию ТКС и предполагает декомпозицию основной научной задачи на ряд частных задач исследования, решение которых реализует последовательность операций наблюдение (измерение) – оценка – управление (рис. 1) и связано с разработкой динамической модели ТКС в условиях изменения внешней нагрузки; моделей и процедур оценивания состояния ТКС в различных условиях неопределенности наблюдения и управления в ТКС.



Рис. 1.

3. Математическая модель реструктуризации ТКС в условиях неопределенности ее стационарного состояния

В качестве базовой примем динамическую модель реструктуризации ТКС, описанную в работах [3, 5]. Тогда для ТКС, состоящей из n узлов и обслуживающей одновременно m сетей доступа (абонентских сетей, абонентов), вектор переменных состояния $\bar{x}(k)$ представляет собой n_x -мерный вектор загрузки буферных устройств на маршрутизаторах ТКС в момент времени t_k ($n_x = n(n-1)$); $\bar{u}(k)$ – n_u -мерный вектор, который характеризует динамическую стратегию распределения сетевых ресурсов ($n_u = n(n-1)^2$); $\bar{w}(k)$ – n_w -мерный вектор абонентской нагрузки, поступающей на узлы ТКС на временном интервале стационарности Δt ; координаты $n_x \times n_x$ -матрицы $A(k)$ определяют статическую стратегию управления сетевыми ресурсами; $B(k)$ – $n_x \times n_u$ -матрица, характеризующая особенности структурного построения, а также пропускные способности ее трактов передачи в момент времени t_k ; компоненты $n_x \times n_w$ -матрицы $G(k)$ обуславливают порядок подключения и распределения абонентской нагрузки по приграничным узлам ТКС на протяжении цикла управления Δt .

В базовой модели [3, 5] производится учет лишь стохастического характера поступления пакетов абонентского трафика, а также неопределенность процесса измерения состояния ТКС. Стохастичность же сетевых параметров, оказывающих существенное

влияние на процессы управления, их устойчивость и точность, не учитывается. В данной работе основное внимание будет уделено описанию динамической модели реструктуризации с неопределенностью стационарного состояния ТКС. Различают стационарную параметрическую и структурную неопределенность состояния ТКС как объекта управления в целом, не изменяющуюся в процессе функционирования. Неопределенность в зависимости от природы ее возникновения охватывает то или иное множество сетевых параметров, которые предполагаются постоянными (медленно изменяющимися), но с неизвестной величиной и структурой. Стационарная неопределенность возникает при отсутствии точной априорной информации о реальном состоянии ТКС – загрузке ее канальных и буферных ресурсов, а также параметрах ее структуры.

Как правило, случайные по своей природе структурно-функциональные параметры подчиняются статистическим закономерностям и к моменту начала перерасчета (модификации) управляющего воздействия (маршрутных таблиц, порядка резервирования буферного пространства и канальной емкости) могут принимать определенные значения и вид на дискретном множестве. Таким образом, важными особенностями подобных динамических моделей реструктуризации ТКС являются, во-первых, параметрическая и структурная неопределенность в начальный момент, не изменяющаяся в процессе функционирования, и, во-вторых, стохастичность самого процесса при действии случайных управляющих воздействий и помех.

В этой связи с целью формализации возникновения неопределенности стационарного состояния ТКС, обусловленной вышеприведенными факторами, процесс реструктуризации можно представить векторно-матричным разностным уравнением

$$\bar{x}(k+1) = A(k, \theta^{(a)})\bar{x}(k) + B(k, \theta^{(b)})\bar{u}(k) + G(\theta^{(g)})\bar{w}(k), \quad (1)$$

где θ – вектор параметров неопределенности состояния ТКС, входящий в том или ином виде в зависимости от источника, вызывающего неопределенность, в состав одной из матриц A , B , G .

В свою очередь уравнение (1) для непрерывного времени может быть записано в форме

$$d\bar{x}(t)/dt = A(t, \theta^{(a)})\bar{x}(t) + B(t, \theta^{(b)})\bar{u}(t) + G(\theta^{(g)})\bar{w}(t). \quad (2)$$

Аналогично вектор параметров неопределенности может быть введен и в уравнение наблюдения (измерения) состояния ТКС:

$$y(t) = H^T(t, \theta^{(h)})x(t) + v(t). \quad (3)$$

Таким образом, описанная математическая модель ТКС (1-3) определена с точностью до неизвестного вектора параметров θ . В дальнейшем при разработке метода реструктуризации путем решения частных задач оценивания и управления ресурсами ТКС будет использоваться байесовский подход, в котором вектор θ рассматривается как случайная переменная с известной или предполагаемой произвольной априорной функцией плотности вероятностей $p(\theta|t_0) = p(\theta)$ [5].

