

## МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ И GRID-СЕТЯХ

Адиль Тимофеев

**Аннотация:** Рассматриваются проблемы и методы интеллектуального сетевого управления информационными потоками в мультиагентных телекоммуникационных системах и GRID-сетях. Значительное внимание уделяется принципам построения и оптимизации сетевых и нейросетевых агентов, обеспечивающих интеллектуальный анализ информационных потоков и адаптивное сетевое управление в условиях неопределённости в нечёткой среде.

**Keywords:** интеллектуальное управление, мультиагентные технологии, телекоммуникационные системы, GRID-сети.

**ACM Classification Keywords:** E.4 CODING AND INFORMATION THEORY

---

### Введение

---

Развитие информационных и телекоммуникационных технологий на современном этапе требует разработки теоретических основ проектирования и имитационного моделирования глобальных телекоммуникационных систем (ТКС) нового поколения и средств их интеграции с GRID-сетями, в которых аккумулируются распределенные информационные и вычислительные ресурсы. Такие интегрированные ТКС и GRID-сети предоставляют своим многочисленным 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 информационных потоков.

---

### 1. Проблемы сетевого управление и интеллектуального анализа информационных потоков

---

Совершенствование глобальных ТКС и GRID-сетей связано прежде всего с развитием методологии автоматизации, адаптации и интеллектуализации систем сетевого управления информационными потоками на базе динамических моделей ТКС как сложных объектов управления с переменной структурой и нечёткими или частично неопределёнными условиями эксплуатации. Важное значение имеет также разработка инновационных методов оптимизации процессов маршрутизации информационных потоков и принципов адаптивного и интеллектуального управления трафиком с использованием мульти-агентных 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 в нечёткой среде, так и адаптация к различным факторам неопределенности на основе мониторинга и функциональной диагностики мультиагентных ТКС [1–2].

---

## 2. Архитектура мультиагентных ТКС и GRID-сетей

---

Архитектуру глобальных ТКС или распределённых GRID-сетей можно представить как сложную систему, состоящую из четырёх основных (базисных) подсистем [2]:

- 1) Распределенная система связи (РСС);
- 2) Сетевая система управления (ССУ);
- 3) Распределенная информационная система (РИС);
- 4) Распределенная транспортная система (РТС).

Эти подсистемы взаимосвязаны и предназначены для управляемой передачи внешним агентам-пользователям ТКС по их запросам информационных и вычислительных ресурсов, распределённых в GRID-средах.

Центральную роль в эффективной организации и управляемой передаче информационных потоков играют ССУ. ССУ нового поколения должны быть адаптивными и интеллектуальными [2], т.е. обладать способностями к адаптации (автоматической самонастройке) по отношению к изменяющемуся количеству пользователей с учетом их запросов «по интересам» и персональных требований к качеству предоставляемых услуг, к изменяющимся структуре (топологии) ТКС и параметрам (весам) узлов и каналов связи в нечёткой или частично неопределённой среде.

Интеллектуальная ССУ основана на обучении и самообучении новым функциям и правилам функционирования ТКС и GRID-сетей, а также на самоорганизации структуры и функций ССУ в зависимости от возможных изменений в РТС и РИС и предотвращении отказов и сетевых конфликтов.

---

## 3. Методы маршрутизации и адаптации сетевого управления информационными потоками

---

Традиционная статическая постановка задачи планирования и оптимизации маршрутов передачи данных основывается на предположении, что структура (число узлов, топология связей) 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 ТКС [1].

Динамическая постановка задачи маршрутизации 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 (пересчёту) оптимальных маршрутов передачи потоков данных в системе сетевого управления.

Адаптивная постановка задачи предполагает, что маршрутизация и сетевое управление осуществляются в условиях неопределённости в нечёткой среде, когда топология и параметры каналов связи ТКС, а также трафик и число пользователей могут непредсказуемо изменяться в широких пределах. 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 сетевого управления потоками данных [1–2].

