Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ СИСТЕМ И ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ
имени В.М. Матросова
Сибирского отделения Российской академии наук

ЛЯПУНОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

5 – 7 декабря 2017 года

Материалы конференции

Иркутск – 2017

Научное издание

Материалы конференции «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 5–7 декабря 2017 г.). – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2017. – 66 с.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на конференции «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 5–7 декабря 2017 г.). Конференция организуется с целью обсуждения актуальных результатов исследований научных сотрудников, аспирантов и студентов старших курсов по направлениям:

- Теория и методы исследования эволюционных уравнений и динамических систем с приложениями;
- Качественная теория и методы управления с приложениями;
- Методы математической физики в задачах теории поля, газовой и плазменной динамики;
- Теория, алгоритмы и вычислительные технологии решения задач оптимизации и исследования операций;
- Теоретические основы и технологии организации распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем;
- Теоретические основы и технологии организации информационно-телекоммуникационных инфраструктур;
- Методы, технологии и сервисы формирования информационно-аналитических, геоинформационных, вычислительных и программноаппаратных систем в различных предметных областях (в том числе для поддержки комплексных междисциплинарных научных исследований).

TABBYPDF: ВЕБ-СЕРВИС ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТАБЛИЦ ИЗ PDF ДОКУМЕНТОВ*

А.А. Алтаев, А.А. Михайлов, А.О. Шигаров
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
altaev@icc.ru, mikhaylov@icc.ru, shigarov@icc.ru

В работе рассматривается веб-сервис обнаружения и распознавания структуры таблиц, расположенных в неразмеченных документах формата PDF (Portable Document Format). В отличие от известных решений извлечения таблиц из PDF документов впервые задействуется информация о выводе текста и векторной графики на печать. При печати таблиц PDF генераторы часто выводят текст в порядке его чтения внутри отдельных ячеек, кроме того иногда они перемещают курсор (координаты вывода), очерчивая контуры ячеек. Несмотря на зашумленность этой информации, в работе впервые делается попытка выстроить эвристические алгоритмы обнаружения и распознавания структуры таблиц на основе ее анализа [1].

Предлагаемое решение реализовано в виде веб-сервиса TABBYPDF, имеющего клиент-серверную архитектуру. Серверная часть выполняет обработку PDF документов эвристическими алгоритмами извлечения таблиц и предоставляет клиентской части интерфейс прикладного программирования, реализованный на языке программирования Java с использованием инструментальной платформы SPRING FRAMEWORK. Клиентская часть предоставляет пользовательский веб-интерфейс, отображающий результаты автоматического обнаружения и распознавания структуры таблицы с использованием сторонних средств PDF визуализации, а также позволяет интерактивно выделять и изменять границы расположения таблиц. Кроме того, пользовательский интерфейс позволяет выгрузить результаты извлечения в формате электронных таблиц Excel.

Предлагаемые алгоритмы TABBYPDF протестированы с помощью соревновательного набора данных ICDAR 2013 TABLE COMPETITION [2] и методологии оценки методов извлечения таблиц из PDF [3]. F-мера, полученная на данном наборе в соответствии с этой методологией, составляет 83,18% для извлечения таблиц и 93,64% для распознавания их структуры, что сопоставимо с лучшими академическими аналогами [2]. Реализованный веб-сервис доступен по адресу http://cells.icc.ru/pdfte. Исходные коды веб-сервиса доступны по адресу https://github.com/cellsrg.

Разработанное программное обеспечение эксплуатируется на базе облачной инфраструктуры ЦКП ИИВС ИРНОК (http://net.icc.ru).

1. Shigarov A., Mikhailov A., Altaev A. Configurable table structure recognition in untagged PDF documents // Proc. of the 16th ACM Symposium on Document Engineering. 2016. Vienna (Austria). P. 119-122.
2. Göbel M., Hassan T., Oro E., Orsi G. ICDAR 2013 table competition // Proc. of the 12th Intern. Conf. on Document Analysis and Recognition. 2013. P. 1449-1453.
3. Göbel M., Hassan T., Oro E., Orsi G. A methodology for evaluating algorithms for table understanding in PDF documents // Proc. of the 2012 ACM Symposium on Document Engineering. 2012. NY (USA). P. 45-48.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-47-380007.

МОДИФИКАЦИИ ГРАДИЕНТНЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА КОМПЬЮТЕРАХ С НЕСКОЛЬКИМИ ГРАФИЧЕСКИМИ УСКОРИТЕЛЯМИ*

А.С. Аникин[1], А.Н. Андрианов[2]
[1]Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
[2]Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва
htower@icc.ru, and@a5.kiam.ru

Поиск решения задач оптимизации больших и сверхбольших размерностей в последние годы становится все более актуальной проблемой. Подобные huge-scale постановки возникают в самых разных прикладных областях: разработка новых материалов, анализ и управление компьютерными сетями, транспортная логистика, фармацевтика и др. Методы оптимизации, способные эффективно решать задачи рассматриваемого класса, становится неотъемлемой частью современного технологического процесса.

В работе предлагается технология создания эффективных параллельных реализаций градиентных методов, направленная на эффективное использование вычислительных мощностей современных графических ускорителей (GPU). Основной идеей предлагаемого подхода является реализация унифицированных интерфейсов для взаимодействия с базовыми структурами данных – векторами и матрицами (включая разреженные варианты). Данные этих структур хранятся в памяти соответствующего вычислительного устройства (CPU/GPU), которое в дальнейшем выполняет необходимые операции над данными без излишних процедур обмена между центральным и графическим процессорами. Программная реализация выполнена на языке C++ с использованием механизма шаблонов (templates). Предложенный подход дает возможность создания унифицированного программного кода, способного без модификаций задействовать вычислительные ресурсы как CPU, так и GPU. Это обеспечивает существенное упрощение процесса разработки программных реализаций, а также избавляет от необходимости «синхронизации» изменений кода в CPU и GPU-версиях алгоритмов.

С использованием предлагаемого подхода выполнены реализации ряда градиентных методов: методы сопряженных градиентов, как классические варианты, так и современные, включая вариант, предложенный Ю.Е. Нестеровым, метод Barzilai-Borwein, метод Б.Т. Поляка, метод Коши. Полученные реализации позволяют использовать ресурсы нескольких графических ускорителей, установленных на вычислительной системе, что не только повышает скорость работы алгоритмов, но также позволяет работу с задачами, которые не могут быть решены в рамках одного GPU из-за ограниченного объема оперативной памяти, установленной на ускорителе.

Работоспособность и быстродействие предлагаемых реализаций были проверены на задачах нахождения PageRank-вектора с различными типами матрицы (диагональными, со случайной структурой, построенными из web-графов тестовой коллекции Стэнфордского университета [1]), а также задачах восстановления матрицы корреспонденций сети передачи данных. Вычислительные эксперименты, проведенные на системах с GPU NVidia Fermi C2050 и NVidia Fermi M2090, продемонстрировали значительное ускорение расчетов при использовании предложенных GPU-реализаций.

1. Stanford Large Network Dataset Collection: snap.stanford.edu/data/#web.

* Работа поддержана грантом РФФИ № 16-07-00664.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДВОДНОЙ СРЕДЫ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

К.В. Беденко
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
bedenko@icc.ru

Назначение программного комплекса заключается в создании виртуальной подводной среды для моделирования и тестирования функциональных возможностей систем и алгоритмов поведения как одиночных, так и группировок автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). В данной работе описывается одна из подсистем комплекса, отвечающая за генерацию рельефа дна и естественных и искусственных объектов акваторий. Описанные в [1–2] подходы к созданию цифровых моделей рельефа по наборам пространственных данных могут быть использованы и в задаче генерации случайных рельефов. В отличие от [3], где акцент делается на «автоматизации исследований, связанных с вопросами разработки систем управления движением АНПА и выполнения им обзорных и обследовательских работ», в данном программном комплексе планируется реализовать не только модели поведения одиночных АНПА, но и модели их группового взаимодействия с элементами искусственного интеллекта. Модель среды при этом должна включать в себя модули генерации наиболее реалистичных моделей рельефа дна, моделей подводных течений, полей плотности воды, ее солености, химических загрязнений и других явлений, встречающихся под водой.

В данной работе рельеф дна создается путем послойного наложения ландшафтов различного типа друг на друга с использованием «масок». Этот подход обеспечивает моделирование разнообразных типов поверхностей (скалы, песчаные отмели, россыпи камней и т.д.) и позволяет избежать появления грубой границы перехода между ними. В качестве основного способа процедурной генерации ландшафта был выбран шум Перлина, предложены алгоритмы его использования в задаче получения реалистичного рельефа дна. Сгенерированный рельеф представляется в виде карты высот. Кроме этого, 3D-модель подводной среды содержит данные об отражающих свойствах подстилающей поверхности и грунта и размещенных на них искусственных объектах. Такое представление данных позволяет при моделировании подсистемы технического зрения АНПА генерировать изображения, максимально приближенные к изображениям, полученным с гидролокаторов бокового обзора подводных роботов. Программный комплекс разработан с использованием платформы Unity3D.

1. Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. Геоинформатика. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 480 с.
2. Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В., Попов О.Е., Левченко О.В. О методах построения цифровых моделей рельефа дна (на примере Белого моря) // Океанология. 2015. Т. 55, № 2. С. 326–336.
3. Бобков В. А., Морозов М. А., Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Имитационный моделирующий комплекс для обследовательского автономного подводного робота // Электронный журнал «Научная визуализация». 2013. Т. 5, № 4. С. 47–70.

ПОСТРОЕНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ И КВАЗИОРТОГОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЛАТИНСКИХ КВАДРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ SAT

Е.Г. Белей
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
Иркутский национальный исследовательский технический университет
beleyevgenia@gmail.com

В докладе будут представлены результаты исследования ослабленных вариантов известной открытой комбинаторной задачи о существовании тройки попарно ортогональных латинских квадратов 10-го порядка. Латинский квадрат порядка n - это таблица $n \times n$, заполненная элементами из множества $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, $a_i \neq a_j$ $i, j \in \{1, \dots, n\}$, $i \neq j$, такая, что в каждой строке и каждом столбце встречаются все n элементов из A. Два латинских квадрата A и B одного порядка называются ортогональными, если различны все пары вида (a_{ij}, b_{ij}), полученные при совмещении этих квадратов. Система из n ортогональных латинских квадратов – это множество из n попарно ортогональных латинских квадратов. Задачи поиска ортогональных систем являются вычислительно трудными, поэтому имеет смысл рассматривать их ослабленные варианты. С этой целью определяются квазиортогональные системы латинских квадратов и вводятся различные меры их ортогональности. В настоящем докладе приводятся результаты вычислительного исследования одной такой меры, названной индексом ортогональности. Более точно исследовались квазиортогональные системы, состоящие из трех латинских квадратов 10-го порядка. Задачи поиска соответствующих систем ставились в форме частных случаев проблемы булевой выполнимости (SAT) [1], и для их решения использовались современные SAT-решатели.

Основная новизна работы состоит в строгой формулировке понятия квазиортогональности и использовании итеративной процедуры улучшения, на каждой итерации которой строятся квазиортогональные системы возрастающего индекса ортогональности. С применением алгоритмов решения SAT были построены семейства квазиортогональных систем с индексом ортогональности до 80 включительно. Наибольшая по индексу ортогональности система, известная на данный момент, приведена в работе [2], ее индекс ортогональности равен 91, однако при построении данной системы SAT никак не задействовался.

В экспериментах использовались два класса SAT-решателей: SLS (Stochastic Local Search) [3] и CDCL (Conflict Driven Clause Learning) [4]. По результатам экспериментов было выяснено, что учет в последующих итерациях информации, полученной на предыдущих стадиях SLS-решателями, дает лучшие результаты в сравнении с ситуацией, когда в последующих итерациях используется информация, найденная ранее CDCL-решателями. Для вычислительных экспериментов использовался ПК с процессором Intel Core i7 и вычислительный кластер «Академик В.М. Матросов» Иркутского научного центра (процессоры Opteron 6276).

1. Biere A., Heule M., Van Maaren H., Walsh T. (eds.): Handbook of Satisfiability, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. IOS Press, 2009. Vol. 185.
2. Egan J., Wanless I. Enumeration of MOLS of Small Order // Mathematics of Computation. 2016. Vol. 85, № 298. P. 799-824.
3. Selman B., Kautz H., Cohen B. Noise strategies for local search // Proc. of AAAI-94 (AAAI Press/The MIT Press). 1994. P. 337-343.
4. Marques-Silva J.P., Sakallah K.A. GRASP: A search algorithm for propositional satisfiability // IEEE Trans. Computers. 1999. Vol. 48, № 5. P.506-521.

ТРАНСДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНЫХ ПРОБЛЕМ

А.Ф. Берман, О.А. Николайчук
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
bafbam@mail.ru

Решение научных, технических и экологических проблем требуют совместных усилий, творчества, взаимной поддержки специалистов различных научных дисциплин и направлений. Время «узких специалистов» и « узких технических решений» уходит.

Впервые для обеспечения безопасности и снижения риска аварий и катастроф предлагается использовать трансдисциплинарный подход как некий принцип организации научного знания, обеспечивающий использование знаний многих дисциплин при решении комплексных проблем. С помощью трансдисциплинарного подхода у любого специалиста-дисциплинария появляется возможность достаточно профессионально работать со всей мультидисциплинарной информацией об объекте [1–3].

Факторы и параметры, характеризующие проблему предупреждения и снижения последствий аварий и техногенных катастроф, представляются данными и знаниями, входящими в состав практически всех общетехнических и специальных инженерных дисциплин, некоторых разделов физики, химии и психологии, а также методов и средств математического моделирования и информационных технологий. Разработана трансдисциплинарная модель, обеспечивающая использование знаний различных предметных областей и научных направлений для принятия коллективных решений [4–6]. Формулировка трансдисциплинарной задачи является результатом синтеза задач и соответствующих им данных и знаний.

Рис. Структура трансдисциплинарной задачи

1. Transdisciplinarity. Stimulating Synergies, Integrating Knowledge. UNESCO, Division of Philosophy and Ethics. 1998. P. 37–38 / [Электронный ресурс]. URL: http://unesdoc.unesco.org/ images/0011/001146/114694eo.pdf (дата обращения: 10.02.16).
2. Мокий В.С. Основы трансдисциплинарности. Нальчик: Изд. «ЭльФа», 2009. 368 с.
3. Князева Е. Н. Трансдисциплинарные стратегии исследования // Вестник ТГПУ (TSPU Bulletin). 2011. Т. 10, № 112. С. 193–201.
4. Берман А.Ф. Информатика катастроф // Проблемы безопасности и ЧС. 2012. № 3. С. 17-37.
5. Махутов Н.А., Берман А.Ф., Николайчук О.А. Некоторые принципы самоорганизации для управления риском техногенных катастроф // Проблемы анализа риска. 2015. Т. 12, № 4. С. 34-45.
6. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Трансдисциплинарная модель задач для обеспечения безопасности технических объектов // Тр. Междунар. научн.-практ. конф. «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности» (МНПК «ЛЭРЭП-11-2017»). Россия, Тула, 15-17 ноября 2017 г. С. 25-32.

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ДЕКОМПОЗИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

В.Г. Богданова, А.А. Пашинин
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
bvg@icc.ru

В настоящее время активно развиваются технологии организации высокопроизводительных вычислений, предоставляющие вычислительные мощности и программное обеспечение в виде сервисов для решения сложных научно-технических задач. Несмотря на многообразие подобного инструментария, ряд вопросов по-прежнему остается актуальным. К этим вопросам относится интеграция знание-ориентированного подхода к созданию приложения, децентрализованного управления выполнением сервисов приложения (более предпочтительного в распределенных средах для обеспечения масштабируемости), возможности выбора способов доступа к компонентам приложения, средств описания логики вычислительных схем не программным, а декларативным путем, обработки потоков задач, имеющих как статическую, так и динамическую структуру в рамках единой инструментальной среды. В докладе рассматривается связанные с этими вопросами аспекты реализации в среде HPCSOMAS Framework [1] сервис-ориентированных приложений, предназначенных для решения задач, отвечающих следующим условиям: высокая вычислительная сложность, необходимость использования высокопроизводительной техники для их решения, возможность декомпозиции на слабосвязанные в вычислительном отношении подзадачи. Особенность предлагаемого инструментария заключается в том, что приложение, разработанное на основе этих инструментальных средств, не является монолитным, а состоит из нескольких сервисов, системных и вычислительных, реализующих функции, необходимые для решения задачи. Эти сервисы могут быть установлены как на одном сервере, так и на разных серверах и взаимодействовать друг с другом по сети, например, посредством HTTP. Описывается пример разработки web-приложения для параметрического синтеза обратной связи линейного динамического объекта с помощью этого инструментария [2]. Предложенная технология позволяет упростить создание сервиса и предоставляет новые качественные возможности по управлению высокопроизводительными вычислениями.

1. Bychkov I.V., Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A., Gorsky S.A. Automation Development Framework of Scalable Scientific Web Applications Based on Subject Domain Knowledge // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10421. P. 278-288.
2. Oparin G., Feoktistov A., Bogdanova V., Sidorov I. Automation of multi-agent control for complex dynamic systems in heterogeneous computational network // AIP Conf. Proc. 2017. 1798, 020117. URL: http://doi.org/10.1063/1.4972709.

РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ*

А.А. Ветров, Е.С. Фереферов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
vetrov@icc.ru, fereferov@icc.ru

Одним из показателей эффективности деятельности научной организации Российской академии наук (РАН) является публикационная активность ее сотрудников. Отчетность перед вышестоящими структурами, такими как ФАНО России, Министерство образования РФ, отделения РАН требуют предоставления количественных показателей публикаций организации с различной периодичностью в разнообразных разрезах: по видам публикаций, базам индексации изданий, научным направлениям, в привязке к проектам. Такое разнообразие отчетных форм требует применения разных алгоритмов расчета и в случае неавтоматизированной обработки приводит к большим временным затратам. Анализ публикационной активности научных сотрудников необходим также внутри научных организаций для реализации процедур аттестации, проведения конкурсов на научные должности, расчета надбавок и премий сотрудникам.

В работе рассматриваются вопросы создания информационной системы учета и мониторинга результатов научной деятельности, автоматизирующей отдельные аспекты документооборота научной организации, связанные с формированием единой базы результатов научной деятельности организации и подготовкой содержащих статистические данные документов. Например, задачи подготовки документов на конкурсы замещения должностей научных работников, формирования периодических отчетов перед вышестоящими органами, отчетов по научным проектам, расчета показателей результативности научной деятельности (ПРНД) работников. Из-за ряда ограничений не представляется возможным использовать классические информационные системы научной деятельности (CRIS), которые в первую очередь направлены на поддержку научных исследований, а не на подготовку отчетов и документов.

Авторами разработана и введена в опытную эксплуатацию информационная система учета научной деятельности института. Несмотря на преимущества системы управления содержимым (CMS) Drupal и ее экосистемы [1], авторами была выбрана альтернатива: CMS для разработчиков October, так как с Drupal возникли фундаментальные проблемы массовой загрузки данных. Выбранная система использует в своем ядре современный веб-фреймворк Laravel, написанный на языке PHP, и требует значительно больше знаний и времени от разработчиков, одновременно давая свободу, сравнимую с разработкой на основе «чистого» фреймворка.

Произведена миграция данных института с официального сайта, которая дополнена актуальной информацией о новых сотрудниках и текущей структуре института. Сделан частичный импорт публикаций из данных, собираемых службой ученого секретаря в рамках оценки эффективности результатов научной деятельности. Для разбора сырых данных применялся набор регулярных выражений, охватывающих статьи и материалы конференций на русском и английском языках, книги и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Тестирование проводилось на данных, извлеченных из годовых отчетов.

1. Ветров А.А., Фереферов Е.С. Автоматизированная система учета научной деятельности сотрудников учреждения подведомственного ФАНО России // Материалы конф. «Ляпуновские чтения». Иркутск: РИО ИДСТУ СО РАН, 2016. С. 14.

* Работа выполнена на базе ЦКП ИИВС ИРНОК.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ WEB-СЕРВИСОВ*

М.Л. Воскобойников, Р.К. Федоров
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
voskoboynikov1988@gmail.com, fedorov@icc.ru

На сегодняшний день развитие сетей передачи данных обеспечивает достаточно высокую скорость обмена информацией практически в любой точке мира. Активно внедряются и удешевляются разнородные информационные и программно-аппаратные системы, позволяющие получать точные и оперативные данные с различных датчиков, реализовать удаленное управление. Развитие программно-аппаратных систем и сетей передачи данных позволяет производить автоматизацию большего количества процессов, окружающих человека. Уже сейчас человек способен управлять многими устройствами, используя мобильный телефон. Многие устройства предоставляют программный интерфейс в виде Web-сервисов, доступных через Интернет, что дает возможность унифицировать их использование, организовывать каталогизацию сервисов, поиск и т.д. Для взаимодействия с такими сервисами могут применяться как стандартизированные, так и не стандартизированные интерфейсы и протоколы, такие как REST, WPS, SOAP и т.д.

Одной из задач, возникающих в результате развития сервисно-аппаратных систем, является упрощение управления множеством сервисов. Для решения поставленной задачи необходимо произвести анализ применения пользователем сервисов, а именно, поиск регулярно повторяющихся выполнений сервисов и идентификация признаков их выполнения, которые являются специфичными для каждого человека. В результате анализа можно будет автоматически предлагать или выполнять сервисы, формировать сценарии, автоматизирующие выполнение последовательности действий и т.д.

Для сбора данных о применении пользователем сервисов авторами разрабатывается специализированный Web-сервис и Android-приложение, устанавливаемое на мобильное устройство пользователя. Производится сбор данных, учитывающий время, геолокационные данные мобильного устройства, вызов Web-сервисов, ускорение, освещенность и другие данные, доступные с сенсоров конкретного устройства.

В настоящее время для анализа собранных данных применяются методы статистического анализа и машинного обучения, такие как метод опорных векторов, искусственные нейронные сети, деревья решений и другие.

* Работа выполнена при поддержке центра коллективного пользования ИИВС ИРНОК и гранта РФФИ, № 16-07-00411.