Динамику информационного обмена (1) можно представить в виде системы разностных управляемых уравнений загрузки буферов очередей на сетевых узлах:

$$\begin{aligned} x_{i,j}(k+1) = & x_{i,j}(k) - \sum_{p=1, p \neq i}^n (a_{i,p}^j \pm \theta_{i,p}^{j(a)})x_{i,j}(k) + \sum_{r=1, r \neq i, j}^n (a_{r,i}^j \pm \theta_{r,i}^{j(a)})x_{r,j}(k) - \\ & - \sum_{l=1, l \neq i}^n b_{i,l}^\theta(k)u_{i,l}^j(k) + \sum_{z=1, z \neq i, j}^n b_{z,i}^\theta(k)u_{z,i}^j(k) + \sum_{s=1}^m g_{s,i}^{j(\theta)}w_{s,j}(k), \end{aligned} \quad (4)$$

в которой величины $b_{z,i}^{\theta}(k)$ и $g_{s,i}^{j(\theta)}$ в зависимости от физики возникновения неопределенности могут рассчитываться следующим образом:

$$b_{z,i}^{\theta}(k) = (c_{z,i}(k) \pm \theta_{z,i}^{(b_1)}) \Delta t \quad (5) \quad \text{или} \quad b_{z,i}^{\theta}(k) = c_{z,i}(k) \theta_{z,i}^{(b_2)} \Delta t; \quad (6)$$

$$g_{s,i}^{j(\theta)}(k) = g_{s,i}^j(k) \theta_{s,i}^{(g_1)} \quad (7) \quad \text{или} \quad g_{s,i}^{j(\theta)}(k) = g_{s,i}^j(k) \pm \theta_{s,i}^{(g_2)} \quad (8)$$

где $b_{v,i}(k) = c_{v,i}(k) \Delta t$, $w_{s,j}(k) = \zeta_{s,j}(k) \Delta t$, ($k=0,1,2..$; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$); $x_{i,j}(k)$ – объем данных, находящихся на i -м узле и предназначенных для передачи j -му узлу в момент времени t_k , трактуемый в дальнейшем как переменная состояния; $c_{i,j}(k)$ – скорость передачи данных от i -го узла к j -му узлу в момент времени t_k в тракте (i, j) ; $a_{i,p}^j$ – доля передаваемых данных из буфера очереди (i, j) к j -му узлу через p -й узел, трактуемая в дальнейшем как статическая маршрутная переменная; $u_{i,l}^j(k)$ – доля пропускной способности тракта (i, l) , выделенная для передачи трафика к j -му узлу в момент времени t_k и трактуемая в дальнейшем как динамическая маршрутная переменная; $g_{s,i}^j$ – доля трафика, поступающего от s -го абонента на i -й приграничный маршрутизатор с адресатом j -й узел; $\zeta_{s,j}(k)$ – интенсивность внешнего трафика для j -го узла от s -го абонента в момент времени t_k ; Δt – цикл управления (период перерасчета маршрутных переменных).

Параметр неопределенности $\theta_{z,i}^{(b_1)}$ моделирует непротокольное изменение номинальной или доступной пропускной способности тракта передачи (z, i) , т.е. $\theta_{z,i}^{(b_1)} \in [0, c_{z,i}]$. Параметр $\theta_{z,i}^{(b_2)}$ формализует ситуацию возможного выхода из строя тракта передачи (z, i) , т.е. $\theta_{z,i}^{(b_2)} \in \{0, 1\}$. В свою очередь, параметры неопределенности $\theta_{s,i}^{(g_1)} \in \{0, 1\}$ и $\theta_{s,i}^{(g_2)} \in [0, 1]$ описывают возможность изменения порядка подключения или непланового перераспределения абонентского потока, поступающего на i -й приграничный сетевой узел от s -й сети доступа.

Кроме того, наличие параметров неопределенности $\theta_{z,i}^{(b_2)}$ ($z, i = \overline{1, n}$, $z \neq i$) в выражении (6) и $\theta_{s,i}^{(g_1)}$ ($s = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) в выражении (7) может привести к тому, что размерность вектора состояния ТКС n_x также станет функцией параметров неопределенности. Таким образом, параметры $\theta_{z,i}^{(b_1)}$ и $\theta_{s,i}^{(g_2)}$ формализуют параметрическую стационарную неопределенность, а параметры $\theta_{z,i}^{(b_2)}$ и $\theta_{s,i}^{(g_1)}$ – структурную стационарную неопределенность состояния телекоммуникационной системы.

В рамках предлагаемой модели реструктуризации (4) осуществляется формализация процессов управления канальными и буферными ресурсами ТКС. В выражении (4)

слагаемое $\sum_{p=1, p \neq i}^n a_{i,p}^j x_{i,j}(k)$ характеризует объем данных, который будет убывать из

очереди (i, j) на соседние узлы, а слагаемое $\sum_{r=1, r \neq i, j}^n a_{r,i}^j x_{r,j}(k)$ численно определяет

объем данных, которые поступают в эту же очередь в момент времени t_k в соответствии со статической стратегией управления сетевыми ресурсами. Эти слагаемые определяют непосредственно содержание управления буферным ресурсом сетевых узлов.

Кроме того, слагаемые $\sum_{l=1, l \neq i}^n b_{i,l}(k)u_{i,l}^j(k)$ и $\sum_{v=1, v \neq i, j}^n b_{v,i}(k)u_{v,i}^j(k)$ (4) определяют

также объемы данных, которые убывают или поступают в очередь (i, j) от соседних узлов, но уже в соответствии с динамической стратегией управления сетевыми ресурсами. Приведенные слагаемые непосредственно отвечают за распределение канального ресурса между трафиками пользователей, а также согласно выражению (3) определяют порядок использования буферного пространства сетевых узлов-маршрутизаторов ТКС.