Первые системы управления в глобальных ТКС выполняли в автоматизированном режиме (т.е. с участием человека) важные, но сравнительно простые функции. К ним, прежде всего, относятся:

- управление телекоммуникационным оборудованием;
- контроль изменяющегося трафика ТКС.

Примером программного обеспечения такой системы управления может служить программный продукт Sun Net Manager, разработанный компанией Sun Soft в 1989 году [1].

Кроме глобальной системы сетевого управления, существуют локальные системы, управляющие различными компонентами ТКС, а именно:

- локальные системы управления базами данных;
- локальные операционные системы;
- локальные системы управления приложениями;

В соответствии со стандартом ISO 7498-4 и рекомендациями ИТО-TX.700 задачи управления ТКС разбиты на пять подзадач, называемых обычно функциональными группами [1, 7]:

1. управление конфигурацией сети (Network Configuration Management);
2. обработка неисправностей (Fault Manager);
3. управление производительностью (Performance Manager);
4. управление безопасностью (Security Manager);
5. организация учета (Accounting Management);

Подзадача 1 заключается в формировании и корректировке топологической карты ТКС, определяющей текущую конфигурацию ТКС (физические и логические каналы связи, сетевые адреса и имена-идентификаторы, таблицы коммутации, протоколы маршрутизации и т.п.). Обычно управление конфигурацией ТКС осуществляется в полуавтоматическом режиме.

Подзадача 2 по существу сводится к диагностике и локализации неисправностей (сбоев и отказов) на базе сообщений об ошибках в компонентах ТКС. На этой основе осуществляется автоматическое или полуавтоматическое перераспределение информационных потоков в обход неисправных сетевых элементов, а также устранение обнаруженных дефектов (неисправностей).

Подзадача 3 заключается в оценке основных показателей (время реакции, пропускная способность, интенсивность трафика, время устранения неисправности, коэффициент готовности и т.п.), характеризующих производительность и надежность ТКС с целью обеспечения пользователей ТКС необходимым уровнем обслуживания в соответствии с договором об уровне обслуживания (Service Level Agreement), заключенным между пользователями и администраторами ТКС.

Подзадача 4 включает в себя контроль доступа пользователей к распределенным информационным и телекоммуникационным ресурсам (данным и оборудованию ТКС) и поддержание целостности данных при их хранении и передаче по каналам связи ТКС. Основными процедурами управления безопасностью ТКС являются аутентификация пользователей, проверка и назначение прав доступа к ресурсам ТКС, распределение полномочий и ключей шифрования и т.п. Часто решение этой подзадачи возлагается не на систему управления ТКС, а на специальные (заказные) средства безопасности (системы шифрования данных, специальные операционные системы и т.п.).

Подзадача 5 сводится к регистрации времени использования телекоммуникационного оборудования с оплатой за предоставленные ресурсы ТКС. Обычно решение этой подзадачи реализуется в специальных (заказных) системах и не является функцией управления ТКС.

Главной целью сетевого управления ТКС является быстрая доставка (транспортировка) необходимой информации пользователям ТКС с высоким качеством предоставляемых услуг. С этой точки зрения общую задачу управления ТКС можно разделить на три взаимосвязанные подзадачи:

- управление потоками данных для всех видов гетерогенного трафика;
- управление телекоммуникационным оборудованием;
- административное управление производительностью и конфигурацией ТКС.

В глобальных ТКС (например, в Internet) управление передачей и распределением (маршрутизацией) потоков данных должно осуществляться не по жесткой программе, а “в россыпь” по непредсказуемо изменяющимся запросам пользователей или узловых компонентов ТКС.

Традиционный подход к управлению ТКС зачастую не обеспечивает интерактивность в реальном времени (например, речевой диалог без задержек). Другими недостатками традиционного подхода являются неадаптивность (по отношению к изменяющемуся трафику) управления потоками информации, невозможность автоматического предотвращения сетевых конфликтов, распознавания неисправностей и реконфигурирования ТКС без участия человека (администратора сети) и т.п.