МЕХАНИЗМ ПОСТРОЕНИЯ 3-D МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ*

А.С. Гаченко, А.Е. Хмельнов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gachenko@icc.ru

Получение цифровой модели рельефа речного дна и согласование его с наземной частью является актуальной наукоемкой задачей, которая позволяет комплексно использовать водные ресурсы и проводить на этих данных интеграционные научные исследования.

Если надводный рельеф с разной степенью детализации представлен на топографических векторных электронных картах различных масштабов, то информацию о подводном рельефе рек в электронном виде найти достаточно сложно. Существующие данные о глубинах для некоторых навигаторов имеют фрагментарный характер и имеют большую погрешность.

В настоящее время для больших пространств судоходных участков рек, озер и водохранилищ рельеф дна наиболее детально и полномасштабно отображается на специальных навигационных картах (лоциях), обычно представленных в «бумажной» форме. Для их использования при построении модели рельефа применяются процедуры интерактивной оцифровки. Согласованные 3-D модели подводного с надводным рельефом практически не встречаются. Имеются лишь разрозненные данные по надводным и в малой степени по подводным рельефам. Задачи построения 3-D моделей надводного и подводного рельефов и их совмещения между собой являются актуальными, востребованными и наукоемкими.

Для моделирования уровня воды и совмещения надводного рельефа с подводным разрабатывается оригинальный подход к построению цифровой модели рельефа, использующий алгоритм морфинга (трансформации) электронных карт. Для выполнения морфинга находится непрерывное преобразование плоскости, которое может совместить неточные контура береговых линий (например, лоцманских карт) с более точными (например, спутниковых снимков). Для совмещения карт используются слои береговых линий, находящихся как на подводном, так и на надводном рельефе. Преобразование применяется к различным слоям карты подводного рельефа (изобатам и отметкам глубин). Полученные в результате морфинга модели рельефа хорошо отображают существующее положение вещей.

1. Бычков И.В., Никитин В.М. Регулирование уровня озера Байкал: проблемы и возможные решения // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 5-16.

* Работа поддержана РФФИ, грант № 17-47-380005\17, Программа № I.33П фундаментальных исследований Президиума РАН и интеграционной программы «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей», № 0341-2016-001.

WEB-СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОЗЕРО БАЙКАЛ

А.С. Гаченко[1,2], А.Е. Хмельнов[1,2], Е.С. Фереферов[1,2], Р.К. Федоров[1]
[1] Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
[2] Иркутский научный центр СО РАН
{gachenko,hmelnov,fereferov,fedorov}@icc.ru

В течение последнего десятилетия в прибрежном слое озера Байкал наблюдается гибель эндемиков, играющих важную роль в экосистеме озера. Для всестороннего изучения и анализа причин экологического кризиса необходимы инструментальные средства, позволяющие объединить усилия ученых разных профилей. Учитывая пространственный характер данных, наиболее адекватным инструментом поддержки такого рода исследований являются геоинформационные системы (ГИС), а в силу междисциплинарного характера и необходимости оперативного представления материалов исследований ученых из разных областей знаний такая система должна быть многопользовательской.

В работе представлена разработанная авторами геоинформационная система для поддержки исследований антропогенного воздействия на экологию прибрежной зоны озера Байкал [1]. Система реализована в виде геопортала, позволяющего исследователям формировать общую в рамках проекта базу результатов исследований в виде тематических и картографических данных, а также осуществлять запуск интернет-сервисов для решения задач геообработки и комплексного анализа данных. Геопортал создан с открытой архитектурой, что позволяет расширять его функциональность путем добавления новых сервисов, находящихся как локально на сервере геопортала, так и удаленно на других серверах. За счет поддержки стандартов в области геоинформатики обеспечивается интероперабельность программных систем, реализующих функции анализа и обработки геоданных. В состав развернутых на геопортале сервисов входят сервисы: интерполяции точечных данных на регулярную сетку, расчета растровой плотности точечных объектов, идентификации объектов по растровому изображению, классификации объектов на основе метода опорных векторов, построение индекса растительности, растеризации линейных и площадных объектов, построения карт уклонов и направлений высот по регулярной сетке, построения карт временной доступности объектов. Отдельные сервисы для расчетов могут задействовать вычислительные мощности Центра коллективного пользования «Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН».

С применением оригинальной библиотеки треангуляции и технологии морфинга электронных карт авторами построена сопряженная цифровая модель рельефа суши и дна в районе п. Листвянка. Цифровая модель рельефа строилась на основе приобретенного у компании Airbus космоснимка высокого разрешения (10 метров на пиксел) WorldDem (Airbus Defence and Space под общим названием GEO Elevation Services. Глобальная цифровая модель WorldDEM создана по результатам интерферометрической обработки тандемных съемок с радарных спутников TerraSAR-X/TanDEM-X). Подводный рельеф получен при помощи эхолокационной съемки рельефа дна урезовой зоны залива Лиственичный, полевые промеры глубин были выполнены до 50-тиметровой отметки. Полученная модель рельефа позволяет решать задачи анализа распространения загрязнителей с учетом ландшафта.

1. Гаченко А.С., Минаев В.В., Михайлов А.А., Хмельнов А.Е., Фереферов Е.С., Федоров Р.К., Воробьева И.Б., Власова Н.В. Информационно-аналитическая система мониторинга и оценки антропогенного воздействия на экологию прибрежной зоны озера Байкал // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 174–178.

ДВУХМЕТОДНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРЕОБРАЗОВАНИИ ГЕРНЕТ-ВАЛЕНТАЙНА

А.Ю. Горнов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М.Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Одним из основных конструкционных ресурсов построения эффективных методов поиска локального экстремума является многометодный подход. Возможности комбинирования на основе отдельных, «базовых» алгоритмов многометодных вычислительных схем рассматривались в ряде работ (см., напр., [1]), однако многообразие свойств алгоритмов и огромное число их сочетаний позволяет надеяться на нахождение новых вариантов с существенно лучшими характеристиками.

В работе рассматриваются двухметодные алгоритмы, основанные на применении неэквивалентных преобразований варьируемых переменных. Одной из первых работ в этом направлении является, по-видимому, монография российского математика Н.Н. Гернет [2], изучавшей (более ста лет назад!) возможности решения задач вариационного исчисления с ограничениями-неравенствами. Предложенные в работах Н.Н. Гернет конструкции, к сожалению, не были замечены специалистами, и в 1937 г. вновь переоткрыты американским математиком Ф. Валентайном [3]. В англоязычной литературе впервые предложенное Н.Н. Гернет преобразование, конечно, называется «преобразованием Валентайна». Попытки применения этого преобразования начались, наверное, еще в 50-х годах XX века. Но встреченные при этом трудности казались непреодолимыми, и весь подход был подвергнут уничтожающе жестокой критике (см., напр., [4]). Дело в том, что при замене переменных, вполне естественно, в новом вариабельном пространстве возникает множество паразитических стационарных точек очень большой мощности, что может существенно воспрепятствовать поиску экстремума. В вычислительной практике этот эффект получил название «прилипание управления к границе» [4].

Проблема, выглядевшая непреодолимой, оказалась легко решаемой в рамках многометодного подхода. Для построения надежной вычислительной схемы предлагается использовать два метода, один из которых работает в исходном пространстве, другой – в «преобразованном». Биективность преобразования достигается ограничением области определения обратного преобразования (например, арксинуса для синуса). Результаты работы одного метода, после соответствующего преобразования, передаются для начала работы второго метода и так далее, при этом оказывается возможным сохранять монотонную сходимость для всей вычислительной схемы по значению функционала. Для работы в «прямом» пространстве используется простой метод приведенного градиента, выполняющий всего одну итерацию для «снятия управления с границ», а основная часть работы выполняется в «преобразованном» пространстве методами со сверхлинейной скоростью сходимости: сопряженных градиентов, квазиньютоновскими и др. Предложенные вычислительные схемы оказались весьма конкурентоспособными, особенно для задач оптимизации динамических систем, и включены в состав функционального наполнения нескольких программных комплексов.

1. Тятюшкин А.И. Многометодная технология оптимизации управляемых систем. Новосибирск: Наука, 2006. 343 с.
2. Гернет Н.Н. Об одной простейшей задаче вариационного исчисления. СПб.: Типография Ю.Н. Эрлих, 1913.
3. Valentine F. The problem of Lagrange with differential inequalities as added side conditions // Contribution to the Calculus of Variations 1933-1937. University of Chicago Press. 1937. P. 407-448.
4. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 488 с.

МЕТОДИКА КЛАСТЕРИЗАЦИИ БАЗЫ ПРОБНЫХ ТОЧЕК В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО ТРУДОЕМКИХ ФУНКЦИЙ*

А.Ю. Горнов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Оптимизация вычислительно трудоемких (expensive) функций в настоящее время есть малоисследованный класс экстремальных задач. В немногочисленных работах (см., напр., [1-4]) специалисты обычно отталкиваются от известных алгоритмов безградиентной оптимизации (Black Box Optimization) и не уделяют внимания поиску новых ресурсов эффективности. Однако практическая значимость этого класса представляется довольно высокой. Задачи такого типа регулярно возникают в различных научно-практических областях, но готовность алгоритмического инструментария для таких проблем оказывается «не слишком высокой». К решению в ряде случаев предлагаются прикладные задачи с функциями (функционалами), расчет одного варианта для которых может занимать от нескольких часов до нескольких суток. Представляется естественным, что в таких задачах должна быть зафиксирована вся информация о пробных точках, которую удалось получить.

Оперативная память компьютеров в таких задачах обычно не является критическим ресурсом. Стандартной ситуацией можно считать случай, когда при значительных доступных вычислительных ресурсах можно позволить себе получить информацию всего о нескольких сотнях или тысячах проб, при этом размерности предлагаемых к решению задач редко бывают больше десяти. Зачастую у постановщика уже имеется набор исследованных точек и соответственно насчитанные значения функции в этих точках. Но способы использования базы для построения рациональной методики генерации новых пробных точек пока остаются открытой проблемой.

В работе предлагается методика оперативного исследования информационной базы, позволяющая упростить постановку задачи и построить механизм прогнозирования информативных пробных точек, по сути, метод планирования эксперимента. Для анализа имеющейся информационной базы в работе используется метод FOREL («формальный элемент») – алгоритм кластеризации, основанный на идее объединения в один кластер объектов в областях их наибольшего сгущения. Алгоритм предложен в работах новосибирского математика Н.Г. Загоруйко [5]. Доказана сходимость алгоритма за конечное число шагов, а теоретическая оценка его эффективности в линейном пространстве указывает, что поиск центра кластера происходит за время O(n). Известны и его недостатки, кластеризация сильно зависит от начального приближения и выбора значения алгоритмического параметра, отражающего размеры сфер, содержащих кластеры. Но в нашем случае второй недостаток превращается скорее в достоинство, поскольку позволяет в интерактивном режиме управлять работой всех технологий. После кластеризации множества пробных точек выделяются кластеры с относительно меньшими значениями функции, и далее задача может быть расщеплена на несколько задач такого же типа, но с существенно меньшими объемами пространства поиска.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Jones D.R., Schonlau M., Welch W.J. Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions // J. of Global Optimization. 1998. Vol. 13, № 4. P. 455–492.
2. Huang D., Allen T.T., Notz W.I., Zeng N. Global Optimization of Stochastic Black-Box Systems via Sequential Kriging Meta-Models // J. of Global Optimization. 2006. Vol. 34, № 3. P. 441–466.
3. Villemonteix J., Vazquez E., Walter E. An informational approach to the global optimization of expensive-to-evaluate functions // J. of Global Optimization. 2009. Vol. 44, № 4. P. 509–534.
4. Wang J., Clark S.C., Liu E., Frazier P. Parallel Bayesian Global Optimization of Expensive Functions. 2017. arXiv:1602.05149.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-07-03827.

МЕТОДИКИ УЧЕТА ПРЯМЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ОПТИМИЗИРУЕМЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ КВАЗИСЕПАРАБЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ*

А.Ю. Горнов[1], А.С. Аникин[1], А.Н. Андрианов[2]
[1] Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
[2] Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
gornov@icc.ru, anton.anikin@gmail.com, and@a5.kiam.ru

Термин «задача безусловной минимизации» в последние годы претерпел некоторое перевоплощение. Если ранее (в 60-90 гг. XX века) под этим понималась задача минимизации функции без каких-либо дополнительных ограничений, то в последние годы этим термином специалисты все чаще называют задачу поиска минимума функции на параллелепипедном множестве (брус, в англоязычкой литературе box). Так сложилось, что не прижился в среде специалистов термин «задача оптимизации при простых ограничениях» [1], ранее использовавшийся для такого класса задач. Повинуясь традиции, будем называть такие ограничения прямыми. Популярность данного типа ограничений, очевидно, следует из самого смысла моделей, когда содержательные оценки возможных двухсторонних пределов по переменным находятся относительно легко. Отметим, что если для локальной (выпуклой, унимодальной) оптимизации отсутствие прямых ограничений в постановках задач встречается достаточно часто, то для постановок задач невыпуклой оптимизации их отсутствие представляется практически невозможным. Стоит заметить, что присутствие прямых ограничений существенно усложняет задачу при теоретическом анализе ее сложности, и, по нашим сведениям, проблема разработки «оптимальных алгоритмов» для этого класса задач пока никем не решена (см., напр., [2]). Для учета прямых ограничений в теории и практике оптимизации разработан целый арсенал подходов. Любая методика из теории условной оптимизации может быть использована для построения алгоритмических процедур (внутренние и внешние штрафные функции, модифицированные функции Лагранжа, точные дифференцируемые функции и др., см., напр., [3]). Но простота ограничений стимулирует нахождение специализированных способов с лучшей эффективностью.

В работе рассматриваются конструктивные способы учета прямых ограничений для построения методов оптимизации квазисепарабельных функций. Для ряда алгоритмов: Поляка 1969 г., Барзилаи-Борвейна, Spectral Projected Gradient Евтушенко, прямо-двойственных методов, методов для дискретизованной задачи динамической оптимизации проблема легко решается путем применения несложных проекционных операторов. Сложнее ситуация для популярных и, как правило, более конкурентоспособных методов «с памятью» – сопряженных градиентов, квазиньютоновских методов, где при касании переменными прямых ограничений возникает «разрыв истории» и потеря сверхлинейной скорости сходимости. Традиционный способ конструирования алгоритмов основан на введении «полос чувствительности» вдоль границ ограничений, отслеживания фактов попадания переменных в эти полосы и перезапуске алгоритмов в подпространстве меньшей размерности. В докладе обсуждается также и предложенный способ учета ограничений, основанный на применении неэквивалентных преобразований Гернет-Валентайна [4]. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. Наука, 1983. 384 с.
2. Нестеров Ю.Е. Введение в выпуклую оптимизацию. МЦНМО, 2010. 280 с.
3. Бертсекас Д. Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа. Радио и связь, 1987. 400 с.
4. Гернет Н.Н. Об одной простейшей задаче вариационного исчисления. СПб.: Типография Ю.Н. Эрлих, 1913.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-07-00664.

НОВЫЙ АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОБРАЩЕНИЯ 39-ШАГОВОГО ВАРИАНТА ХЕШ-ФУНКЦИИ MD4

И.А. Грибанова
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
the42dimension@gmail.com

Хеш-функция MD4 является одним из первых примеров криптографических хеш-функций, построенных на базе конструкции Меркля-Дамгарда [1]. Данная хеш-функция была признана уязвимой по отношению к атаке поиска коллизий, однако до сих пор не предложено эффективного алгоритма для решения задачи ее обращения.

Процесс вычисления i-го шага алгоритма MD4 для одного 512 битного блока сообщения описывается формулой

$$Q_i = \left(Q_{i-4} + \Phi_i(Q_{i-1}, Q_{i-2}, Q_{i-3}) + m_{p(i)} + k_i\right) <<< s_i, i \in \{0, \ldots, 47\},$$

где Φ_i – раундовая функция i-го шага; $m_{p(i)}$ – часть хешируемого сообщения; k_i, s_i – целочисленные константы i-го шага. Заметим, что в алгоритме MD4 Q_i – это 32-битная переменная, называемая переменной сцепления (chaining variable).

Для задачи обращения неполнораундовых версий хеш-функции MD4 значительный прогресс был достигнут в работе [2]. В данной работе было продемонстрировано, что первые два раунда (32 шага) хеш-функции MD4 не являются стойкими к атаке поиска прообраза известного хеша. Подробный анализ свойств раундовых функций, используемых в первых двух раундах, позволил построить дополнительные ограничения для значений переменных сцепления на определенных шагах алгоритма MD4. Всего было предложено 12 дополнительных ограничений вида $Q_i = K$, где K – некоторая 32-хбитная константа.

Известно, что в работе [3] при помощи SAT-подхода удалось осуществить обращение 39 шагов алгоритма MD4 (MD4-39). При этом были использованы некоторые из дополнительных ограничений из работы [2] с константой $K = 0$, которые были добавлены в SAT-кодировку задачи обращения MD4-39 в виде однолитеральных дизъюнктов. Основной недостаток техники, предложенной в [3], заключается в том, что она не является универсальной: приемлемого времени атаки (около 8 часов работы SAT-решателя minisat) удавалось добиться только для хеш-значений специального вида.

В настоящем докладе будет представлен новый алгоритм автоматического построения дополнительных ограничений вида $Q_i = 1$ и $Q_i = 0$ для задачи обращения 39 шагов алгоритма MD4. В основе данного алгоритма лежит известная метаэвристическая стратегия tabu search [4]. В ходе вычислительных экспериментов были найдены ограничения, которые позволяют обращать не менее 70% случайных хеш-значений MD4-39 за время, не превосходящее 30 секунд.

1. Merkle R.A. Certified digital signature // LNCS. 1990. Vol. 435. P. 218–238.
2. Dobbertin H. The first two rounds of MD4 are not One-Way // Proc. 5th Intern. Workshop Fast Software Encryption. London, UK: Springer Verlag, 1998. P. 284–292.
3. De D., Kumarasubramanian A., and Venkatesan R. Inversion attacks on secure hash functions using SAT solvers // LNCS. 2007. Vol. 4501. P. 377–382.
4. Glover F., Laguna M. Tabu Search. NY. (USA): Kluwer Academic Publishers, 1997.

ОБОБЩЕННОЕ РЕШЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ АБЕЛЯ С ВЫРОЖДЕНИЕМ В БАНАХОВЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

Л.А. Грюнвальд, С.С. Орлов
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»
lfb_o@yahoo.co.uk, orlov_sergey@inbox.ru

Пусть E_1, E_2 – банаховы пространства, u – неизвестная, а f – заданная функции аргумента $t \geq 0$ со значениями в E_1 и E_2, соответственно. Рассмотрим уравнение

$$\Im\big(u(t)\big) \equiv Bu(t) - \frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t (t-s)^{\alpha-1} Au(s)ds = f(t), \tag{1}$$

где B и A – замкнутые линейные операторы из E_1 в E_2, причем $D(B) \subseteq D(A)$, $\overline{D(B)} = \overline{D(A)} = E_1$, $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функции Эйлера аргумента $0 < \alpha < 1$. Предполагается, что оператор B *фредгольмов*, т.е. $\overline{R(B)} = R(B)$ и $\dim N(B) = \dim(B^*) = n < +\infty$, и имеет полный A-жорданов набор $\varphi_i^{(j)} \in E_1$, $j = \overline{1, p_i}$, $i = \overline{1, n}$. Как известно [1], в этом случае B^* также имеет полный A^*-жорданов набор $\psi_i^{(j)} \in E_2^*$, $j = \overline{1, p_i}$, $i = \overline{1, n}$.

В пространстве $K'_+(E_1)$ распределений с ограниченным слева носителем уравнение (1) имеет сверточный вид

$$\Im\big(\delta(t)\big) * \tilde{u}(t) = \tilde{f}(t), \tag{2}$$

где $\tilde{u}(t) = u(t)\theta(t)$, $\tilde{f}(t) = f(t)\theta(t)$, θ – функция Хевисайда, u – *классическое* (сильно непрерывное на луче $[0; +\infty)$) решение уравнения (1). Единственным решением уравнения (2) в классе $K'_+(E_1)$ (*обобщенным* решением уравнения (1)) является распределение $\tilde{u}(t) = \boldsymbol{\varepsilon}(t) * \tilde{f}(t)$, где обобщенная оператор-функция $\boldsymbol{\varepsilon}$ удовлетворяет условиям: $\forall v \in K'_+(E_2)$ $\Im\big(\delta(t)\big) * \boldsymbol{\varepsilon}(t) * v(t) = v(t)$, $\forall w \in K'_+(E_1)$ $\boldsymbol{\varepsilon}(t) * \Im\big(\delta(t)\big) * w(t) = w(t)$; и называется *фундаментальной* оператор-функцией вырожденного интегрального оператора $\Im\big(\delta(t)\big)$. Доказана теорема.

Теорема 1. *Интегральный оператор $\Im\big(\delta(t)\big)$ имеет на классе $K'_+(E_2)$ фундаментальную оператор-функцию вида*

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \tilde{B}^{-1}\delta'(t) * \big(\mathrm{I}_2 + E_\alpha(A\tilde{B}^{-1}t^\alpha)\big)\big(\mathrm{I}_2 - \tilde{Q}\big)\theta(t) - \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{p_i}\sum_{j=1}^{p_i-k+1} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle \varphi_i^{(p_i-k+2-j)} \delta^{(k\alpha)}(t),$$

где $\tilde{B}^{-1}$ – регуляризатор Треногина, $E_\alpha(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{t^k}{\Gamma(k\alpha+1)}$ – функция Миттаг-Леффлера, $\tilde{Q} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle A\varphi_i^{(p_j-j+1)}$ – проектор.

Сингулярная обобщенная функция

$$\delta^{(\beta)}(t) = \frac{1}{\Gamma(-\beta)}\left(P\frac{1}{t^{\beta+1}} + \sum_{k=1}^{[\beta]+1} \frac{(-1)^{k-1}\delta^{(k-1)}(t)}{(k-1)!(\beta-k+1)} \right)$$

определяет сверточное выражение оператора Римана–Лиувилля дифференцирования дробного порядка $\beta > 0$ [2] на классе $K'_+(E_2)$.