Слагаемое $\sum_{s=1}^m g_{s,i}^j w_{s,j}(k)$ характеризуют объем данных, который поступает в очередь (i, j) приграничного узла-маршрутизатора от сетей доступа или отдельных абонентов.

На переменные состояния, а также переменные статического и динамического управления сетевыми ресурсами с целью предотвращения перегрузки элементов ТКС может быть наложен ряд ограничений. Ввиду ограниченности величины буферов очередей на узлах ТКС на переменные состояния накладываются ограничения вида

$$0 \leq x_{i,j}(k) \leq x_{i,j}^{\max}, \quad (9)$$

где $x_{i,j}^{\max}$ - емкость буфера очереди на i -м маршрутизаторе для пакетов трафиков, передаваемых на j -й маршрутизатор.

Исходя из физического смысла переменных статического управления сетевыми ресурсами, на них накладываются ограничения вида

$$0 \leq a_{i,p}^j; \quad \sum_{p=1, p \neq i}^n a_{i,p}^j \leq 1. \quad (10)$$

Вследствие ограниченности пропускных способностей трактов передачи на переменные динамического управления сетевыми ресурсами накладывается следующая система ограничений:

$$0 \leq u_{i,l}^j(k) \leq u_{i,l}^{j(\max)} \leq 1; \quad \sum_{j=1, j \neq i}^n u_{i,l}^j(k) \leq \varepsilon_{i,l} \leq 1, \quad (11)$$

где $u_{i,l}^{j(\max)}$ – результат предварительного решения задачи распределения канальных ресурсов, определяющий максимальную долю пропускной способности тракта передачи (i, l) , выделенную для передачи пакетов от i -го узла-маршрутизатора к j -му; $\varepsilon_{i,l}$ – доля пропускной способности тракта (i, l) , выделенная для реализации динамической стратегии управления сетевыми ресурсами.

В общем случае переменная $\varepsilon_{i,l}$ может отличаться от единицы, так как реализация динамической стратегии управления сетевыми ресурсами всегда связана с дополнительными временными затратами и расходами буферного пространства и пропускной способности, вызванными необходимостью передачи дополнительных объемов служебной информации. Случай $\varepsilon_{i,l} = 0$ соответствует моделированию решения задач реструктуризации с реализацией лишь статических стратегий управления сетевыми ресурсами, основанных на использовании фиксированных (статических) маршрутных

таблиц. Они определяются или на этапе проектирования сети на основе информации о ее структуре, пропускной способности каналов связи, а также априорных данных о средней загрузке отдельных направлений сети, или в процессе предварительной настройки сетевого оборудования провайдеров, например при создании некоммутируемых виртуальных путей в сетях ATM или Frame Relay. Примером подобного решения служит протокол маршрутизации IISIP (Interim Interswitch Signaling Protocol), нашедший свое применение в сетях ATM. Динамические стратегии управления сетевыми ресурсами ($\varepsilon_{i,l} \neq 0$) и, в частности, динамическая маршрутизация являются атрибутом динамических сетей, например сетей-IP или ATM-сетей, использующих коммутируемые виртуальные соединения. Возможность периодического перерасчета маршрутных таблиц заложена, например, в такие маршрутизирующие протоколы, как RIP и IGRP в IP-сетях [6].

Кроме того, согласно физическому смыслу координат матрицы G на их величину накладываются ограничения вида

$$\sum_{i=1, j \neq i}^n g_{s,i}^j \leq 1. \quad (12)$$

Стоит учесть тот факт, что на узлы ТКС поступают агрегированные потоки одновременно от нескольких сетей доступа, к которым подключены, в свою очередь, множество отдельных абонентов (рис.1). В этой связи особый интерес представляет принятие гипотезы о нормальности процесса $\vec{w}(t)$ [7]. Принятие данной гипотезы обосновано возможностью применения центральной предельной теоремы, позволяющей сделать следующее заключение: если агрегированный поток $w(t)$ представляет собой наложение множества информационных потоков отдельных абонентов, то согласно результатам работ [7, 8] процесс $\vec{w}(t)$ можно считать гауссовской случайной некоррелированной последовательностью с известным средним $\vec{w}(k)$ и спектральной плотностью мощности $N_w(t)$. Обеспечивая коммутацию каждого сетевого узла как минимум к четырём-пяти сетям доступа, создающим соизмеримые между собой по интенсивности информационные нагрузки, можно добиться желаемых статистических характеристик агрегированного потока на приграничный узел ТКС [8]. Это позволит обеспечить адекватное математическое описание системы и, в конечном итоге, получить эффективное решение поставленной задачи по реструктуризации ТКС.

4. Выбор критерия оптимальности при решении задач реструктуризации ТКС

В конечном итоге наличие в том или ином виде неопределенности стационарного состояния ТКС существенно отражается на самом процессе реструктуризации системы, который в общем случае согласно предложенной выше динамической модели сводится к расчету оптимального управления $\vec{u}(\vec{x}_t, t)$ в соответствии с выражением

$$\vec{u}(\vec{x}_t, t) = \arg \min M\{J(\vec{x}, \vec{u}, \theta, t)\}, \quad (13)$$

где $M\{a\}$ – математическое ожидание случайной величины a .

