

# АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И МНОГОАГЕНТНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ

А. В. ТИМОФЕЕВ

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,

СПИИРАН, 14-я линия ВО, д. 39, Санкт-Петербург, 199178

<tav@ias.spb.su>

---

УДК 681.324

Тимофеев А. В. Адаптивное управление и многоагентная обработка информационных потоков в интегрированных телекоммуникационных и компьютерных сетях // Труды СПИИРАН. Вып. 3, т. 1 — СПб.: Наука, 2006.

**Аннотация.** Рассматриваются динамические (нестационарные) модели глобальных телекоммуникационных систем с переменной структурой и их обобщения. Исследуются оптимизационные алгоритмы динамической, адаптивной и нейросетевой маршрутизации и принципы многоагентной обработки информационных потоков в интегрированных инфотелекоммуникационных сетях. — Библ. 10 назв.

UDC 681.324

Timofeev A. V. Adaptive routing and multi-agent processing of information flows in integrated telecommunication and computer networks // SPIIRAS Proceedings. Issue 3, vol. 1 — SPb.: Nauka, 2006.

**Abstract.** The paper describes dynamic (non-stationary) models for global telecommunication systems with changable structure and their generalizations. Optimization algorithms for dynamic, adaptive and neural routing and principles for multiagent processing of information flows in integrated infotelecommunication networks are investigated. — Bibl. 10 items.

---

## 1. Введение

Развитие информационных и телекоммуникационных систем на современном этапе требует разработки теоретических основ проектирования интегрированных инфотелекоммуникационных сетей (ИТКС) нового поколения, включающих в себя телекоммуникационные системы (ТКС) и компьютерные сети (КС), в которых аккумулируются распределенные информационные и вычислительные ресурсы. Такие ИТКС предоставляют своим пользователям как внешним агентам высококачественные услуги для их массового удаленного доступа и эффективного использования распределенных информационных и вычислительных ресурсов с помощью IP-протоколов и других средств управляемой связи и передачи информации.

Совершенствование ИТКС связано прежде всего с развитием методологии автоматизации, адаптации и интеллектуализации систем сетевого управления информационными потоками на базе динамических (нестационарных) моделей ТКС как сложных объектов управления с переменной структурой, методов оптимизации процессов маршрутизации информационных потоков и принципов адаптивного и интеллектуального управления трафиком с использованием многоагентных технологий и протоколов нового поколения (IPv6 и др.). На этом новом пути возможен как учет реальной динамики ТКС, т.е. фактического состояния или изменения структуры (топологии) и параметров (весов каналов связи)

ТКС в реальном времени, так и адаптация к различным факторам неопределенности на основе мониторинга и функциональной диагностики ИТКС.

В статье рассматриваются динамические модели глобальных ТКС с переменной структурой и их обобщения, оптимизационные алгоритмы и средства динамической, адаптивной и нейросетевой маршрутизации и методы многоагентной обработки информационных потоков, возникающих в ИТКС. Эти модели, методы и протоколы для проектирования ТКС нового поколения отражают опыт и научный задел, полученные в процессе выполнения в 2002–2004 годах госконтракта №37.029.0027 на тему «Адаптивные методы управления потоками данных в телекоммуникационных системах нового поколения» Федерального агентства по науке и инновациям в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» [1–7]. Новые результаты для создания ИТКС получены в рамках гранта РГНФ № 03-06-12019в и проекта № 1.6 «Разработка методов адаптивной маршрутизации информационных потоков и оптимизации архитектуры телекоммуникационных систем на основе многоагентных и GRID-технологий» Программы № 15 Президиума РАН.

## **2. Архитектура телекоммуникационных систем и роль сетевого управления информационными потоками**

Глобализация и другие современные тенденции развития ТКС как средства управляемой передачи информационных потоков и удаленного доступа внешних агентов-пользователей к КС привели не только к существенному пересмотру основных телекоммуникационных концепций, но и к значительным технологическим сдвигам.