1. Вайнберг М.М., Треногин В.А. Теория ветвления решений нелинейных уравнений. М.: Наука, 1969. 528 с.
2. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.

О МОДЕЛИ ВХОДЯЩЕГО ПАССАЖИРОПОТОКА В ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫЕ УЗЛЫ*

М.Л. Жарков
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
zharkm@mail.ru

В работе представлена математическая модель входящего потока заявок в транспортно-пересадочный узел (ТПУ), основанная на теории BMAP-потоков. Использование такого подхода, во-первых, дает возможность построения единого математического описания нескольких входящих потоков заявок, как независимых, так и коррелированных, с сохранением их структуры. Во-вторых, позволяет учитывать поступление групп заявок случайного размера, при этом размер групп определяется отдельно для каждого потока. Таким образом, математическая модель становится более универсальной и может быть применена для описания различных входящих потоков, в частности, транспортных [1].

Модель BMAP – обобщение группового Пуассоновского процесса, допускающее изменение интенсивности поступления групп заявок. При этом BMAP-поток не обладает свойствами отсутствия последействия и ординарности, однако является при этом матричным аналогом стационарного пуассоновского потока [2, 3].

На основе математической модели созданы модель общего входящего пассажиропотока для действующего ТПУ «Владыкино», который расположен в г. Москва, и имитационная модель, позволяющая разыгрывать поведение потока с течением времени по заданным параметрам. Последняя реализована в виде дополнительного модуля к программному комплексу для моделирования и расчетов параметров систем массового обслуживания [4].

Автором проведены две серии модельных экспериментов. В первой серии путем подбора определены необходимые параметры BMAP-потока с целью установления соответствия между разыгрываемым значением суммарного входящего пассажиропотока и ожидаемым объемом пассажиров в ТПУ «Владыкино» в час пик на 2025 г. Во второй серии определены общий уровень загрузки, средние характеристики функционирования и «узкие места» данной ТПУ при полученных параметрах входящего пассажиропотока. На основе выходных данных экспериментов выработаны рекомендации по совершенствованию изучаемого транспортно-пересадочного узла.

1. Журавская М.А., Казаков А.Л., Жарков М.Л., Парсюрова П.А. Моделирование пассажиропотоков в современных транспортно-пересадочных узлах мегаполиса на основе немарковской системы массового обслуживания // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С.17-23.
2. Lucantoni D.M. New results on single server queue with a batch Markovian arrival process // Commun. Statist. Stochastic Models. 1991. Vol. 7. P. 1–46.
3. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Мн.: БГУ, 2000. 176 с.
4. Жарков М.Л., Казаков А.Л., Лемперт А.А. Определение критических показателей работы транспортно-пересадочного узла на основе многофазной системы массового обслуживания // Вестник УрГУПС. 2017. № 3 (35). С. 40-52.

* Работа поддержана РФФИ, проект № 16-06-00464.

ПРИМЕНЕНИЕ ДОБРОВОЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РЕСУРСОЕМКИХ ЗАДАЧ КОМБИНАТОРИКИ, КРИПТОНАЛИЗА И ПОДВОДНОЙ АКУСТИКИ*

О.С. Заикин
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
zaikin.icc@gmail.com

В рамках добровольных распределенных вычислений (ДРВ) используются простаивающие ресурсы персональных компьютеров частных лиц со всего мира. ДРВ хорошо подходят для решения задач, которые допускают разбиение на независимые подзадачи. С помощью ДРВ был решен ряд задач астрономии, математики, медицины и т.д. Наиболее распространенной платформой для создания проектов ДРВ является BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing) [1].

Был разработан и запущен BOINC-проект Acoustics@home [2], предназначенный для решения обратных задач подводной акустики. Рассматривались задачи двух видов. В задачах первого вида необходимо по полученному (от источника до приемника) акустическому сигналу восстановить профиль скорости звука в воде, а также расстояние между источником и приемником сигнала. В задачах второго вида необходимо по полученному акустическому сигналу восстановить параметры морского дна (плотность, скорость звука), а также расстояние от источника до приемника сигнала. В проекте Acoustics@home успешно решены задачи обоих видов.

Был разработан и запущен BOINC-проект SAT@home [3], предназначенный для решения задач, сводимых к проблеме булевой выполнимости. В данном проекте были решены задачи криптоанализа генератора ключевого потока A5/1, а также ослабленные задачи криптоанализа генератора ключевого потока Bivium. При этом для нахождения декомпозиций был использован алгоритм, основанный на методе Монте-Карло. Данный алгоритм был реализован в виде параллельной программы и запускался на вычислительном кластере «Академик В.М. Матросов» Иркутского суперкомпьютерного центра СО РАН [4].

Был разработан программный комплекс CluBORun (Cluster for BOINC Run), позволяющий увеличивать производительность BOINC-проектов за счет простаивающих ресурсов вычислительных кластеров. CluBORun был использован для ускорения проекта SAT@home, а также ряда других проектов.

1. Anderson D.P. BOINC: A System for Public-Resource Computing and Storage // Proc. of the 5th IEEE/ACM Intern. Workshop on Grid Computing. 2004. Pittsburgh, USA. P. 1-7.
2. Zaikin O.S., Petrov P.S. Algorithm of reconstruction of the sound speed profile in a shallow-water geoacoustic waveguide from modal dispersion data // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016. Vol. 52, № 3. P. 259-265.
3. Semenov A.A., Zaikin O.S. Algorithm for finding partitionings of hard variants of Boolean satisfiability problem with application to inversion of some cryptographic functions // SpringerPlus. 2016. Vol. 5, № 1. P. 1-16.
4. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс]: сайт. Иркутск: ИДСТУ СО РАН. URL: http://hpc.icc.ru (дата обращения: 20.11.2017).
5. Afanasiev A.P., Bychkov I.V., Zaikin O.S., Manzyuk M.O., Posypkin M.A., Semenov A.A. Concept of a multitask grid system with a flexible allocation of idle computational resources of supercomputers // J. of Computer and Systems Sciences International. 2017. Vol. 56, № 4. P. 701-707.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-00155-а) и Совета по грантам Президента РФ (стипендия № СП-1184.2015.5).

АЛГОРИТМ ПОИСКА МИНИМУМА НЕВЫПУКЛОГО ФУНКЦИОНАЛА, ОСНОВАННЫЙ НА НЕЙРОННОЙ МОДЕЛИ ШЕПАРДА*

Т.С. Зароднюк
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
tz@icc.ru

Задача поиска глобального минимума невыпуклых функционалов, определенных на решениях нелинейных динамических систем, остается серьезной проблемой даже в случае систем небольших размерностей. Большинство известных алгоритмов (см., напр., [1]) носит эвристический характер и в сложных случаях не позволяет достичь удовлетворительных результатов. Основной проблемой предлагаемых подходов является проблема эффективного использования информации, получаемой в процессе работы алгоритмов. В связи с этим актуальной является задача построения алгоритмов оптимизации «с памятью», способных ограничивать размеры внутренней информационной базы без существенной потери качества поиска.

В докладе рассматривается технология решения невыпуклых задач оптимального управления, основанная на методиках машинного обучения. Основная идея предлагаемого подхода заключается в создании информационной базы, рационально накапливающей управления, уже опробованные в процессе решения. В качестве обучаемой модели используется модифицированная модель Шепарда (см., напр., [2]), которая корректируется на каждой итерации и позволяет генерировать пробные точки-управления для последующих итераций.

На стартовом этапе работы алгоритма выбирается фиксированная сетка дискретизации непрерывной системы и устанавливается максимальный размер встроенной информационной базы. Далее с применением алгоритмов генерации квазислучайных управлений кусочно-линейного или сплайнового типа (см., напр., [3]) база заполняется полностью и для каждого из запомненных управлений путем решения задачи Коши вычисляется значение функционала. На втором этапе с использованием модели Шепарда и несложной эвристической процедуры создается набор новых пробных управлений и среди них выбирается и вносится в базу лучшее по прогнозируемому значению функционала. Третий этап посвящен локальной «чистке» информационной базы, в процессе которой в ней находится узел («нейрон»), дающий наименьший вклад в точность аппроксимации целевого функционала; этот узел удаляется из базы. Отметим, что на третьем этапе «чистке» не подвергаются управления, дающие хорошие, недалекие от рекордных, значения функционала. Таким образом, размер информационной базы на итерациях не меняется, а в процессе коррекций удается построить сетку в пространстве дискретизованных управлений, условно равномерно покрывающую допустимое множество и сгущающуюся в окрестности глобального решения.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S., Finkelshtein E.A., Anikin A.S. The Method of Uniform Monotonous Approximation of the Reachable Set Border for a Controllable System // J. Glob. Optim., 2016. Vol. 66. P. 53-64.
2. Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data // Proc. of the 23 ACM National Conf. ACM Press, NY. 1968. P. 517-524.
3. Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S. Tunneling algorithm for solving nonconvex optimal control problems // Optimization, Simulation, and Control, Springer Optimization and Its Applications. 2013. Vol. 76. P. 289–299.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-07-00627.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ НЕЛОКАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ РАССЛОЕННОЙ ВЫБОРКИ*

Т.С. Зароднюк, А.С. Аникин
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
tz@icc.ru, htower@icc.ru

Задача поиска глобального минимума для мультиэкстремальных функций продолжает оставаться одной из самых проблемных и одновременно престижных задач невыпуклой оптимизации. Основным приложением в данном классе задач являются, без сомнения, проблемы поиска низкопотенциальных атомно-молекулярных кластеров [1]. Экспоненциальный рост числа локальных экстремумов в этих задачах и определяет их сложность. Среди предложенных за последние 20 лет алгоритмов для этого типа задач одно из центральных мест занимает, вполне заслуженно, метод MSBH (Monotonic Sequence Basin-Hoping, см., напр., [1]). С применением указанного метода были получены, например, почти все известные рекордные результаты для кластеров Морса [2-4]. В традиционных терминах теории глобальной оптимизации это алгоритмическое семейство может быть классифицировано как методы расслоенной выборки.

Метод MSBH основан на многочисленных локальных спусках из различных случайных точек. В отличие от других методов типа расслоенной выборки (случайный мультистарт и т.п.) генерация новых стартовых приближений производится из малой окрестности известной рекордной точки. Из вычислительной практики известно, что алгоритмический параметр, задающий размер этой окрестности, оказывает очень существенное влияние на работоспособность всего подхода. Традиционно экспериментально выявляется рациональное значение этого параметра, и все расчеты производятся с фиксированным его значением. Для задач небольших размерностей традиционный подход дает вполне удовлетворительные результаты. Но для более сложных задач число требуемых для достижения результата локальных спусков и соответственно вычислительные затраты многократно увеличиваются.

В работе рассматриваются предложенные технологии подбора оптимальных размеров стартовой окрестности. В первом варианте используется равномерное случайное распределение на заданном интервале значений, что соответствует гипотезе об отсутствии заметно выраженной зависимости эффективности алгоритма от размера параметра. Более перспективными представляются второй и третий варианты, в рамках которых по методике обучения с подкреплением строятся обратные связи, направленные на учет успешности, точнее говоря, полезности решения локальных задач. В качестве обучаемой модели при таком подходе используется одномерная функция, значения которой в пробных точках существенно увеличиваются при достижении нового рекорда и немного уменьшаются в противном случае. Второй вариант алгоритма основан на булевской оценке успешности локального спуска («получен или не получен новый рекорд»), в третьем варианте учитываются также достигнутые значения функции в найденных локальных экстремумах. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Leary R.H. Global Optima of Lennard-Jones Clusters // J. of Global Optimization. 1997. Vol. 11, № 1. P. 35-53.
2. Feng Y., Cheng L., Liu H. Putative global minimum structures of Morse clusters as a function of the range of the potential: 161 <= N <= 240 // J. of Physical Chemistry. 2009. Vol. 49, № 113. P. 13651–5.
3. Evtushenko Y., Posypkin M., Effective hull and its approximation // Proc. of V Intern. Conf. OPTIMA-2014. P. 67-68.
4. Аникин А.С., Горнов А.Ю. Оптимизация потенциала Морса для кластеров размерностей 241-260 атомов // Тез. конф. «Ляпуновские чтения». Иркутск, 2014. С. 5.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-07-00627.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИНАНСОВОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ*

Т.С. Зароднюк[1], Р. Энхбат[2]
[1] Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
[2] Национальный университет Монголии, Улан-Батор
tz@icc.ru

Рассматривается известная модель оптимального финансирования корпораций, впервые предложенная в работе [1] и характеризующая распределение инвестиций, с целью выделения доли прибыли, которую необходимо использовать для внутреннего развития фирмы

$$\dot{x}_1(t) = c\left[rx_2(t)\left(1-u_1(t)\right) - \rho x_1(t) \right],\ x_2(t) = rx_2(t)\left[u_1(t) + u_2(t)\left(1 - \frac{x_2(t)}{(1-\delta)x_1(t)}\right)\right], \qquad (1)$$

здесь $x_1(t)$ – рыночная стоимость акций компании, $x_2(t)$ – собственный капитал, затрачиваемый на акцию. Заданы следующие ограничения на долю доходов, удерживаемых с целью увеличения основных средств – $u_1(t)$, и новых денег, вложенных в компанию – $u_2(t)$:

$$u(t) \in U = \left\{ u \mid u_1 + u_2 \le \frac{k}{r} < 1, u_1 \ge 0, u_2 \ge 0 \right\},\ x_1(0) = x_1^0,\ x_2(0) = x_2^0. \qquad (2)$$

Значение вектора фазовых координат в стартовой точке и параметры модели заданы: $x^0 = (x_1^0, x_2^0)$, $c = 1$, $r = 0.2$, $\rho = \delta = 0.1$, $k = 0.15$, $t_1 = 5$. Необходимо максимизировать текущую стоимость акций при выполнении заданных ограничений

$$J(u) = x_1(t_1)e^{-\rho t_1} + \int_0^{t_1} rx_2(t)e^{-\rho t}\left(1-u_1(t)\right)dt \to \max. \qquad (3)$$

Вычислительные эксперименты по исследованию представленной задачи с различными значениями параметров модели проведены с использованием алгоритмов поиска минимума невыпуклых функционалов, зависящих от траекторий нелинейных управляемых динамических систем, с использованием методологии обучения с подкреплением. Полученные результаты (рис.1) совпали с известным решением [2].

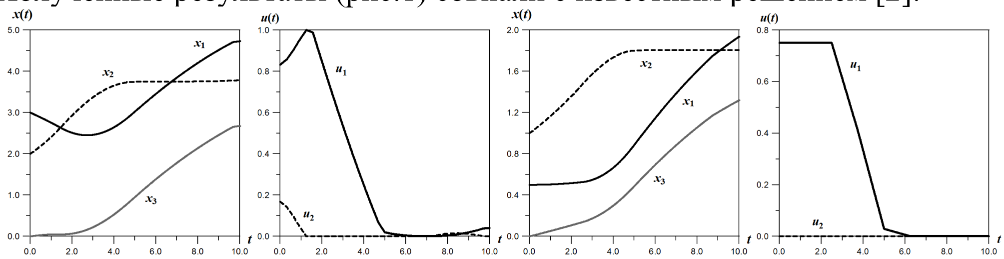


Рис. 1. Оптимальные траектории и управление в задаче (1)–(3):
а) $x^0 = (3,2)$, $J^* = 4.42$, б) $x^0 = (0.5,1)$, $J^* = 2.03$.

Результаты решения характеризуют динамическую структуру финансовых потоков фирмы и оптимальный переход от одного источника финансирования к другому. Использование технологии машинного обучения позволило на порядок ускорить получение оптимального результата в сравнении с классическими подходами решения задач оптимального управления.

1. Davis B.E., Elzinga D.J. The solution of an optimal control problem in financial modeling. Operations Research, 1970. Vol. 19, № 6. P. 1419-1433.
2. Ping Chen, Sardar M.N. Islam. Optimal Control Models in Finance. A New Computational Approach. 2005. P. 94.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-07-00627.

О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ОБОБЩЕННОГО ГИРОСТАТА КОВАЛЕВСКОЙ*

В.Д. Иртегов, Т.Н. Титоренко
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
irteg@icc.ru, titor@icc.ru

Метод качественного анализа систем обыкновенных дифференциальных уравнений, предложенный А. Пуанкаре [1], сводит задачу к выделению особых решений системы и исследованию их окрестности. В результате получается фазовый портрет системы. У систем общего вида особыми являются положения равновесия и периодические движения. В случае консервативных систем класс таких решений расширяется за счет инвариантных многообразий (множеств ненулевой размерности) и их семейств. Инвариантные многообразия (ИМ) можно, например, получить из необходимых условий экстремума элементов алгебры первых интегралов задачи. Здесь также возникает задача об устойчивости таких ИМ в смысле Ляпунова. Наличие особых ИМ требует для получения фазового портрета системы построения фазового портрета на этих ИМ, т.е. отыскания особых решений и исследования их устойчивости.

На основе указанного подхода проведено исследование уравнений движения гиростата Ковалевской в двух постоянных силовых полях [2]. Уравнения движения гиростата записываются так:

$$\begin{aligned}
&2\dot{p} = q(r-\lambda) + b\delta_3, && \dot{\gamma}_1 = \gamma_2 r - \gamma_3 q, && \dot{\delta}_1 = \delta_2 r - \delta_3 q,\\
&2\dot{q} = x_0\gamma_3 - p(r-\lambda), && \dot{\gamma}_2 = \gamma_3 p - \gamma_1 r, && \dot{\delta}_2 = \delta_3 p - \delta_1 r,\\
&\dot{r} = -b\delta_1 - x_0\gamma_2, && \dot{\gamma}_3 = \gamma_1 q - \gamma_2 p, && \dot{\delta}_3 = \delta_1 q - \delta_2 p.
\end{aligned} \tag{1}$$

Уравнения (1) допускают следующие первые интегралы:

$$\begin{aligned}
&2H = 2(p^2+q^2) + r^2 + 2(x_0\gamma_1 - b\delta_2) = 2h, \quad V_1 = (p^2 - q^2 - x_0\gamma_1 - b\delta_2)^2 + (2pq - x_0\gamma_2 + b\delta_1)^2\\
&\quad + 2\lambda[(p^2+q^2)(r-\lambda) + 2(bq\delta_3 - px_0\gamma_3)] = c_1, \quad V_2 = \gamma_1^2+\gamma_2^2+\gamma_3^2 = 1, \; V_3 = \delta_1^2+\delta_2^2+\delta_3^2 = 1,\\
&V_4 = \gamma_1\delta_1 + \gamma_2\delta_2 + \gamma_3\delta_3 = c_2, \quad V_5 = x_0^2[p\gamma_1 + q\gamma_2 + (r+\lambda)\gamma_3/2]^2 + b^2[p\delta_1 + q\delta_2 + (r+\lambda)\delta_3/2]^2\\
&\quad - bx_0(r-\lambda)[(\gamma_2\delta_3 - \gamma_3\delta_2)p + (\gamma_3\delta_1 - \gamma_1\delta_3)q + (r+\lambda)(\gamma_1\delta_2 - \gamma_2\delta_1)/2] + x_0 b^2\gamma_1(\delta_1^2+\delta_2^2+\delta_3^2)\\
&\quad - x_0^2 b\delta_2(\gamma_1^2+\gamma_2^2+\gamma_3^2) - bx_0(b\delta_1 - x_0\gamma_2)(\gamma_1\delta_1+\gamma_2\delta_2+\gamma_3\delta_3) = c_3.
\end{aligned}$$

Исследуемая система консервативная, вполне интегрируемая. Установлено, что в случае параллельных силовых полей уравнения (1) имеют семейства перманентных вращений, при специальной ориентации силовых полей – семейства положений равновесия и при отсутствии ограничений на направления силовых полей – два ИМ коразмерности 2. Показано, что семейства перманентных вращений и положений равновесия принадлежат пересечению этих ИМ. Проведено исследование найденных решений на устойчивость по Ляпунову.

1. Пуанкаре А. О кривых, определяемых дифференциальными уравнениями. М.−Л.: ОГИЗ, 1947.
2. Bobenko A.I., Reyman A.G., Semenov-Tian-Shansky M.A. The Kowalewski Top 99 Years Later: A Lax Pair, Generalizations and Explicit Solutions // Commun. Math. Phys. 1988. Vol. 122. P. 321−354.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (грант № НШ-5007.2014.9) и РФФИ (грант № 16-07-00201а).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВСПЛЫВАНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ*

В.В. Козлов[1], М.М. Макаров[2], А.С. Аникин[1]
[1]Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
[2]Лимнологический институт СО РАН
gornov@icc.ru, boba50@mail.ru

В работе приводятся данные о всплытии отдельных фрагментов газовых гидратов метана на поверхность озера Байкал. Приведены зимние гидроакустические (эхолотные) данные регистрации всплывающих газовых гидратов.

Выполнено подробное моделирование процесса разложения (диссоциации) всплывающего к поверхности газогидратного фрагмента в неограниченном объеме жидкости. Выше границы фазового равновесия при температурах T < 273.15 К между монолитным газовым гидратом и окружающей средой образуется промежуточный слой – «ледяная корка». Этот слой имеет сложную неоднородную структуру и состоит из пористого льда (снега), газа, возможно воды и остатков неполностью разложившихся кристаллов газового гидрата. Гидрат, лед (снег) и воду считаем несжимаемыми. Процесс разложения лимитируется только подводом тепла к поверхности газового гидрата с учетом теплового сопротивления окружающей газовый гидрат «ледяной корки». В процессе всплытия температура на границе гидрат – «ледяная корка» равна равновесной температуре фазового превращения, а температура на границе «ледяная корка» – вода равна температуре замерзания воды. Эффекты разложения, связанные с диффузией тепла внутри и «самоконсервация» (кинетика замедленного разложения) газовых гидратов, не учитываются. Уравнение для определения скорости всплывания газового гидрата сферической формы с «ледяной коркой» получено из уравнения импульсов для тела с переменной массой. Из баланса тепла на границах фазового превращения гидрат – «ледяная корка» и «ледяная корка» – вода получены уравнения для определения радиуса газового гидрата и радиуса гидрата с «ледяной коркой». Полученная замкнутая система уравнений относительно неизвестных решалась численно. В результате решения обратной задачи получены оценки эффективной теплопроводности «ледяной корки» и рассчитаны начальные радиусы всплывающих газовых гидратов зафиксированных эхолотом. Показано, что начиная с диаметра 0,025 м и более, кусок газового гидрата может достигнуть поверхности озера в условиях реального вертикального распределения температуры в озере Байкал. Данные, полученные при численном моделировании, хорошо согласуются с натурными данными, полученными при помощи акустической съемки всплывающих фрагментов газовых гидратов. Показано, что на эхограммах траектория всплытия отображается только с глубин более 250 м. Эта глубина соответствует температуре $T \le 273.15$ K. Таким образом, с момента образования «ледяной корки» на поверхности газового гидрата отражающая способность значительно увеличивается. Видимо, это происходит за счет присутствия газа в пористой структуре «ледяной корки».