При получении численных значений вектора динамического управления сетевыми ресурсами $\vec{u}(\vec{x}_t, t)$ в процессе реструктуризации ТКС важную роль играет форма и содержание функционала J в выражении (13). Основным требованием к таким функционалам является учет значений вектора состояния ТКС и вектора динамического управления сетевыми ресурсами на протяжении интервала оптимизации $[0, t_N]$, т.е. критерий (13) не должен носить терминальный характер.

В рамках предложенной динамической модели реструктуризации ТКС задача оптимального управления (13) может быть представлена в форме задач Больца, Майера, Лагранжа и задачи на оптимальное быстроедействие [9]. Формулировка задачи Майера не обеспечивает в процессе минимизации учет значений вектора динамического управления ресурсами ТКС, а в задаче на оптимальное быстроедействие, кроме того, не учитываются значения и самого вектора состояния системы. В задаче Больца наблюдается обратная ситуация, в ней обеспечивается учет текущих значений $\bar{x}(t)$ и $\bar{u}(t)$, но кроме всего прочего особое внимание уделяется значениям вектора состояния ТКС в конце процесса оптимизации $\bar{x}(t_N)$. Но согласно физике процесса реструктуризации управление должно быть организовано на скользящем интервале $[0, t_N]$, в котором никаких дополнительных требований к значениям вектора $\bar{x}(t_N)$ не предъявляется. В этой связи, наиболее отвечает установленным требованиям интегральный функционал, представляющий задачу (13) в форме задачи Лагранжа [9]:

$$J = M \left\{ \int_0^{t_N} \left[\bar{x}^T(t) Q_x \bar{x}(t) + \bar{u}^T(t) Q_u \bar{u}(t) \right] dt \right\}, \quad (14)$$

где Q_x - диагональная положительно определенная весовая матрица, обусловленная приоритетностью очередей на узлах сетевых узлов ТКС; Q_u - диагональная положительно определенная весовая матрица, координаты которой характеризуют важность (стоимость) использования трактов передачи данных в ТКС.

Расчет управляющего вектора $\bar{u}(\bar{x}_t, t)$ связан с минимизацией стоимости использования доступных сетевых ресурсов ТКС на временном интервале $[0, t_N]$ – периоде прогнозирования состояния системы. При этом в выражении (14) слагаемое $\bar{x}^T(t) Q_x \bar{x}(t)$ характеризует стоимость использования буферных устройств сетевых узлов ТКС, а слагаемое $\bar{u}^T(t) Q_u \bar{u}(t)$ определяет стоимость использования пропускной способности трактов передачи ТКС, т.е. канальных ресурсов сети.

5. Метод реструктуризации ТКС в условиях неопределенности структурно-функциональных сетевых параметров и характеристик абонентского трафика

В основу предлагаемого метода реструктуризации будет положено решение сформулированной оптимизационной задачи (14), которое усложняется необходимостью синтеза управления $\bar{u}(\bar{x}_t, t)$ с одновременным стохастическим усреднением полученных решений. Однако предложенная модель реструктуризации, дополненная квадратичным функционалом (14), имеет одну важную особенность. Она заключается в применимости теоремы разделения [5], суть которой состоит в том, что решение исходной стохастической оптимизационной задачи можно упростить путем последовательного решения двух частных взаимосвязанных между собой задач. Первая – задача стохастического оценивания состояния ТКС ($\hat{x}(t)$) в условиях различного рода неопределенностей, а вторая – задача детерминированного управления сетевыми ресурсами, связанная с нахождением непосредственно управляющего вектора $\bar{u}(\hat{x}_t, t)$ по результатам решения задач оценивания. Таким образом, основу разрабатываемого метода реструктуризации составят модель нахождения оценок вектора состояния ТКС в различных условиях неопределенности сетевых параметров и внешних воздействий, а также модель расчета вектора динамического управления сетевыми ресурсами $\bar{u}(\hat{x}_t, t)$.

5.1. Модель адаптивного оценивания состояния ТКС в условиях неопределенности структурных и функциональных сетевых параметров

В рамках предложенной математической модели реструктуризации ТКС в условиях неопределенности стационарного состояния системы при наличии неизвестного вектора параметров неопределенности θ задача адаптивного оценивания может рассматриваться как задача совместного оценивания и идентификации [5]. В соответствии с методом разделения производится, в свою очередь, декомпозиция общей задачи оценивания на множество элементарных условных задач при фиксированном векторе параметров θ . Тогда решение исходной задачи при стационарной параметрической неопределенности получается в виде взвешенной суперпозиции решений элементарных задач оценивания с весовой функцией, в роли которой может выступать априорная $f(\theta | t_0)$ или апостериорная $\hat{f}(\theta | t, t_0)$ плотности вероятности распределения вектора θ . Выражение для оценки состояния ТКС в этом случае приобретает вид [5]

$$\hat{x}(t) = \int_{\theta} \hat{x}(\theta, t) \hat{f}(\theta | t, t_0) d\theta \quad (16)$$