Взрывной рост трафика реального времени и его мультимедийный характер зачастую порождают сетевые конфликты и перегрузки, блокируя нормальную работу ТКС и удаленный доступ к распределенным в КС информационным и вычислительным ресурсам. Бурное развитие новых видов услуг (дистанционное обучение, электронная коммерция и т.п.) резко повысило требования к качеству обслуживания пользователей и защите информации. Возникшие проблемы привели к необходимости создания новых математических и имитационных моделей ТКС как сложных динамических объектов управления, алгоритмов и протоколов маршрутизации потоков данных, принципов многоагентной обработки информации и методов адаптивного сетевого управления с автоматическим разрешением или предотвращением сетевых конфликтов.

Архитектура глобальной ТКС, предложенная в [1], состоит из четырех основных (базисных) подсистем:

- распределенная система связи (РСС);
- сетевая система управления (ССУ);
- распределенная информационная система (РИС);
- распределенная транспортная система (РТС).

Эти подсистемы взаимосвязаны и предназначены для управляемой передачи внешним агентам-пользователям ТКС по их запросам распределенных в КС информационных и вычислительных ресурсов. Центральную роль в человеко-машинном интерфейсе и эффективной организации и передачи информационных потоков играют ССУ.

ССУ нового поколения должны быть адаптивными и интеллектуальными [1–7], т.е. обладать способностями к:

- адаптации (автоматической самонастройке) по отношению к изменяющемуся количеству пользователей, их запросов «по интересам» и персональных требований к качеству предоставляемых услуг, к изменяющимся структуре (топологии) ТКС и параметрам (весам) узлов и каналов связи и т.п.;
- обучению и самообучению новым функциям и правилам функционирования ИТКС;
- самоорганизации структуры и функций ССУ в зависимости от изменений в ИТКС;
- предсказанию и предотвращению отказов и сетевых конфликтов.

### **3. Оптимизация и адаптация при управлении трафиком и маршрутизации информационных потоков**

Задача управления трафиком в глобальных ТКС распадается на две взаимосвязанные задачи [1–5]:

- планирование, оптимизация и адаптация маршрутов передачи потоков данных между узлами ТКС по доступным каналам связи;
- управление передачей потоков данных по заданным маршрутам с адаптацией к изменяющемуся трафику, возможным перегрузкам или изменениям топологии или параметров ТКС.

Традиционная статическая постановка задачи планирования и оптимизации маршрутов передачи данных основывается на предположении, что структура (число узлов, топология) и параметры (стоимость каналов связи) ТКС известны и неизменны. При этом в роли внешнего агента-пользователя ТКС обычно выступает один клиент, формирующий запрос к одному из узловых компьютеров сети.

Динамическая постановка задачи исходит из того, что структура или параметры ТКС могут изменяться с течением времени, но при этом остаются известными. В этом случае сетевая информация о ТКС обновляется, что приводит к автоматическому изменению (пересчету) оптимальных маршрутов передачи потоков данных.

При адаптивной постановке задачи маршрутизация осуществляется в условиях неопределенности, когда топология и параметры каналов связи ТКС, а также трафик и число пользователей могут непредсказуемо изменяться. При этом доступная информация о ТКС обычно имеет локальный характер. Мониторинг и обновление сетевой информации по каналам обратной связи позволяют адаптивно скорректировать маршруты и алгоритмы управления потоками данных [1–5].

### **4. Нестационарная графовая модель телекоммуникационной системы и ее обобщение**

Динамическая (нестационарная) модель ТКС с переменной структурой и изменяющимися параметрами описывается графом [1]

$$G(t) = G(A(t), R(t), W(t)), t \in [t_0, t_T], \quad (1)$$

где  $A$  — узлы,  $R$  — каналы связи,  $W$  — веса (параметры) каналов связи ТКС, которые могут изменяться с течением времени на заданном интервале  $[t_0, t_T]$ . Использование таких «динамических» графов и соответствующих им матрич-

ных моделей ТКС обусловлено тем, что реальная динамика ТКС с переменной структурой и изменяющимися параметрами все еще слабо изучена.

