

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

ЛЯПУНОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

2 – 5 декабря 2019 года

Материалы конференции



Иркутск – 2019

Научное издание

Материалы конференции «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 2–5 декабря 2019 г.). – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2019. – 106 с.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на конференции «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 2–5 декабря 2019 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 программно-аппаратных систем в различных предметных областях (в том числе для поддержки комплексных междисциплинарных научных исследований).

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ПОМОЩЬЮ ПОСТРОЕНИЯ МАТРИЧНОГО ПРОФИЛЯ

А.А. Абдулов

Факультет сервиса и рекламы ИГУ

sanek_015@mail.ru

Поиск паттернов и аномалий во временных рядах является важной задачей анализа данных. Найденные во временном ряду закономерности позволяют отследить, а затем и предсказать некоторые события, например, сезонное изменение цен на товары, изменение цен на бирже или изменение температурных показателей в регионе и т.п.

Задача поиска паттернов решается с помощью различных методов. В данной работе рассматривается метод поиска паттернов, основанный на построении матричного профиля. Матричный профиль – это структура данных, описывающая временные ряды. Главными преимуществами этого метода являются независимость от предметной области, высокая точность, высокая эффективность.

Матричный профиль состоит из профиля расстояний и профиля индексов. Профиль расстояний – это вектор Z -нормализованных евклидовых расстояний, в котором каждый элемент – это дистанция до ближайшей подпоследовательности, а профиль индексов содержит индекс этой последовательности. Хранение информации в таком виде позволяет эффективно обновлять данные, а также поддерживает многопоточное вычисление.

Для избежания тривиальных совпадений, при которых паттерн соответствует самому себе или паттерну, сильно пересекающимся с самим собой, в концепции матричного профиля введено определение “исключающей зоны”. Ее значение установлено как половина длины подпоследовательности.

Подпоследовательность серии T записывается как $T_{i,m}$, где i – это индекс позиции начала подпоследовательности, а m – ее длина.

Для вычисления Z -нормализованного евклидового расстояния используется формула

$$d_{i,j} = \sqrt{2m \left(1 - \frac{QT_{i,j} - m\mu_i\mu_j}{m\sigma_i\sigma_j} \right)},$$

где m – это длина подпоследовательности, μ_i – это среднее подпоследовательности, $T_{i,m}$, μ_j – среднее подпоследовательности, $T_{j,m}$, σ_i – стандартное отклонение $T_{i,m}$, σ_j – это стандартное отклонение $T_{j,m}$, $QT_{i,j}$ – скалярное произведение, расписывается как

$$QT_{i,j} = \sum_{k=0}^{m-1} T_{i+k} T_{j+k}.$$

Дальнейший поиск паттернов на основе рассчитанного матричного профиля производится с помощью таких алгоритмов, как Top-K Motifs, Top-K Discords, FLUSS, Extract Regimes.

Для тестирования метода построения матричного профиля в совокупности с методом Top-K Motifs был использован временной ряд длиной ~270000. Результат показал, что данный метод отлично решает задачу поиска паттернов, но сильно уступает по времени методам кластеризации и снижения размерности.

1. Introduction to Matrix Profiles. URL: <https://towardsdatascience.com/introduction-to-matrix-profiles-5568f3375d90>.
2. The first matrix profile tutorial. URL: <https://www.cs.ucr.edu/~eamonn/MatrixProfile.html>.

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ СХЕМ ТИПА «МУЛЬТИСТАРТ С ПОКОЛЕНИЯМИ» ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ НЕВЫПУКЛЫХ ВОРОНКООБРАЗНЫХ ФУНКЦИЙ*

А.С. Аникин

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

anton.anikin@gmail.com

Оптимизация невыпуклых функций заметных размерностей – порядка сотен и тысяч переменных – продолжает оставаться одной из самых актуальных и престижных проблем теории экстремальных задач (см., напр., [1–3]). Одним из наиболее интересных приложений технологий глобальной оптимизации можно считать задачи оптимизации воронкообразных функций, популярных в вычислительной химии – задачи поиска низкопотенциальных атомно-молекулярных кластеров [4, 5]. Отличительной особенностью этого класса задач для гомогенных кластеров (кластеров, состоящих из одинаковых атомов) является свойство астрономического роста числа локальных экстремумов в зависимости от размерности задачи – числа включенных в рассмотрение атомов.

Несмотря на усилия большого числа высококлассных математиков и огромный объем публикуемых теоретических, строго обоснованных результатов, на практике специалисты вынуждены использовать эвристические, ничего в общем случае не гарантирующие, и оттого «некомфортные в использовании» рандомизированные алгоритмы. Но именно с этих «рационалистических» позиций в настоящее время получены практически все рекордные результаты для популярных моделей атомно-молекулярных потенциалов (см., напр., [4]). «Рекордность» результатов определяется известным правилом «best-of-known» – «принципом предъявления»: результат считается рекордом до тех пор, пока кто-либо не представит другой результат с меньшим значением потенциала.

В докладе обсуждается одна из конкурентоспособных на наш взгляд методик построения алгоритмов невыпуклой оптимизации, основанная на построении и быстрой селекции поколений процессов локального спуска. Стартуя со случайно сгенерированного «поколения», вычислительный алгоритм периодически прерывается для определения состояния всех локальных процессов. Принимаемые на этом этапе решения могут либо прекратить какой-либо локальный процесс при его бесперспективности, либо объединить два сблизившихся процесса в один, либо продолжить локальный спуск при его успешности. При этом все освободившиеся после удаления процессоры немедленно заполняются новыми, случайно или рационально сконструированными приближениями, выступающими стартовыми точками для новых локальных процессов.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов для рекордных кластеров Морса, Леннарда-Джонса, Саттон-Чена, Гупта [6] и других.

1. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983.
2. Евтушенко Ю.Г., Малкова В.У., Станевичюс А.-И.А. Параллельный поиск глобального экстремума функций многих переменных // ЖВМ и МФ. 2009. Т. 49, № 2. С. 255–269.
3. Нестеров Ю.Е. Введение в выпуклую оптимизацию. М.: МЦНМО, 2010.
4. The Cambridge Energy Landscape Database. URL: <http://www-wales.ch.cam.ac.uk/CCD.html>.
5. Doye J.P.K., Wales D.J. Global minima for transition metal clusters described by Sutton–Chen potentials // New journal of chemistry. 1998. Vol. 22, № 7. P. 733–744.
6. Anikin A., Gornov A., Sorokovikov P. Algorithms for global minimum search of atomic–molecular clusters of extremely large dimensions // Системный анализ: моделирование и управление: Материалы Междунар. конф., посвященной памяти акад. А.В. Кряжковского, 2018. С. 9–10.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-29-03071.

ТЕХНОЛОГИЯ GPU-РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ДОКИНГА*

А.С. Аникин

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

Развитие экспериментальных методов исследования молекулярных и клеточных систем за последние десятилетия привело к значительному росту понимания сути биологических процессов, протекающих при различных патологических явлениях. Эти результаты в свою очередь, позволяют выявлять основные «мишени», на которые должна быть направлена та или иная лекарственная терапия. Средствами реализации такой терапии выступают некоторые искусственно созданные молекулы, имеющие необходимые свойства. Современное состояние этой области говорит о том, что мы пришли к эпохе «синтеза» лекарств через процедуры моделирования, т.е. большая часть процесса разработки выполняется без проведения реальных биологических экспериментов, а эффективное выполнение такого моделирования стало одной из важнейших целей современной вычислительной биологии.

К сожалению, текущие возможности вычислительных систем, а также «пробелы» теории, описывающей исследуемые биологические процессы, не позволяют решать такие задачи в полном объеме. Поэтому на практике применяются модели той или иной степени достоверности, охватывающие лишь часть свойств изучаемых явлений. Общей идеей таких подходов является то, что процесс оптимизации геометрии синтезируемой молекулы соответствует минимизации некоторой функции, задающей потенциальную энергию рассматриваемой молекулы [1]. Хорошо проработанная модель должна иметь минимумы потенциальной энергии, соответствующие реально наблюдаемым объектам в природе и при этом быть достаточно экономичной с точки зрения требуемого объема вычислений. Вполне очевидно, что требования по точности модели и ее «простоте» вступают в противоречие друг с другом, поэтому все применяемые сегодня подходы – компромисс между этими требованиями.

В работе рассматривается упрощенная модель молекулы белка, включающая различные виды энергии взаимодействия как связанных, так и несвязанных между собой атомов. Для частичного преодоления высокой вычислительной сложности модели для молекул актуальных размерностей в работе предлагается распараллеливание вычислений с использованием современных графических ускорителей (GPU) [2]. Рассматриваются детали реализации для различных видов потенциалов, а также эффективность разных методов оптимизации при решении задач рассматриваемого класса. Предлагаются экономичные алгоритмы одномерного поиска, исследуется их поведение при использовании одинарной (float) и двойной (double) точностей чисел с плавающей запятой.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. A Second Generation Force Field for the Simulation of Proteins, Nucleic Acids, and Organic Molecules / W.D. Cornell [et al.] // J. of the American Chemical Society. 1995. Vol. 117, № 19. P. 5179–5197.
2. Wilt N. The CUDA Handbook: A Comprehensive Guide to GPU Programming. Pearson Education, 2013.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-07-00587.

УСКОРЕННЫЙ ПОКОМПОНЕНТНЫЙ МЕТОД ДЛЯ РАЗРЕЖЕННЫХ ЗАДАЧ ВЫПУКЛОЙ ОПТИМИЗАЦИИ: СТРОГИЕ ОЦЕНКИ СЛОЖНОСТИ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ*

А.С. Аникин

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

anikin@icc.ru

В настоящее время одним из наиболее интересных и перспективных направлений в выпуклой оптимизации являются так называемые покомпонентные методы, т.е. методы, выполняющие разреженные итерации, на каждой из которых производится модификация небольшого (относительно общего числа) количества переменных, что обеспечивает очень низкую стоимость такой итерации. Для некоторых задач такие методы показывают очень высокую (вычислительную) эффективность, существенно превосходящую результаты классических подходов (см. например, [1–3]). Разработаны также ускоренные варианты покомпонентных методов, но, к сожалению, для некоторых классов разреженных гладких задач выпуклой оптимизации не очень понятно, как их применять, чтобы стоимость итерации учитывала разреженность исходной задачи. Например, хорошо изучены случаи сепарабельных функционалов со скрытой аффинной структурой (см. [4, замечание 8]) и некоторые другие (см. там же замечание 7), но в общем случае не очень понятно, как следует это делать. В частности, при минимизации функции вида (8) из [5] (эта задача возникает как двойственная к задаче поиска энтропийно-регуляризованного транспортного расстояния, а также при восстановлении матрицы корреспонденций в транспортных сетях). В общем случае, можно рассмотреть задачи вида

$$\ln \sum_{k=1}^m (\exp(a_k^T x)) \rightarrow \min_{x \in \mathbb{R}^n}. \quad (1)$$

Будем считать, что матрица A , составленная из строк a_k , имеет в среднем в каждом столбце $s \ll m = O(n)$, отличных от нуля элементов. Проблема состоит в том, что все известные ускоренные покомпонентные методы будут решать такую задачу со стоимостью итерации не меньше, чем $O(n)$, что может быть очень дорого при больших n . Данная работа посвящена попытке реализации варианта ускоренного покомпонентного метода, для которого амортизационная или средняя стоимость итерации будет $O(s)$.

В качестве основы используется известный неускоренный покомпонентный метод, предложенный Ю.Е. Нестеровым (см. пункт 6.4.2 из [6], полагаем что $\gamma = 1$), для ускорения которого предлагается применение техники «Каталист» [7]. Вполне очевидно, что амортизационная сложность итерации неускоренного метода Нестерова для задачи (1) будет равна $O(s)$ – это стоимость пересчета случайно выбранной компоненты градиента. Общая же трудоемкость предлагаемого ускоренного метода будет равна

$$N_c(C_g + N_N C_N),$$

где N_c – число внешних итераций «Каталиста», C_g – стоимость расчета полного градиента оптимизируемого функционала, N_N – число итераций неускоренного метода Нестерова для решения вспомогательной задачи на каждой внешней итерации «Каталиста», C_N – амортизационная стоимость итерации неускоренного метода. При правильном выборе регуляризующего параметра $\bar{L} = 1/n \sum_{i=1}^n L_i$, где L_i – константа Липшица производной по координате (переменной) i , для задачи (1) имеем

$$N_c = O(\sqrt{\bar{L}R^2/\varepsilon}), \quad C_g = O(sn), \quad N_c = \tilde{O}(n), \quad C_N = O(s).$$

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-31-20005 мол_a_вед.