с апостериорной дисперсией оценки

$$V(t) = \int_{\theta} \{V(\theta, t) + [\hat{x}(t) - \hat{x}(\theta, t)][\hat{x}(t) - \hat{x}(\theta, t)]^T\} \hat{f}(\theta | t, t_0) d\theta. \quad (17)$$

Важно отметить, что входящие в выражения (16) и (17) условные по θ среднеквадратичные оценки

$$\hat{x}(\theta, t) = M\{\bar{x}(t) | \bar{y}(t), \theta\} \text{ и } V(\theta, t) = M\{[\hat{x}(t) - \hat{x}(\theta, t)][\hat{x}(t) - \hat{x}(\theta, t)]^T | \bar{y}(t), \theta\}$$

получаются путем использования фильтра Калмана-Бьюси [10]

$$d\hat{x}(\theta, t) / dt = A(\theta, t)\hat{x}(\theta, t) + V(\theta, t)H(\theta, t)N_v^{-1}(t)[\hat{y}(t) - H^T(\theta, t)\hat{x}(\theta, t)], \quad (18)$$

$$\begin{aligned} dV(\theta, t) / dt = & A(\theta, t)V(\theta, t) + V(\theta, t)A^T(\theta, t) - \\ & - V(\theta, t)H(\theta, t)N_v^{-1}H^T(\theta, t)V(\theta, t) + G(\theta)N_wG^T(\theta). \end{aligned} \quad (19)$$

Апостериорная плотность вероятности $\hat{f}(\theta | t, t_0)$ при наличии результатов наблюдения находится из соотношения

$$\hat{f}(\theta | t, t_0) = \Lambda(t, t_0 | \theta) f(\theta) / \int_{\theta} \Lambda(t, t_0 | \theta) f(\theta) d\theta, \quad (20)$$

где $\Lambda(t, t_0 | \theta)$ – отношение правдоподобия, определяемое из выражения [5]

$$\begin{aligned} \Lambda(t, t_0 | \theta) = \exp \left\{ \int_{t_0}^t \bar{x}(\tau | \tau, t_0, \theta) H(\tau, \theta) N_v^{-1}(\tau, \theta) \bar{y}(\tau) d\tau - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \int_{t_0}^t \left| H^T(\tau, \theta) \hat{x}(\tau | \tau, t_0, \theta) \right|^2 N_v^{-1}(\tau, \theta) d\tau \right\}. \end{aligned}$$

Плотность распределения $\hat{f}(\theta | t, t_0)$ позволяет получить оценку $\hat{\theta}$ на основании выборочной статистики $\hat{y}(t)$.

Основываясь на анализе выражений (16)-(20), можно сделать вывод о том, что в соответствии с применением метода разделения для получения искомой адаптивной по θ оценки (16) можно использовать обобщенный фильтр [5, 11], структуру которого (рис. 2) определяет, с одной стороны, линейная неадаптивная часть (множество параллельно соединенных элементарных линейных фильтров, непосредственно функционально не связанных между собой, каждый из которых настроен на конкретное значение θ), а с другой стороны, – нелинейная часть, обеспечивающая необходимую адаптацию к значениям параметра неопределенности θ путем расчета апостериорной плотности вероятности $\hat{f}(\theta|t, t_0)$.

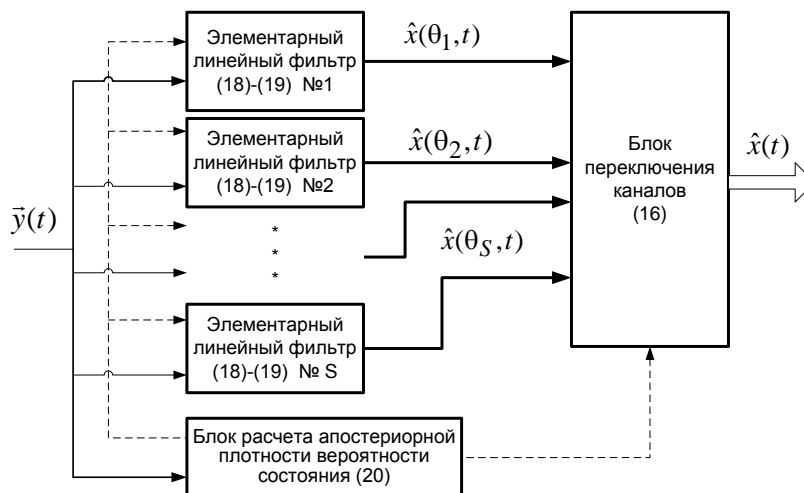


Рис. 2.