Обычно нестационарная графовая модель ТКС рассматривается как фиксированный граф  $G(t) = G$  или как последовательность фиксированных графовых моделей

$$G(t_k) = G(A(t_k), R(t_k), W(t_k)), t \in [t_k, t_{k+1}), k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

не изменяющих свою структуру (топологию связей) и параметры (скалярные веса каналов связи) на известных или неизвестных (непредсказуемо изменяющихся) интервалах времени. При этом вес  $w_{ij}$  канала связи между  $i$ -ым и  $j$ -ым узлом задается как скалярный параметр (например, пропускная способность канала связи).

Однако на практике каналы связи могут быть разнородными и иметь различную физическую природу. Поэтому они в общем случае характеризуются не одним, а различными параметрами, т.е. вектором параметров. Например, волоконно-оптический кабельный канал связи характеризуется не только своей высокой пропускной способностью, но и стоимостью и длиной кабеля, затратами на его прокладку и т.п. Каналы спутниковой связи и радиоканалы также характеризуются вектором специфических параметров (весов).

Узлам глобальных ТКС в действительности соответствуют различные технические элементы: компьютеры, серверы, концентраторы и т.п. Поэтому выход из строя или появление новых узлов окажет различное влияние на функционирование ТКС в целом. Для эффективной маршрутизации и управления потоками данных важно  $i$ -му узлу ТКС поставить в соответствие его вес  $V$  или соответствующий вектор параметров  $v_i$ .

Учет изменяющихся весов узлов и каналов связи глобальной ТКС, которые вообще говоря, являются векторными параметрами, возможен в рамках следующей обобщенной динамической («векторной») графовой модели ТКС

$$G(t) = G(A(t), V(t), R(t), W(t)), t \in [t_0, t_T) \quad (3)$$

или последовательности соответствующих фиксированных графовых моделей «векторного» типа на заранее известных или неизвестных интервалах времени  $t \in [t_k, t_{k+1}), k = 0, 1, 2, \dots$

Необходимость в динамической и адаптивной маршрутизации потоков данных в глобальных ТКС возникает в следующих случаях:

- изменение весов узлов или стоимости каналов связи ТКС (например, при их замене);
- отказ (выход из строя) в ТКС одного или нескольких каналов связи;
- добавление в ТКС новых каналов связи;
- отказ (выход из строя) одного или нескольких узлов ТКС;
- добавление в ТКС новых узлов;
- перегрузка каналов связи ТКС;
- перегрузка (переполнение) буферов узлов ТКС.

Многоагентная обработка информационных потоков требует разработки методов динамической и адаптивной маршрутизации в условиях многоадресной и, возможно, многопоточковой передачи информационных потоков коллективного использования ТКС, когда число внешних агентов-клиентов ТКС, а также количество и характер их запросов могут непредсказуемо изменяться с течением времени. В этом случае могут возникать сетевые перегрузки и кон-

фликты, для компенсации или предотвращения которых нужны специальные средства и алгоритмы [3–7].

## 5. Критерии маршрутизируемости информационных потоков

Пусть ТКС задана своей графовой моделью, т.е. орграфом  $G(A, R, W)$ . Назовем простой таблицей маршрутизации  $\tau_i$  узла  $a_i \in A$  отображение множества узлов  $A$  ТКС на множество узлов-соседей  $A_i \in A$  узла  $a_i$ , т.е.

$$\tau_i : A \rightarrow A_i. \quad (4)$$

С каждым узлом ТКС  $a_i \in A$  свяжем локальную базу данных (БД) и локальную базу знаний (БЗ) маршрутизации. БД определяется как результат отображения  $\tau_i$ , т.е. набором пар узлов из  $A_i \times \tau_i(A_i)$ , а БЗ — как само отображение  $\tau_i$ . Это позволяет учитывать в БЗ дополнительные характеристики ТКС, такие как топология сети, стоимости каналов связи и т.п.