#### **4. Особенности мультиагентного управления потоками данных в ТКС**

При проектировании и эксплуатации современных телекоммуникационных сетей (ТКС) важную роль играют системы управления потоками передаваемых данных. Однако теория управления ТКС (в отличие, например, от теории автоматического управления движением самолетов, роботов и других подвижных объектов) развита слабо. Поэтому возникает необходимость в постановке, формализации и решении задач управления, обработки и передачи информации в ТКС с учётом их особенностей и неопределённости условий эксплуатации [2].

Специфика ТКС как объекта управления заключается в распределённом характере компонент ТКС и управляемых потоков разнородных (гетерогенных) данных, передаваемых через узлы ТКС по различным маршрутам и каналам связи. Вследствие этого система управления ТКС также должна быть распределённой и иметь многоуровневую иерархическую структуру [2–5].

На каждом уровне этой системы возникают специфические цели и задачи управления. Однако многие из этих целей не формализованы, а задачи не решены (в том смысле, что для этих задач отсутствуют теоретически обоснованные модели и алгоритмы управления). Поэтому в настоящее время значительное внимание уделяется постановке и решению задач управления потоками данных в условиях неопределённости и сетевых конфликтов.

Неопределённость условий эксплуатации ТКС проявляется в непредсказуемом характере изменения и гетерогенности сетевого трафика. Кроме того, неопределённым является и число пользователей ТКС, которое может значительно изменяться в течение суток. В ТКС могут возникнуть сбои или отказы отдельных компонент, а также разного рода сетевые конфликты. Поэтому необходимы адаптация к трафику, мониторинг и диагностика состояний ТКС и классификация и разрешение сетевых конфликтов.

Указанные особенности ТКС требуют исследования и разработки адаптивного подхода к решению задач управления потоками данных в ТКС на базе современных интеллектуальных и мультиагентных технологий. Предлагаемые методы адаптивного и интеллектуального управления обеспечивают адаптацию к непредсказуемо изменяющемуся трафику, адаптивную маршрутизацию потоков данных, мульти-агентную обработку информации, функциональную диагностику ТКС, распознавание и разрешение сетевых конфликтов [2–7].

Широкий класс сложных распределённых ТКС может быть представлен как мультиагентная система (МАС). При этом в роли агентов ТКС как МАС выступают либо пользователи (внешние агенты) ТКС, либо

узловые компьютеры или локальные ТКС (внутренние агенты). Характерными чертами этих внутренних агентов ТКС является наличие локальных баз данных и знаний и телекоммуникационных каналов связи для обмена информацией между агентами в процессе совместного использования распределенных информационных ресурсов и обработки информации.

Главная особенность мультиагентной обработки информации и управления заключается в том, что сначала сложная задача декомпозируется (фрагментируется) на ряд локальных задач, решение которых распределяется (распараллеливается) между агентами, а затем результаты решения этих локальных задач агрегируются (интегрируются) и реализуются с помощью телекоммуникационных ресурсов.

Работа МАС обработки информации при интеллектуальном анализе одерживается ТКС, реализующей сетевые технологии передачи данных между агентами. Коммуникация между удаленными агентами осуществляется на уровне их локальных баз данных и знаний путём управляемого обмена сообщениями в процессе решения локальных (индивидуальных) или общих (глобальных) задач.

Значительный теоретический и практический интерес представляют две стратегии мультиагентной обработки и передачи информации:

- с координатором (когда один из агентов отвечает за координацию поведения всех остальных агентов);
- и без координатора (когда все агенты "равноправны" и не подчиняются ведущему агенту-координатору).

При мультиагентном управлении потоками данных в ТКС возникает необходимость в разработке методов автоматического предотвращения или разрешения сетевых конфликтов, которые могут возникать между агентами ТКС. Важное значение имеют мультиагентные модели и алгоритмы обработки информации (репликация кода, фрагментация данных, адаптивная маршрутизация и т.п.).