Резюмируя все вышесказанное, получаем, что для предлагаемого метода общее число итераций будет равно

$$\tilde{O}\left(\frac{R^2}{\varepsilon\sqrt{n\sum_{i=1}^n L_i}}\right),$$

при сложности итерации, равной $O(s)$. Если бы для задачи (1) был использован ускоренный покомпонентный метод (см. замечание 2 приложения и текст на с. 207–208 пособия [8]), то для него мы бы получили оценку на число итераций $O(\sum_{i=1}^n \sqrt{L_i} \sqrt{R^2/\varepsilon})$. Эта оценка лучше, чем для предлагаемого подхода, во-первых, тем, что вследствие вогнутости функции \sqrt{x} и неравенства Иенсена $\sum_{i=1}^n \sqrt{L_i} \leq \sqrt{n\sum_{i=1}^n L_i}$, а во-вторых, тем, что здесь нет лишнего логарифмического множителя, возникшего из-за применения техники «Каталист» и решения вспомогательной задачи с нужной точностью. Но стоимость итерации для такого метода составит уже $O(n)$, что делает итоговую трудоемкость не столь однозначной. Возникает в некотором смысле игра между числом итераций и их стоимостью, исход которой напрямую зависит от свойств решаемой задачи. Предлагаемый в работе метод должен быть эффективен для сильно разреженных постановок, когда потери из-за возросшего числа итераций с запасом компенсируются их низкой стоимостью.

1. Nesterov Yu. Efficiency of Coordinate Descent Methods on Huge-Scale Optimization Problems // SIAM Journal on Optimization. 2012. Vol. 22. P. 341–362.
2. Nesterov Yu. Subgradient methods for huge-scale optimization problems // Mathematical Programming. 2014. Vol. 146, № 1–2. P. 275–297.
3. Аникин А.С. и др. Эффективные численные методы решения задачи PageRank для дважды разреженных матриц // Труды МФТИ. 2015. Т. 7, № 4. С. 70–91.
4. Гасников А.В. Двуреченский П.Е. Усманова И.Н. О нетривиальности быстрых (ускоренных) рандомизированных методов // Труды МФТИ. 2016. Т. 8, № 2. С. 67–100.
5. Гасников А.В., Гасникова Е.В., Нестеров Ю.Е., Чернов А.В., Об эффективных численных методах решения задач энтропийно-линейного программирования // Журн. вычисл. математики и матем. физики. 2016. Т. 56, № 4. С. 523–534.
6. Bubeck S. Convex Optimization: Algorithms and Complexity // arXiv:1405.4980 [cs, math, stat]. 2015.
7. Lin H., Mairal, J. Harchaoui Z. Catalyst Acceleration for First-order Convex Optimization: from Theory to Practice // Journal of Machine Learning Research. 2017. № 18.
8. Гасников А.В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска: Учебное пособие. МФТИ, 2018. 166 с.

БЕЗГРАДИЕНТНЫЙ МЕТОД ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ГРАФИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ*

А.С. Аникин, Т.С. Зароднюк

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
anikin@icc.ru, tz@icc.ru

Алгоритмы поиска глобального экстремума работают существенно эффективнее, если при постановке задачи удастся найти и/или сгенерировать аналитические формулы для градиентов целевой функции. Как теоретически [1], так и на практике доступность градиентов позволяет существенно быстрее получать и верифицировать локальные экстремумы. Однако возможность получения формул для градиентов имеется, к сожалению, далеко не всегда. Использование в алгоритмах для вычисления функции итерационных процессов, сложных аппроксимационных процедур или алгоритмов со сложной логической структурой практически наверняка лишает исследователя этого комфортного положения. Заметим, что в этих случаях, как правило, «испаряются» также и другие чрезвычайно полезные свойства исследуемых функций – факторизуемость, позволяющая строить красивые интервальные методы [2] и/или методы разнообразных покрытий [3], возможность оценки констант роста, так необходимая для методов «липшицевой оптимизации» [4] и другие. Для задач небольшой размерности, порядка сотен переменных, эту недоступность аналитических градиентов иногда удается слегка нивелировать применением разностных схем для градиентов. Однако целесообразность многократного вычисления функции в близких точках всего только для определения локального направления движения не может не вызывать сомнения при решении невыпуклых экстремальных задач.

В работе обсуждается вариант поискового метода, ориентированного на невыпуклые задачи («Black Box Optimization»), использующего «оракул нулевого порядка» [1], не предполагающего доступности градиентов. Основная идея подхода – генерация четырехмерных «случайных» подзадач – четырех случайно выбранных номеров компонент оптимизируемого вектора, фиксация всех остальных компонент и адаптивный случайный поиск в сформированном четырехмерном подпространстве. Использование графического ускорителя позволяет сформировать целое множество четырехмерных подзадач («сколько есть процессоров»), для каждой из которой свой «персональный агент» осуществляет оптимизацию по своему адаптационному плану. По завершению этапа вычислений с априори заданной затратностью (число вычислений функции или требуемое процессорное время) производится координация проведенных расчетов, простейшим вариантом которой обычно выбирается кооптация в текущую точку наилучшего найденного агентами варианта. Проведенные вычислительные эксперименты продемонстрировали достаточно высокую эффективность предложенного алгоритма.

1. Немировский А.С., Юдин Д.Б. Сложность задач и эффективность методов оптимизации // М.: Наука, 1979.
2. Хансен Э., Уолстер Дж.У. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа. М.: РХД, 2012.
3. Евтушенко Ю.Г., Посыпкин М.А. Метод неравномерных покрытий для решения задач многокритериальной оптимизации с заданной точностью // Автоматика и телемеханика. 2014. Т. 6. С. 49–68.
4. Сергеев Я.Д., Квасов Д.Е. Краткое введение в теорию липшицевой глобальной оптимизации. Н. Новгород, 2016.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА КИТИНГА
С РАЗМЕРНОСТЯМИ ДО 10^8 ПЕРЕМЕННЫХ*

А.С. Аникин¹, А.В. Ненашев²

¹Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

anikin@icc.ru

Для моделирования деформаций, возникающих в квантовых точках «кремний-германий», еще в 1966 г. был предложен потенциал Китинга [1], представляющий из себя (с математической точки зрения) многомерный полином четвертой степени. Очевидно, что такой потенциал относится к классу невыпуклых функций, что в общем случае может приводить к существенным вычислительным сложностям при поиске решения. К счастью, в нашем случае существует дополнительная информация о «хорошем» начальном приближении, что сильно сужает область поиска и позволяет рассматривать задачи существенно больших размерностей – с миллионом и более атомов. Другой полезной информацией является знание внутренней структуры задачи, что в перспективе позволит применить так называемые «покомпонентные» методы, т.е. методы, выполняющие очень быстрые итерации, которые модифицируют по 1-2 переменных и реализуют «пересчет» (за счет знания структуры задачи) значения оптимизируемой функции вместо полного ее вычисления. Интерес к модели Китинга, несмотря на ее «почтенный» возраст, не ослабевает (см., напр., [2, 3]), но отсутствие работоспособных алгоритмов очевидно заставляет специалистов искать ее упрощения (см., напр., [4]). Поэтому задача создания алгоритмов, способных численно исследовать устойчивые состояния потенциала Китинга для числа атомов порядка 10^8 , продолжает оставаться актуальной.

В докладе предлагаются вычислительные технологии, предназначенные для поиска глобального экстремума потенциала Китинга для постановок со сверхбольшим числом атомов. В качестве «базовых» алгоритмов, на основе которых строятся многометодные вычислительные схемы, используется хорошо зарекомендовавший себя на практике квазиньютоновский метод LBFGS, а также различные модификации метода сопряженных градиентов. Предлагаемая вычислительная схема основана на параллельной работе различных алгоритмов из базового набора, анализе результатов их работы и периодических рестартах методов из наилучшей найденной точки. Вышестоящая «глобализующая» процедура формирует набор начальных точек, генерируемых в некоторой окрестности ненапряженного состояния квантовой точки.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Keating P.N. Effect of Invariance Requirements on the Elastic Strain Energy of Crystals with Application to the Diamond Structure // *Phys. Rev.* 1966. Vol. 145. P. 637–645.
2. Yakimov A.I., Stepina N.P., Dvurechenskii A.V., Nikiforov A.I., Nenashev A.V. Excitons in charged Ge/Si type-II quantum dots // *Semiconductor Science and Technology*. 2000. Vol. 15, № 12. P. 1125–1130.
3. Yakimov A.I., Bloshkin A.A., Dvurechenskii A.V. Calculating of energy spectrum and electronic structure of two holes in a pair of coupled Ge/Si quantum dot // *Phys. Rev. B*. 2010. Vol. 81. P. 115434.
4. Давыдов С.Ю. Простой модельный потенциал для описания упругих свойств однослойного графена // *Физика твердого тела*. 2013. Т. 55, вып. 4. С. 813–815.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-07-00587.

АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ЛИНЕАРИЗУЮЩИХ МНОЖЕСТВ В АЛГЕБРАИЧЕСКОМ КРИПТОАНАЛИЗЕ

К.В. Антонов, А.А. Семенов

Институт математики, экономики и информатики ИГУ

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

aknitr@mail.ru, biclop Rambler@yandex.ru

Термин «линеаризационное множество» был введен Г.П. Агибаловым в 2003 году в статье [1]. Упрощенно говоря, линеаризационным называется подмножество X' в множестве X переменных системы уравнений криптоанализа шифра, такое что подстановка любого значения переменных из X' в эту систему превращает ее в линейную (используется термин «линеаризует»). Обычно X' – это подмножество в множестве переменных, кодирующих секретный ключ. Тогда при $|X'| \ll n$, n – длина ключа, на основе X' можно построить атаку на рассматриваемый шифр, которая будет эффективнее атаки методом грубой силы (brute force attack). Атаки, использующие множество X' так, как описано выше – это атаки типа «угадай и определи» (guess-and-determine), и такие атаки образуют весьма многочисленный класс в алгебраическом криптоанализе [2]. Один из самых известных примеров так называемая «атака Андерсона» [3].

В докладе предлагается обобщение понятия линеаризационного множества. Соответствующие множества называются линеаризующими (linearization set). В основе этого понятия лежат идеи, описанные в статье [4]. Кратко, суть данного понятия состоит в следующем. Множество X' называется линеаризующим с вероятностью линеаризации ρ , если доля наборов значений переменных из X' , которая линеаризует систему уравнений криптоанализа, есть ρ . Для оценки ρ можно применять метод Монте-Карло в той его форме, как он был использован в [4].

Любое множество типа X' , $X' \subseteq X$, можно представить в виде точки в булевом гиперкубе $\{0,1\}^n$ ($n = |X|$). В каждой такой точке вычисляется значение специальной оценочной функции – это значение дает оценку вероятности ρ для рассматриваемого множества. Задача построения guess-and-determine атаки с нетривиальной оценкой ρ (дающей относительно малую трудоемкость этой атаки), таким образом, может быть рассмотрена как задача минимизации псевдобулевой функции Black-Box типа. Для данной задачи оправдано использование метаэвристических алгоритмов. Несколько таких алгоритмов были запрограммированы и применены к задаче криптоанализа известного криптографического генератора A5/1. Наилучшие результаты показала специальная версия генетического алгоритма, описанная в [5]. Построенная в результате атака оказалась в несколько десятков раз более эффективной в сравнении с атакой Андерсона [3].