Пусть для каждого узла ТКС задана связанная с ним БД — простая таблица маршрутизации. Назовем множество таких таблиц простой картой маршрутизации ТКС. Формально карту маршрутизации глобальной ТКС можно представить в виде набора локальных БД

$$T = \{\tau_i\}_{i=1}^N. \quad (5)$$

Карта маршрутизации  $T$  может быть реализована как распределенная по узлам ТКС БД, представляющая собой совокупность простых таблиц маршрутизации. На этой карте не проводится предварительная (априорная) прокладка маршрутов от одного узла ТКС к другому, а осуществляется только определение «соседей» для каждого узла ТКС.

Сетевое управление прокладкой маршрутов ведется следующим образом: фиксируется узел-получатель данных  $f$  и для него от узла-источника  $s$  посредством последовательных отображений строится последовательность узлов ТКС, определяющих маршрут передачи информационных потоков вида

$$s = a_0, a_1, a_2, \dots, a_k = f. \quad (6)$$

При этом для любого  $i = 1, 2, \dots, k$  для маршрута (6) справедливо соотношение

$$\tau_{i-1}(f) = a_i. \quad (7)$$

Карту маршрутизации ТКС и соответствующую ей БД будем называть корректной, если по ней можно проложить маршрут передачи данных между любыми двумя узлами графа  $G(A, R, W)$ .

Критерий, позволяющий прокладывать с помощью карты маршрутизации маршруты передачи пакетов данных между любыми двумя узлами ТКС, будем называть критерием коммуникабельности (маршрутизируемости) ТКС.

Основываясь на глобальной БД, реализующей карту маршрутизации ТКС, этот критерий можно сформулировать в виде следующей теоремы.

**Теорема.** Карта маршрутизации ТКС корректна тогда и только тогда, когда для любого узла  $f \in A$  и для любого разбиения множества  $A$  на непустые множества  $A_1$  и  $A_2$ , такие что  $f \in A_2$ , найдутся узлы  $a \in A_1$  и  $a \in A_2$ , для которых справедливо соотношение (7).

Из этой теоремы следует, что для любого узла-источника данных  $s$  и любого узла-получателя данных  $f$  из множества  $A$  узлов ТКС существует мар-

шрут передачи пакетов данных, т.е. последовательность узлов вида (6), такой, что для всех  $i = 1, 2, \dots, k$ , справедливо соотношение (7).

Другие критерии маршрутизации ТКС сформулированы в [8].

## **6. Методы адаптивной маршрутизации и принципы многоагентной обработки информационных потоков**

Как отмечается в 6-м издании монографии [10], «адаптивная маршрутизация — это задача, которую весьма трудно решить должным образом. Доказательством этого может служить тот факт, что наиболее крупные сети с пакетной коммутацией (такие, как ARPANET и ее «наследники», TYMNET и сетевые архитектуры IBM и DEC) неоднократно претерпели значительные изменения принципов маршрутизации».

Адаптивная маршрутизация потоков данных имеет ряд преимуществ по отношению к неадаптивной (статической или динамической) маршрутизации, а именно:

- обеспечивает работоспособность и надежность ССУ при непредсказуемых изменениях структуры или параметров ТКС;
- приводит к более равномерной загрузке узлов и каналов связи ТКС за счет «выравнивания» нагрузки или адаптации к сетевым перегрузкам;
- упрощает управление потоками данных при сетевых перегрузках или сетевых конфликтах;
- увеличивает время безотказной работы при непредсказуемых изменениях параметров и структуры ТКС.

Принцип адаптивной маршрутизации основывается на передаче локальной информации (в форме локальной обратной связи) от соседних узлов или глобальной информации (в форме глобальной обратной связи) от всех узлов ТКС. Эта информация содержит данные об отказах или задержках в узлах или каналах связи ТКС и т.п.

Модели адаптивной маршрутизации и управления потоками данных в глобальных ТКС можно разбить на три класса [1,3]:

- централизованная (иерархическая) маршрутизация;
- децентрализованная (распределенная) маршрутизация;
- многоагентная (гибридная) маршрутизация.