При проектировании систем управления потоками данных в ТКС важную роль играет надёжность используемого оборудования. Надёжность глобальной ТКС тем ниже, чем больше узловых компьютеров входит в состав ТКС. Это объясняется тем, что с увеличением числа узлов ТКС возрастает вероятность выхода из строя одного или нескольких компьютеров. Поэтому возникает необходимость в адаптивном управлении и мультиагентной обработке информации в ТКС, гарантирующих решение задач при непредсказуемом изменении трафика, сбое или отказе одного или нескольких узловых компьютеров ТКС [4–7].

---

## 5. Многопоточковая маршрутизация в мультиагентных ТКС

---

Многопоточковая маршрутизация является задачей, близкой к много-адресной маршрутизации. Отличием является то, что в многопоточковой маршрутизации один узел-источник и один узел-получатель, а передаваемые потоки данных дублируются и передаются по разным маршрутам.

Многопоточковая динамическая маршрутизация полезна в тех случаях, когда планирование маршрутов производится с учетом возможности выхода из строя какого-то участка ТКС, через который пройдет поток данных. При этом случае каждый узел ТКС будет «знать» один или несколько запасных маршрутов, по которым можно будет передавать поток данных. Использование «запасных» маршрутов зависит от стратегии управления потоками данных в ТКС.

Сформулируем задачу K-поточковой маршрутизации при  $K \geq 2$  [4–7].

Рассмотрим графовую модель ТКС

$$G=G(A, R, W), \tag{1}$$

где  $A$  – множество вершин графа  $G$ , соответствующих узлам ТКС,  $R$  – множество однонаправленных дуг  $G$ , соответствующих каналам связи, а  $W$  – множество весов ребер (каналов связи), соответствующих некоторым числовым характеристикам (параметрам) каналов связи, определяющих их «стоимость». Стоимость маршрута определяется как суммарная стоимость составляющих его рёбер (каналов связи).

Будем говорить, что два маршрута пересекаются, если они имеют общие вершины, отличные от начальной и конечной.

Пусть выбраны два узла  $s \in A$  – узел-источник, а  $d \in A$  – узел-получатель. Необходимо проложить  $K$  непересекающихся маршрутов из  $s$  в  $d$ , таких, что их суммарная стоимость наименьшая из всех возможных вариантов.

Введем необходимые обозначения. Пусть все несамопересекающиеся маршруты из  $s$  в  $d$  проиндексированы. Обозначим  $i$ -й маршрут из  $s$  в  $d$  как  $i_{sd}$ , а его стоимость – как  $w(i_{sd})$ . Если  $i$ -й и  $j$ -й маршруты не пересекаются, то будем обозначать этот факт следующим образом:  $i_{sd} \nabla j_{sd}$ .

Определим все возможные множества из  $K$  непересекающихся маршрутов из  $s$  в  $d$  в виде

$$I = \{i_{sd}\} : \begin{cases} \forall i_{sd}, j_{sd} \in I : i_{sd} \nabla j_{sd}, \\ |I| = K. \end{cases} \quad (2)$$

Зададим над этими множествами функционал  $Q$  вида

$$Q(I) = \sum_{i_{sd} \in I} w(i_{sd}). \quad (3)$$

Тогда задача  $K$ -поточковой оптимальной маршрутизации сводится к оптимизации функционала (3), т.е.

$$Q(I) = \sum_{i_{sd} \in I} w(i_{sd}) \rightarrow \min \quad (3.6.4)$$

при ограничениях (2)

## 6. Классификация GRID-сетей и базовые фрактальные архитектуры

По своему назначению GRID-сети принято делить на вычислительные сети (computational GRID) и сети, ориентированные на хранение больших массивов информации (data GRID).

GRID-системы целесообразно использовать прежде всего для решения следующих научных и прикладных задач высокой сложности:

1. математическое и имитационное моделирование сложных систем и процессов;
2. совместная визуализация и динамическая анимация больших массивов и быстрых потоков научных данных;
3. распределенная обработка в целях системного анализа и кластеризации данных;
4. комплексирование научного инструментария с удаленными компьютерами и архивами данных и знаний;
5. распределенная обработка баз данных и знаний с использованием современных технологий "Data Mining" и "Knowledge Discovery".