По результатам исследований представлена в печать публикация: N.G. Granin, V.V. Kozlov, M.M. Makarov, R.U. Gnatovsky, V.V. Blinov, V.G. Ivanov, I.B.Mizandroncev, I.A. Aslamov, A.S. Anikin, Granin M.N. Emergence of gas hydrates and the formation of specific ice forms in lake Baikal.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-07-03827 А и № 15-55-12378 ННИО_а).

О РОБАСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ВЫСОКОГО ИНДЕКСА В УСЛОВИЯХ СТРУКТУРИРОВАННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ*

А.Д. Кононов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
my_official@rambler.ru

Рассматривается система уравнений вида

$$\left(A+C_1\Delta_1 D_1\right)x'(t)+(B+C_2\Delta_2 D_2)x(t)=0, \qquad t\in T=[0,+\infty), \qquad (1)$$

где A, B, C_1, C_2, D_1, D_2 – заданные вещественные $(n\times n)$-матрицы, Δ_1 и Δ_2 – матрицы неопределенностей, $x(t)$ – искомая n-мерная вектор-функция. Предполагается, что $\det A = 0$ и матричный пучок $\lambda A + B$ регулярен. Такого рода системы называют дифференциально-алгебраическими уравнениями (ДАУ). Важнейшей характеристикой ДАУ является индекс неразрешенности, отражающий сложность внутренней структуры системы.

Исследуется вопрос об устойчивости системы вида (1) в предположении, что номинальная система

$$Ax'(t)+Bx(t)=0, \qquad t\in T \qquad (2)$$

асимптотически устойчива.

На основании результатов статьи [1] показано, что для ДАУ (2) существует обратимый оператор $\Re = R_0(t)+R_1(t)\frac{d}{dt}+\cdots+R_r\left(\frac{d}{dt}\right)^r$, действие которого преобразует систему (2) к виду

$$\begin{pmatrix} O & O \\ E_{n-d} & O \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x'_1(t) \\ x'_2(t) \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} J_1 & E_d \\ J_2 & O \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}=0, \qquad (3)$$

где E_d – единичная матрица указанного порядка; J_1 и J_2 – некоторые матрицы соответствующих размеров; $colon(x_1(t), x_2(t)) = Qx(t)$, Q – матрица перестановки строк; r – индекс неразрешенности. При этом множества решений систем (2) и (3) совпадают.

Основная сложность исследования робастной устойчивости ДАУ связана с тем, что возмущения коэффициентов могут изменить структуру и дифференциальный порядок системы даже в случае индекса 1. Поэтому матрицы возмущений не могут быть произвольными.

Найдены достаточные условия, при которых возмущения не меняют внутреннюю структуру ДАУ (1). В предположениях, обеспечивающих сохранение структуры, получены условия робастной устойчивости ДАУ (2). Кроме того, для ДАУ (1) введено понятие радиуса устойчивости и получены соответствующие оценки этого радиуса.

1. Щеглова А.А. Существование решения начальной задачи для вырожденной линейной гибридной системы с переменными коэффициентами // Известия вузов. Математика. 2010. № 9. С. 57–70.

* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект No 16-31-00101).

УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ И ЗНАКООПРЕДЕЛЕННОСТЬ ОДНОРОДНЫХ ФОРМ*

А.А. Косов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
kosov_idstu@mail.ru

Как было установлено А.М.Ляпуновым, для линейных систем с постоянными коэффициентами необходимые и достаточные условия асимптотической устойчивости могут быть получены с помощью функций Ляпунова, как из класса квадратичных форм, так и из класса однородных форм четной степени выше двух с одинаковым успехом. Таким образом, в случае линейных систем с постоянными коэффициентами применение форм высоких степеней не дает никаких преимуществ, создавая лишь дополнительные проблемы, связанные с отсутствием критериев знакоопределенности.

Простые примеры показывают [1], что при анализе устойчивости систем с переключениями формы степени выше второй могут предоставлять более широкие возможности исследователю, чем квадратичные формы. Тем самым возникает новый стимул к разработке критериев знакоопределенности форм выше второй степени.

Теорема. *Для того чтобы однородная форма степени* $2m$ *от двух переменных была положительно определенной, необходимо и достаточно, чтобы она была представима в виде произведения* m *положительно определенных квадратичных форм.*

В части достаточности эта теорема справедлива и для форм от более, чем двух переменных. В части необходимости вопрос о возможности распространения на формы от произвольного числа переменных остается открытым.

Эта теорема очень полезна при построении общей функции Ляпунова для двумерных систем с переключениями и однородными функциями в правых частях.

Конструктивные достаточные условия знакоопределенности, близкие к необходимым, в ряде случаев могут быть получены на основе подхода, предложенного Т.К. Сиразетдиновым и А.Б. Аминовым в [2]. При этом задача сводится к выбору параметров-коэффициентов, обеспечивающих положительную определенность связки матриц. Для случая форм 4-й степени от трех переменных выполнена программная реализация данного подхода, показавшая хорошую эффективность на ряде тестовых примеров.

1. Косов А.А. Исследование конвергенции сложных почти периодических систем с помощью вектор-функций сравнения с компонентами в виде форм четной степени // Известия вузов. Математика. 2015. № 7. С. 25-35.
2. Сиразетдинов Т.К., Аминов А.Б. К задаче построения функций Ляпунова для исследования устойчивости в целом решения систем с полиномиальной правой частью // Метод функций Ляпунова и его приложения / Под ред. В.М. Матросова, С.Н. Васильева. Новосибирск: Наука, 1981. С. 72-87.

* Работа поддержана РФФИ, проект 15-08-06680.

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕАКЦИИ-ДИФФУЗИИ И СВЯЗАННЫХ С НИМИ НЕЛИНЕЙНЫХ ОДУ*

А.А. Косов, Э.И. Семенов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
kosov_idstu@mail.ru edwseiz@gmail.com

Изучается нелинейная система реакции-диффузии, моделируемая системой уравнений параболического типа со степенными нелинейностями. Предложена конструкция анзатца для отыскания точных решений, позволяющая декомпозировать процесс отыскания компонент, зависящих от времени и от пространственных переменных. Построены многопараметрические семейства точных решений, задаваемых элементарными функциями. Выделены случаи взрывающихся (blow-up solution) или периодических по времени и анизотропных по пространственным переменным точных решений.

Особое внимание уделено существованию и построению периодических решений. Для случаев, когда исходная система состоит из двух или трех уравнений, получены условия на параметры, гарантирующие существование семейств периодических решений.

Рассматривается также система обыкновенных дифференциальных уравнений со степенными нелинейностями, возникающая при применении предложенного анзатца к параболическим уравнениям реакции-диффузии. Такого рода системы обыкновенных дифференциальных уравнений со степенными нелинейностями имеют и самостоятельное значение, они используются в математической биологии и химической кинетике, а также могут возникать в результате редукции более сложных моделей. Найдены условия на параметры системы, гарантирующие существование первых интегралов, задаваемых комбинациями степенных и логарифмических функций от фазовых переменных. С использованием первых интегралов построены периодические решения нелинейных трехмерных систем.

Приводится целый ряд примеров, иллюстрирующих полученные результаты.

* Работа поддержана РФФИ, проект 15-08-06680.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА В СРЕДЕ UNITY3D

Д.А. Костылев
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова
mail@kostydenis.me

Основным устройством, устанавливаемым на каждый подводный необитаемый подводный аппарат, является гидролокатор бокового обзора. Это связано с тем, что оптические камеры требуют большого количества энергии аккумуляторов, которые имеют ограниченную емкость, а также дальность обзора недостаточна для наблюдения за поверхностью дна с высоты движения аппарата.

В данной работе разработана модель гидролокатора бокового обзора для комплексной системы тестирования различных алгоритмов в среде Unity3d.

Модель состоит из двух частей: сбор сырых данных, основанный на измерении расстояния от различных точек поверхности до излучателя, которыми оперирует аппарат, и преобразование этих данных в вид, совместимый с алгоритмами обработки ГБО-изображений и удобный для изучения человеком [1, 2].

Данный алгоритм также учитывает свойства объекта, от которого отражается сигнал. Это значит, что отзвук, отраженный от песка, будет иметь меньшую интенсивность, чем отзвук, отраженный от металла [3, 4].

Реализация модели представляет собой единый модуль, который ассоциируется с моделью подводного аппарата в системе, что обеспечивает простую интеграцию алгоритма с проектом программного комплекса имитационного моделирования подводных роботов.

1. Хмельнов А.Е., Золотарев В.В. Моделирование гидролокационных изображений с использованием графических ускорителей // Подводные исследования и робототехника 2011. № 1. С. 41–48.
2. Бобков В., Морозов М., Багницкий А., Инзарцев А., Павин А., Щербатюк А., Туфанов И. Имитационный моделирующий комплекс для обследовательского автономного подводного робота // Научная визуализация. 2013. № 4. С. 47–70.
3. Chong K.S., Kleeman L. Sonar Based Map Building for a Mobile Robot // Robot. Autom. 1997. Proc. IEEE Intern. Conf. 1997. Vol. 2. P. 1700–1705.
4. Varveropoulos V. Robot Localization and Map Construction Using Sonar Data // Rossum Proj. 2005. Vol. 10. P. 1–10.

ЗАДАЧА С ЗАДАННЫМ ТЕПЛОВЫМ ФРОНТОМ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ИСТОЧНИКОМ*

П.А. Кузнецов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
pav_ku@mail.ru

Рассматривается краевая задача для нелинейного уравнения теплопроводности в полярных координатах с источником

$$u_t = u\left(u_{\rho\rho} + \frac{1}{\rho}u_\rho + \frac{1}{\rho^2}u_{\varphi\varphi}\right) + \frac{1}{\sigma}\left(u_\rho^2 + \frac{1}{\rho^2}u_\varphi^2\right) + F(u); \tag{1}$$

$$u(t,\rho,\varphi)\big|_{\rho=a(t,\varphi)} = 0. \tag{2}$$

Здесь $\sigma > 0$ – константа, $u = u(t,\rho,\varphi)$ – искомая функция, t – время, $\rho > 0$, $\varphi \in [-\pi;\pi)$ – полярные координаты; $a(t,\varphi)$ – известная функция, такая, что $a(t,-\pi) = a(t,\pi-0)$. Функция источника $F(u)$ определена при $u \geq 0$, причем $F(0) = 0$.

Задача (1), (2) относится к классу задач о построении тепловых волн. Тепловая волна представляет собой две интегральные поверхности уравнения (1) ($u \geq 0$ и $u \equiv 0$), непрерывно состыкованные вдоль линии $\rho = a(t,\varphi)$, называемой тепловым фронтом. Близкие задачи ранее исследовались в работах [1-3] при $F \equiv 0$. Для задачи (1), (2) доказана следующая

Теорема. *Пусть функция* $a(t,\varphi)$ *аналитическая при* $t = 0$ *и* $\varphi \in [-\pi;\pi)$, *причем* $a(0,\varphi) \neq 0$ *и* $a_t(0,\varphi) \neq 0$; *функция* $F(u)$ *аналитическая при* $u = 0$. *Тогда существует локально аналитическое решение задачи* (1), (2), *единственное при выборе знака* $a_t(0,\varphi)$.

Доказательство теоремы проводится в два этапа. Вначале строится решение задачи (1), (2) в виде формального ряда по степеням $r = \rho - a(t,\varphi)$

$$u(t,r,\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_n(t,\varphi)}{n!} r^n; \qquad u_n(t,\varphi) = \left.\frac{\partial^n u(t,r,\varphi)}{\partial r^n}\right|_{r=0}, \tag{3}$$

коэффициенты которого определяются рекуррентно. Затем с помощью метода мажорант доказывается сходимость ряда (3).

Полученные результаты обобщают ранее представленные в работе [3].

1. Сидоров А.Ф. Избранные труды: Математика. Механика. М.: Физматлит, 2001. 576 с.
2. Казаков А.Л., Кузнецов П.А. Об одной краевой задаче для нелинейного уравнения теплопроводности в случае двух пространственных переменных // Сиб. журнал индустриальной математики. 2014. Т. 17, № 1. С. 46-54.
3. Казаков А.Л., Спевак Л.Ф., Нефедова О.А. Решение двумерной задачи о движении фронта тепловой волны с использованием степенных рядов и метода граничных элементов // Известия ИГУ. Сер. Математика. 2016. Т. 18. С. 21-37.

* Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты № 16-01-00608 А и № 16-31-00291 мол_а.

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ИНТЕРВАЛЬНЫХ МАТРИЦ ПОЛНОГО РАНГА

А.В. Лакеев
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
lakeyev@icc.ru

Если A – $m \times n$-матрица и b – m-мерный вектор, то псевдорешением уравнения $Ax = b$ называется n-мерный вектор x, доставляющий минимум функционалу $\|Ax-b\|_2^2 = (Ax-b, Ax-b)$ (квадрат эвклидовой нормы).

Для двух матриц $\underline{A}$, $\overline{A}$ таких, что $\underline{A} \le \overline{A}$ (неравенство понимается поэлементно), интервальной матрицей называется множество $\widetilde{A} = \{A \,|\, \underline{A} \le A \le \overline{A}\}$ и, аналогично, для интервального вектора $\widetilde{b} = \{b \,|\, \underline{b} \le b \le \overline{b}\}$.

Далее будем рассматривать интервальные $m \times n$-матрицы с $m \ge n$.

Будем говорить, что интервальная $m \times n$-матрица имеет полный ранг (более точно полный ранг по столбцам), если любая матрица $A \in \widetilde{A}$ имеет полный ранг.

Если $m = n$, то это условие эквивалентно невырожденности $\widetilde{A}$ (любая матрица $A \in \widetilde{A}$ невырождена). В этом случае показано [1], что невырожденность $\widetilde{A}$ эквивалентна непустоте и ограниченности так называемого объединенного множества решений $\Sigma(\widetilde{A}, \widetilde{b}) = \{x \,|\, (\exists A \in \widetilde{A})(\exists b \in \widetilde{b})(Ax = b)\}$ интервальной системы уравнений $\widetilde{A}x = \widetilde{b}$. Следующий пример показывает, что при $m > n$ это уже не верно.

Положим $\underline{A} = \begin{pmatrix} 1\,0 \\ 0\,1 \\ 1\,1 \end{pmatrix}$, $\overline{A} = \begin{pmatrix} 11 \\ 11 \\ 11 \end{pmatrix}$, $\underline{b} = \overline{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$. Тогда можно показать, что $\Sigma(\widetilde{A}, \widetilde{b}) = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$, но в $\widetilde{A}$ очевидно есть матрица ранга меньше 2, а именно, $\overline{A}$.

Заметим, что вектор x будет псевдорешением тогда и только тогда, когда $A^T Ax = A^T b$.

Введем следующее множество $\widetilde{\Sigma}(\widetilde{A}, \widetilde{b}) = \{x \,|\, (\exists A \in \widetilde{A})(\exists b \in \widetilde{b})(A^T Ax = A^T b)\}$ – объединенное множество псевдорешений. В отличие от $\Sigma(\widetilde{A}, \widetilde{b})$ множество $\widetilde{\Sigma}(\widetilde{A}, \widetilde{b})$ всегда непусто и $\Sigma(\widetilde{A}, \widetilde{b}) \subseteq \widetilde{\Sigma}(\widetilde{A}, \widetilde{b})$. Доказано следующее утверждение.

Теорема. 1). *Если $\widetilde{A}$ имеет полный ранг, то для любого $\widetilde{b}$ множество $\widetilde{\Sigma}(\widetilde{A}, \widetilde{b})$ ограничено.*

2). *Если для некоторого $\widetilde{b}$ множество $\widetilde{\Sigma}(\widetilde{A}, \widetilde{b})$ ограничено, то $\widetilde{A}$ имеет полный ранг.*

Отметим также, что утверждение 1), по сути, доказано в работе [2], где также имеется много различных условий как необходимых, так и достаточных для того, чтобы $\widetilde{A}$ имела полный ранг.

1. Lakeyev A.V., Kreinovich V. NP-hard classes of linear algebraic systems with uncertainties // Reliable Computing. 1997. Vol. 3, № 1. P. 51-81.
2. Шарый С.П. Об интервальных матрицах полного ранга // Сибирский журн. вычисл. математики. 2014. Т. 17, № 3. С. 289–304.

О ЗАДАЧЕ УПАКОВКИ КРУГОВ ДВУХ ТИПОВ В ОГРАНИЧЕННОЕ МНОЖЕСТВО С НЕЕВКЛИДОВОЙ МЕТРИКОЙ*

А.А. Лемперт
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
lempert@icc.ru

В работе рассматривается задача об упаковке наборов из кругов двух типов в односвязное множество. При этом число кругов полагается заданным, также фиксируется отношение радиусов кругов из разных наборов.

Пусть X – метрическое пространство с метрикой $\rho(x,y)$, $P \subset X$ – замкнутое односвязное множество, $s_i = (x_i, y_i)$, $i = 1,...,n+m$ – координаты центров упаковываемых кругов. Без ограничения общности можно считать, что первые n кругов имеют радиус R_1, а оставшиеся m – радиус $R_2 = \frac{1}{k} R_1$, $k \in \mathbb{N}$. Требуется определить вектор координат центров кругов $s = (s_1,...,s_{n+m}) \in \mathbb{R}^{2(n+m)}$, при которых значение радиуса R_1 будет максимальным. Таким образом, получаем следующую задачу:

$$R_1 \to \max,$$

$$R_2 = \frac{1}{k} R_1, k \in \mathbb{N},$$

$$\rho(s_i, s_j) \ge 2R_1, \forall i, j = \overline{1,n}, i \ne j,$$

$$\rho(s_i, s_j) \ge 2R_2, \forall i, j = \overline{n+1, n+m}, i \ne j,$$

$$\rho(s_i, s_j) \ge R_1 + R_2, \forall i = \overline{1,n}, \forall j = \overline{n+1, n+m} \quad ,$$

$$\rho(s_i, \partial P) \ge R_1, \forall i = \overline{1,n},$$

$$\rho(s_j, \partial P) \ge R_2, \forall j = \overline{n+1, n+m}$$

$$s_i \in P, \forall i = \overline{1, n+m}.$$

Здесь ∂P – граница P, $\rho(s_i, \partial P)$ – расстояние от точки до множества P.

В рамках данного исследования будем использовать следующую метрику:

$$\rho(a,b) = \min_{\Gamma \in G(a,b)} \int_{\Gamma} \frac{d\Gamma}{f(x,y)},$$

где $G(a,b)$ – множество непрерывных кривых, лежащих в X и соединяющих точки a и b, $0 < \alpha \le f(x,y) \le \beta$ – непрерывная функция, задающая мгновенную скорость движения в каждой точке множества P. Отметим, что в случае $f(x,y) \equiv 1$ данная метрика превращается в евклидову.

Для решения поставленной задачи предложен и программно реализован алгоритм, основанный на оптико-геометрическом подходе [1]. Проведено сравнение с известными результатами [2, 3], позволяющее сделать вывод о применимости и эффективности предложенного подхода.

1. Kazakov A.L., Lempert A.A. An approach to optimization in transport logistics // Automation and Remote Control. 2011. Vol. 72, Iss. 7. P. 1398–1404.
2. Lopez C., Beasley J. Packing unequal circles using formulation space search // Computers and Operations Research. 2013. Vol. 40, Iss. 5. P. 1276–1288.
3. Specht E. Packomania. URL: http://www.packomania.com/ (Дата обращения 2017-10-28).

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №16-06-00464.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ ПРОЦЕССОМ TAVERNA В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ МЕТАГЕНОМНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МИКРОБИОМА ОЗЕРА БАЙКАЛ

Ф.С. Малков, Е.А. Черкашин, А.О. Шигаров
Иркутский научный центр СО РАН
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
malkov@icc.ru

При исследовании микробиома озера Байкал методами высокопроизводительного секвенирования порождаются большие массивы метагеномных данных. Рабочий процесс обработки и анализа этих данных является многоэтапным. Например, рабочий процесс анализа ампликонов может включать до 50 последовательных этапов. Планирование и исполнение подобного рабочего процесса требует навыков работы со специализированным программным обеспечением (комплексами обработки нуклеотидных последовательностей, статистическими пакетами и средствами визуализации), а также навыков программирования скриптов исполнения вычислительных цепочек. Микробиологи не всегда способны самостоятельно реализовывать такие рабочие процессы. Кроме того, исполнение рабочего процесса требует организации хранения и управления метагеномными данными.

В докладе рассматриваются перспективы применения системы управления рабочим процессом TAVERNA [1] в задачах обработки метагеномных данных при исследовании микробиома озера Байкал. Обсуждаются вопросы ее интеграции с комплексами обработки последовательностей, статистическими пакетами и средствами визуализации. Предполагается, что система обеспечит возможность визуального проектирования и исполнение рабочих процессов, включая вопросы хранения данных. Это позволит микробиологам самостоятельно создавать собственные процессы обработки и анализа метагеномных данных при исследовании микробиома озера Байкал. В настоящее время реализована веб-ориентированная система управления данными рабочих процессов, разрабатывается интерфейс прикладного программирования для интеграции с системами управления рабочим процессом.