Принцип централизованной маршрутизации заключается в том, что каждый узел ТКС передает информацию о своем состоянии центральному узлу-маршрутизатору, который вычисляет оптимальный маршрут.

Принцип децентрализованной маршрутизации основывается на обмене локальной информацией между узлами ТКС для вычисления локально-оптимального маршрута.

Многоагентная маршрутизация является своеобразным гибридом (компромиссом) между централизованной и децентрализованной маршрутизацией. Она основывается на много-адресной или многопоточковой маршрутизации, адаптации к факторам неопределенности и анализе возможных сетевых конфликтов с целью их предотвращения или разрешения в процессе управляемой передачи потоков данных по множеству оптимальных или локально-оптимальных маршрутов. Модели и методы многоагентной маршрутизации в глобальных ТКС описаны в [3–5,8].

## **7. Сетевые и нейросетевые агенты в глобальных телекоммуникационных системах**

Основные функции обработки информации, самоорганизации и управления информационными потоками по запросам внешних агентов-пользователей глобальной ТКС распределяются между внутренними агентами, роль которых выполняют сетевые или нейросетевые агенты.

Архитектура этих внутренних сетевых агентов аналогична архитектуре ТКС. В этом проявляется фрактальность сетевых и нейросетевых агентов по отношению к ТКС и ее подсетям как автономным системам [5,7].

Каждый внутренний сетевой или нейросетевой агент имеет собственную локальную БД и локальную БЗ, а также средства связи с другими агентами для обмена информацией в процессе совместного принятия решений, самоорганизации по «интересам» и автоматического формирования сетевого управления РТС, обеспечивающего адресную доставку информационных и вычислительных ресурсов по запросам внешних агентов-пользователей глобальной ТКС.

Сетевые агенты способны самостоятельно принимать локальные решения и обеспечивать их исполнение. Поэтому они могут решать возникающие задачи как автономно, так и коллективно.

Нейросетевые агенты предназначены прежде всего для параллельной передачи и обработки сложных мультимедийных сигналов и образов (2D- или 3D-изображения и т.п.). В результате обучения по множеству прецедентов из обучающей БД осуществляется настройка архитектуры (топологии сетевых нейронов) и параметров (синаптических весов) нейронных агентов на решаемую задачу [1–4].

В последнее время разработаны модели нейросетевых агентов для адаптивной маршрутизации (агенты-маршрутизаторы) и автоматической классификации WEB-сайтов на естественном (русском) языке (агенты-классификаторы). Программная реализация и имитационное моделирование этих агентов свидетельствует об их эффективности и преимуществах по отношению к традиционным средствам [9].

Для управляемой адресной передачи и навигации потоков данных, разрешения сетевых конфликтов, функциональной диагностики и распознавания состояний глобальной ТКС нового поколения целесообразно ввести специальных агентов-координаторов [1–6]. Особенность этих координирующих агентов заключается в том, что их БД и БЗ формируются на основе локальных БД и БЗ агентов более низкого уровня. Поэтому они имеют глобальный характер и позволяют оценивать сетевую ситуацию «в целом».

## **8. Многопоточная маршрутизация и отказоустойчивость управления информационными потоками**

Основными недостатками однопоточной маршрутизации в ТКС являются следующие ее особенности [1,10]:

- неисправность или отказ хотя бы одного узла или канала связи ТКС, через которые проходит оптимальный маршрут передачи потоков данных, требуют трудоемкого перепланирования (пересчета) оптимального маршрута (или его части) с учетом неисправных узлов или каналов связи;

- спланированный маршрут между любыми заданными узлом-источником и узлом-получателем ТКС может породить сетевые перегрузки в то время, когда другие (например, соседние) узлы и каналы связи могут быть свободными или недогруженными.

Для преодоления этих трудностей целесообразно использовать многопотокową маршрутизацию. При этом одновременно планируется не один (например, оптимальный) маршрут передачи пакетов данных вида (6), (7), а  $K \geq 2$  таких маршрутов. Чем больше число  $K$ , тем больше вероятность гарантированной доставки пакетов данных от узла-источника к узлу-получателю. Вследствие этого увеличивается надежность и отказоустойчивость глобальной ТКС [1, 8].