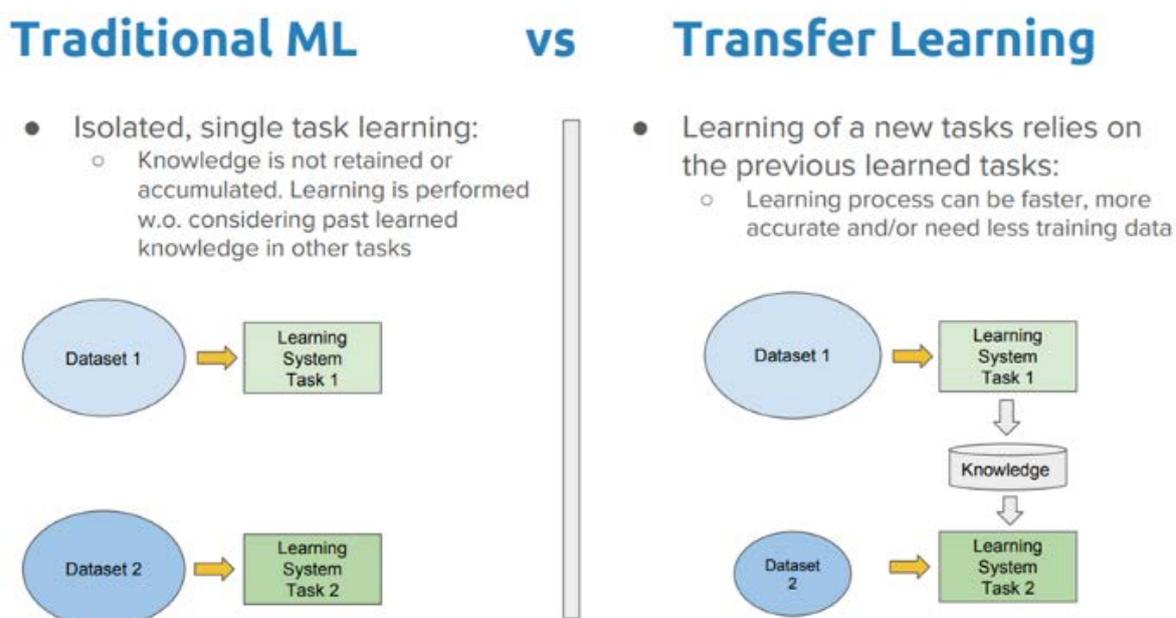
1. Агибалов Г.П. Линеаризационные множества в криптоанализе генераторов ключевого потока // Вестник Томского гос. ун-та. Приложение. 2003. № 6. С. 31-41.
2. Bard G. Algebraic cryptanalysis. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st edition, 2009.
1. Anderson R. A5 (Was: Hacking digital phones) // Newsgroup Communication. 1994. URL: <http://yarchive.net/phone/gsmcipher.html>.
3. Semenov A., Zaikin O., Otpuschennikov I., Kochemazov S., Ignatiev A. On cryptographic attacks using backdoors for SAT // Proc. the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI'2018). 2018. P. 6641-6648.
4. Pavlenko A., Semenov A., Ulyantsev V. Evolutionary computation techniques for constructing SAT-based attacks in algebraic cryptanalysis // Lecture Notes in Computer Science. 2019. Vol. 11454 (EvoApps). P. 237–253.

ПРИМЕНЕНИЕ TRANSFER LEARNING В ЗАДАЧАХ ПРЕДСКАЗАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

А.Е. Быков, П.Е. Гладилин, И.А. Сайтов
ФГБОУ ВО “Иркутский государственный университет”, НИУ ИТМО

Анализ временных рядов необходим во всех отраслях, где присутствуют данные, зависящие от времени. Задача предсказания является одной из главных задач анализа временных рядов, которая до сих пор имеет большое количество нерешенных проблем. Одним из возможных решений является применение сетей LSTM, обучение которых сильно затрудняется при нехватке данных. Данную проблему потенциально способен решить Transfer Learning, который в настоящий момент уже успешно применяется в задачах классификации изображений и анализа естественного языка. На данный момент существует несколько статей, исследующих Transfer learning в задаче предсказания либо анализа временных рядов [1, 2].

Подход Transfer learning заключается в обучении сети на большом массиве данных для схожей или аналогичной задачи, затем дообучение части сети на новых данных, чтобы подстроить ее к новой задаче.



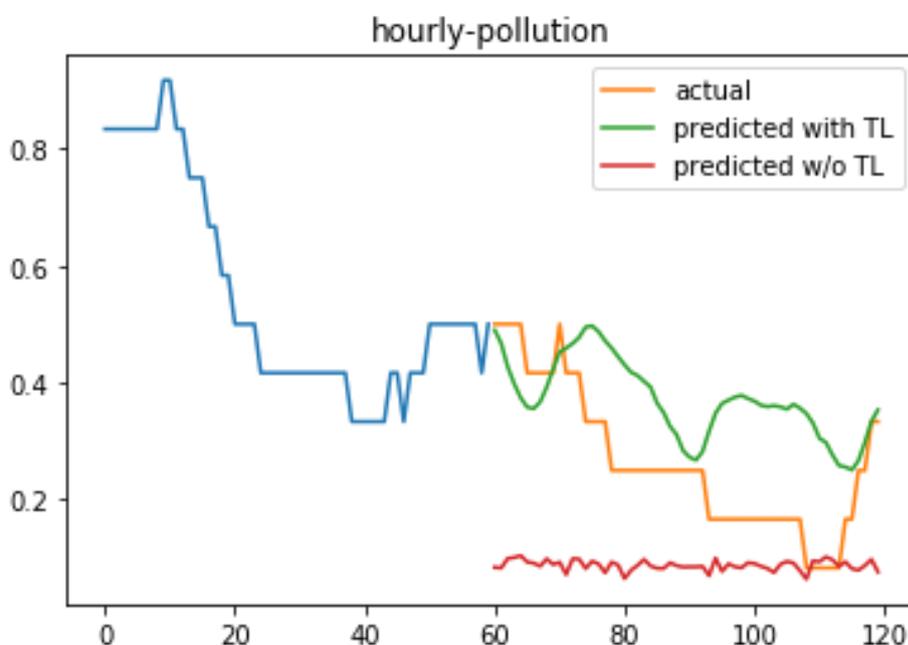
Целью работы было оценить применимость техники Transfer learning для предсказания временных рядов и оценить параметры, влияющие на эффективность техники.

Итак, необходимо было обучить две модели: основную и дообученную. Основная модель была обучена на данных датасета M4, содержащего в себе временные ряды из различных сфер. Для второй модели использовалось несколько датасетов различного объема.

Датасет	Объем данных от-но M4	Описание
hourly-bitcoin	2%	Курс bitcoin
hourly-ethereum	3 %	Курс ethereum

hourly-pollution	< 1 %	Уровень загрязнения
hourly-humidity	7%	Уровень влажности
hourly-venezia	50 %	Уровень воды
hourly-crime	6%	Кол-во преступлений
hourly-consumption	12 %	Уровень энергопотребления
daily-electricity	<1%	Уровень выработки эл-ва
monthly-beer	< 1 %	Производство пива
yearly-wages	< 1 %	Зарплаты в день

Примеры предсказаний:



Результаты получились следующие:

1. Была оценена применимость TL для задач предсказания временных рядов.
2. Были рассмотрены факторы, влияющие на эффективность техники TL для временных рядов.
3. Оптимальное количество замороженных слоев варьируется от датасета.
4. Оптимальный размер входной последовательности и предсказываемой варьируется от датасета.
5. Получено, что TL отлично применим в тех случаях, когда данных собрано очень мало.

1. Fawaz H.I. et al. Transfer learning for time series classification // Proc. 2018 IEEE Intern. Conf. on Big Data. IEEE, 2018. P. 1367-1376.
2. Laptev N., Yu J., Rajagopal R. Reconstruction and Regression Loss for Time-Series Transfer Learning // SIGKDD MiLeTS'2018. 8 p.

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРИ НАИХУДШЕМ СЦЕНАРИИ ПОТЕРЬ ОБЪЕКТОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ*

И.Л. Васильев, Т.В. Груздева, А.В. Ушаков

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
{vil, gruzdeva, aushakov}@icc.ru

На протяжении последних десятилетий стало очевидным, насколько уязвимыми являются объекты инфраструктуры, системы оказания экстренной помощи, снабжения и обслуживания, прежде всего в случае атак террористических групп или спланированного саботажа. С другой стороны, идентификация критически важных элементов инфраструктуры и снабжения, например, при выборе целей для воздушной бомбардировки, является одним из известных направлений военного планирования [1].

В настоящей работе исследуется задача построения сетей снабжения (предоставления услуг) при условии возникновения угроз целенаправленной атаки. Предполагается, что необходимо разместить заданное число пунктов обслуживания (распределения) с целью минимизации затрат на оказание услуг некоторому множеству потребителей. Дополнительным условием является тот факт, что заданное число пунктов (после размещения) может быть выведено из строя спланированной атакой, приводящей к тому, что часть потребителей будет вынуждена получать услугу из более отдаленных пунктов, увеличивая тем самым затраты на функционирование системы. Предполагается, что выведенные из строя пункты обслуживания не могут быть быстро восстановлены и система может функционировать в «нарушенном режиме» достаточно длительный промежуток времени.

В работе исследуется возможность моделирования описанной выше задачи в виде двухуровневой задачи целочисленного программирования. Предполагается, что на верхнем уровне происходит выбор p наилучших мест для размещения пунктов предоставления услуг с целью минимизации суммарных затрат на обслуживание потребителей. В то время как на нижнем уровне $r < p$ пунктов выводятся из строя таким образом, чтобы максимизировать суммарный ущерб.

В работе предлагается одноуровневая формулировка представленной задачи, а также алгоритмы поиска близких к оптимальным решений. В докладе приводятся результаты численного тестирования на серии известных тестовых задач.

1. Scaparra M.P., Church R.L. An exact solution approach for the interdiction median problem with fortification // *Eur. J. Oper. Res.* 2008. Vol. 189, № 1. P. 76-92.
2. Vasilyev I., Ushakov A.V., Maltugueva N., Sforza A. An effective heuristic for large-scale fault-tolerant k -median problem // *Soft Computing*. 2019. Vol. 23, № 9. P. 2959-296.
3. Васильев И.Л., Груздева Т.В., Ушаков А.В. Двухуровневая задача о p -медиане с условием надежности // *Динамические системы, оптимальное управление и математическое моделирование: Материалы Междунар. симпозиума, посвящ. 100-летию матем. образования в Восточной Сибири и 80-летию со дня рождения проф. О.В. Васильева*. Иркутск, 7-11 октября 2019 г. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. С. 385-388.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 18-07-01037.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕРНЫХ ДЫР ЧЕРЕЗ ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ МЕХАНИКИ, ТЕРМОДИНАМИКИ И МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

А.С. Верховин
Лицей № 3, 11 класс

Введение в прекрасный мир науки может принести большое эстетическое наслаждение и вдохновить к познанию тайн природы, если рискнуть взяться за синтез фактов и теорий, познакомиться с общими понятиями основных разделов конкретной науки, например, физики, и, составив карты понятий, применить их для анализа некоторых объектов астрофизики.

Гипотеза: черные дыры открывают путь в новое, очень широкое поле познания нашего физического мира.

Цель работы: создание карт понятий и тетради с решением задач прикладного характера для представления некоторых характеристик черных дыр.

Задачи для достижения цели:

1. Рассмотреть различные подходы к изучению тепловых явлений.
2. Изучить молекулярно-кинетическую теорию и термодинамику и показать их взаимосвязь друг с другом и с понятием «черной дыры».
3. Выяснить, что такое энтропия и излучение Хокинга.
4. Выделить основные понятия для представления термодинамики черных дыр.
5. Применить метод размерностей к описанию черных дыр.

Метод размерностей позволяет сделать оценки физических величин, оценить размеры Вселенной, проникнуть в мир атомов, молекул и звезд, установить новые соотношения между физическими величинами.