При практической реализации предложенной модели адаптивного оценивания состояния ТКС следует учитывать тот факт, что количество элементарных фильтров, входящих в состав обобщенного фильтра (рис.2), соответствует числу возможных реализаций параметра стационарной неопределенности θ . Таким образом, для получения приемлемых решений в реальном масштабе времени континуум θ должен быть представлен счетным множеством в соответствии с заданной $f(\theta)$. Согласно физике решаемой задачи параметры неопределенности динамической модели реструктуризации ТКС в основе своей дискретны, так как $\theta_{z,i}^{(b_2)} \in \{0,1\}$ (6) и $\theta_{s,i}^{(g_1)} \in \{0,1\}$ (7). Кроме того, мощность множества значений параметров статической неопределенности $\theta_{z,i}^{(b_1)} \in [0, c_{z,i}]$ (5) полностью определяется числом классов обслуживания, принятых в рамках алгоритмов обслуживания очередей СВQ, СВWFQ на узлах ТКС. Количество возможных реализаций параметров неопределенности $\theta_{i,p}^{j(a)}$ (4) и $\theta_{s,i}^{(g_2)} \in [0,1]$ (8) во многом зависит от особенностей технологической реализации соответственно механизмов статической маршрутизации и средств управления доступом.

5.2. Модель расчета управления сетевыми ресурсами в условиях реструктуризации телекоммуникационной системы

При расчете вектора динамического управления сетевыми ресурсами $\vec{u}(t)$ в каждый текущий момент времени в ходе решения задач реструктуризации ТКС в соответствии с теоремой разделения [5] необходимо основываться на полученных оценках вектора состояния системы \hat{x} , так как именно при его формировании производится учет возникновения в процессе функционирования различного рода неопределенностей. По итогам решения задач адаптивного стохастического оценивания вектора состояния

ТКС производится также фактически идентификация структуры системы, отдельных ее функциональных параметров и характеристик внешней нагрузки. В этой связи процесс расчета оптимального вектора динамического управления сетевыми ресурсами $\vec{u}(\hat{x}_t, t)$ можно полагать детерминированным.

Задача расчета $\vec{u}(\hat{x}_t, t)$ относится к классу задач оптимального управления, и ее решение должно производиться с учетом динамических ограничений (2), а также ограничений на переменные состояния (9) и управляющие переменные (11). Для решения сформулированной оптимизационной задачи существует широкий перечень методов оптимального управления [9]: метод Эйлера-Лагранжа, принцип максимума Понтрягина, метод динамического программирования Беллмана, координатно-декомпозиционные методы иерархической оптимизации, метод функций Ляпунова, другие прямые и непрямые вариационные методы.

Для примера рассмотрим особенности решения сформулированной задачи для расчета искомого вектора $\vec{u}(\hat{x}_t, t)$, когда выражение (11) заменяется условием вида

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n u_{i,l}^{j(\max)} \leq 1,$$

выполнение которого обеспечивается на этапе предварительного решения задача распределения канальных ресурсов, что во многом характерно для существующих протоколов управления пропускной способностью трактов передачи.

При отсутствии интегральных ограничений (11), а также в случае неограниченности буферного пространства сетевых узлов решение задачи (14) может быть получено в аналитическом виде [11]

$$\vec{u}(t) = -\text{sat} \left\{ [Q_u]^{-1} B^T(t) \Sigma(t) \hat{x}(t) \right\}, \quad (21)$$

где через sat обозначена функция [11]

$$\text{sat}\{u\} = \begin{cases} 0, & \text{если } u \leq 0; \\ u, & \text{если } 0 \leq u \leq u^{\max}; \\ u^{\max}, & \text{если } u^{\max} \leq u, \end{cases}$$

а симметрическая матрица определяется из обратного уравнения Рикатти

$$\dot{\Sigma}(t) = -\Sigma(t)A(t) - A^T(t)\Sigma(t) + \Sigma(t)B(t)Q_u^{-1}B^T(t)\Sigma(t) - Q_x.$$

В случае стационарности системы уравнение Рикатти преобразуется к виду [9]

$$\Sigma \cdot A + A^T \Sigma - \Sigma \cdot B \cdot Q_u^{-1} B^T \Sigma + Q_x = 0.$$

Отличительным свойством полученного решения (21) является его замкнутость. Кроме того, структура решения представляет собой произведение детерминированного коэффициента управления $[Q_u]^{-1} B^T(t) \Sigma(t)$, который в общем случае может быть рассчитан отдельно, и оптимальной в среднеквадратичном смысле оценки текущего состояния ТКС $\hat{x}(t)$. Возможность разделения задач адаптивного оценивания и детерминированного управления и определяет суть теоремы разделения. С вычислительной точки зрения подобная структура решения является достаточно предпочтительной ввиду возможности организации параллельных вычислений при расчете вектора динамического управления сетевыми ресурсами $\vec{u}(\hat{x}_t, t)$.

6. Оценка эффективности полученных решений задач реструктуризации ТКС

Важным этапом разработки и анализа моделей и методов реструктуризации ТКС является этап оценки эффективности полученных решений. В качестве общих показателей эффективности телекоммуникационных систем широко используются показатели производительности системы. Показатели производительности (скоростные показатели) во многом определяют значения не менее важных вероятностно-временных показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) [12]. Производительность определяет свойство ТКС обеспечивать с заданными вероятностно-временными показателями QoS передачу от источников к получателям требуемого объема информации. Она численно равна нагрузке, исполненной (доведенной) в единицу времени по всем направлениям связи при соблюдении требуемых значений показателей качества обслуживания.