При централизованной многопотковой маршрутизации осуществляется априорное планирование  $K \geq 2$  оптимальных или субоптимальных маршрутов по имеющейся (фиксированной) или обновленной (динамической) информации о состоянии ТКС.

При децентрализованной маршрутизации в каждом последующем узле маршрута, начиная с узла-источника, планируется  $K \geq 2$  оптимальных или субоптимальных маршрутов передачи потоков данных к узлу-получателю. Такой метод апостериорного планирования  $K$  маршрутов «от достигнутого узла» требует специального механизма предотвращения циклов (замкнутых маршрутов) [8].

Главное достоинство метода апостериорной  $K$ -потковой маршрутизации заключается в том, что он обеспечивает автоматический «обход» отказавших узлов или каналов связи ТКС. Это позволяет быстро обновлять информацию о текущем состоянии ТКС и вносить необходимые коррективы адаптивного характера в таблицы и карты маршрутизации [3,7,8].

## 9. Заключение

Предлагаемые математические модели и оптимизационные методы динамической, адаптивной, нейросетевой и многоагентной (много-адресной и многопотковой) маршрутизации информационных потоков для глобальных ИТКС нового поколения представляются важным шагом в направлении создания теории адаптивного многоагентного (массового) обслуживания глобальных информационных и телекоммуникационных сетей [1]. Эта новая теория должна прийти на смену традиционной статистической теории массового обслуживания. Полученные результаты могут быть полезны для создания нового поколения научно-образовательных IP-сетей или для организации адаптивного многоагентного (массового) обслуживания GRID-инфраструктур различного масштаба и назначения.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 05-01-08044-офи и проекта № 1.6 Программы № 15 Президиума РАН "GRID".

## Литература

1. Тимофеев А. В. Проблемы и методы адаптивного управления потоками данных в телекоммуникационных системах // Информатизация и связь. 2003. № 1–2. С. 68–73.
2. Тимофеев А. В. Методы высококачественного управления, интеллектуализации и функциональной диагностики автоматических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 2. С. 13–17.
3. Syrtzev A. V., Timofeev A. V. Neural and Multi-Agent Routing in Telecommunicational Networks // International Journal "Information Theories and Their Applications". 2003. Vol.10, no. 2. P. 167–172.



4. *Timofeev A. V.* Models for Multi-Agent Dialogue and Informational Control in Global Telecommunication Networks // International Journal "Information Theories and Their Applications". 2003. Vol. 1, no. 1. P. 178–180.
5. *Timofeev A. V.* Multi-Agent Information Processing and Adaptive Control in Global Telecommunication and Computer Networks // International Journal "Information Theories and Their Applications". 2003. Vol. 10, no. 1. P. 54–60.
6. *Timofeev A.V., Syrtsev A.V., Kolotaev A.V.* Network Analysis, Adaptive Control and Imitation Simulation for Multi-Agent Telecommunication Systems // Proceedings of International IFAC-Conference Physics and Control 2005 (August 24-26, 2005, Saint-Petersburg, Russia). 2005. Vol. 1, no.1. P. 235–244.
7. *Timofeev A.V.* Adaptive Control and Multi-Agent Interface for Infotelecommunication Systems of New Generation // International Journal "Information Theories & Applications". 2004. Vol.11, no. 2. P. 329–336.
8. *Тимофеев А. В. Сырцев А. В.* Модели и методы маршрутизации потоков данных в телекоммуникационных системах с изменяющейся динамикой // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2005. № 8. С. 32.
9. *Тимофеев А. В., Борисова П. В., Мышков П. С.* Разработка Web-классификаторов и нейронных агентов для инфотелекоммуникационных сетей // Материалы научно-технической конференции «Модели устойчивого регионального развития». 2005. С. 212–215.
10. *Столингс В.* Современные компьютерные сети. СПб.: Питер, 2003. С. 783.