Квант времени в черной дыре зависит от гравитационной постоянной, приведенной постоянной Планка и скорости света. Составляем зависимость

$$t = k * \hbar^\alpha * G^\beta * c^\gamma,$$

где t – квант времени, k – коэффициент пропорциональности, \hbar – приведенная постоянная Планка, G – гравитационная постоянная, c – скорость света.

$$[t] = c = T$$

$$[\hbar] = Дж * c = Н * м * c = кг * м^2 * c^{-1} = M * L^2 * T^{-1}$$

$$[G] = кг^{-1} * c^{-1} * м^3 = M^{-1} * T^{-2} * L^3$$

$$[c] = м * c^{-1} = L * T^{-1}$$

$$T = k * [M * L^2 * T^{-1}]^\alpha * [M^{-1} * T^{-2} * L^3]^\beta * [L * T^{-1}]^\gamma$$

$$T = k * M^{\alpha-\beta} * L^{2\alpha+3\beta+\gamma} * T^{-\alpha-2\beta-\gamma}$$

Сравним степени левой и правой частей:

$$\begin{cases} \alpha - \beta = 0, \\ 2\alpha + 3\beta + \gamma = 0, \\ -\alpha - 2\beta - \gamma = 1, \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \alpha = \beta, \\ \gamma = -5\beta, \\ 2\beta = 1, \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \alpha = \frac{1}{2}, \\ \beta = \frac{1}{2}, \\ \gamma = -\frac{5}{2}. \end{cases}$$

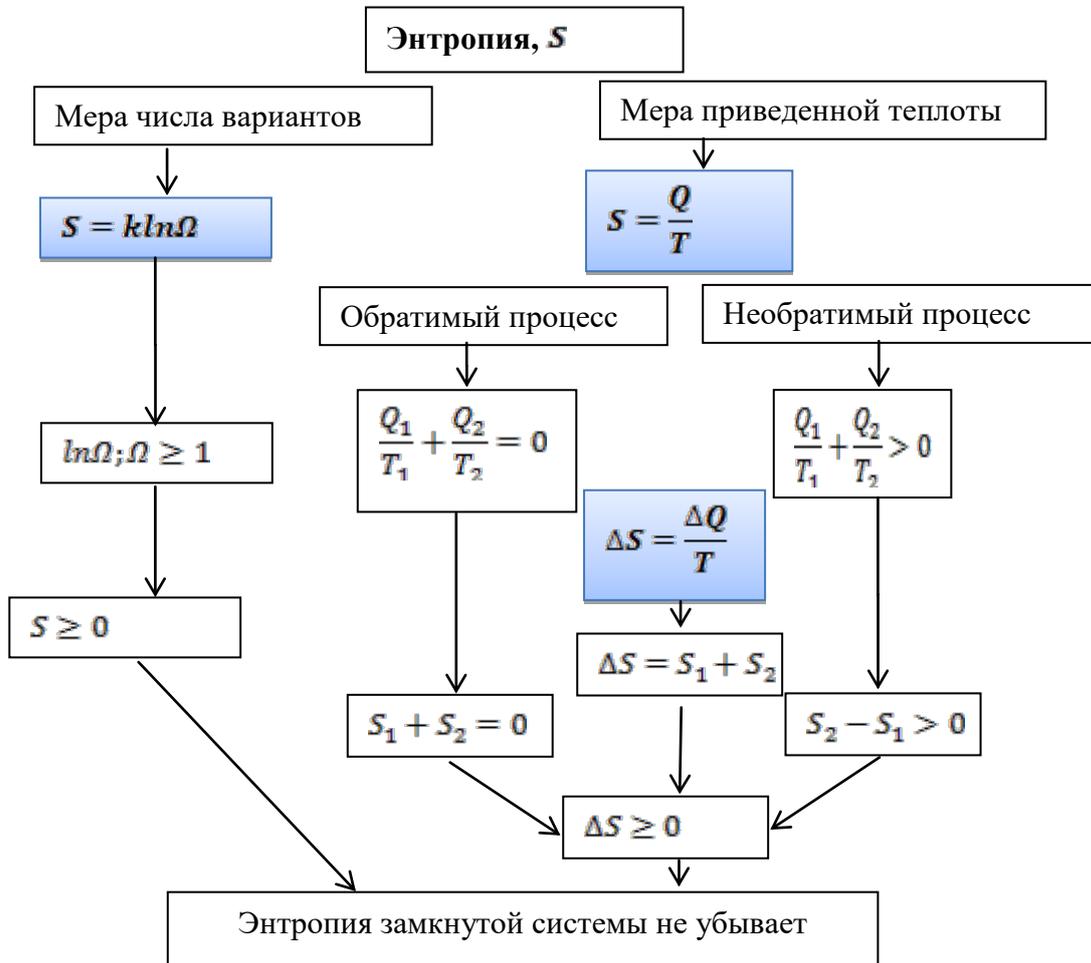
Подставляем степени в уравнение и получаем формулу

$$t = k * \sqrt{\frac{G * \hbar}{c^5}}.$$

Подставим табличные величины и найдем квант времени, который будет равен 10^{-43} с.

Второй закон термодинамики

Невозможно передать теплоту от менее нагретого тела более нагретому без изменений в других телах. Отвечающая за направленность процессов функция – энтропия.



- Чем больше температура, тем больше $\overline{E_k}$ и Ω , значит, больше и S .
- Чем больше $\overline{E_k}$, тем больше скорость молекул, значит, их становится труднее отследить.
- Чем труднее отследить молекулы, тем меньше информации о них можно узнать.

Объединяя 1 и 3 пункт, получаем, что *чем больше энтропия, тем меньше информации о системе можно узнать, значит, система более однородна (беспорядочна).*

Энтропия – мера скрытой информации

Таблица с расчетами энтропии, температуры, мощности излучения и времени жизни для черных дыр различных масс

Масса черной дыры, кг	$S, \frac{Дж}{К}$	$T, К$	$L, \frac{эрг}{с}$	$t, с$
10^6	$39,6 * 10^4$	10^{17}	$3,4 * 10^{27}$	88
M_c	$15,8 * 10^{53}$	$5,85 * 10^{-4}$	$9 * 10^{-22}$	$70,4 * 10^6$
$5 M_c$	$39,6 * 10^{54}$	$11,7 * 10^{-4}$	$3,4 * 10^{-23}$	$8,8 * 10^{76}$
$100 M_c$	$15,8 * 10^{57}$	$5,85 * 10^{-4}$	$9 * 10^{-26}$	$70,4 * 10^6$
$1000 M_c$	$15,8 * 10^{59}$	$5,85 * 10^{-4}$	$9 * 10^{-28}$	$70,4 * 10^6$
$10^6 M_c$	$15,8 * 10^{65}$	$5,85 * 10^{-4}$	$9 * 10^{-34}$	$70,4 * 10^6$
$10^9 M_c$	$15,8 * 10^{71}$	$5,85 * 10^{-4}$	$9 * 10^{-40}$	$70,4 * 10^6$

Общая теория относительности утверждает, что информация, попавшая в черную дыру, там и остается, но по общей теории относительности черные дыры стационарны и не испаряются. Квантовая механика же утверждает, что черные дыры испаряются и исчезают за счет излучения Хокинга. Однако после исчезновения черной дыры остается пустое место, и что происходит с энтропией и информацией, зашифрованной на горизонте событий, остается непонятным.

Возможно, для решения этой проблемы потребуется открыть совершенно новые законы природы, пересмотреть фундамент современной физики. Поэтому в области термодинамики черных дыр еще достаточно много работы, но результаты этой работы наконец-то смогут приблизить человечество к пониманию устройства нашего физического мира.

1. Фейнин О.О. Стивен Хокинг. Гений черных дыр. М.: Эксмо, 2010. 336 с.
2. Хокинг С. Краткая история времени: От Большого взрыва до черных дыр. М.: Изд-во АСТ, 2018. 232 с.
3. Сасскинд Л. Битва при черной дыре. Мое сражение со Стивеном Хокингом за мир, безопасный для квантовой механики. СПб.: Питер, 2015. 448 с.
4. Леонов В.С. Квантовая энергетика. Кембридж, 2010. 62 с.
5. Хокинг С. Черные дыры и молодые вселенные. СПб.: Амфора, 2004. 189 с.
6. Кабардин О.Ф., Орлов В.А., Эвенчик Э.Е. и др. Физика: Учебник для 10 классов школ и классов с углубленным изучением физики / Под ред. А.А. Пинского. М.: Просвещение, 1999. 415 с.
7. Фролов В.П. Введение в физику черных дыр. М.: Знание, 1983. 64 с.
8. Новиков И.Д. Энергетика черных дыр. М.: Знание, 1986. 64 с.

ВОЗМОЖНЫЕ ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗАЦИИ КАЛИБРОВКИ КАМЕРЫ ALLSKY ПО СНИМКАМ ЗВЕЗДНОГО НЕБА

З.А.Воловикова^{1,2}, А.М. Веснин^{1,2}

¹ ИСЗФ СО РАН

² Факультет сервиса и рекламы ИГУ

zoya.v@ya.ru, artemvesnin@gmail.com

Околосземное космическое пространство (ОКП) является динамической средой, влияющей на многие аспекты человеческой деятельности, к которым, в том числе, относится радиосвязь и позиционирование. В настоящее время существуют различные подходы к изучению ОКП. В данной работе мы рассматриваем сопряжение данных оптического метода (камеры всего неба ALLSKY) с данными полного электронного содержания (ПЭС)[1] по измерениям глобальных спутниковых навигационных систем. Подход заключается в приведении изображений камеры в вид, когда возможна однозначная привязка каждого пикселя изображения к определенному углу места и азимуту. В качестве естественного ориентира выбраны звезды на изображении. Выделив их и сопоставив со звездами из каталога, угол места и азимут которых известны для каждого времени, возможно определить модель камеры ALLSKY.

Задача выделения звезд на изображении, может иметь следующее решение.

Пусть M_{ij} - является срезом матрицы I_{ij} и хранит значения снимка на промежутке $[i:i+step, j:j+step]$. p - является пороговым значением определяющим, звезду на определенном промежутке изображения. Тогда можно определить p как медиану от уникальных значений матрицы M_{ij} .

Результат выделения звезд по такому методу представлен на рис. 1.

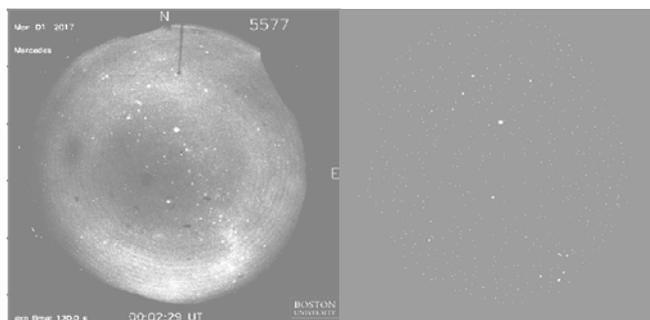


Рис.1. Справа - оригинальный снимок, слева - выделенные на нем звезды

Для сопоставления детектированных на снимках звезд и объектов, имеющих в каталоге использовался подход, базирующийся на решении задачи о назначении [2].

При сопоставлении объектов из каталога с детектированными по снимкам возникает проблема необходимости учета искажений - шумов, появляющихся на снимках из-за пересвета камеры. В связи с этим, задача модифицируется: требуется по ряду снимков определить истинные звезды, выделяя маршрут движения каждой звезды. Таким образом, объекты, чья траектория по нескольким кадрам не будет определена, звездами не являются.

Ниже представлен результат для покадрового сопоставления звезд с помощью Венгерского алгоритма [3].

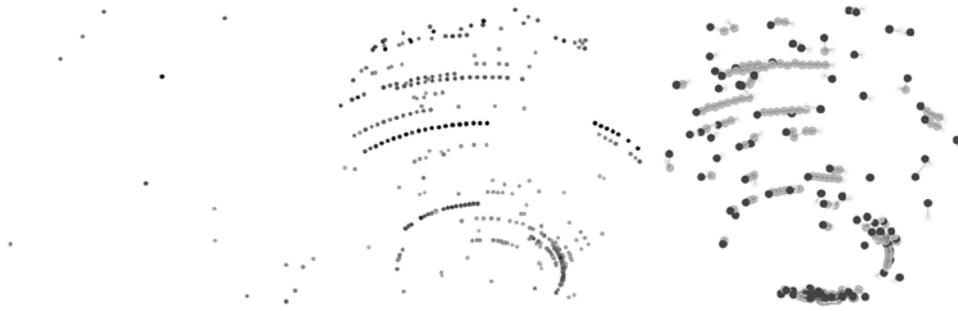


Рис.2. Выделение маршрутов передвижения звезд.
 Слева направо находятся звезды, выделенные на одном снимке,
 звезды, выделенные по ряду снимков, выделение траектории звезд

Возможно выделение маршрута передвижения звезд, не по последовательности кадров, а на матрице, содержащей звезды с N кадров с помощью алгоритмов кластеризации. В примере был использован алгоритм OPTICS [4], формирование кластеров в котором происходит за счет плотности объектов друг к другу. Это позволяет звезды со схожей светимостью и находящиеся рядом выделить в один кластер.