Дополнительным показателем будет выступать показатель потерь производительности ТКС, обусловленные неточностью используемой информации о состоянии системы, при реализации того или иного метода реструктуризации по отношению к идеальному процессу наблюдения и управления. Потери производительности рассчитывались по следующему показателю:

$$\Delta D = \frac{D_{ид} - D_p}{D_{ид}}, \quad (22)$$

где $D_{ид}$ – производительность ТКС в идеальных условиях наблюдения и управления ее состоянием; D_p – производительность ТКС, получаемая в ходе реструктуризации системы при использовании различных моделей оценивания и управления ее состоянием.

В ходе проведения сравнительного анализа рассмотрению подлежали следующие методы реструктуризации ТКС:

метод 1 – метод, основанный на непосредственном измерении состояния телекоммуникационной системы;

метод 2 – метод с оцениванием состояния ТКС на основе использования фильтра Калмана-Бьюси с учетом неопределенности интенсивности трафика и процесса измерения [7, 10];

метод 3 – метод реструктуризации с оцениванием состояния ТКС с помощью робастного одношагового экстраполятора Калмана, учитывающего дополнительно возможность потерь измерений о состоянии системы [13];

метод 4 – предложенный метод реструктуризации ТКС, в основу которого положен фильтр Калмана-Бьюси с учетом неопределенности стационарного состояния системы.

Анализ эффективности сравниваемых методов реструктуризации (1 ÷ 4) производился по двум основным показателям – по ошибкам оценивания состояния ТКС (Δx) и по потерям производительности ТКС (ΔD), к которым приводили эти ошибки. В первом случае качество решений оценивалось для каждой очереди отдельно по следующему показателю:

$$\Delta x = \frac{|x_{ист} - \hat{x}|}{x_{ист}},$$

где $x_{ист}$ – истинное значение длины очереди на сетевом узле; \hat{x} – оцениваемая с использованием той или иной модели длина очереди.

Оценивание состояния ТКС производилось на различных временных интервалах $T_m = h\Delta t$, где h – количество циклов управления, на которых производилось оценивание состояния системы.

Примеры исследуемых структур ТКС приведены на рис. 3.

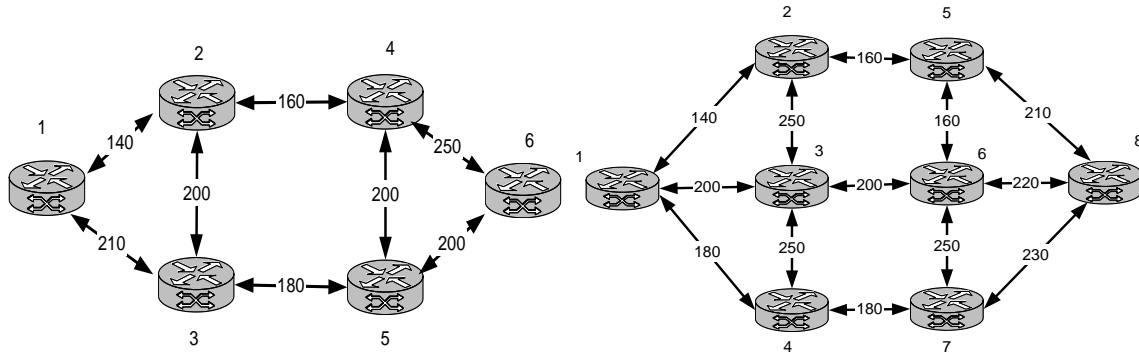


Рис. 3.

В работе исследовалось влияние величины параметров неопределенности на точность получаемых оценок и производительность ТКС в целом (рис. 4). По результатам сравнительного анализа можно сделать вывод, что в условиях стационарной неопределенности структурных параметров ТКС точность полученных оценок была улучшена в среднем на 18-25%; в условиях стационарной неопределенности параметров пропускной способности трактов передачи – на 14-22% (рис. 4 а); в условиях стационарной неопределенности порядка подключения сетей доступа и перераспределения абонентского трафика на приграничные узлы ТКС – на 20-27%; в условиях стационарной неопределенности параметров статической маршрутизации – на 8-12%, что позволило, в свою очередь, обеспечить соответствующий рост производительности системы в среднем на 12-20% (рис. 4 б).

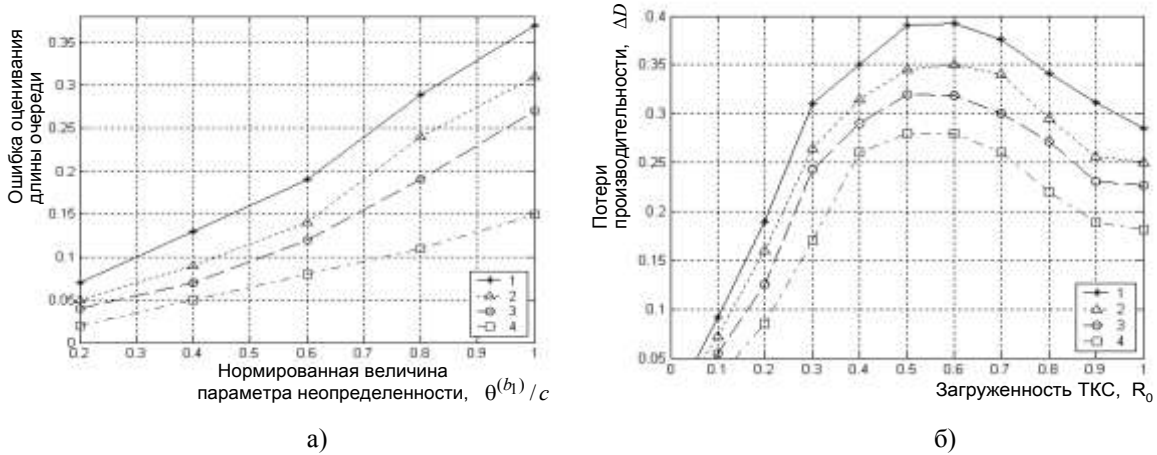


Рис. 4.