1. Taverna Workflow System. URL: https://taverna.incubator.apache.org (дата обращения: 13.11.2017).

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ*

Г.С. Малтугуева
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gama@icc.ru

Рассмотрим задачу принятия решений, которую в общем виде можно представить как тройку <*A, C, IP*>, где *A* – множество вариантов, *C* – множество критериев, *IP* – множество индивидуальных предпочтений. В литературе описаны разнообразные способы решения такой задачи и для выбора метода (группы методов), применимого к решению конкретной задачи, требуется оценить уровень применимости существующих методов решения.

Основным критерием для оценки методов является класс решаемых с его помощью задач, который определяется набором следующих характеристик:

1. число участников процесса принятия решений – один, группа,
2. вид показателя эффективности – однокритериальный, многокритериальный,
3. степень определенности информации – детерминированное, вероятностное (стохастическое), неопределенное принятие решений;
4. структурированность задачи – хорошо структурированная, слабоструктурированная, неструктурированная,
5. степень согласованности целей при групповом принятии решений – кооперативное, в условиях конфликта;
6. структура множества вариантов – условное принятие решений, принятия решений на конечном множестве вариантов;
7. тип используемой модели принятия решений – субъективная, объективная;
8. информированность лица, принимающего решение – целостное, критериально-экспертное принятие решения;
9. регулярность проблемной ситуации (новизна задачи) – уникальная, повторяющаяся задача;
10. вид окончательного решения – единственная альтернатива, упорядочение вариантов, кассы вариантов;
11. зависимость от времени – статическая, динамическая задача;
12. длительность периода реализации окончательного решения – краткосрочный, среднесрочный, долгосрочный;
13. вид информации (тип шкалы показателя эффективности) – количественная, качественная или смешанная информация.

Кроме этого, для лица, принимающего решение, немаловажную роль играют и такие показатели как:

1. средняя скорость формирования окончательного решения,
2. возможность возникновения парадоксов (надежность),
3. объем и качество необходимой информации,
4. время получения информации от ЛПР и/или экспертов.

В настоящее время производится оценка по указанным параметрам методов решения задач многокритериального выбора в условиях определенности. С помощью полученных оценок предлагается автоматизировать процедуру подбора метода или набора методов, применимых к решению конкретной задачи принятия решений.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 16-07-01125.

МЕТОД КОЛЛЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ НЕЧЕТКОЙ И НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ, ИЗВЛЕЧЕННОЙ ИЗ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ*

Г.С. Малтугуева, О.А. Николайчук
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gama@icc.ru, nikoly@icc.ru

Построение концептуальной модели предметной области позволяет в наглядной форме отобразить основные понятия и существующие между ними связи. В работе [1] предложен подход к извлечению знаний из концептуальных моделей. Для повышения эффективности данного процесса предложено представление извлеченных знаний в виде нечетких мультимножеств, которое основано на принципе построения мультимножеств Петровского А.Б.: нечеткое мультимножество B представляет собой совокупность троек вида $(x;\mu(x))\ {*}k$, где $\mu(x)$ – функция принадлежности, отражающая субъективную степень уверенности экспертов в том, что конкретное значение x базовой шкалы соответствует определяемому нечеткому множеству; k – число экспертов, придерживающихся данной точки зрения, $k > 0$.

В отличие от известных методов обработки нечетких мультимножеств, ориентированных на работу со значениями функций принадлежности $\mu(x)$, авторами предложен подход, опирающийся на сравнение числа экспертов (k). В рамках предложенной формы представления нечетких мультимножеств авторами определены основные операции: включение, объединение, пересечение, дополнение. Помимо этого, предложен способ оценки расстояния между ними, который позволяет определить степень их близости для формирования обоснования при принятии решений. Основными этапами метода определения расстояния между нечеткими мультимножествами являются:

1) на основе экспертной информации (набора нечетких множеств) построить мультимножества, описывающие все лингвистические переменные, в соответствии с предложенной моделью;

2) построить единую шкалу значений для сравниваемых переменных (ЕШЗ);

3) для каждого значения ЕШЗ определить функции принадлежности, при этом для недостающих значений необходимо их восстановить, исходя из вида функции принадлежности (треугольная, равномерная, нормальная);

4) расстояние между нечеткими мультимножествами определяется как сумма модулей разницы между количеством экспертов, поставивших переменным в соответствие пару.

Предложенная форма представления нечетких мультимножеств, а также определенные для них операции позволяют производить обработку нечеткой и неполной информации, полученной от нескольких экспертов. Метод оценки расстояния может быть применен для решения задачи классификации, извлечения прецедентов-аналогов и т.п.

1. Бычков И.В., Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Подход к разработке программных компонентов для формирования баз знаний на основе концептуальных моделей // Вычисл. технологии. 2016. Т. 21, № 4. С. 16-36.
2. Дородных Н.О., Малтугуева Г.С., Николайчук О.А. Метод представления и обработки экспертных знаний, извлеченных из концептуальных моделей // Седьмая Междунар. конф. «Системный анализ и информационные технологии». САИТ–2017 (13-18 июня 2017 г., Светлогорск, Россия): Тр. конф. в 2-х т. М: ИСА РАН, 2017. Т. 1. С. 363-368.

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект 15-07-05641.

ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА В РАМКАХ ТЕОРИИ БАБА-МАДХАВАРАО ДЛЯ СПИНА 3/2

Ю.А. Марков, М.А. Маркова, А.И. Бондаренко
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»
markov@icc.ru, markova@icc.ru, 370omega@mail.ru

Рассматривается проблема, связанная с выводом волнового уравнения четвертого порядка для частиц со спином 3/2. Данная задача является непосредственным обобщением работы [1], где выполнено аналогичное построение волнового уравнения третьего порядка в рамках формализма Дэффина-Кеммера-Петье для частиц со спином 1. Для решения поставленной задачи используется теория Баба-Мадхаварао для высших спинов [2, 3]. В свое время было установлено, что мультимассовое волновое уравнение типа Клейн-Гордона-Фока не допускает обратного преобразования, которое позволило бы получить решения уравнения первого порядка из решений уравнения четвертого порядка. Причиной этого является тот факт, что мультимассовый дивизор Клейна-Гордона-Фока для спина 3/2

$$d(\partial) = -\frac{16}{9}[m^3 - m^2(\beta\cdot\partial) + m(\beta\cdot\partial)^2 - \frac{5}{2}m\Box I - (\beta\cdot\partial)^3 + \frac{5}{2}(\beta\cdot\partial)\Box]$$

не коммутирует с исходным дифференциальным оператором первого порядка

$$L(\partial) = \beta\cdot\partial + mI,$$

в случае, когда вводится минимальным образом взаимодействие с внешним электромагнитным полем: $\partial_\mu \to D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu(x)$. Для того чтобы добиться коммутативности дивизора $d(D)$ и оператора $L(D)$, необходимо отказаться от требования, что произведение этих двух операторов есть оператор типа Клейн-Гордона-Фока.

Найдем вид искомого уравнения четвертого порядка в рамках теории Баба-Мадхаварао в случае отсутствия взаимодействия. С этой целью рассматриваем множество корней четвертой степени из единицы (q, q^2, q^3, 1), а в качестве спиновых матриц выбираем β_μ – матрицы, удовлетворяющие алгебре Баба-Мадхаварао для спина 3/2:

$$2\left(\beta_\mu\beta_\nu\beta_\lambda\beta_\sigma + \beta_\mu\beta_\sigma\beta_\lambda\beta_\nu + \beta_\nu\beta_\lambda\beta_\sigma\beta_\mu + \beta_\sigma\beta_\lambda\beta_\nu\beta_\mu\right) = 3\left(\beta_\mu\beta_\nu + \beta_\nu\beta_\mu\right)\delta_{\lambda\sigma} + 3\left(\beta_\mu\beta_\sigma + \beta_\sigma\beta_\mu\right)\delta_{\nu\lambda}$$
$$+\left(\beta_\lambda\beta_\sigma + \beta_\sigma\beta_\lambda\right)\delta_{\mu\nu} + \left(\beta_\lambda\beta_\nu + \beta_\nu\beta_\lambda\right)\delta_{\mu\sigma} + \left(\beta_\nu\beta_\sigma + \beta_\sigma\beta_\nu\right)\delta_{\mu\lambda} + \left(\beta_\mu\beta_\lambda + \beta_\lambda\beta_\mu\right)\delta_{\nu\sigma} - \frac{3}{2}\left(\delta_{\mu\nu}\delta_{\lambda\sigma} + \delta_{\mu\lambda}\delta_{\nu\sigma} + \delta_{\nu\lambda}\delta_{\mu\sigma}\right)I.$$

В силу данной алгебры и свойств корней из единицы справедливо следующее выражение для волнового оператора четвертого порядка:

$$[(\beta\cdot\partial) + qmI][(\beta\cdot\partial) + q^2mI][(\beta\cdot\partial) + q^3mI][(\beta\cdot\partial) + mI] = \frac{5}{2}(\beta\cdot\partial)^2\Box - \frac{9}{16}\Box^2 + m^2(q+q^3)(\beta\cdot\partial)^2 + q^2m^4I.$$

Нахождение матрицы A, такой, что выполняется соотношение

$$\left[A(\beta\cdot\partial + mI)\right]^4 = \frac{1}{m^2}\left\{\frac{5}{2}(\beta\cdot\partial)^2\Box - \frac{9}{16}\Box^2 I\right\} - m^2I,$$

решает задачу вычисления корня 4-й степени волнового уравнения 4-го порядка.

Для вывода корня четвертого порядка из волнового уравнения вводим в рассмотрение новый алгебраический объект: так называемый *деформированный* коммутатор (q-коммутатор)

$$\left[A, \beta_\mu\right]_z \equiv A\beta_\mu - z\beta_\mu A,$$

где z – некоторое комплексное число, называемое параметром деформации, а также новый набор матриц η_μ вместо исходных β_μ – матриц в алгебре Баба-Мадхаварао, явно зависящих от z. В терминах этих новых матриц предложенная процедура построения корня 4-й степени волнового уравнения приводит к следующему выражению для дифференциального оператора первого порядка:

$$\hat{L}^{3/2}(z,\partial) \equiv A\left[\frac{1}{\varepsilon^{1/2}(z)}\eta_\mu^{(\pm 3/2)}(z)\partial_\mu + \left(P_{3/2}^{(\pm)}(q) + P_{3/2}^{(\mp)}(q)\right)m\right], \tag{1}$$

где $\eta_\mu^{(\pm 3/2)}(z) = (1-zq)\eta_\mu^{(\pm 3/2)}(q) + (1+zq)\eta_\mu^{(\pm 3/2)}(q)$, $\eta_\mu^{(\pm 3/2)}(q) \equiv P_{3/2}^{(\pm 3/2)}(q)\beta_\mu$ и введены матрицы $P_{3/2}^{(\pm)}(q)$ и $P_{3/2}^{(\mp)}(q)$, обладающие свойствами проекторов.

Одной из целей работы было также показать, что волновой оператор 4-го порядка можно получить в виде формального предела $z \to q$ четвертой степени оператора (1). Однако вместо ожидаемого одного волнового уравнения четвертого порядка в пределе $z \to q$ мы получили самосогласованную систему из двух волновых уравнений четвертого порядка.

1. Markov Yu.A., Markova M.A., and Bondarenko A.I. Third order wave equation in Duffin-Kemmer-Petiau theory: Massive case // Physical Review D. 2015. Vol. 92. P. 105017(24).
2. Bhabha H.J. Relativistic wave equations for the elementary particles // Reviews Modern Physics. 1945. Vol. 17. P. 200-216.
3. Madhava Rao B.S., Thiruvenkatachar V. R. and Venkatachaliengar K. Algebra related to elementary particles of spin 3/2 // Proceeding the Royal Society A. 1946. Vol. 187. P. 385-397.
4. Markov Yu.A., Markova M.A., Bondarenko A.I. Fourth order wave equation in Bhabha-Madhavarao spin-3/2 theory // Intern. J. of Modern Physics A. 2017. Vol. 32. P. 1750144 (57).

НЕУДЕРЖИВАЮЩИЕ СВЯЗИ В СЛУЧАЕ САНЕЙ ЧАПЛЫГИНА НА НАКЛОННОЙ ВОГНУТО-ВЫПУКЛОЙ НЕГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Р.П. Мошкин
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
rmoshkin@yandex.ru

Пусть твердое тело в форме пластинки опирается на наклонную плоскость острым полукруговым лезвием, жестко соединенным с пластинкой. Предполагается, что точка опоры лезвия может свободно двигаться по плоскости вдоль касательной к лезвию, но не может передвигаться в перпендикулярном направлении; проекция центра тяжести плоскости пусть совпадает с точкой опоры S лезвия. Найдем уравнения движения построенной механической системы, используя обобщенную функцию Лагранжа, линейные дифференциальные формы, структурные коэффициенты, замкнутую систему инфинитезимальных линейных операторов и обобщенную непотенциальную силу.

Как пример использования новой формы уравнений Пуанкаре рассмотрим теперь качение саней Чаплыгина по наклонной вогнуто-выпуклой негладкой поверхности. Допускается сложное движение саней Чаплыгина с неудерживающими связями. Чтобы разобраться в сложном движении плоского твердого тела с возможными неудерживающими связями, обратимся к примеру Гиббса.

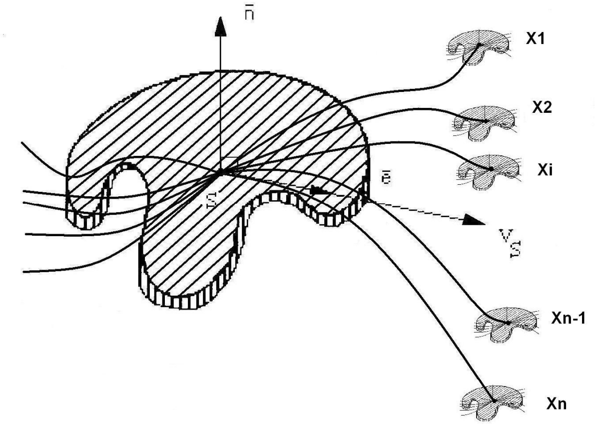


Рис. 1 . Неголономная система

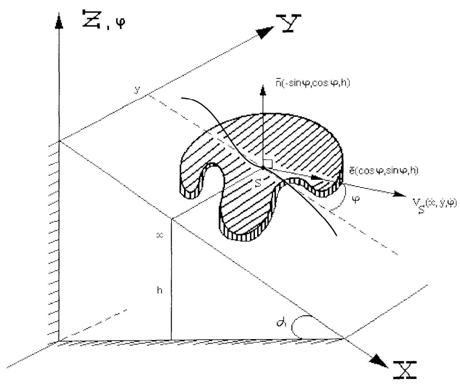


Рис. 2. Сани Чаплыгина на наклонной плоскости

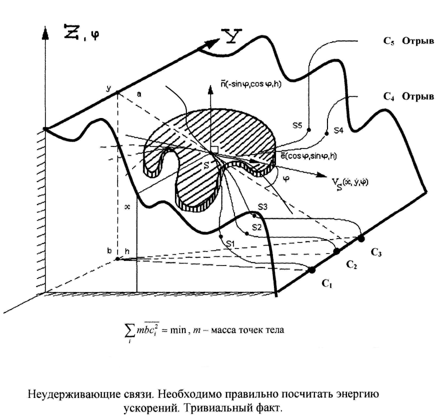


Рис. 3. Сани Чаплыгина на наклонной вогнуто-выпуклой негладкой поверхности

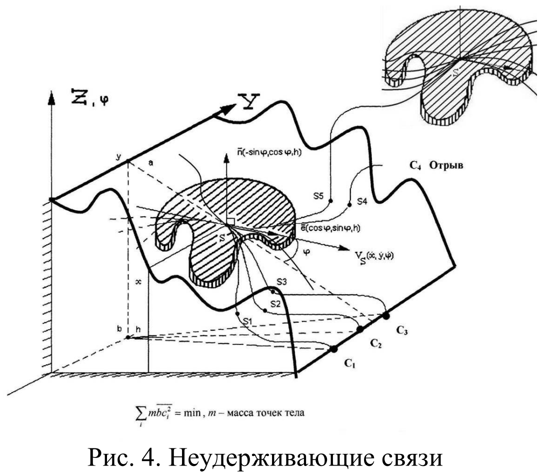


Рис. 4. Неудерживающие связи

ШАБЛОНЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ*

О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Б. Столбов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
nikoly@icc.ru

Имитационное моделирование на основе агентной парадигмы – это подход для анализа и моделирования сложных систем в терминах агентов: автономных, целеполагающих и взаимодействующих сущностей, которые могут быть организованы в сообщества. В настоящее время инструментальные средства создания агентных имитационных моделей (АИМ) предполагают наличие у пользователя хороших навыков моделирования и программирования, что, как правило, затрудняет работу для специалистов-предметников. В связи с этим создание ориентированных на специалистов-предметников методологий и программных инструментов разработки АИМ является актуальной проблемой.

Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является автоматизация процесса разработки АИМ на основе применения шаблонов. Наиболее распространено понятие *шаблона проектирования* (*software design pattern*), где под ним понимается повторяемая архитектура конструкции, представляющей собой решение проблемы проектирования в рамках некоторого часто возникающего контекста [1]. Также развивается современная типология шаблонов проектирования онтологий [2], которая использует аналогичный подход для создания онтологий. Авторы предлагают описание методологии создания агентно-ориентированных систем на основе понятия *шаблона информационного процесса*, которое дополняет понятие *шаблон проектирования* проблемно-ориентированным описанием алгоритма выполняемых действий. Благодаря этому шаблон информационного процесса может быть автоматически преобразован к исполняемому виду в отличие от шаблона проектирования, который не является законченным образцом, а лишь примером решения задачи, который можно использовать в различных ситуациях.

В качестве примера шаблона информационного процесса можно рассмотреть предметно-независимую агентно-ориентированную модель, в рамках которой на основе элементов структурной составляющей модели («Роль», «Событие», «Действие») и описания алгоритмов поведения активных элементов («Агент», «Среда») формируется описание выбранной методологии агентного моделирования, которая в дальнейшем используется для реализации АИМ [3].

1. Шаллоуей А., Тротт Джеймс Р. Шаблоны проектирования. Новый подход к объектно-ориентированному анализу и проектированию. М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. 288 с.
2. Staab S., Studer R. Handbook on Ontologies. SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 2009. 811 p.
3. Николайчук О.А., Павлов А.И., Столбов А.Б. Особенности разработки агентных имитационных моделей на основе модельно-управляемого подхода // Тр. восьмой всерос. научно-практической конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017). СПб., 2017. С. 288–293.

* Работа поддержана РФФИ, проект 15-07-05641.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РАЗРАБОТКЕ АГЕНТНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНО-УПРАВЛЯЕМОГО ПОДХОДА*

О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Б. Столбов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
asd@icc.ru, stolboff@icc.ru

MDD (Model Driven Development) – управляемая моделями разработка приложений [1]. Это подход, предполагающий создание метамоделей и средств их обработки, на основе которых происходит построение конкретных моделей, описывающих проблемную ситуацию. При этом непосредственное создание программного обеспечения для решения рассматриваемой проблемы осуществляется автоматически, без участия разработчика.

Применительно к созданию агентных имитационных моделей (АИМ) использование MDD-подхода предполагает разработку четырехуровневой системы, обеспечивающей представление информации о структуре и поведении элементов АИМ в форме онтологии, включая как общее описание архитектуры АИМ, так и спецификацию конкретной АИМ.

В работах авторов [2, 3] был предложен подход, основными идеями которого являются следующие: возможность создания АИМ на основе информации из концептуальной модели предметной области, представленной в форме онтологии; использование формализма продукционных правил и парадигмы визуального программирования для описания поведения элементов АИМ (агент, ресурс, среда и т.п.).

В развитие этих идеи с учетом применения MDD-подхода в данной работе особое внимание уделяется этапу программной реализации АИМ. В частности, разработаны метамодели, описывающие интерфейсы средства моделирования (simulation engine), машины логического вывода, блока вызова внешних процедур. Использование стандартизированного набора интерфейсов позволяет описывать различные методологии проектирования АИМ на основе единого языка спецификаций без внесения изменений в программный код, реализующий конкретную АИМ. Более подробное описание подхода представлено в работе [4].

1. France R., Rumpe B. Model-Driven Development of Complex Software: A Research Roadmap // Proc. of the Intern. Conf. «Future of Software Engineering». Minneapolis, 2007. P. 37–54.
2. Павлов А.И., Столбов А.Б. Архитектура системы поддержки проектирования агентов для имитационных моделей сложных систем // Программные продукты и системы. 2015. № 109. С. 12-16.
3. Павлов А.И., Столбов А.Б. Прототип системы поддержки проектирования агентов для имитационных моделей сложных систем // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 79–84.
4. Николайчук О.А., Павлов А.И., Столбов А.Б. Особенности разработки агентных имитационных моделей на основе модельно-управляемого подхода // Тр. восьмой всерос. научно-практической конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017). СПб., 2017. С. 288–293.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке №15-07-05641.

РАЗРАБОТКА СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РЕШАТЕЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, А.А. Пашинин
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
bvg@icc.ru

В своей фундаментальной работе [1] А.П. Ершов определил сборочное программирование как метод, который решает задачу многократного и быстрого применения в процессе создания программы заранее изготовленных деталей, роль которых играют программные модули. К наиболее важным особенностям этого метода относятся ориентация на класс задач и наличие вычислительной модели предметной области, позволяющей формулировать непроцедурную постановку задачи. В докладе предлагается дальнейшее развитие технологии интеллектуализации децентрализованного управления распределенными вычислениями на основе такого метода [2]. В качестве базы знаний решателя используется вычислительная модель, включающая множество программных модулей, работающих над полем общих транзитных величин, являющихся входными или выходными параметрами этих модулей, множество узлов вычислительного поля (ВП) и отношения, отражающие взаимосвязь модулей с величинами соответственно по входу и выходу. Под ВП понимается совокупность объединенных сетью логических узлов, каждый из которых возможно работает под управлением собственной операционной системы. Под логическим узлом понимается некоторый физический вычислительный ресурс. Оформленные в виде сервисов расчетные программные модули приложения, установленные в узле, имеют своего владельца и исполняются в местах их установки. Каждый модуль делегирует выполнение всех необходимых действий, требуемых для решения задачи нахождения целевых величин по заданным исходным величинам с помощью вычислительной модели, своему агенту, установленному в узле ВП. Модель предметной области является распределенной так, что каждый агент обладает ограниченными знаниями, как о возможностях других агентов системы, так и о топологии вычислительного поля в целом. Коммуникационная модель мультиагентной системы предполагает только парные взаимодействия между агентами на каждом этапе решения задачи. Процесс сборки программных модулей осуществляется только за счет внутренних взаимодействий мультиагентной системы без явного внешнего управления во время решения задачи. ВП является средством координации агентов. Методом координации является событийное управление. Технология разработки реализована с использованием инструментальной системы HPCSOMAS [3] и демонстрируется на примере построения интеллектуального решателя задач качественного анализа автономных двоичных динамических систем, имеющих практическое применение в генных регуляторных сетях.