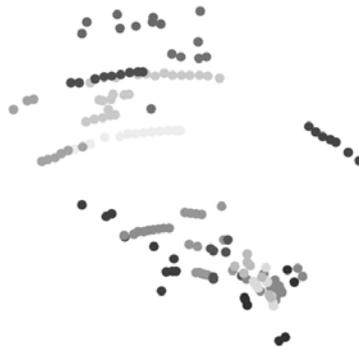


Рис.3. Выделение маршрутов передвижения звезд.
 Маршруту определенной звезды соответствует интенсивность света

После того, как снимок очищен от ложных звезд, его можно сопоставлять со звездами из каталога, для этого также используется венгерский алгоритм (рис. 4). По полученной информации, можно определить модель камеры стандартным способом [5].

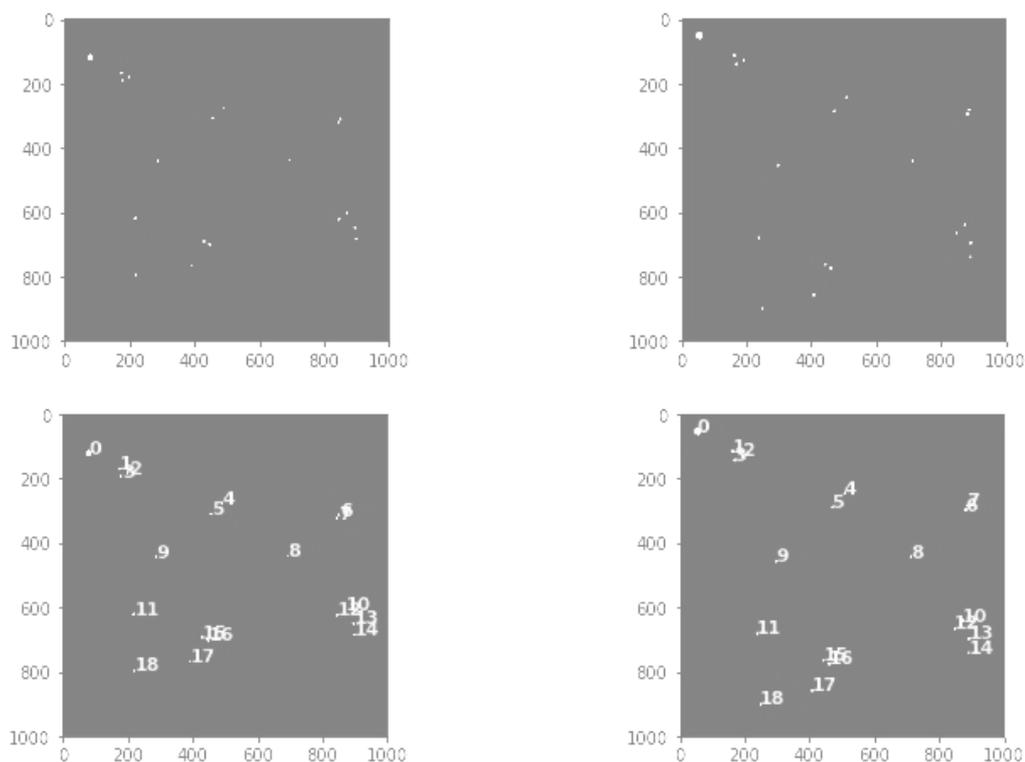


Рис.4. Результаты сопоставления объектов со снимком и из каталога

1. Mannucci, A. J., Wilson, B. D., Yuan, D. N., Ho, C. H., Lindqwister, U. J., & Runge, T. F. (1998). A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio science*, 33(3), 565-582.
2. Хемди А. Таха. гл 5.4 Задача о назначениях. // Введение в исследование операций. 7-е издание. Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2005.
3. Harold W. Kuhn, «The Hungarian Method for the assignment problem», *Naval Research Logistics Quarterly*, 2:83—97, 1955. Kuhn's original publication.
4. Mihael Ankerst, Markus M. Breunig, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander. OPTICS: Ordering Points to Identify the Clustering Structure // =ACM SIGMOD international conference on Management of data. — ACM Press, 1999. — С. 49–60.
5. OpenCV 2.4.13.7 documentation(2011) // Camera calibration with OpenCV https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html.

АКТУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЕРВИСОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ДАТЧИКОВ МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА*

М.Л. Воскобойников

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
voskoboynikov1988@gmail.com

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, использовать, организовать каталогизацию сервисов, поиск и т.д. Для взаимодействия с такими сервисами могут применяться как стандартизированные, такие как REST, WPS, SOAP, так и не стандартизированные интерфейсы и протоколы.

Для сбора и хранения данных об использовании сервисов разработано Android-приложение, устанавливаемое на мобильное устройство пользователя.

Разработан метод классификации контекстов использования сервисов, позволяющий автоматизировать вызов сервисов внутри помещения. Контекстом использования сервисов внутри помещения являются данные, получаемые с видимых мобильным устройством Wi-Fi точек доступа. Разработанный метод классификации базируется на расчете метрики, учитывающей изменение уровня сигнала Wi-Fi точек доступа в зависимости от расстояния до мобильного устройства. Точность классификации составляет 95%, что позволяет использовать данный метод в системах умного дома и умного города. Метод реализован в виде модуля Android-приложения.

Одной из проблем, возникающих при классификации контекстов использования сервисов, является актуализация данных, входящих в обучающую выборку. Разрабатываемый метод актуализации данных позволит решить ряд задач, а именно,

1. устранять ошибочные прецеденты, которые возникают, когда пользователь вызывает сервис в неверном контексте;
2. выявлять изменение контекста вызова сервиса.

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

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАНТИЙНЫХ И КОРОВЫХ МАГМ НА РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ЗЕМНОЙ КОРЫ*

Д.П. Гладкочуб¹, А.Ю. Горнов², Е.В. Скляр¹, В.В. Козлов², Т.В. Донская¹

¹Институт земной коры СО РАН

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН

dima@crust.irk.ru, gornov@icc.ru

Основная цель совместной работы по интеграционному проекту – оценить масштабы и временные рамки проявления гранитоидного магматизма и обосновать его связь с близко-возрастными базит-ультрабазитовыми комплексами. В качестве информационной и методической базы используется комплексный анализ геологических, геофизических, геохронологических и петрогеохимических данных по гранитоидным батолитам карбона-перми и триаса, располагающимся в пределах южного обрамления Северо-Азиатского кратона. Для реализации целей проекта произведена попытка разработки численных геодинамических моделей магматизма данного типа, объясняющих наряду с генетическими вопросами строгую детерминированность металлогенической специализации всех изученных объектов [1].

Проведена структурная идентификация модели гранитоидного магматизма, описываемой системой дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Для постановки задачи параметрической идентификации предложенной модели была создана информационная система, включающая результаты полевых исследований, проводимых в последние годы сотрудниками Института земной коры СО РАН [2]. Численное решение задачи параметрической идентификации выполнялось с применением многометодных вычислительных технологий, основанных как на глобализованных алгоритмах (Лууса-Яаколы, Пауэлла-Брента, Растригина), так и на алгоритмах локального поиска – сопряженных градиентов и квазиньютоновских [3, 4].

Проведенное математическое моделирование открывает реальные возможности изучения проблемы правомерности отнесения исследованных гранитоидных батолитов и ассоциирующих с ними базит-ультрабазитовых комплексов к редко встречающемуся в мире и не имеющего аналогов на территории Российской Федерации «сиалическому» типу крупных магматических провинций.

1. Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Котов А.Б., Старикова А.Е., Шарыгин В.В., Великославинский С.Д., Ларин А.М., Мазукабзов А.М., Толмачева Е.В., Хромова Е.А. Генезис Катугинского редкометального месторождения: магматизм против метасоматоза // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35, № 3. С. 9–22.
2. Котов А.Б., Владыкин Н.В., Ларин А.М., Гладкочуб Д.П., Сальникова Е.Б., Скляр Е.В., Толмачева Е.В., Донская Т.В., Великославинский С.Д., Яковлева С.З. Новые данные о возрасте оруденения уникального Катугинского редкометального месторождения (Алданский щит) // Доклады академии наук. 2015. Т. 463, № 2. С. 187–191.
3. Горнов А.Ю. Вычислительные технологии решения задач оптимального управления. Новосибирск: Наука, 2009.
4. Горнов А.Ю., Гладкочуб Д.П., Скляр Е.В., Донская Т.В. Методика параметрической идентификации моделей взаимодействия мантийных и коровых магм на различных гипсометрических уровнях земной коры // Материалы конф. «Ляпуновские чтения», 2018. С. 25.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта № 39 Комплексной Программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018-2020 гг.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАЛИДНОСТИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИИ ЗАДАЧ «MIXED-INTEGER» КЛАССА К НЕПРЕРЫВНЫМ ЗАДАЧАМ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ*

А.Ю. Горнов, А.С. Аникин

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

gornov@icc.ru, anton.anikin@gmail.com

Задачи смешанного целочисленного («mixed-integer») программирования есть очень популярный в приложениях класс экстремальных задач (оптимизация расписаний, производственное планирование, оптимизация и анализ графов и сетей,...). Однако появление среди оптимизируемых величин переменных дискретного типа – целочисленных и/или булевских, резко меняет статус задачи, она становится NP-трудной и невыпуклой даже при оптимизации линейных функций при линейных же ограничениях. «Первичная разведка» проблемы, проведенная нами, показала, что либо для решения задач обсуждаемого класса используются весьма «тяжелые» решатели, использующие гарантированные стратегии методов «ветвей и границ», либо эвристические подходы, вызывающие сомнение в качестве получаемых результатов (см., напр., [1]). В первом случае возможности решателей, очевидно, будут жестко ограничены по размерности задач, во втором – вообще непонятно, как относиться к выдаваемым решениям.

Работа посвящена поиску возможностей эффективного решения задач «mixed-integer» классов с применением современного алгоритмического и компьютерного инструментария. Самый простой редуциционный подход, читаемый студентам математических факультетов еще в 70-х годах прошлого века (см., напр., [2, 3]), заключается во введении специальных штрафных функций, не допускающих остановки алгоритмов в точках, в которых не выполняются условия целочисленности. В качестве таких функций рассмотрены тригонометрические зависимости $F(x) = \sin^2 \pi x$. Для тестирования подхода была сформирована коллекция задач с размерностями $n = 10, 100, 1000$. Все переменные считались целочисленными, количество вариантов для каждой переменной было выбрано несколько сотен (например, от 300 до 1000). Для оценки полученного результата введены два критерия качества решения диапазона точности: первый – решение отличается от известного оптимального не более, чем на 0.5, второй – не более, чем на 1.5. В качестве оптимизируемых функций рассматривались выпуклые квадратичные функции типа $\sum_{i=1}^n (x_i - 50)^2$, стартовые точки выбирались случайными.

Были проведены вычислительные эксперименты с использованием как локальных, так и глобализующих методов: сопряженных градиентов, квазиньютоновских, доверительных интервалов, Лууса-Яаколы, сферического поиска, дифференциальной эволюции, “Basin Hopping”, криволинейного поиска и других. В подавляющем большинстве случаев алгоритмам удавалось найти хорошее и/или идеальное решение по второму критерию качества; первый критерий при этом получал большой разброс. Это свойство несколько не ослабло при росте размерности решаемых задач от 10 до 1000. Можно констатировать, что столь простой подход дает вполне удовлетворительные результаты при невысоких требованиях к точности решения за весьма скромное время расчетов.

1. The modeling system for mathematical programming and optimization – The General Algebraic Modeling System (GAMS). URL: <https://www.gams.com/>.
2. Абрамов В.В., Булатов В.П., Крумов Л.А. Об одном алгоритме решения задачи выпуклого целочисленного программирования с параллелепипедными ограничениями // Тез. докл. конф. по оптимальному планированию. Новосибирск, 1965.
3. Булатов В.П. Об одном новом методе решения задачи дискретного программирования // Методы оптимизации и их приложения. Иркутск, 1974.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-29-03071.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОНТРЯГИНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.Ю. Горнов, А.С. Аникин, Т.С. Зароднюк

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН

gornov@icc.ru, anton.anikin@gmail.com, tz@icc.ru

Применимость традиционных методов исследования управляемых динамических систем расширяется с ростом мощностей современной вычислительной техники. Мультиметодные подходы в объединении с технологиями распараллеливания могут привести к новому качеству достигаемых результатов [1, 2].