Как показывает практика, GRID-системы наиболее эффективно используются в следующих областях:

1. распределенные высокопроизводительные вычисления;
2. решение сверхсложных задач, требующих максимальных процессорных ресурсов, памяти и быстродействия;

3. "многопоточная" обработка информации, позволяющая организовать эффективное использование основных информационно-вычислительных ресурсов с утилизацией временно простаивающих компьютеров;
4. проведение крупных разовых оптимизационных расчетов;
5. вычисления с привлечением больших объемов распределенных данных (например, в метеорологии, генетике, астрономии, физике высоких энергий);
6. распределенные коллективные вычисления, координирующие одновременное решение нескольких взаимодействующих вычислительных задач разных пользователей.

Специфика GRID-систем и обслуживающих их ТКС нового поколения определяются прежде всего архитектурой (структурой и функциями) самой вычислительной сетевой среды, на которой они строятся. В общем случае эта среда представляет собой глобальную динамическую сеть с изменяющейся (в течение некоторого периода времени) архитектурой, т.е. с изменяющимся количеством активных вычислительных узлов (узловых компьютеров) и каналов связи между ними [4,7].

Изменения архитектуры GRID-среды или связанной с ней глобальной ТКС происходят как за счет нештатного отказа, планового выключения компьютеров или подключения новых вычислительных мощностей. Кроме того, часто возникают изменения качественных характеристик и количественных параметров интегрированной сети (изменение вычислительной нагрузки узлов или пропускной способности каналов связи и т.п.) [5–7].

Архитектура интегрированной вычислительной, информационной и телекоммуникационной среды определяются характеристиками сетевых топологических структур, образующих саму эту среду в виде архитектуры (топологической структуры) узловых компьютеров и каналов связи между ними. Важно отметить, что именно топологические структуры (архитектуры) компонентов GRID-систем и ТКС имеют решающее значение как при системном анализе и моделировании существующих GRID-систем и ТКС, так и особенно при проектировании, имитационном моделировании и оптимизации архитектур вновь создаваемых GRID-систем и ТКС нового поколения.

Исходя из перечисленных выше требований, предъявляемых к компьютерным и телекоммуникационным сетям как основе для построения интегрированных GRID-систем и современных ТКС, наиболее существенными являются следующие показатели (критерии качества) [5,6,7]:

- I. Надёжность;
- II. Стоимость;
- III. Пропускная способность.

Эти показатели (критерии) отражают наиболее важные аспекты функционирования GRID-систем и ТКС любого масштаба. Они соответственно обеспечивают:

Устойчивую работоспособность GRID-систем и ТКС в целом;

Экономический фактор, актуальный для заказчика или проектировщика GRID-системы и ТКС с точки зрения стоимости;

Качество и быстрота обслуживания внешних агентов-абонентов существующей или вновь создаваемой GRID-системы и ТКС.

Под базовыми топологиями (архитектурами) GRID-систем и ТКС будем понимать следующие самоподобные топологические структуры (фракталы):

Полная ячеистая топология;

Кольцевая топология;

Топология "Звезда";

Линейная топология, а также смешанная топологическая структура (мультифрактал):

Смешанная топология (включающая в себя в различных сочетаниях базовые топологии 1–4).

При имитационном моделировании и прогнозировании GRID-сетей и связанных с ними ТКС нового поколения важную роль играет оценка основных показателей I–III базовых топологических структур 1–5 (фрактальных и мультифрактальных архитектур), а также их многокритериальная оптимизация. Эта задача рассмотрена и решена в работах [6–7].

---

## 7. Сетевые и нейросетевые агенты в GRID-системах

---

Основные функции обработки информации, самоорганизации и управления информационными потоками по запросам внешних агентов-пользователей глобальной ТКС распределяются между внутренними агентами ТКС и GRID-сетей, 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 [6,7].

Каждый внутренний сетевой или нейросетевой агент имеет собственную локальную БД и локальную БЗ, а также средства связи с другими агентами через РСС 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 или GRID-сети [5–7].