1. Ершов А.П. Научные основы доказательного программирования // Вестник академии наук СССР. 1984. № 10б. С. 9-19.
2. Бычков И.В., Опарин Г.А., Богданова В.Г, Пашинин А.А. Интеллектуализация децентрализованного управления распределенными вычислениями // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 10. С. 35-42. DOI: 10.14489/vkit.2017.10.pp.035-042.
3. Bychkov I.V., Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A., Gorsky S.A. Automation Development Framework of Scalable Scientific Web Applications Based on Subject Domain Knowledge // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10421. P. 278-288.

РЕДУКЦИИ И СЕМЕЙСТВА СПЕЦИАЛЬНЫХ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ*

Св.С. Орлов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
s.orlov@icc.ru

Рассматривается квазилинейное параболическое уравнение

$$T_t = \nabla_{\boldsymbol{x}} \cdot [k(T)\nabla_{\boldsymbol{x}} T], \quad k(T) = k_0 T^{\sigma}, \tag{1}$$

где $T \triangleq T(t, \boldsymbol{x}) : \mathbf{R}_{\geq 0} \times \mathbf{R}^{1+\nu} \to \mathbf{R}_{\geq 0}$, $k_0, \sigma \in \mathbf{R}_{>0}$, $\nu \in \mathbf{Z}_{\geq 0}$. Это уравнение описывает многие процессы, встречающиеся в задачах тепло- и массопереноса, теории горения и взрыва, фильтрации жидкости и газа, химической кинетике, биологии и т.д. В литературе (1) часто называют *уравнением нелинейной диффузии*, *теплопроводности* или *нестационарной фильтрации* [1, 2].

Замена $u(t, \rho) = [T(t, \boldsymbol{x})]^{\sigma}$, где $\rho \triangleq \| \boldsymbol{x} \| = (x_1^2 + \ldots + x_{1+\nu}^2)^{1/2}$, приводит (1) к одномерному уравнению

$$u_t = u u_{\rho\rho} + \frac{u_\rho^2}{\sigma} + \frac{\nu u}{\rho} u_\rho, \tag{2}$$

в котором u – новая искомая функция, зависящая от времени $t \geq 0$ и скалярной переменной $\rho \geq 0$. С позиции задачи теплопроводности уравнение (2) описывает распространение тепловых возмущений с течением времени в пространстве $\mathbf{R}^{1+\nu}$ (в зависимости от выбора $\nu \in \mathbf{Z}_{\geq 0}$: на прямой, на плоскости, в трехмерном пространстве и т.д.) симметрично относительно начала координат.

Настоящая работа посвящена поиску точных решений типа тепловой волны [2, 3] уравнения (2), удовлетворяющих условию

$$u(t, \rho)|_{\rho = f(t)} = 0, \tag{3}$$

где функция $f \in C^k(\Gamma)$, $\Gamma \subset \mathbf{R}_{\geq 0}$, $1 \leq k \leq +\infty$. Для построения таких решений использован так называемый *прямой метод Кларксона-Крускала* (*the Clarkson-Kruskal direct method*) [4]. В качестве основной конструкции рассматривается

$$u(t, \rho) = \Omega(t, \rho, v(\xi)), \quad \xi \triangleq \xi(t, \rho), \ \xi_t \xi_\rho \neq 0.$$

Используемый подход позволяет получить редукции уравнения (2) к некоторому семейству нелинейных ОДУ относительно $v(\xi)$. Установлено, что процедура построения решений типа тепловой волны, удовлетворяющих условию (3), может быть сведена к начальным задачам для ОДУ второго порядка с вырождением. В работе получены точные решения типа тепловой волны, дополняющие перечень построенных автором ранее [5].

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2005. 320 с.
2. Сидоров А.Ф. Избранные труды: Математика. Механика. М.: Физматлит, 2001. 576 с.
3. Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука, 1987. 480 с.
4. Olver P.J. Direct reduction and differential constraints // Proc. of the Royal Society of London. 1994. Ser. A, Vol. 444. P. 509-523.
5. Казаков А.Л., Орлов Св.С. О некоторых точных решениях нелинейного уравнения теплопроводности // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2016. Т. 22, № 1. С. 102-113.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты 16-01-00608, 16-31-00291.

О РОБАСТНОЙ УПРАВЛЯЕМОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ*

П.С. Петренко
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
petrenko_p@mail.ru

Рассматривается система обыкновенных дифференциальных уравнений
$$Ax'(t)+Bx(t)+Uu(t)=0, \quad t\in T=[0,+\infty), \tag{1}$$
где A,B,U − заданные вещественные матрицы размеров $n\times n, n\times n$ и $n\times l$, соответственно, $x(t)\in C^1(T)$ − n-мерная искомая функция, $u(t)$ − l-мерная функция управления. При этом предполагается, что $\det A=0$. Такие системы принято называть дифференциально-алгебраическими уравнениями (ДАУ). Мерой неразрешенности ДАУ относительно производной служит целочисленная величина, называемая индексом.

Исследуется робастная управляемость ДАУ (1). Пусть система (1) обладает свойством полной или R-управляемости. Задача робастной управляемости заключается в нахождении условий, при которых возмущенная система
$$Ax'(t)+(B+\Delta_B)x(t)+(U+\Delta_U)u(t)=0 \tag{2}$$
останется по-прежнему управляемой. Здесь Δ_B,Δ_U − неизвестные вещественные матрицы соответствующих размеров.

Анализ проводится в предположении существования обратимого оператора $\Re=\sum_{j=0}^{r}R_j\left(\frac{d}{dt}\right)^j$, действие которого преобразует ДАУ (1) к структурной форме с разделенными «дифференциальной» и «алгебраической» подсистемами [1]
$$x_1'(t)+J_1x_1(t)+\sum_{j=0}^{r}H_ju^{(j)}(t)=0, \tag{3}$$
$$x_2'(t)+J_2x_1(t)+\sum_{j=0}^{r}G_ju^{(j)}(t)=0, \tag{4}$$
где J_1,J_2,H_j,G_j − некоторые матрицы соответствующих размеров; $colon(x_1(t),x_2(t))=Qx(t)$, Q − матрица перестановок; r − индекс неразрешенности. При этом множества решений систем (1) и (3), (4) совпадают.

Получены достаточные условия робастной полной и R-управляемости ДАУ (1) индекса неразрешенности 1 и 2.

1. Щеглова А.А. Существование решения начальной задачи для вырожденной линейной гибридной системы с переменными коэффициентами // Известия вузов. Математика. 2010. № 9. С. 57-70.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-31-00101) и Комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН № II.2.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ*

Г.М. Ружников, Р.К. Федоров, А.О. Шигаров, В.В. Парамонов, А.Е. Хмельнов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
rugnikov@icc.ru

Под цифровой экономикой понимают хозяйственную деятельность, ключевым фактором производства в которой являются данные в цифровой форме, способствующие формированию информационного пространства с учетом потребностей органов власти, бизнеса и общества в получении качественных и достоверных сведений, развитии информационной инфраструктуры, создании и применении российских информационно-телекоммуникационных технологий, а также в формировании новой технологической основы для социально-экономической сферы.

Цифровая экономика включает следующие уровни: рынки и отрасли экономики (сферы деятельности), платформы и технологии формирования компетенции для развития рынков и отраслей экономики, среду создания условия развития цифровых платформ и технологий, нормативного регулирования и эффективного взаимодействия отраслей экономики, а также информационную инфраструктуру, кадры и информационную безопасность [2].

В свою очередь, сквозные технологии – это ключевые научно-технические направления, развитие которых позволит обеспечить радикальное изменение ситуации на рынках технологий, продуктов и услуг. К основным сквозным цифровым технологиям относятся большие данные, нейротехнологии и искусственный интеллект, системы распределенного реестра, квантовые технологии и «интернет вещей» и т.д.

К базовым направлениям развития цифровой экономики относятся нормативное регулирование; кадры и образование; формирование исследовательских компетенций и технических заделов; информационная инфраструктура и информационная безопасность.

Основной целью базового направления «исследовательские компетенции и технологические заделы», является создание исследовательской инфраструктуры, обеспечивающей технологическую независимость по каждому из направлений сквозных цифровых технологий, конкурентных на глобальном уровне. Основными целями базового направления «информационная инфраструктура и информационная безопасность» являются

– развитие цифровых сетей связи, обеспечивающих потребности экономики по сбору и передаче данных органов власти, бизнеса и населения;

– развитие центров обработки данных (ЦОД), обеспечивающих предоставление органам власти, бизнесу и населению устойчивых, безопасных и экономически эффективных услуг по хранению и обработке данных;

– внедрение цифровых платформ работы с данными для обеспечения потребностей органов власти, бизнеса и населения;

– создание эффективной системы сбора, обработки, хранения и предоставления потребителям пространственных данных, обеспечивающей потребности органов власти, бизнеса и населения в актуальной и достоверной информации о пространственных объектах.

Социально-экономическое развитие Иркутской области характеризуется значительным количеством индикативных показателей и сложностью их мониторинга, анализа и использования в системах поддержки принятия управленческих решений. Террито-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-47-380007 р_а.

риальная информатизация формируется на пространственно вложенных уровнях, что позволяет обобщать данные и реализовывать системный проблемно-ориентированный анализ особенностей развития территорий и выработку комплексных решений [1]. Это обосновывает актуальность проведения работ по формированию исследовательских компетенций и технических заделов, а также информационной инфраструктуры, что будет способствовать модернизации информационно-телекоммуникационного пространства области и учитывать потребности органов власти, бизнеса и общества в получении качественных и достоверных сведений и созданию новой технологической основы для социально-экономической сферы. Это полностью согласуется с политикой информатизации, проводимой Правительством Иркутской области, и мероприятиями программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

Создание компонент исследовательской и информационной инфраструктур цифровой экономики в Иркутской области предполагает

- анализ исследовательских и технологических заделов, моделей, общей схемы использования информационно-аналитических систем, в задачах управления социально-экономическим развитием территорий для формирования цифровой платформы управления, социально-экономическим развитием территорий Иркутской области;
- создание информационной модели взаимодействия компонент цифровой платформы информационной инфраструктуры по направлениям «сквозных» технологий для управления социально-экономическим развитием территорий Иркутской области;
- внедрение сервисно-ориентированного подхода, открытых стандартов OGC (Open Geospatial Consortium), Web-технологий, стандартизации программного интерфейса браузеров для перехода от локальных к распределенным и «облачным вычислениям», в которых информационные ресурсы предоставляются пользователю как Web-сервисы, что позволит упростить обновление, доступность данных и сервисов их обработки и т.д.;
- разработку инструментальных средств создания приложений баз данных, сервисов информационно-аналитических систем (ИАС);
- создание системы формирования баз данных на основе исполнения моделей анализа и интерпретации источников слабоструктурированной табличной информации, в том числе публикуемой Иркутскстатом;
- создание геопортальной ИАС сбора, обработки, хранения и предоставления потребителям пространственных данных, обеспечивающей потребности органов власти, бизнеса и населения в актуальной информации о пространственных объектах;
- разработку сервисов (приложений) информационной инфраструктуры, реализующих основные функции поддержки цифровой экономики Иркутской области;
- развитие центров обработки данных (ЦОД), обеспечивающих предоставление органам государственной власти и местного самоуправления, научно-образовательному комплексу, бизнесу и населению услуг по хранению и обработке данных.

Использование компонент исследовательской и информационной инфраструктур цифровой экономики позволит повысить эффективность принимаемых решений.

1. Бычков И.В., Ружников Г.М. и др. Инфраструктура информационных ресурсов и технологии создания информационно-аналитических систем территориального управления. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 241 с.
2. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». URL: http://government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf.

ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ГИСТЕРЕЗИСОМ

О.Н. Самсонюк
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
samsonyuk.olga@gmail.com

В докладе рассматривается задача оптимального импульсного управления (задача (P)) с траекториями ограниченной вариации. Правая часть управляемой системы содержит гистерезисную нелинейность, описываемую play оператором, действующим в пространстве BV. Задача (P) возникает при импульсно-траекторном расширении следующей задачи оптимального управления:

$$\mathrm{J} = \int_a^b \bigl(f_0(t, x(t), y(t)) + \|v(t)\|\bigr) dt \to \inf,$$

$$\dot{x} = f(t,x,y) + G(t,x)v, \qquad x(a) = x_0, \tag{1}$$

$$q = Ax, \tag{2}$$

$$\dot{y} \in \partial I_{[-r,r]}(q - y), \qquad y(a) = y_0, \tag{3}$$

$$v(t) \in K \qquad \text{п.вс. на } T = [a,b]. \tag{4}$$

Здесь T – заданный отрезок времени, $K \subseteq R^m$ – замкнутый выпуклый конус, A – постоянная $(1 \times n)$-матрица, $\|v\| = \sum_{i=1}^{m} |v_i|$, $x \in W^{1,1}(T, R^n)$, $y \in W^{1,1}(T, R)$, $v \in L^\infty(T, R^m)$. Начальные точки $x_0 \in R^n$, $y_0 \in R$ удовлетворяют условию $q_0 - y_0 \in [-r, r]$, где $q_0 = Ax_0$, $r > 0$ – заданное число. Функция $I_{[-r,r]}$ – индикаторная функция отрезка $[-r, r]$, т.е.

$$I_{[-r,r]}(z) = \begin{cases} 0, & z \in [-r,r], \\ +\infty & z \in (-\infty, -r) \cup (r, +\infty), \end{cases}$$

$\partial I_{[-r,r]}(z)$ – субдифференциал выпуклой функции $I_{[-r,r]}$ в точке z.

Оператор решения дифференциального включения (3)

$$P_0 : W^{1,1}(T,R) \times R \to W^{1,1}(T,R) : \ (q, y_0) \to y$$

описывает гистерезис типа люфт [2] и известен как play оператор.

В докладе обсуждаются задача расширения play оператора на пространство функций ограниченной вариации и варианты ее решения в работах [1, 3–5]. Рассматриваются также вопросы аппроксимации решений импульсной управляемой системы с гистерезисом последовательностями решений системы (2)–(4) и существования оптимального решения в задаче (P).

1. Kopfova J., Recupero V. BV-norm continuity of sweeping processes driven by a set with constant shape. 2016. ArXiv: 1512.08711.
2. Krasnoselskii M.A., Pokrovskii A.V. Systems with Hysteresis. Springer-Verlag, Heidelberg, 1989.
3. Krejčí P., Laurençot Ph. Generalized variational inequalities // J. Convex Anal. 2002. Vol. 9. P. 159–183.
4. Krejčí P., Recupero V. Comparing BV solutions of rate independent processes // J. Convex. Anal. 2014. Vol. 21. P. 121–146.
5. Recupero V. BV solutions of the rate independent inequalities // Ann. Scuola Norm. Sup. Pisa Cl. Sci. 2011. Vol. X, № 5. P. 269–315.

О НЕПРЕРЫВНОМ ПРЕДЕЛЕ ИНТЕГРИРУЕМОЙ ИЕРАРХИИ ЦЕПОЧКИ БОГОЯВЛЕНСКОГО

А.К. Свинин
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
svinin@icc.ru

Рассмотрим искомую функцию $T = T(i,t)$ от $i \in Z$ и $t \in R$ и уравнение

$$\dot{T}(i) = T(i)\left(\sum_{j=1}^{n} T(i+j) - \sum_{j=1}^{n} T(i-j)\right), \tag{1}$$

известное в литературе как цепочка Богоявленского [1]. Известно, что это эволюционное уравнение интегрируемо. Оно допускает нетривиальное представление Лакса и бесконечную серию обобщенных симметрий. Пусть $\{t_s : s \geq 1\}$ – бесконечный набор эволюционных параметров и $\partial s := \partial / \partial t_s$ – производная по соответствующему параметру.

Теорема [2]. *Эволюционные уравнения интегрируемой иерархии обобщенных симметрий уравнения* (1) *имеют следующее явное представление*:

$$\partial_s T(i) = T(i)\left(S_{sn}^{s}(i - sn + n + 1) - S_{sn}^{s}(i - sn)\right), \quad s \geq 1 , \tag{2}$$

с дискретными многочленами, *определяемыми по формуле*

$$S_s^r = \sum_{0 \leq \lambda_1 \leq \cdots \leq \lambda_r \leq s-1} T(i + \lambda_1 + (r-1)n) \cdots T(i + \lambda_{r-1} + n) T(i + \lambda_r) .$$

Представление (2) удобно использовать для исследования непрерывного предела этой интегрируемой иерархии к иерархии эволюционных дифференциальных уравнений Кортевга-де Фриза, которые имеют представление Лакса $\partial L / \partial t_{2s+1} = [A_{2s+1}, L]$ $\forall\, s \geq 1$ с оператором $L := \partial^2 + u$, где $u = u(x)$ – искомая функция переменной $x \in R$ и эволюционных параметров $\{t_{2s+1} : s \geq 0\}$. В докладе представляются некоторые результаты, полученные при помощи системы компьютерной алгебры.

1. Богоявленский О. И. Интегрируемые динамические системы, связанные с уравнением КдВ // Изв. АН СССР. Сер. Математика. 1987. Т. 51. С. 1123–1141.
2. Svinin A. K. On some class of homogeneous polynomials and explicit form of integrable hierarchies of differential-difference equations // J. Phys. A: Math. Theor. 2011. Vol. 44. Art. No. 165206.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КВАЗИЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ СПЛАЙН-КОЛЛОКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ*

С.В. Свинина
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gaidamak@icc.ru

При описании поведения сплошной среды (газ, жидкость, твердое тело) возникают различные модели, которые приводят, как правило, к нелинейным системам уравнений в частных производных, к интегро-дифференциальным уравнениям с частными производными или к нелинейным дифференциально-алгебраическим системам уравнений в частных производных. В докладе рассматривается частный случай нелинейной дифференциально-алгебраической системы уравнений в частных производных, а именно, квазилинейная система вида

$$A(x,t,u)\partial_t u + B(x,t,u)\partial_x u + F(x,t,u) = 0, \tag{1}$$

с начально-краевыми условиями

$$u(x_0,t) = \psi(t), \qquad u(x,t_0) = \phi(x). \tag{2}$$

В (1) $A(x,t,u)$ и $B(x,t,u)$ – заданные тождественно вырожденные в области U квадратные матрицы порядка n; $F(x,t,u)$ – известная n-мерная вектор-функция; $u \equiv u(x,t)$ – искомая n-мерная вектор-функция. Предполагается, что элементы матриц $A(x,t,u)$, $B(x,t,u)$ и вектора $F(x,t,u)$ являются достаточно гладкими в U. Применяя к задаче (1), (2) сплайн-коллокационный метод, который основан на отыскании искомой функции $u(x,t)$ в виде сплайна $S^{m_1,m_2}(x,t)$, получено нормальное операторно-разностное уравнение

$$\mathrm{P}(V) = L^{-1}(V)\left[\bar{g}(V) + H(V)w_0 + Q(V)w^0\right] + \delta(V,h,\tau) \tag{3}$$

с искомой сеточной функцией V, аппроксимирующее уравнение (1) с порядком $O(h^{p_1}) + O(\tau^{p_2})$. Для систем вида (1) малого индекса $p_1 = m_1$ и $p_2 = m_2$, а для систем (1) индекса $(k,0)$ $p_1 = m_1 - 1$ и $p_2 = m_2 - 1$. Уравнение (3) исследовано и доказана следующая теорема.

Теорема. *Пусть выполнены условия*

1) *собственные значения* $\xi^{s_1}_{\bar{\gamma}_{m_1}}$, $\xi^{s_2}_{\gamma_{m_2}}$ *и* $\xi^{s_3}_{J_{i,j}}$ *матриц* $\bar{\gamma}_{m_1}$, γ_{m_2} *и* $J_{i,j}$, *соответственно, в каждом узле разностной сетки* U_Δ *удовлетворяют условию*

$$\tau / h\xi^{s_1}_{\bar{\gamma}_{m_1}} \xi^{s_3}_{J_{i,j}} \neq \xi^{s_2}_{\gamma_{m_2}} \quad \forall s_1, s_2, s_3,$$

где $s_1 = \overline{1,m_1}$, $s_2 = \overline{1,m_2}$, $s_3 = \overline{1,k}$;

2) *собственные значения* $\xi^{s_3}_{J_{i,j}}$ *положительные в сеточном пространстве* U_Δ;

3) *отношение шагов разностной сетки является постоянной величиной.*

Тогда уравнение (3) *в пространстве* U_Δ *имеет решение, равномерно-ограниченное по начально-краевым условиям и по правой части, для которого справедлива оценка*

$$\|V\|_{C(U_\Delta)} \le M_1 \|F_{i,j}\|_{C(U_\Delta)} + M_2 \|\varphi_i\|_{C(U_\Delta)} + M_3 \|\psi_j\|_{C(U_\Delta)}, \quad i = \overline{1,n_1},\ j = \overline{1,n_2},$$

где M_ν *– постоянные величины.*

* Работа выполнена в рамках проекта СО РАН Качественная теория и численный анализ дифференциально-алгебраических уравнений № 0348-216-0009.