Рассматривается традиционная задача оптимального управления со свободным правым концом и параллелепипедными ограничениями на управляющие воздействия. Для ее решения реализованы варианты метода Л.С. Понтрягина [3], позволяющие находить нелокальные решения задач оптимального управления. Предлагаемый подход опирается на построение расширенной системы дифференциальных уравнений, включающей исходные и сопряженные уравнения. Для формирования соответствующей задачи Коши используются известные значения начальных фазовых координат и стартовые значения сопряженных переменных, вычисляемые по формулам для двумерного (1) и трехмерного (2) случая соответственно:

$$\psi_1^1(t_0) = \sin \alpha, \psi_2^1(t_0) = \cos \alpha, \quad (1)$$

$$\psi_1^2(t_0) = \sin \alpha \cos \beta, \psi_2^2(t_0) = \cos \alpha \cos \beta, \psi_3^2(t_0) = \sin \beta, \alpha, \beta \in [0, 2\pi]. \quad (2)$$

Для задач большей размерности используется стохастический способ генерации значений сопряженного фазового вектора в начальный момент времени. Сформированная система из $2 \cdot n$ дифференциальных уравнений аппроксимируется с использованием конечно-разностных схем, автоматически решается вспомогательная задача максимизации гамильтониана. В результате численного интегрирования полученной системы вычисляется достигаемое в конечный момент времени значение целевого функционала на соответствующей траектории. Таким образом, численное решение краевой задачи принципа максимума позволяет получить управляющее воздействие с обратной связью.

Вычисление сопряженных координат в начальный момент времени выполняется с использованием технологии параллельного программирования Nvidia CUDA, ориентированной на использование мощностей современных графических ускорителей (GPU). Осуществляется параллельный запуск процедуры интегрирования динамической системы с различными управлениями и значениями начального фазового вектора. Для интегрирования выбран метод Эйлера с итерациями как наиболее эффективно реализуемый в рамках текущей архитектуры GPU. Расчеты производились в режиме одинарной точности (float), что также обусловлено аппаратными особенностями графических ускорителей – режим двойной точности требует на порядок больше процессорного времени.

Результаты проведенных экспериментов позволили продемонстрировать эффективность применения технологий распараллеливания вычислительных процессов для численного решения задач оптимального управления.

1. Gornov A.Yu., Tyatyushkin A.I., Finkelshtein E.A. Numerical methods for solving terminal optimal control problems // Comput. Math. Math. Phys. 2016. Vol. 56, № 2. P. 221–234.
2. Guminov S., Gasnikov A., Anikin A., Gornov A. A universal modification of the linear coupling method // Optimization Methods and Software. 2019. Vol. 34, № 3. P. 560–577.
3. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ТРАЕКТОРНЫХ ЗАДАЧ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ПОТЕНЦИАЛОВ*

А.Ю. Горнов, Т.С. Зароднюк

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru, tz@icc.ru,

К числу актуальных задач молекулярной динамики специалисты относят, помимо традиционных задач исследования статических конструкций [1] – поиска минимумов атомно-молекулярных кластеров, также и ряд далеко не так популярных задач динамической оптимизации, в которых детально исследуются динамические процессы, происходящие в наноструктурах. Относительно малая распространенность модельных постановок такого типа связана, на наш взгляд, с неразвитостью математического инструментария, ориентированного на данный класс невыпуклых в общем случае экстремальных задач (см., напр., [2]).

Работа посвящена поиску подходов к исследованию различных вариантов траекторных задач молекулярной динамики для моделей, базирующихся на разнообразных гипотезах о взаимодействии небольших кластерных конфигураций. В качестве общего подхода предложен разработанный нами ранее метод криволинейного поиска. Для проведения вычислительных экспериментов использованы три модификации алгоритмов с двумя, тремя и четырьмя дополнительными пробными точками [3].

Рассмотрен набор задач диссипации двухатомных молекул, описываемых моделями с различными гипотезами о структуре взаимодействия – потенциалами Морса, Леннарда-Джонса, Гупта, Саттон-Чена и другими (см., напр., [4, 5]). Полученные модели в виде системы дифференциальных уравнений были дополнены традиционными управляющими воздействиями в правых частях, соответствующими «лазерному управлению» системой. Рассмотрены постановки задач оптимального управления, как с линейными, так и с нелинейными зависимостями правых частей от управляющих воздействий. Проведенные сравнительные вычислительные эксперименты продемонстрировали совпадение результатов расчетов с работами других авторов, при наличии таких работ в доступной печати (см., напр., [6]).

Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. The Cambridge Energy Landscape Database. URL: <http://www-wales.ch.cam.ac.uk/CCD.html>.
2. Печень А.Н. Некоторые математические задачи управления квантовыми системами // Квантовые вычисления. Итоги науки и техники. Сер. Современ. математика и ее приложения. 2017. № 138. С. 76–81.
3. Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С. Метод «криволинейного поиска» глобального экстремума в задаче оптимального управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 19–26.
4. Goggin M.E., Milonni P.W. Driven Morse oscillator: Classical chaos, quantum theory and photodissociation // Phys. Rev. A. 1988. Vol. 37, № 3. P. 796-845.
5. Yu C., Gross P., Ramakrishna V., Rabitz H., Mease K., Singh H. Control of classical regime molecular objectives – applications of tracking and variations of the theme // Automatica. 1997. № 9. P. 1617–1633.
6. Liu W.K., Wu B., Yuan J.M. Nonlinear dynamics of chirped pulse excitation and dissociation of diatomic molecules // Phys. Rev. Letters. 1995. Vol. 75, № 7. P. 1292.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-07-00587.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОВОДИМОСТЬЮ МАССИВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА ПРИМЕРЕ РЕЛАКСАЦИИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ*

А.Ю. Горнов¹, Т.С. Зароднюк¹, А.Ф. Зиновьева², А.В. Ненашев²

¹Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

gornov@icc.ru, tz@icc.ru, aigul@isp.nsc.ru, nenashev@isp.nsc.ru

Существует множество предложений по реализации квантовых вычислений на основе различных систем, одним из наиболее перспективных считается использование спиновых состояний носителей заряда, локализованных в полупроводниковых квантовых точках в гетеросистеме Ge/Si [1]. Актуальной проблемой является передача спиновой информации между элементами квантового компьютера, а значит, стоит задача управления спиновыми токами в структурах с квантовыми точками. Основными управляющими инструментами могут стать воздействие светом и магнитное поле. Для реализации управления необходимо понимание механизмов, определяющих поведение системы с квантовыми точками при световом воздействии и изменении внешнего магнитного поля. С этой точки зрения наиболее информативным является анализ экспериментальных результатов по временной релаксации фотопроводимости массива квантовых точек в магнитном поле [2]. Для описания эволюции фотопроводимости в магнитном поле была предложена модель, в которой предполагалось, что проводимость образца определяется фактором заполнения квантовых точек носителями заряда.

Исследование возможности управления проводимостью массива квантовых точек осуществлялось с помощью разработанного авторами специализированного программного комплекса, включающего наряду с алгоритмами оптимизации и интегрирования динамических систем удобную диалоговую систему, алгоритмы предоптимизационного и постоптимизационного анализа. Пакет программ дополнен средствами настройки алгоритмических параметров, коррекции модели, конструирования многомодальных вычислительных схем и средствами верификации и визуализации полученных решений.

В рамках разработанных подходов были проведены вычислительные эксперименты, в результате которых найдены наборы параметров, с хорошей точностью описывающих экспериментальные данные и позволившие объяснить наблюдаемое в эксперименте необычное поведение фотопроводимости в магнитном поле. Значения полученных параметров позволяют воспроизвести в вычислительном эксперименте ускорение релаксации фотопроводимости массива квантовых точек в магнитном поле.

1. Nenashev A.V., Zinovieva A.F., Dvurechenskii A.V., Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S. Quantum logic gates from time-dependent global magnetic field in a system with constant exchange // *J. of Applied Physics*. 2015. Vol. 117, № 11. P. 113905.
2. Степина Н.П., Якимов А.И., Ненашев А.В., Двуреченский А.В., Соболев Н.А., Лейтао Д.П., Кириенко В.В., Никифоров А.И., Коптев Е.С., Перейра Л., Кармо М.С. Фотопроводимость по массиву туннельно-связанных квантовых точек Ge/Si // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2006. Т. 130, № 2. С. 309–318.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта № 7 Комплексной Программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018-2020 гг.

ОБ ОТСУТСТВИИ СВОЙСТВ СЛУЧАЙНОГО ОРАКУЛА У ПОЛНОРАУНДОВОЙ ХЕШ-ФУНКЦИИ MD4

И.А. Грибанова, А.А. Семенов

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
the42dimension@gmail.com, biclop Rambler@yandex.ru

Случайный оракул – это гипотетический объект, обладающий рядом свойств, которые привлекательны с позиции криптографических приложений [1]. Кратко криптографический смысл случайного оракула состоит в следующем. Пусть O – случайный оракул. Тогда, подав на вход O случайное двоичное слово некоторой фиксированной длины, на выходе O мы получим двоичное слово произвольной длины n , которое неотличимо никаким полиномиальным от n алгоритмом от последовательности Бернулли с вероятностью успеха $p = 1/2$ длины n .

В [1] было отмечено, что хорошим прототипом случайного оракула в реальном мире являются криптографически стойкие хеш-функции. Идея использовать такие хеш-функции в роли случайного оракула при разработке различных криптографических протоколов, высказанная в [2-3], привела к целому направлению в криптографии, известному как «доказательства в модели случайного оракула».

Как уже было сказано, случайный оракул – это гипотетический объект. Однако доказательство того, что та или иная функция не является случайным оракулом, может быть вполне реальным, для этого достаточно построить алгоритм поиска прообразов случайных выходов таких функций, который будет существенно эффективнее полного перебора (brute force method).

Известная хеш-функция MD4 – одна из старейших криптографических хеш-функций. Она была предложена Р. Ривестом в 1990 году [4]. В 2005 году MD4 была полностью скомпрометирована по отношению к атаке поиска коллизий [5]. Однако практических атак, которые были бы существенно эффективнее полного перебора, для задачи поиска прообразов MD4 (preimage attack) до данного момента не было известно. Еще одной открытой задачей является выделение относительно больших по мощности множеств выходов MD4, которые были бы слабыми с позиции задачи обращения.

В настоящем докладе будет предьявлено конкретное семейство слабых выходов функции MD4. Также мы оцениваем вероятностным способом долю таких выходов в множестве $\{0,1\}^{128}$. Мы показываем, что эта доля слишком велика для того, чтобы считать функцию MD4 случайным оракулом.

1. Bellare M., Rogaway P. Random Oracles are Practical: A Paradigm for Designing Efficient Protocols // Proc. of the 1st ACM Conference on Computer and Communication Security (CCS'93). 1993. P. 62-73.
2. Pointcheval D., Stern J. Security Proofs for Signature Schemes // LNCS. 1996. Vol. 1070 (EUROCRYPT'96). P. 387-398.
3. Pointcheval D., Stern J. Security Arguments for Digital Signature and Blind Signature // Journal of Cryptology. 2000. Vol. 13. № 3. P. 361-396.
4. Rivest R.L. The MD4 Message Digest Algorithm // LNCS. 1990. Vol. 537 (CRYPTO'90). P. 303-311.
5. Wang X., Lai X., Feng D., Chen H., Yu X. Cryptanalysis of the Hash Functions MD4 and RIPEMD // LNCS. 2005. Vol. 3494 (EUROCRYPT'05). P. 1-18.

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ДЛЯ ОТРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ

Н.А. Громик
Иркутский государственный университет

Задачи ведения устойчивого сопровождения и локализации объекта независимо от характера его движения приобретают с каждым днем все большую популярность в различных сферах промышленной и научно-образовательной деятельности.

Для решения этих задач используются знания в различных разделах математики и программирования, связанные в основном с задачами прогнозирования и оптимального управления.

Целью данной работы являются создание обучающего программного комплекса для моделирования процессов системы слежения и локализации движущегося объекта и методически-последовательное изложение для школьников и студентов основных принципов теории устойчивого сопровождения и локализации движущегося объекта.

Задачей комплекса является расширение возможностей школьников и студентов, обучающихся алгоритмам прогноза и автоматического управления. В проекте эту задачу предполагается решить через создание программной модели комплекса радар-объект с возможностью программного управления обоими. Отображение процессов сопровождения и возникающих при этом ошибок, а также возможность отработки собственных алгоритмов прогноза и сопровождения движущегося объекта позволит обучающимся углубить и упрочить свои знания в задачах сопровождения и прогноза с использованием модели, максимально приближенной к реальной.