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 [3–5]. В последнее время разработаны модели нейросетевых агентов для адаптивной маршрутизации (агенты-маршрутизаторы) и автоматической классификации WEB-сайтов на естественном (русском) языке (агенты-классификаторы) [5–7]. Программная реализация и имитационное моделирование этих агентов свидетельствует об их эффективности и преимуществах по отношению к традиционным информационным технологиям [7].

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 09–08–00767-а и РФФИ–ГФЕН Китая № 10-08-91159-а, Программы № 1 Президиума РАН и издательского гранта РФФИ № 12-08-07022-д.

---

## Заключение

---

В настоящей работе на основе системного анализа эволюции и особенностей динамики глобальных ТКС с изменяющейся структурой (сетевой топологией) и варьируемыми параметрами (весами каналов связи) обосновывается необходимость разработки теории адаптивного высококачественного мультиагентного обслуживания глобальных ТКС нового поколения и связанных с ними GRID-сетей как хранилища распределенных информационных и вычислительных ресурсов. Эта новая теория должна прийти на смену традиционной теории массового обслуживания, вероятностные предположения (гипотезы) которой, как правило, не выполняются на практике.

Отмечая достоинства и недостатки классических моделей и методов фиксированной (статической) маршрутизации потоков данных, авторы предлагают принципиально новые подходы, отличающиеся

возможностью учета нечётких, нестационарных и неопределенных факторов. Эти факторы фактически игнорируются (или, в лучшем случае, учитываются лишь "в среднем") традиционной теорией массового обслуживания ТКС, основанной на вероятностных предположениях (гипотезах). Однако их учет и адаптивная компенсация неопределенности при сетевом управлении потоками данных как в современных ТКС, так и в глобальных ТКС новых поколений, связанных с GRID-сетями, являются принципиально важными и абсолютно необходимыми.

Предлагаемые в данной работе модели и методы динамической, адаптивной, нейросетевой и мультиагентной (многоадресной и многопоточковой) маршрутизации информационных потоков для глобальных ТКС нового поколения представляются первым важным шагом в направлении создания теории адаптивного мультиагентного (массового) обслуживания глобальных информационных и телекоммуникационных сетей, имеющей большое прикладное и социальное значение. В частности, эти результаты могут быть полезны для организации адаптивного мультиагентного (массового) обслуживания GRID-инфраструктур различного масштаба и назначения или для создания мировой сети Internet нового поколения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 09–08–00767-а, РФФИ–ГФЕН Китая № 10-08-91159-а, Программы № 1 Президиума РАН и издательского гранта РФФИ № 12-08-07022-д.

---

## Литература

- [1] Столлингс В. Современные компьютерные сети. СПб: Питер, 2003, 783 с.
- [2] Тимофеев А.В. Проблемы и методы адаптивного управления потоками данных в телекоммуникационных системах. – Информатизация и связь. 2003. № 1,2. С. 68–73.
- [3] Тимофеев А.В., Сырцев А.В. Мультиагентная и нейросетевая маршрутизация потоков данных в телекоммуникационных сетях. – Труды 10-й международной конференции "Knowledge–Dialogue–Solution" (16–26 июня, 2003, Варна). 2003. С. 187–190.
- [4] Тимофеев А.В., Сырцев А.В. Модели и методы маршрутизации потоков данных в телекоммуникационных системах с изменяющейся динамикой. – М.: Новые технологии, 2005.
- [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. N 10. P. 54–60.
- [6] Тимофеев А.В., Фрактальное моделирование и многокритериальная оптимизация компьютерных сетей. – International Book Series "Information Science and Computing". 2011, Vol. 5. N.3, P. 237–244.
- [7] Тимофеев А.В. Адаптивное управление и интеллектуальный анализ информационных потоков в компьютерных сетях. – М.: Наука, 2012.

---

## Сведения об авторе



**Тимофеев Адиль Васильевич** – заведующий лабораторией информационных технологий в управлении и робототехнике Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук, Профессор кафедры информатики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39, СПИИРАН, [tav@iias.spb.su](mailto:tav@iias.spb.su)