РАЗВИТИЕ И БЛОКИРОВАНИЕ АТАК В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ В РАМКАХ ПРОЦЕССОВ СЕТЕВОЙ АКТИВАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ

А.А. Семенов, Д.Е. Горбатенко, С.Е. Кочемазов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»
biclop.rambler@yandex.ru, gorbadima@yandex.ru, veinamond@gmail.com

В докладе будут представлены результаты, относящиеся к описанию и моделированию динамических свойств коллективных систем. Более точно, рассмотрены задачи активации/деактивации коллективов, представленных сетями, за счет расстановки в сети специальных агентов, называемых активаторами (соответственно, деактиваторами). Такого рода задачи являются комбинаторными, и для их решения предлагается использовать комбинаторные алгоритмы с убедительной аргументацией их эффективности. В качестве таковых используются алгоритмы решения проблемы булевой выполнимости (SAT). Соответственно, мы описываем общую технику сведения рассматриваемого класса задач к SAT.

Основной компонент новизны представленных в работе результатов состоит в том, что с позиции динамических процессов активационного типа исследуются некоторые задачи, относящиеся к компьютерной безопасности (Computer Security), а именно, в этом ключе рассматриваются процессы развития и блокирования атак в компьютерных сетях.

Мы описываем способ представления множества всевозможных атак в конкретной компьютерной сети в виде булевой формулы и показываем прямую связь такого представления с т.н. «графами атак» [1-3], а также с графами состояний одного класса автоматных отображений (к данному классу, в частности, принадлежат синхронные булевы сети [4]).

Мы показываем, что задачи развития атак, а также нетривиальные задачи блокирования атак можно рассматривать в контексте динамических процессов в сетях, имеющих активационную природу [5]. Приводится ряд теоретических свойств соответствующих дискретных динамических систем. Для задачи блокирования атак в компьютерной сети соответствующая ее редукция к SAT была программно реализована и протестирована.

1. Jha S., Sheyner O., Wing J. Two formal analyses of attack graphs // Proc. of the 2002 Computer Security Foundations Workshop. Nova Scotia, 2002. P. 45–59.
2. Amman P., Wijesekera D., Kaushik S. Scalable, Graph-Based Network Vulnerability Analysis // Proc. Of 9th ACM Conf. on Computer and Communication Security. 2002. P. 217-224.
3. Ou X., Boyer W., McQueen M. A scalable approach to attack graphs generation // Proc. of the 13th ACM conference on Computer and communications security. 2006. P. 336-345.
4. Kauffman S. Metabolic stability and epigenesis in randomly constructed genetic nets // J. of Theoretical Biology. 1969. Vol. 22. P. 437–467.
5. Kochemazov S., Semenov A. Using synchronous Boolean networks to model several phenomena of collective behavior// PLOS ONE. 2014. Vol. 9, № 12. P. 1-28.

О ПРИМЕНЕНИИ ЯВНЫХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ *

Л.С. Соловарова
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
soleilu@mail.ru

В докладе рассмотрены подходы для численного решения полуявных дифференциально-алгебраических уравнений вида

$$x'(t) = f(x(t), y(t), t), \tag{1}$$

$$0 = g(x(t), y(t), t), \tag{2}$$

$$t \in [0,1], x(0) = x_0, y(0) = y_0, \tag{3}$$

где $x(t)$, $y(t)-$ k - и l-мерные искомые вектор-функции $f : R^{k+l+1} \to R^k$, $g : R^{k+l+1} \to R^l$.

Предполагается, что входные данные задачи обладают той степенью гладкости, которая необходима для проведения выкладок, и

$$\det \frac{\partial g(x(t), y(t), t)}{\partial y} \neq 0$$

в точке $(x_0, y_0, 0)$ и ее окрестности.

Для численного решения такой задачи предлагаются алгоритмы, основанные на явных методах Рунге-Кутта, в том числе и методах типа Дорманда-Принса.

Приведем простейший алгоритм, в основе которого лежат схема Эйлера для (1), (3) и линеаризация для (2), (3). Стандартно введем сетку $t_j = jh$, $j = 0,1,...,N$, $N = 1/h$ и обозначим $x_j \approx x(t_j)$, $y_j \approx y(t_j)$,

$$x_{i+1} = x_i + hf(x_i, y_i, t_i),$$

$$G(x_{i+1}, y_i, t_{i+1}) = G(x_{i+1}, y_i, t_{i+1})y_i - g(x_{i+1}, y_i, t_{i+1}),$$

где $G(.) = \dfrac{\partial}{\partial y} g(.)$.

Обсуждаются преимущества данного алгоритма над классическими неявными методами.

1. Novikov E.A., Rybkov M.V. Application of explicit methods with extended stability regions for solving stiff problems // Журн. СФУ. Сер. Математика и физика. 2016. Т. 9, № 2. С. 209–219.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-00219 мол-а.

АЛГОРИТМ ОДНОМЕРНОГО ПОИСКА ЕВТУШЕНКО С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКОЙ КОНСТАНТЫ ЛИПШИЦА*

П.С. Сороковиков, А.Ю. Горнов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
pavel2301s@gmail.com

Задача одномерного поиска глобального минимума невыпуклой функции часто возникает в качестве вспомогательной при решении многомерных задач оптимизации. Алгоритмы одномерной глобальной оптимизации в течение множества лет разрабатывались многими специалистами из России и зарубежных стран. Одним из таких алгоритмов является метод, предложенный Ю.Г. Евтушенко (см., напр., [1, 2]), в котором строится последовательность точек $x_1, x_2, \ldots$ функции f на отрезке $[a, b]$ следующим образом:

$$x_1 = a,\ x_k = x_{k-1} + \frac{f(x_{k-1}) - f_k^* + 2\varepsilon}{L},$$

где $f_k^* = \min\{f(x_1), ..., f(x_k)\}$ – рекордное значение функции, ε – точность по функции, L – константа Липшица. Минимизация прекращается, когда $x_k > b$.

Главным недостатком данного алгоритма является то, что для работы этого метода необходимо знать хорошую оценку константы Липшица. Указанная проблема критична в случае применения алгоритма в качестве вспомогательного при решении многомерных задач, так как в многоуровневой иерархии алгоритмов он будет функционировать на самом низком уровне и выполняться многократно в процессе расчетов. Следовательно, необходим встроенный в алгоритм механизм автоматизации для оперативной оценки константы Липшица.

В работе рассматривается предложенная модификация алгоритма одномерного поиска Ю.Г. Евтушенко с автоматической оценкой константы роста. На стартовом этапе оценка константы Липшица выбирается равной $L_0 = |f(b) - f(a)| / |b - a|$, на каждой итерации алгоритма вычисляется по следующей формуле:

$$L_j = K_c \cdot \max \frac{|f(x_{k+1}) - f(x_k)|}{|x_{k+1} - x_k|},$$

где K_c – страховочный коэффициент (параметр алгоритма). При этом цикл просмотра отрезка повторяется несколько раз с учетом полученной оценки и выполненных проб. Критерием останова алгоритма является выполнение условия $L_{j+1} = L_j$, где j – номер цикла просмотра.

Предложенный алгоритм запрограммирован на языке C. При реализации метода применялись единые программные стандарты с целью упрощения его использования для решения многомерных задач. Для численного исследования свойств реализованного алгоритма создана коллекция тестовых задач, представляющих собой невыпуклые функции одной переменной с различными скоростями роста. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Евтушенко Ю.Г. Методы поиска глобального экстремума // Исследование операций. М.: ВЦ АН СССР, 1974. С. 39-68.
2. Жиглявский А.А., Жилинскас А.Г. Методы поиска глобального экстремума. М.: Наука, 1991. 248 с.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-07-03827.

ЧИСЛЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА ЛОКАЛЬНОГО ПОИСКА НА ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ

А.С. Стрекаловский, М.В. Баркова
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
strekal@icc.ru, mbarkova@icc.ru

В работе рассматривается следующий класс квадратичных невыпуклых задач с ограничениями-неравенствами:

$$\begin{cases} f_0(x) = \langle x, Q_0 x\rangle + \langle b_0, x\rangle + d_0 \downarrow \min\limits_x, & x \in S, \\ f_i(x) = \langle x, Q_i x\rangle + \langle b_i, x\rangle + d_i \le 0, & i \in \mathcal{I} \triangleq \{1,\dots,m\}, \end{cases} \qquad (Q)$$

где функции f_i, $i \in \mathcal{I} \cap \{0\}$ невыпуклые, $S \subset \mathbb{R}^n$ – выпуклое множество.

Как известно [2], любая квадратичная функция может быть представлена в виде разности двух выпуклых функций, и задача (Q) может быть записана в виде

$$\begin{cases} f_0(x) = g_0(x) - h_0(x) \downarrow \min\limits_x, & x \in S, \\ f_i(x) = g_i(x) - h_i(x) \le 0, & i \in \mathcal{I}. \end{cases} \qquad (P)$$

Идея метода локального поиска, предложенного в [1] для задачи (P), заключается в последовательном решении частично линеаризованных задач вида

$$\begin{cases} \Phi_{0s}(x) = g_0(x) - \langle \nabla h_0(x^s), x\rangle \downarrow \min\limits_x, & x \in S, \\ \Phi_{is}(x) = g_i(x) - \langle \nabla h_i(x^s), x - x^s\rangle - h_i(x^s) \le 0, & i \in \mathcal{I}. \end{cases} \qquad (PL_s)$$

Такие задачи являются выпуклыми и могут быть решены любыми подходящими методами выпуклой оптимизации [2] и пакетами прикладных программ.

Для экспериментальной проверки работоспособности и эффективности метода локального поиска сконструировано поле тестовых примеров с известными глобальными решениями и общим количеством стационарных точек в задаче. Построение задач осуществлялось по методике, предложенной в [3]. Генерация задач типа (Q) производилась в три этапа: первый – построение так называемых задач-ядер небольшой размерности и аналитическое отыскание их решений, второй – конструирование сепарабельной задачи заданной размерности путем объединения конечного числа задач-ядер, третий – преобразование сепарабельной задачи с помощью генератора псевдослучайных чисел. Для сгенерированной таким образом большой задачи можно подсчитать число всех стационарных точек, а также глобальные решения.

Генерация тестовых примеров и метод локального поиска реализованы в среде Matlab. Для решения вспомогательных выпуклых задач, возникающих на этапах локального поиска, использован решатель Gurobi. Расчеты проводились на компьютере Intel Core i5-3570K CPU 3.40 GHz 3.80 GHz.

Сравнение результатов работы метода локального поиска и современных пакетов прикладных программ показало эффективность метода локального поиска на сгенерированных задачах различной сложности и размерности и возможность его применения в алгоритме глобального поиска.

1. Strekalovsky A. S. On local search in d.c. optimization problems// Applied Mathematics and Computation. 2015. Vol. 255. P. 73–83.
2. Nocedal J., Wright S. Numerical Optimization. NY.: Springer Science+Business Media, 2006. 664 p.
3. Vicente L.N., Calamai P.H. Generation of Disjointly Constrained Bilinear Programming Test Problems // Computational Optimization and applications. 1992. Vol. 1, № 3. P. 299–306.

ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОБСЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПОЛЯ

А.А. Толстихин
Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН
madstayler93@gmail.com

Несмотря на то, что водой покрыто примерно 70% Земли, на данный момент исследовано менее 5% гидросферы. Использование субмарин и управляемых подводных аппаратов при изучении Мирового океана не эффективно по причине высокой потребности в человеческих ресурсах. Таким образом, использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) становится все более популярным направлением в данной сфере.

АНПА, в зависимости от установленного оборудования, могут выполнять различные классы задач: картографирование морского дна, поиск и идентификация объектов, патрулирование акваториальных границ и др. Очевидно, что эффективность их выполнения существенно повышается при использовании скоординированной группы автономных аппаратов. Таким образом, именно организация коллективного управления АНПА представляет на данный момент особый практический интерес.

Одной из важных задач при исследовании морских акваторий является задача обследования физических полей и поиска аномалий (областей с экстремальными значениями). Особенностью задачи является ряд пространственно-временных ограничений, обусловленных неопределенностью внешних условий, а также необходимостью обеспечения коммуникационного обмена внутри группы.

Целью данной работы является модификация алгоритма серых волков (GWO) для организации поиска аппаратами региона с максимальной концентрацией неких веществ или максимальной величиной поля в пределах заданной области.

GWO – это мета-эвристический алгоритм, разработанный С. Мирджалили и А. Льюисом в 2014 году. Он относится к классу роевых интеллектов, описывающих коллективное поведение децентрализованной самоорганизующейся системы. Согласно результатам серии вычислительных экспериментов на наборе стандартных тестовых задач, проведенных Гуансийским университетом по делам национальностей, алгоритм не уступает, а на отдельных задачах и превосходит большинство других популярных эвристических алгоритмов многомерной оптимизации. Структура GWO позволяет естественным образом применить его в качестве алгоритма генерации траекторий движения группы АНПА, а малое количество данных, которое необходимо знать каждому агенту о состоянии выполнения миссии, способствует облегчению коммуникационного процесса.

В рамках доклада будут представлены алгоритм управления движением группы АНПА и его программная реализация, позволяющая моделировать поведение группы АНПА при выполнении задачи траекторного обследования физического поля. Анализ результатов, полученных при тестировании программы на готовых наборах данных, позволит сделать вывод о пригодности алгоритма для применения на реальных АНПА. Кроме того, будут представлены варианты модификации исходного алгоритма, которые позволят увеличить точность поиска экстремума и уменьшить время, необходимое для этого.

1. Mirjalili S., Mirjalili S.M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer // Advances in Engineering Software. 2014. Vol. 69. P. 4–61.
2. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: Учебное пособие / А.П. Карпенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 446 с.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ЗАДАЧИ О Р-МЕДИАНЕ[*]

А.В. Ушаков
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
aushakov@icc.ru

В докладе рассматривается так называемая задача кластеризации, представляющая собой одну из базовых задач машинного обучения без учителя. В общем случае задача кластеризации состоит в разделении заданного множества объектов (наблюдений, событий) на подмножества (кластеры) таким образом, чтобы каждый кластер состоял из максимально схожих между собой объектов, в то время как объекты из различных кластеров существенно различались. В качестве модели кластеризации рассматривается известная дискретная задача размещения – задача о p-медиане, известная в области кластеризации также как задача о k-медоидах и состоящая в поиске k объектов в качестве представителей кластеров таких, что сумма расстояний относительно евклидовой метрики между объектом и ближайшим к нему представителем была минимальной.

Для задачи кластеризации в виде задачи о p-медиане предлагается параллельный эвристический алгоритм поиска приближенных решений, предполагающий поиск последовательностей верхних и нижних оценок оптимального значения задачи с помощью метода лагранжевых релаксаций, техники фиксирования переменных и алгоритма имитации отжига. Предложенный алгоритм реализован с помощью стандартов MPI и OpenMP и протестирован на вычислительном кластере Иркутского суперкомпьютерного центра «Академик В.М. Матросов» на тестовых задачах большой размерности.

1. Ushakov A.V., Vasilyev I.L., Gruzdeva T.V. A computational comparison of the p-median clustering and k-Means // Intern. J. of Artificial Intelligence. 2015. Vol. 13, № 1. P. 229–242.
2. Ushakov A.V., Klimentova X., Vasilyev I. Bi-level and Bi-objective p-Median Type Problems for Integrative Clustering: Application to Analysis of Cancer Gene-Expression and Drug-Response Data // IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics. 2016. DOI: 10.1109/TCBB.2016.2622692.
3. Vasilyev I., Ushakov A. A shared memory parallel heuristic algorithm for the large-scale p-median problem // Optimization and Decision Science: Methodologies and Applications: ODS, Sorrento. 2017. P. 295-302.
4. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс]: сайт. Иркутск: ИДСТУ СО РАН. URL: http://hpc.icc.ru (дата обращения: 23.11.2017).

[*] Работа поддержана РНФ, проект 17-71-10176.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С УСТРОЙСТВАМИ И ДАТЧИКАМИ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ КОМПОЗИЦИЙ СЕРВИСОВ*

Р.К. Федоров, А.С. Шумилов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
alexshumilov@yahoo.com

В современном мире информационных технологий развивается сервисо-ориентированный подход к выполнению вычислений, предполагающий разбиение задачи на множество подзадач, каждая из которых решается путем вызова соответствующего сервиса. Взаимодействие между сервисами, направленное на решение конкретной сложной задачи, называется композицией сервисов. В ИДСТУ СО РАН была разработана система выполнения композиций сервисов в распределенной гетерогенной среде [1], апробированная на множестве практических задач.

Наравне с программным обеспечением и подходами к произведению вычислений активно развивается аппаратное обеспечение и компонентная база, например, устройства для управления жилыми или промышленными помещениями, различного рода датчики. Данные устройства становятся все более доступными, уровень необходимых знаний и навыков, необходимых для их освоения, понижается.

При автоматизации работы с устройствами часто возникает проблема в том, что необходимо задавать взаимодействие между вызовами отдельных компонентов и осуществлять планирование их работы (получение температуры воздуха, управление отоплением, изменение яркости освещения). Немаловажной особенностью работы с устройствами остается вопрос безопасности. Данная работа рассматривает технологию автоматизации процесса построения взаимодействия между управляющими устройствами, датчиками посредством использования сценариев в рамках системы выполнения композиций сервисов в распределенной гетерогенной среде.

Преимуществами данного подхода является повышение уровня абстракции процесса автоматизации, планирование процесса управления устройствами и организация централизованного доступа к устройствам. Повышение уровня абстракции происходит в результате представления отдельных компонентов в виде сервисов (каждому из которых соответствует уникальная JavaScript функция), взаимодействие которых программируется с помощью JavaScript сценариев. При выполнении сценариев производится автоматическое планирование запуска устройств. Управление безопасностью осуществляется на уровне управления доступом к сервисам пользователей Геопортала ИДСТУ СО РАН.

Таким образом, предлагается технология задания сценариев взаимодействия различных аппаратных компонентов посредством их представления в виде сервисов и последующей регистрацией на Геопортале ИДСТУ СО РАН. Данная технология апробирована при автоматизации управления офисным помещением и находится в процессе расширения своих возможностей.

1. Федоров Р.К., Бычков И.В., Шумилов А.С., Ружников Г.М. Система планирования и выполнения композиций веб-сервисов в гетерогенной динамической среде // Вычисл. технологии. 2016. Т. 21, № 6. С. 18–35.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, номер гранта № 16-07-00411-а.

МОДЕЛЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ В ПРОЦЕССЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВЫЧИСЛЕНИЯМИ*

А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
agf65@yandex.ru, romang70055@gmail.com

Повышение эффективности управления заданиями в гетерогенной распределенной вычислительной среде (ГРВС) является задачей, требующей особого внимания специалистов в области разработки программного обеспечения для высокопроизводительных систем. Одним их подходов, в котором зачастую удается достичь значительных успехов при решении этой задачи, является применение предметно-ориентированных и экспертных знаний с целью адаптации алгоритмов работы систем управления распределенными вычислениями к изменяющимся условиям среды.

Эффективность процесса управления может быть также улучшена путем применения в ГРВС мультиагентной системы. Агент в такой системе является интеллектной (использующей элементы искусственного интеллекта) программной сущностью, наделенной правами и обязанностями по обслуживанию вычислительного процесса и управлению заданиями по его выполнению. Агенты представляют интересы различных субъектов – пользователей и владельцев (администраторов) ресурсов, осуществляют локальные взаимодействия друг с другом, кооперируются для решения общих задач, конкурируют и сотрудничают в процессе достижения поставленных целей и удовлетворения своих ментальных свойств. В процессе управления распределенными вычислениями агентам необходимо извлекать знания о заданиях и ресурсах, в которых они выполняются, а также о целях, задачах и намерениях представляемых ими субъектов.

Предложенная в работе модель извлечения знаний в процессе мультиагентного управления вычислениями является расширением концептуальной модели ГРВС [1]. Она описывает характеристики ресурсов и выполняемых в них заданий, их свойства и связи между ними, классы заданий и параметры алгоритмов мультиагентного распределения заданий разных классов по ресурсам. В отличие от известных методов извлечения знаний [2] наполнение модели осуществляется на основе комплексного использования концептуального и имитационного моделирования, классификации заданий и обучения агентов на основе их параметрической настройки (рис. 1).

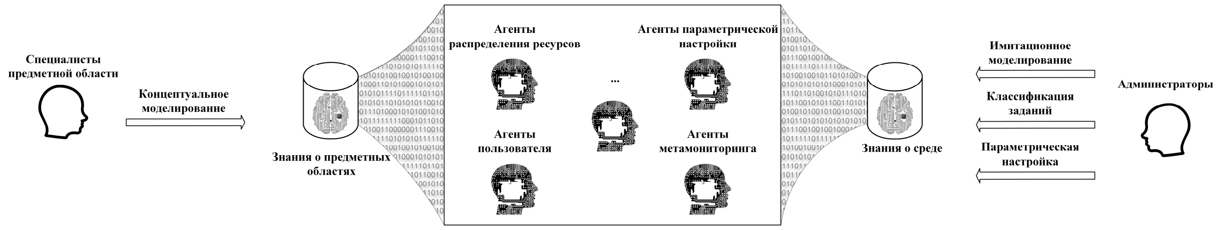


Рис. 1. Схема извлечения знаний агентами

1. Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Bogdanova V., Gorsky S. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 103. P. 162-167.
2. Cooke N. J. Varieties of knowledge elicitation techniques // Intern. J. of Human-Computer Studies. 1994. Vol. 41, № 6. P. 801-849.

* Работа поддержана РФФИ, проект № 16-07-00931-а.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АППРОКСИМАЦИИ МНОЖЕСТВА ДОСТИЖИМОСТИ НА ПЛОСКОСТИ*

Е.А. Финкельштейн[1], И.С. Гусева[2]
[1]Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
[2] Бурятский государственный университет
evgeniya.finkelstein@gmail.com, ig_19@mail.ru

Проблема создания тестовых задач оптимального управления небольшой размерности продолжает оставаться актуальной в связи с разработкой новых алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для исследования управляемых динамических систем. Подобные коллекции позволяют проводить анализ предельных свойств алгоритмов оптимизации и выделения классов задач, на которых они наиболее эффективны [1]. В работе предлагается методика генерации тестов с помощью алгоритмов аппроксимации множеств достижимости [2].

В качестве примера приведем две нелинейные системы дифференциальных уравнений, которым соответствуют следующие множества достижимости (рис. 1).