При реализации проекта предполагается создать веб-ориентированный программный продукт, который можно использовать через сеть Интернет. Будет реализована система разделения прав доступа к комплексу, чтобы иметь возможность различным пользователям выполнять различные роли: администратор, тьютор и пользователь (учащийся), а также при необходимом уровне доступа контролировать начальные условия решения задач. Модульность и гибкость структуры комплекса позволят в одно мгновение контролировать условия задачи и параметры устройства слежения.

Реализация проекта должна иметь низкие системные требования и простой, но в то же время красивый и лаконичный интерфейс для снижения порога вхождения конечного пользователя в процесс обучения.

Все пользовательские алгоритмы, которые будут использоваться в процессе обучения, могут быть сохранены на сервере для получения к ним доступа при последующей авторизации.

Использование конечного программного продукта в целях получения необходимых знаний и практики обучающихся учебных муниципальных общеобразовательных учреждений, а также высших учебных учреждений обосновано развитием дистанционного обучения и низкой стоимостью использования по сравнению с созданием или покупкой механико-электрического макета.

1. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66-67.
2. Савкина А.В., Савкина А.В., Федосин С.А. Виртуальные лаборатории в дистанционном обучении. 2014. С. 507-508.

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ АЛГОРИТМА ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗАПОЛНЕНИЙ НА 4-МЕРНОЕ ЕВКЛИДОВО ПРОСТРАНСТВО

И.Г. Дмитриев
Иркутский государственный университет
eliadmitrieff@gmail.com, elia@sr.isu.ru

В 1887 году лордом Кельвином [1] была поставлена задача об оптимальном заполнении 3-мерного евклидова пространства областями равного объема. Эта задача до сих пор не имеет доказанного решения. К предложенному лордом Кельвином варианту – объемно-центрированной кубической решетке из усеченных октаэдров – спустя 107 лет Д. Уэйром и Р. Феланом [2] был найден контрпример: структура A15, характерная для бинарных химических соединений типа Cr_3Si , Nb_3Si .

Эта структура, известная с 1931 года [3], состоящая из пентагондодекаэдров и усеченных шестиугольных трапецеэдров равного объема, оказалась имеющей меньшую площадь поверхности, приходящейся на единицу объема, чем оригинальная кельвинова структура.

Вне связи с кельвиновой задачей нами с 2016 года проводились исследования возможности моделирования некоторых свойств физического вакуума и фундаментальных частиц при помощи двоичных графов различной топологии [4]. Узлы таких графов принимались несущими по одному биту информации, кодирующему знак электрического заряда, а топология определяла спектр возможных групповых заряженных дефектов в электрически нейтральном графе базового состояния. Исследовались конечные графы из 3, 4, 6, 8 бит, а также некоторые бесконечные – с простой кубической структурой типа NaCl , и с объемно-центрированной кубической CsCl . Эта последняя структура, как оказалось, рассматривалась ранее лордом Кельвином в сходной задаче математического моделирования многогранниками гипотетического светоносного эфира [5].

Мы проверили более современное решение кельвиновой задачи (A15). При этом граф со структурой A15 показал лучшие результаты, давая возможность воспроизводить большее количество квантовых чисел для известных частиц [6, 7]. Это связано с тем, что граф со структурой A15 с периодически чередующимися битами на месте центров ячеек обладает симметрией относительно операции одновременной инверсии заряда и четности со сдвигом на полшага решетки, аналогичной СРТ-симметрии, свойственной частицам стандартной модели.

Вместе с тем структура A15 показала нестабильность при наличии поверхностного натяжения. Кроме того, нам не удалось предложить адекватного описания динамики частиц в рамках данной топологии, что предположительно связано с недостаточной размерностью модели.

В связи с этим мы предприняли поиск структуры, обладающей аналогичными свойствами, но в 4-мерном пространстве. Для этого мы проанализировали два наилучших оптимальных заполнения в 2-мерном (шестиугольные соты) и в 3-мерном (A15) пространствах. Оказалось, что оба они могут быть получены из простых (квадратной и кубической) решеток путем сдвигов узлов вдоль кристаллографических осей с последующим построением для этих узлов диаграмм Вороного [8, 9] и, опционально, релаксацией под действием поверхностного натяжения [10–12]. Граф для моделирования брался, как триангуляция Делано, дуальная к диаграмме Вороного.

При этом структура A15 требовала в случае применения поверхностного натяжения искусственного поддержания равных объемов ячеек двух видов, в противном слу-

чае происходило существенное изменение формы ячеек и перераспределение объема в пользу трапецоэдров.

Мы обратили внимание на различную долю сдвинутых узлов в этих двух случаях. В 2-мерном пространстве только $\frac{1}{2}$ всех узлов сдвигались вдоль прямых: либо каждая вторая строка, либо каждый второй столбец.

В трехмерном же пространстве оказались сдвинутыми уже $\frac{3}{4}$ всех узлов; при этом сдвиги в четных и нечетных слоях представляли собой такие же сдвиги, как и в обоих двумерных случаях – по строкам и по столбцам, и оказывался возможным дополнительный сдвиг $\frac{1}{4}$ узлов в направлении поперек слоев. Структура также имела два варианта – условно, правый и левый, в зависимости от сочетания четности слоя и типа сдвига в нем – строк либо столбцов.

Для оценки того, насколько сильно влияет количество сдвигов, применение натяжения и другие факторы на оптимальность получающегося заполнения, а также для сравнения заполнений вне зависимости от размерности их пространств, мы ввели критерий оптимальности

$$\rho = \frac{D_{d-1}}{d \cdot \sqrt[d]{ND_d^{d-1}}}$$

Здесь d – размерность пространства, D_d – гиперобъем образца, D_{d-1} – гиперплощадь стенок, попадающих в этот гиперобъем, N – число ячеек в образце. Формула получилась как отнесение корня изопериметра $\sqrt[d]{I_d} = \sqrt[d]{\frac{D_{d-1}^d}{D_d^{d-1}}} = \frac{D_{d-1}}{\sqrt[d]{\frac{D_d^{d-1}}{D_{d-1}^d}}}$ исследуемой ячейки

к d -корню изопериметра ячейки соответствующей простой гиперкубической решетки, который равен размерности пространства d (это можно доказать индуктивно).

Составленный таким образом критерий оптимальности дает значение 1 для простой гиперкубической решетки в евклидовом пространстве любой размерности, а для различных заполнений показывает, какую долю составляет гиперплощадь стенок данного заполнения от гиперплощади стенок гиперкубического заполнения того же гиперобъема.

Для интересующих нас заполнений мы получили следующие значения критерия оптимальности:

Заполнение политопами	Критерий оптимальности ρ
Замоещение плоскости равными квадратами	1
Заполнение пространства равными кубами	1
Заполнение 4D пространства равными тессерактами	1
Плоские шестиугольные соты	$\sqrt{\frac{3}{2\sqrt{3}}} \approx 0,93060$
Структура Кельвина*	$\frac{1 + 2\sqrt{3}}{2^{7/3}} \approx 0,88579$
Структура Уэйра-Фелана (A15)*	$\approx 0,882825$ (по компьютерной модели)

*без искривления, вносимого поверхностным натяжением

Сравнивая оптимальность плоского шестиугольного замоещения, полученного сдвигами $\frac{1}{2}$ всех узлов, и A15 со сдвигами $\frac{3}{4}$ узлов, мы предположили, что следующее

4-мерное оптимальное заполнение может позволить сдвинуть еще больше узлов и за счет этого улучшить оптимальность.

Для того чтобы построить такое заполнение, мы экстраполировали прием, который связывает 3- и 2-мерные оптимальные заполнения: в четных пространствах выполнили сдвиги, как в правых 3-мерных заполнениях, а в нечетных – как в левых (или наоборот, обратное сочетание дает зеркальную структуру). Действительно, оказалось, что те $\frac{1}{4}$ узлов, которые остались несдвинутыми и в четных, и в нечетных пространствах, теперь были расположены вдоль прямых линий, перпендикулярных к этим пространствам, и, следовательно, могли быть сдвинуты вдоль этих линий, не мешая при этом остальным узлам.

Диаграмма Вороного, построенная с использованием пакета *qhull* [13] по этим полностью сдвинутым узлам, дала заполнение, состоящее из одинаковых 26-ячейников с 78 вершинами и 2 типами трехмерных граней [14]. Оптимальность, рассчитанная по координатам вершин трехмерных граней, триангулированных тетраэдрами [15], $\rho = \frac{1}{8} \left(1 + \frac{7\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) \approx 0,83943$, оказалась, как и ожидалось, значительно (на $\approx 4,9\%$) лучше, чем у самой оптимальной структуры в 3-мерном пространстве. При этом, так как все имеющиеся узлы уже сдвинуты, невозможно применить снова тот же прием для улучшения оптимальности с переходом в 5-мерное пространство. Поэтому мы предполагаем, что найденное заполнение оптимально согласно примененному критерию, не только среди 4-мерных, но и вообще среди любых заполнений в евклидовых пространствах любой размерности, а 4-мерное пространство, следовательно, является выделенным по признаку наличия именно в нем такого оптимального заполнения.

Полученное заполнение, условно названное нами «сатори», сохраняет большинство полезных для моделирования свойств, имеющих у трехмерного заполнения, и, будучи составлено из ячеек одинаковой формы, ожидается устойчивым к натяжению без искусственно вводимых ограничений.

Вместе с тем, при прямом переносе на новую структуру тех же приемов моделирования, что были успешно применены на трехмерном случае, она дает некоторые противоречащие наблюдениям артефакты, в частности, отсутствие моделей для полностью безмассовых частиц. Такие противоречия могут сниматься путем отказа от евклидовости пространства, например, за счет его сворачивания в цилиндр.

1. Lord Kelvin (Sir William Thomson). On the Division of Space with Minimum Partitional Area. Philosophical Magazine. 1887. Vol. 24, № 151. P. 503.
2. Weaire D., Phelan R. A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces. Phil. Mag. Lett.. 1994. Vol. 69, № 2. P. 107–110.
3. Hartmann H., Ebert F., Bretschneider O. Elektrolysen in Phosphatschmelzen. I. Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. 1931. Vol. 198. P. 116.
4. Dmitrieff E.G. Experience in modeling properties of fundamental particles using binary codes // N.S. Mankoč Borštnik, H.B.F. Nielsen, D. Lukman. Proc. to the 19th Workshop “What comes beyond the Standard Models”. Bled, 11-19. July 2016.
5. Weaire D. et al. The Kelvin Problem, Taylor & Francis. 1996.
6. Dmitrieff E.G. On triple-periodic electrical charge distribution as a model of physical vacuum and fundamental particles // N.S. Mankoč Borštnik, H.B.F. Nielsen, D. Lukman. Proc. to the 21th Workshop “What comes beyond the Standard Models”. Bled, 23-29. June 2018.
7. Dmitrieff E.G. The correspondence between fermion family members in Spin-charge-family theory and structure defects in electrically-charged tessellations // N.S. Mankoč Borštnik, H.B.F. Nielsen, D. Lukman. Proc. to the 21th Workshop “What comes beyond the Standard Models”, Bled, 23-29. June 2018.
8. Wolfram, Stephen. [A New Kind of Science](#). Wolfram Media, 2002. Inc. P. 987.

9. Liebling T., Pournin L. Voronoi diagrams and Delaunay triangulations: ubiquitous Siamese twins. Optimization Stories. Documenta Mathematica. Extra Volume ISMP. 2012. P. 419–431.
10. Ken Brakke. Beating Kelvin's Partition of Space. URL: <http://facstaff.susqu.edu/brakke/kelvin/kelvin.html>.
11. Hales, Thomas C. The Honeycomb Conjecture. Discrete and Computational Geometry. 2001. Vol. 25, № 1. P. 1–22.
12. Opsomer E., Vandewalle N. Novel structures for optimal space partitions. New Journal of Physics. 2016. Vol. 18. P. 103008.
13. Qhull package. URL: <http://www.qhull.org>.
14. Dmitrieff E. On 4-dimensional equi-hypervolumed tessellation with possible the smallest interface hyper-area. Phil. Mag. Lett. (under review).
15. Сабитов И.Х. Объемы многогранников. М.: МЦИМО, 2002.