При этом показатель R_0 характеризовал загруженность ТКС, т.е. отношение суммарного объема абонентской нагрузки, поступающей на узлы сети, к пропускной способности системы. Улучшение качества полученных оценок состояния ТКС привело к повышению показателей производительности системы. Анализ результатов моделирования позволил сделать также вывод о том, что наиболее ощутимые потери производительности при ошибках оценивания состояния ТКС наблюдались в области средних нагрузок ($R_0 = 0.4 \div 0.7$). В области малых нагрузок ($R_0 < 0.3$) ошибки оценивания состояния ТКС не вызывали ощутимых потерь производительности, так как сетевых (канальных и буферных) ресурсов было достаточно, чтобы компенсировать эти ошибки. В области же высоких нагрузок ($R_0 > 0.7$) буферное пространство большинства сетевых узлов-маршрутизаторов было практически заполнено, что препятствовало росту ошибок оценивания состояния ТКС.

Выводы

Таким образом, в работе предложены модель и метод реструктуризации ТКС в условиях стационарной неопределенности структурно-функциональных сетевых параметров и характеристик абонентского трафика. Синтезированная модель представляет реструктуризацию как динамический процесс управления сетевыми ресурсами и состоянием ТКС в целом при наличии случайных стационарных воздействий, описанные путем введения соответствующего вектора параметров неопределенности, компоненты которого входили в состав матричных операторов модели.

Разработанный метод основывается на решении возникающей на выходе предложенной модели реструктуризации оптимизационной задачи, относящейся к классу вариационных задач векторной оптимизации. Применение теоремы разделения позволило определить общую структуру метода, в основу которого положены соответствующие модели (расчетные процедуры) адаптивного оценивания состояния ТКС и детерминированного управления сетевыми ресурсами в условиях неопределенности структурно-функциональных сетевых параметров и характеристик абонентского трафика. Использование предложенного метода позволило получить более точные оценки состояния и более высокие показатели производительности ТКС в целом.

Предложенные модель и метод реструктуризации ТКС являются достаточно общими, что позволяет с их помощью эффективно решать задачи адаптации и управления в условиях изменения алгоритмов функционирования и самой структуры гибридных и мультипротокольных систем, поскольку сами процедуры управления буферными и канальными ресурсами практически свободны от особенностей той или иной технологии. Структура предлагаемого метода реструктуризации ТКС полностью соответствует принципам управления, заложенным в рамках технологий сетевого управления TMN и TINA. Коррекции подлежат используемые модели и вычислительные процедуры адаптации и управления в ТКС. Развитие предложенного подхода видится в использовании нелинейных динамических моделей ТКС с анализом и выяснением областей устойчивости получаемых решений.

Список литературы: 1. *Гребешков А.Ю.* Стандарты и технологии управления сетями связи. М.: Эко-Трендз, 2003. 288 с. 2. *Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г.* Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. М.: Эко-Трендз, 2003. 384 с. 3. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загаль. ред. В.В. Поповського. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. 564 с. 4. *Поповский В.В., Звягольская Г.В., Абдельхамид Зугбор.* Методы реструктуризации телекоммуникационных сетей // Праці Українського науково-дослідного інституту радіо і телебачення. 2004. №4 (40). С. 3-6. 5. *Segall A.* The modeling of adaptive routing in data-communications networks // IEEE Trans. on communications, 1975. Vol. 25. №1. P. 85-95. 6. *Лайниотис Д.Г.* Разделение – единый метод построения адаптивных систем. I. Оценивание // ТИИЭР. 1976. Том.64, №8. С. 8-27. 7. *Остерлох Х.* Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. С.Пб.: ВHV-С.Пб., 2002. 512 с. 8. *Шаров А.Н.* Автоматизированные сети радиосвязи. Л.: Военная академия связи, 1988. 172 с. 9. *Лемешко А.В., Прозоров А.М., Чеплюк С.А.* Характеризация функциональной модели глобальной компьютерной сети // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 1999. Вып. 3. С. 110-114. 10. *Сейдж Э., Мелс Дж.* Теория оценивания и ее применения в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с. 11. *Казаков И.Е.* Статистическая динамика систем с переменной структурой. М.: Наука, 1977. 416 с. 12. *Вегенша Ш.* Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 386 с. 13. *Лемешко А.В., Момот Ю.А.* Алгоритм робастной оценки состояния сети передачи данных // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сборник научных трудов ХАИ. Выпуск №1. Х.: ХАИ, 1998. С.319-323.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники *Поступила в редколлегию*
ОАО «УКРТЕЛЕКОМ»