Тестовая задача 01. $t \in [0,4], u \in [-1.1, 1.1]$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = u + \cos x_2, & x_1(0) = 0 \\ \dot{x}_2 = u + x_1, & x_2(0) = 0 \end{cases}$$

Тестовая задача 02. $t \in [0,2.5], u \in [-0.5, 1.5]$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = u + \dfrac{e^{x_2} + e^{-x_2}}{2} \cos x_2, & x_1(0) = 0 \\ \dot{x}_2 = u + \sin x_1, & x_2(0) = 0 \end{cases}$$

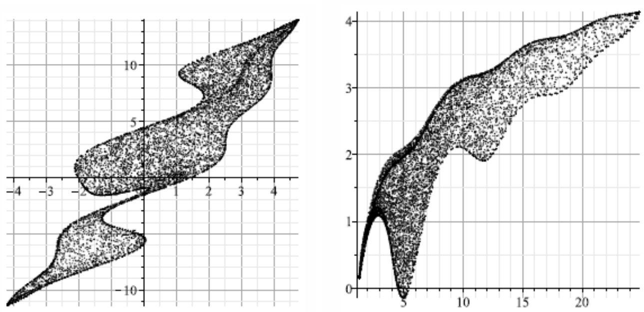


Рис. 1. Множества достижимости в тестовых задачах 01 и 02

На следующем шаге при формировании задач оптимального управления с использованием представленных множеств уже при добавлении линейного терминального функционала удается получить многоэкстремальные задачи.

Таким образом, разработана коллекция тестов, характеризующихся различными уровнями сложности и моделирующих специфические вычислительные трудности для алгоритмов оптимизации управляемых динамических систем, свойственные изучаемым классам задач.

1. Gornov A.Y., Zarodnyuk T.S., Madzhara T.I., Daneyeva A.V., Veyalko I.A. A collection of test multiextremal optimal control problems // Optimization, Simulation and Control. Ser. Springer Optimization and Its Applications. 2013. Vol. 76. P. 257–274.
2. Горнов А.Ю., Финкельштейн Е.А. Алгоритм кусочно-линейной аппроксимации границы множества достижимости // Автоматика и телемеханика. 2015. № 3. С. 22–31.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-07-00627.

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ МОДУЛЯРНОСТИ*

Ф.В. Хандаров, Н.Н. Мартынов, С.П. Мальцев, Д.Ж. Бадагаров
Бурятский государственный университет
fedor.khandarov@gmail.com

Кластеризация на множестве вершин в графах является одной из актуальных задач с большим числом реальных приложений, например, выделение сообществ пользователей в социальных сетях является задачей кластеризации. Суть кластеризации заключается в выделении таких кластеров вершин, чтобы число связей внутри кластеров было выше, чем число связей между ними.

Один из широко употребляемых подходов для кластеризации основан на оптимизации функционала модулярности. Модулярность – характеристика, позволяющая количественно оценить качество кластеризации, выражаемая формулой

$$Q = \frac{1}{2m}\sum_{i,j}\left[A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m}\right]\delta\left(c_i, c_j\right), \tag{1}$$

где A – матрица смежности графа, k_i – степень и c_i – номер кластера i-й вершины, $\delta(x,y)=1$, если $x=y$, иначе $\delta(x,y)=0$, m – число всех связей в графе [1].

Выделение оптимальной структуры сообществ является задачей глобальной оптимизации, для решения которой в данной работе предлагается использование генетического алгоритма. Предложен ряд генетических операторов, основанных на перемещениях отдельных вершин и групп вершин между кластерами, что позволяет быстро пересчитывать функционал модулярности. Произведены вычислительные эксперименты, показывающие применимость алгоритма к обработке больших графов.

1. Blondel V. D. et al. Fast unfolding of communities in large networks // J. of statistical mechanics: theory and experiment. 2008. Vol. 10. P. P10008.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №17-06-00340 «Разработка математических моделей виртуальных буддийских сообществ в социальных сетях»).

ДЕКОМПОЗИЦИЯ АЛГОРИТМОВ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА*

Ф.В. Хандаров[1], Б.С. Занаева[1], П.С. Сороковиков[2]
[1]Бурятский государственный университет
[2]Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
fedor.khandarov@gmail.com

Роевой интеллект (swarm intelligence) – один из известных подходов для решения задач дискретной и непрерывной оптимизации, основанный на моделировании поведения системы независимых поисковых агентов. В настоящее время разработано достаточно большое число различных алгоритмов, относимых к роевому интеллекту [1].

В настоящей работе для нескольких подобных алгоритмов предпринимается попытка их декомпозиции. Выделены примитивы операций над многомерными векторами, условия применения тех или иных операций.

В едином ключе описаны и реализованы алгоритмы Cat Swarm Optimization [2], Particle Swarm Optimization [3], Artificial Fish Swarm Algorithm [4] и Bee Swarm Optimization [5].

Произведен ряд вычислительных экспериментов, включая подбор оптимальных параметров реализованных алгоритмов на разных задачах.

1. Kennedy J. Swarm intelligence // Handbook of nature-inspired and innovative computing. Springer US, 2006. P. 187-219.
2. Chu S. C., Tsai P. W., Pan J. S. Cat swarm optimization // Pacific Rim Intern. Conf. on Artificial Intelligence. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 854-858.
3. Kennedy R. J. and Eberhart. Particle swarm optimization // Proc. of IEEE Intern. Conf. on Neural Networks IV, pages. 1995. V. 1000.
4. Neshat M. et al. Artificial fish swarm algorithm: a survey of the state-of-the-art, hybridization, combinatorial and indicative applications //Artificial Intelligence Review. 2014. P. 1-33.
5. Karaboga D., Akay B. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence // Artificial intelligence review. 2009. Vol. 31, № 1-4. P. 61-85.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-07-00627.

АЛГОРИТМЫ УЛУЧШЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ТРИАНГУЛЯЦИЯМИ

А.Е. Хмельнов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
hmelnov@icc.ru

При построении цифровой модели рельефа по имеющимся векторным данным в качестве основного источника информации выступают горизонтали (изолинии рельефа) и точечные отметки высот. При этом используются алгоритмы построения триангуляций с ограничениями [1], в которых отрезки горизонталей выступают в качестве жестких ребер (ограничений). В результате применения таких алгоритмов на триангуляции, построенной по изолиниям, появляются артефакты – горизонтальные «ступени», состоящие из треугольников, все вершины которых лежат на изолиниях одной высоты. Эти «ступени» появляются как на гребнях, так и в распадках в том случае, когда соседние изолинии достаточно далеко отстоят друг от друга (Рис. 1). В работе рассматриваются алгоритмы, предназначенные для устранения таких артефактов.

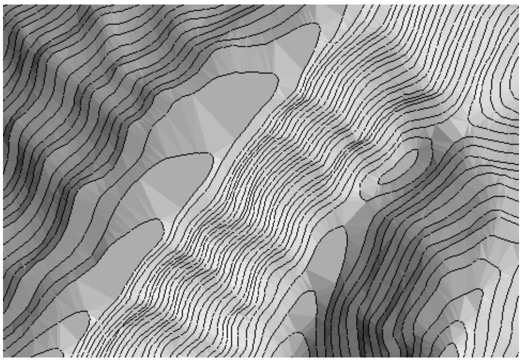


Рис. 1. Триангуляция с горизонтальными участками

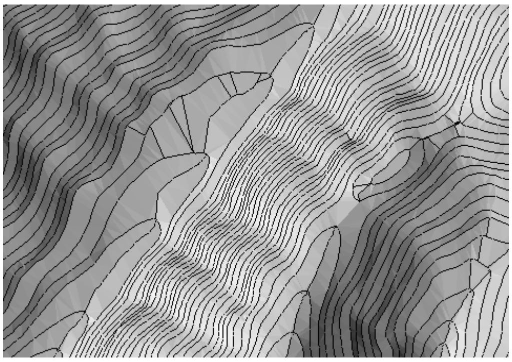


Рис. 2. Триангуляция, исправленная жадным алгоритмом максимального уклона

Хотя во многих случаях для устранения горизонтального участка достаточно выполнить переброску ребер без добавления новых точек, в общем случае необходимо учитывать, что такой участок может иметь сложную невыпуклую форму, поэтому предлагаемые алгоритмы основаны на построении аппроксимации скелета горизонтального участка по образующим его треугольникам с последующим вычислением высот в добавляемых точках – вершинах скелетных линий. Было разработано два альтернативных алгоритма для вычисления высот в добавляемых точках.

Алгоритм резиновых линий рассматривает полученный скелет, как состоящий из «резинок», натянутых между находящимися в точках графа длинными «гвоздиками». В точках с известными высотами резинки закреплены на этой высоте, а в точках с неизвестными – связаны, но могут скользить по вертикали. Высоты определяются по состоянию, в котором действующие в каждой вершине графа силы уравновешивают друг друга. Недостатком алгоритма резиновых линий оказалось сильное «перетягивание» в сторону преобладающих высот в точках, где сходятся более двух линий.

Чтобы устранить этот недостаток был предложен альтернативный жадный алгоритм, который ищет на графе путь с максимальным уклоном между точками с известной высотой, а затем присваивает высоты точкам этого пути с еще не известной высотой. Далее процесс повторяется. Доказано, что предложенный алгоритм является оптимальным: он позволяет минимизировать максимальный уклон ребра. Результат применения алгоритма показан на Рис. 2.

1. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. 128 с.

ГЕОМЕТРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ РАВНОВЕСИЙ СТАЦИОНАРНОГО ОРБИТАЛЬНОГО ГИРОСТАТА

С.В. Чайкин
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН

Изучаются в «ограниченной постановке задачи» относительные равновесия стационарного гиростата (его положения равновесия относительно орбитальной системы координат). Гиростат есть твердое тело, в котором фиксирована ось вращающегося с постоянной относительной угловой скоростью уравновешенного маховика. Центр масс системы движется с постоянной угловой орбитальной скоростью по кеплеровой круговой орбите в центральном ньютоновском поле сил тяготения вокруг притягивающего центра. Гиростатический момент системы произвольно расположен относительно корпуса гиростата.

В предлагаемом подходе с использованием нового вида уравнений [1, 2], определяющих относительные равновесия, изучается на основе анализа кривых пересечения нескольких поверхностей второго порядка механизм появления/исчезновения равновесий гиростата в зависимости от параметров задачи.

1. Чайкин С.В. Относительные равновесия гиростата на круговой орбите при малом выходе гиростатического момента из его главной центральной плоскости инерции // IX Всерос. съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Нижний Новгород, 2006. Т. 1. С. 116-117.
2. Чайкин С.В. Бифуркации относительных равновесий спутника-гиростата в частном случае расположения его гиростатического момента // ПММ. 2013. Т. 77, вып. 5. С. 667-678.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ГЛОБАЛЬНОМ УРОВНЕ

А.К. Черкашин, И.Ю. Лобычева
Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, akcherk@irnok.net
Институт солнечно-земной физики СО РАН, terh@yandex.ru

В основу исследования положена геометрическая модель взаимодействия векторных полей $\boldsymbol{H}(t,\boldsymbol{r})$, $\boldsymbol{E}(t,\boldsymbol{r})$ порождаемых кручением внешнего (векторного) $\boldsymbol{r} = (x,y,z)$ и внутреннего (ковекторного) $\boldsymbol{a} = (a_x,a_y,a_z)$ пространства связи переменных: $\frac{\partial H}{\partial t} = -\alpha rotE, \frac{\partial E}{\partial t} = \beta rotH$. Иллюстрацией являются поля электромагнитного взаимодействия безотносительно к их физической сущности, т.е. трактуемой в геометрическом смысле. Это позволяет применять такую модель к описанию пространственной организации (связности) разнокачественных процессов и явлений, в частности, в географической оболочке Земли, где $\boldsymbol{r}$ является радиус-вектором местоположения в геоцентрической инерциальной системе отсчета, а $\boldsymbol{a}$ – набором показателей наблюдаемых явлений, связь которых определяется различными ковекторными полями $\boldsymbol{G}(t,\boldsymbol{a})$.

Изменение компонентов полей описываются волновой функцией $H(t,\boldsymbol{r}) = Ae^{i\psi}$, $\psi = \boldsymbol{kr} - \omega t + \psi_0$, где ψ - фаза волны, называемая эйконалом; A, ω - амплитуда и частота волны; $\boldsymbol{k} = \omega \boldsymbol{n}/c = \mathrm{grad}\,\psi = \nabla\psi$ – волновой вектор, $\boldsymbol{n} = (n_x,n_y,n_z)$ – единичный ковектор в направлении распространения волны со скоростью c; $\psi_0(\boldsymbol{r})$ - фазовое смещение, индивидуальное для каждой точки пространства.

Уравнения эйконала, следующие из уравнений полей при исключении временной составляющей, при $p = c\psi/\omega$, когда $p(\boldsymbol{r}) = \boldsymbol{nr} + P(\boldsymbol{n})$, имеют вид

$$a)(\nabla p)^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2 = n^2,\ б)(\nabla P)^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial n_x}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial n_y}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial n_z}\right)^2 = r^2, \qquad (1)$$

где r – модуль вектора $\boldsymbol{r}$ местоположения, значение которого, в частности, соответствует высоте рельефа местности, от особенностей изменения которого зависят локальные эффекты; $n^2 = n_x^2+n_y^2+n_z^2$.

Оптические и акустические лучи являются характеристиками уравнения (1а), а для (1б) характеристики соответствуют функциям связи разных природных показателей, $n_y - n_{0y} = \frac{y}{x}(n_x - n_{0x})$ – пучок функциональных связей $n_y(n_x)$ с центром (n_{0y}, n_{0x}), совокупность которых в оптике называется поверхностью каустики, а во внутреннем земном пространстве рассматривается как среда реализации причинно-следственных связей.

Для расчетов использовались пространственно-временные ряды данных проекта NCEP/NCAR Reanalysis по абсолютной температуре n_x и удельной влажности n_y воздуха в узлах регулярной сетки 2.5° × 2.5° при давлении 700 гПа за разные месяцы 2014 г. По результатам регрессионного анализа локальных зависимостей $n_y(n_x)$ восстановлено скалярное поле среды их реализации (n_{0y}, n_{0x}) на планете с разверткой по широте и долготе.

Обосновывается гипотеза, что любую локально наблюдаемую парную и множественную связь можно рассматривать как следствие взаимодействия полей кручения в глобальном пространстве связей явлений географической среды.

КОЛЬЦА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ И ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ

В.Ф. Чистяков
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
chist@icc.ru

Рассматриваются множества дифференциальных и интегро-дифференциальных операторов, в которых можно ввести алгебраические структуры кольца, полугруппы, группы (см., например, [1]). Приведен ряд утверждений о свойствах этих множеств и обсуждаются некоторые вычислительные аспекты данной проблематики.

1. Чистяков В.Ф. Алгебро-дифференциальные операторы с конечномерным ядром. Новосибирск: Наука, 1996.

ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЙ В КЛАССЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ОПЕРАТОРНЫХ УРАВНЕНИЙ С ОТКЛОНЯЮЩИМСЯ АРГУМЕНТОМ

В.В. Шеметова, С.С. Орлов
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»
valentina501@mail.ru, orlov_sergey@inbox.ru

Пусть E – банахово пространство, u и f – неизвестная и заданная функции действительного аргумента со значением в E. Рассмотрим уравнение

$$u'(t) - Au(t) - Bu(t-h) = f(t)\,,\ t > 0\,, \tag{1}$$

где A, B – линейные непрерывные операторы из E в E, а $h > 0$ – заданное число. Для уравнения (1) зададим начальные условия

$$u(t) = \varphi(t)\,,\quad -h \le t \le 0\,, \tag{2}$$

где функция $\varphi(t) \in C([-h;0];E)$ задана. Под *классическим* решением задачи (1), (2) будем понимать функцию $u(t) \in C(t \ge -h;E) \cap C^1(t>0;E)$, обращающую в тождество уравнение (1) и удовлетворяющую начальным условиям (2). Изучается вопрос однозначной разрешимости задачи (1), (2). Используется аппарат обобщенных функций Соболева–Шварца со значениями в банаховом пространстве и конструкция фундаментального решения дифференциального оператора [1]. Рассматриваемая задача в классе $K'_+(E)$ распределений с ограниченным слева носителем имеет вид уравнения

$$(\mathrm{I}\delta'(t) - A\delta(t) - B\delta(t-h)) * \tilde{u}(t) = \tilde{g}(t) \tag{3}$$

с правой частью

$$\tilde{g}(t) = f(t)\theta(t) - A\varphi(t)\big(\theta(t+h)-\theta(t)\big) + \delta'(t) * \varphi(t)\big(\theta(t+h)-\theta(t)\big) + \varphi(0)\delta(t)\,.$$

Единственным решением уравнения (3) в пространстве $K'_+(E)$ (*обобщенным* решением начальной задачи (1), (2)) является распределение $\tilde{u}(t) = \boldsymbol{\varepsilon}(t) * \tilde{g}(t)$, где обобщенная оператор-функция $\boldsymbol{\varepsilon}$ при любом $v(t) \in K'_+(E)$ удовлетворяет условиям

$$(\mathrm{I}\delta'(t) - A\delta(t) - B\delta(t-h)) * \boldsymbol{\varepsilon}(t) * v(t) = \boldsymbol{\varepsilon}(t) * (\mathrm{I}\delta'(t) - A\delta(t) - B\delta(t-h)) * v(t) = v(t)\,,$$

и называется *фундаментальным* решением дифференциального оператора с отклоняющимся аргументом $\mathrm{I}\delta'(t) - A\delta(t) - B\delta(t-h)$.

Теорема. *Пусть* A, $B \in L(E)$, *тогда* $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = e^{At}\theta(t) + \sum_{k=1}^{+\infty} e^{A(t-kh)} U_k(t-kh)\theta(t-kh)$, *где* $U_k(t) = \int_0^t V(s)U_{k-1}(s)ds$, $U_0(t) = \mathrm{I}$, $v(t) = e^{-At}Be^{At}$.

В условиях теоремы начальная задача (1), (2) имеет единственное обобщенное решение, которое представляет собой регулярное распределение, порожденное кусочно заданной на полуинтервалах $[(n-1)h; nh)$ функцией $u = u(t)$. Эта функция сильно непрерывно дифференцируема при $t > 0$, удовлетворяет уравнению (1) и начальному условию (2), т.е. является классическим решением задачи (1), (2). Показано, что в точках $t = nh$, $n \in \mathrm{N}$, кратных запаздыванию, порядок гладкости классического решения равен n, что согласуется с известными сведениями о скалярных $(E = \mathrm{R})$ дифференциальных уравнениях с отклоняющимся аргументом.

Предлагаемый подход применим к изучению однозначной разрешимости более общей задачи с начальными условиями $u(t) = \varphi(t)$, $-h \le t < 0$, $u(0) = u_0$.

1. Sidorov N., Loginov B., Sinitsyn A., Falaleev M. Lyapunov–Schmidt Methods in Nonlinear Analysis and Applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 568 p.
2. Мышкис А.Д. Линейные дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом. М.: Наука, 1972. 352 с.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МУЛЬТИАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВЫЧИСЛЕНИЯМИ*

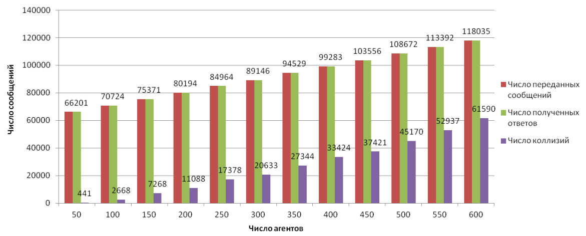
Ю.А. Дядькин
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
Иркутский государственный университет
dyadkin_ua@inbox.ru

Рассматривается инструментальный комплекс SIRIUS II для исследования проблемно-ориентированной гетерогенной распределенной вычислительной среды (ГРВС) с использованием методов автоматизации построения имитационных моделей и распределенного имитационного моделирования [1].

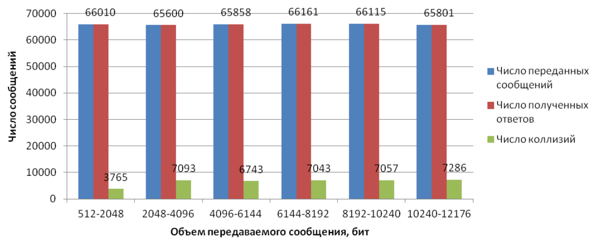
В качестве иллюстрации работы данного инструментального комплекса проведено имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы для управления заданиями в ГРВС. В процессе построения модели ГРВС учтена специфика алгоритмов работы агентов.

В ходе экспериментов по взаимодействию агентов при управлении заданиями получены оценки надежности сегментов сети передачи данных ГРВС и проведен анализ влияния числа агентов и размера нефрагментированного информационного сообщения на возникновение коллизий в сети. Результаты моделирования представлены на рис. 1 а и б соответственно. Очевидно, что в первом случае число коллизий возрастает, однако не существенно. Во втором случае объем информационного сообщения практически не оказывает влияния на число коллизий, возникающих при пересылке сообщений между агентами в сети передачи данных. Поэтому надежность системы передачи данных с точки зрения доставки сообщений между агентами в модели достаточная высока.

Полученные результаты подтверждены в процессе полунатурного моделирования работы агентов.



а)



б)

Рис. 1. Результаты моделирования

1. Дядькин Ю.А., Фереферов Е.С. Инструментальный комплекс имитационного моделирования разнородной распределенной вычислительной среды // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21, № 3. С. 18-32.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-07-00931-а, а также Программы фундаментальных исследований Президиума РАН 1.33П, проект «Разработка новых подходов к созданию и изучению сложных моделей информационно-вычислительных и динамических систем с приложениями», и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-8081.2016.9).

СОДЕРЖАНИЕ

Научно-организационный отдел
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова
Сибирского отделения Российской академии наук
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134
E-mail: rio@icc.ru

Подписано к печати 29.11.2017 г.
Формат бумаги 60×84 1/16, объем 4,25 п.л.
Заказ 8. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИДСТУ СО РАН