КОСМОНАВТЫ ЗЕМЛИ ИРКУТСКОЙ

П.В. Дьячук, В.А. Чашина
МБОУ г. Иркутска лицей № 3
pol.dyachuk@yandex.ru, irk-lic3@yandex.ru
Vach2010@mail.ru

Космонавт – человек, проводящий испытания и эксплуатацию космической техники в космическом полете. Понятие космического полета в разных странах различно. Согласно классификации Международной федерации аэронавтики (ФАИ) космическим считается полет, высота которого превышает 100 км. В России космическим полетом называется орбитальный полет, т.е. полет, при котором аппарат должен сделать хотя бы один виток вокруг Земли. Именно поэтому общее количество космонавтов отличается от источника к источнику.

По данным Фонда общественного мнения наукой интересуется 61% населения, конкретно космонавтикой – 9%. При этом 42% населения считают, что на российском телевидении сейчас недостаточно передач научно-популярной тематики. Кроме того, 86% опрошенных уверены, что о достижениях науки можно рассказать так, что их смогли бы понять обычные люди, а не только ученые. Проанализировав данную статистику, можно сделать вывод о том, что по многим причинам россиянам необходима популяризация науки.

Об основных, наиболее значимых достижениях российской космонавтики многие знают еще со школьной скамьи, но для более глубокого уровня познания гражданам необходимо знать также о своих соотечественниках, достигших высот в данной индустрии. Для этого необходимо рассказать об этих людях просто, но притом интересно. Таким образом, можно выявить следующие пункты, требующие отражения в работе: 1) высокие должности, звания, награды, которые получило данное лицо; 2) наличие коммуникации с какими-либо иностранными организациями, заинтересованными в развитии космоса; совместные полеты с космонавтами других стран. 3) участие космонавта в каких-либо исследованиях, проведенных на борту космического корабля; их результаты, то, какую важность они приобрели в дальнейшем для науки. 4) уникальность действий космонавта, отражающая самые разные аспекты его деятельности: участие в исследованиях, количество полетов с иностранными гражданами, количество совершенных полетов как таковое, принадлежность его к различным группам, отрядам космонавтов, уровень вклада в науку. Каждый из аспектов был в достаточной степени отражен в биографии каждого космонавта: из 122 российских космонавтов в Иркутской области родилось четверо; жизнеописание написано достаточно просто, но притом интересно, представлено достаточно большое количество иллюстраций для наглядности и более полного представления моделей космических кораблей, проводимых опытов; портреты самих космонавтов также присутствуют.

Предложение: проведение работы по популяризации космонавтики путем написания и непосредственно воспроизведения емкого, интересного рассказа о космонавтах Иркутской области.

1. ГК ФОМ. Опросы «Интерес к современной науке», 2014 и «Освоение космоса и космические путешествия», 2018.
2. Маринин И.А., Шамсутдинов С.Х., Глушко А.В. Советские и российские космонавты 1960—2000 / Под ред. Ю.М. Батурина. М.: ООО Информ.-издательский дом «Новости космонавтики», 2001.
3. Батурин Ю.М. Повседневная жизнь российских космонавтов. М.: Молодая гвардия.
4. Волков В.Н. Шагаем в небо. М.: Молодая гвардия.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ *

М.Л. Жарков*, А.Л. Казаков*, М.М. Павидис**

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

**Иркутский государственный университет путей сообщения

Сортировочные станции (СС) предназначены для массовой переработки прибывающих вагонопотоков по назначениям и для формирования новых поездов в соответствии с общесетевым и дорожным планами. Они служат опорными техническими пунктами в организации вагонопотоков на сети железных дорог [1]. В связи с этим важной задачей является обеспечение их бесперебойной работы.

При эксплуатации СС нередко возникают проблемы с пропуском железнодорожного внутростанционного вагонопотока, которые связаны с отказами следующего рода: 1) неисправностями локомотива; 2) появлением на участке количества поездов, превышающего его наличную пропускную способность. Как результат – не обеспечивается своевременное отправление поездов из системы, что влечет за собой излишнюю занятость путей поездами в парках. При этом невозможно рассматривать указанные проблемы как плановые и заложить возможность отказа в технологию работы станции, поскольку они носят случайный характер. Для учета подобных факторов целесообразно использовать стохастические модели [2].

В СС можно выделить следующие последовательно расположенные функциональные подсистемы: 1) подсистема «прибытие» – парк прибытия с сортировочной горкой, где поезда принимаются и расформируются; 2) подсистема «накопление» – сортировочный парк, в котором вагоны накапливаются до полносоставного поезда; 3) подсистема «отправление» – парк отправления, здесь поезда обрабатываются и отправляются из системы. Кроме того, для СС характерно наличие обратных связей, при переполнении одной из подсистем происходит ее блокировка, вследствие чего поток вагонов останавливается в предыдущей подсистеме. Особого рассмотрения требует входящий вагонопоток, который обладает следующими свойствами: время прибытия поездов на СС и количество вагонов в нем являются случайными.

Математическая модель. Таким образом, СС имеет трехуровневую структуру и процесс ее функционирования является случайным, что позволяет использовать в качестве математического инструментария теорию массового обслуживания [2]. В подобных случаях описание объекта строится в два этапа: сперва описывается входящий поток заявок, а затем обслуживающая система.

Входной поток заявок (вагонопоток) обладает сложной структурой, для его описания подходит модель *ВМАР*-потока [3], которая позволяет учитывать наличие нескольких потоков заявок с различными параметрами, включая законы распределения размеров групп заявок и интенсивности их поступления.

Для описания обслуживающей системы применяется трехфазная СМО специального вида, где каждая фаза соответствует подсистеме СС:

- все каналы могут обслуживать заявки группами;
- на каждой фазе допустимо наличие индивидуальных очередей перед каналами;
- все очереди конечны;
- максимальная длина очереди и характеристики обслуживания различны для каждой фазы;
- в системе предусмотрены блокировки каналов первой и второй фаз при отсутствии свободных мест в последующих фазах.

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 18-07-00604.

В терминах теории массового обслуживания [2] данная модель работы СС запишется в следующем виде:

$$M\text{MAP} / M^{X_1} / n_1 / m_1 \rightarrow / M^{X_2} / n_2 / m_2 \rightarrow / M^{X_3} / n_3 / m_3 .$$

Здесь: X_1, X_2, X_3 – размер групп заявок, выбранных на обслуживание; m_1, m_2, m_3 – длина очереди, n_1, n_2, n_3 – количество каналов обслуживания на соответствующей фазе.

В докладе будут представлены модели конкретных отечественных [4] и зарубежных СС и имитационная модель многофазной СМО, а также обсуждены результаты вычислительных экспериментов для рассмотренных систем.

1. Шубко В.Г. Железнодорожные станции и узлы. М., 2002. 368 с
2. Bhat U.N. An Introduction to Queueing Theory. Modeling and Analysis in Applications. Boston: Birkhäuser, 2008. 272 p.
3. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск: БГУ, 2000.
4. Казаков А.Л., Павидис М.М. Об одном подходе к моделированию работы сортировочных станций // Транспорт Урала. 2019. № 1. С. 29–35.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ТРУДНЫХ ЭКЗЕМПЛЯРОВ ПРОБЛЕМЫ БУЛЕВОЙ ВЫПОЛНИМОСТИ*

О.С. Заикин, С.Е. Кочемазов

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

zaikin.icc@gmail.com, veinamond@gmail.com

В [1] был предложен алгоритм прогнозирования времени параллельного решения трудных экземпляров проблемы булевой выполнимости (SAT). При этом распараллеливание осуществляется с применением так называемого декомпозиционного множества, под которым понимается некоторое подмножество множества булевых переменных конъюнктивной нормальной формы (КНФ), SAT-задачу для которой требуется решить. Прогноз времени решения исходной SAT-задачи при помощи декомпозиционного множества строится на основе метода Монте-Карло, при этом оценивается время обработки семейства упрощенных (по сравнению с исходной) SAT-задач, сформированных путем варьирования значений переменных декомпозиционного множества. Каждое декомпозиционное множество рассматривается как точка в пространстве поиска, при этом прогнозируемое время решения для этого декомпозиционного множества соответствует значению целевой функции в данной точке. Так как аналитическое представление этой целевой функции неизвестно, то для ее минимизации (т.е. для поиска декомпозиционного множества с минимальным прогнозируемым временем решения) естественным образом подходят алгоритмы оптимизации типа «черный ящик».

В [2] была предложена модификация целевой функции из [1], которая позволила получить более точные прогнозы для SAT-задач, кодирующих криптоанализ генератора переменного шага. Для минимизации этой модифицированной целевой функции в [3] были применены восемь различных алгоритмов оптимизации. В частности, были использованы два алгоритма случайного поиска, поиск с запретами, два варианта поиска восхождения к вершине, а также эволюционный алгоритм. С помощью данных алгоритмов оптимизации, примененных к упомянутой модифицированной целевой функции, были найдены декомпозиционные множества для трудных SAT-задач, кодирующих криптоанализ следующих поточных шифров: Trivium, Rabbit, Grain_v1, Mickey. Эти шифры являются финалистами европейского конкурса eSTREAM. SAT-кодировки рассмотренных задач криптоанализа были построены при помощи программного средства Transalg [4]. Также были найдены декомпозиционные множества для ослабленных задач криптоанализа шифров Trivium и Grain_v1. Решение этих ослабленных задач показало, что соответствующие прогнозы были точными.

1. 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.
2. Zaikin O.S., Kochemazov S.E. An improved SAT-based guess-and-determine attack on the alternating step generator // Proceedings of Information security conference. 2017. P. 21-38.
3. Zaikin O.S., Kochemazov S.E. On black-box optimization in divide-and-conquer SAT solving // Optimization Methods and Software. 2019. P. 1-25.
4. Otpuschennikov I.V., Semenov A.A., Gribanova I.A., Zaikin O.S., Kochemazov S.E. Encoding cryptographic functions to SAT using TRANSALG system // Proc. of the 22nd European Conf. on Artificial Intelligence. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. Vol. 285. IOS Press. 2016. P. 1594-1595.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-07-00746-а) и Совета по грантам Президента РФ (грант № МК-4155.2018.9, стипендия № СП-1184.2015.5).

МНОГОЭТАПНАЯ МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ НЕВЫПУКЛЫХ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ*

Т.С. Зароднюк, А.Ю. Горнов

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

tz@icc.ru, gornov@icc.ru

Проблема автоматизации численного решения экстремальных задач обсуждается специалистами давно и регулярно (см., напр., [1–4]), но, к сожалению, не имеет, по-видимому, удовлетворительного решения ни в России, ни за рубежом. В докладе обсуждается подход только к одной из частей указанной проблемы – задаче повышения надежности алгоритмически достигаемого результата применительно к классу многоэкстремальных задач оптимального управления (ЗОУ).

Реализован специализированный набор алгоритмов и инструментальных средств, позволяющих в совокупности провести комплексное исследование ЗОУ синхронно с процессом ее решения. На *нулевом* этапе с помощью монте-карловских подходов оцениваются основные характеристики исследуемых функционалов: константы роста и степень выпуклости. Здесь же с помощью принципа Рунге оценивается точность дискретизации непрерывной системы и точность интегрирования. *Первый* этап посвящен пробной попытке решения ЗОУ с помощью одного из глобализованных методов оптимизации. На *втором* этапе производится грубая аппроксимация множества достижимости (МД) системы, что позволяет хотя бы в «общих чертах» оценивать перспективность решения задачи. *Третий* этап нацелен на грубое решение ЗОУ, основанное на информации о свойствах задачи, полученной на более ранних этапах. На *четвертом* шаге производится попытка получить точную аппроксимацию МД, с использованием которой на *пятом* этапе появляется возможность более/менее «точного» решения исходной ЗОУ. *Шестой* этап посвящен «доводке» решения – попытке его радикального улучшения с помощью поисковых методов, не зависящих от погрешностей вычисления градиентов. *Седьмой* этап – постоптимизационный анализ: оценка точности выполнения необходимого условия оптимальности – принципа максимума, оценки чувствительности и обусловленности полученного локального экстремума и т.д.

Реализованная восьмиэтапная схема моделирует последовательность действий опытного специалиста («эксперта»), выполняемых при попытке максимально надежно исследовать экстремальную задачу (в данном случае ЗОУ). К сожалению, без использования интеллекта человека обсуждаемая «комплексная» технология работать не может, после каждого этапа необходимо произвести анализ полученных результатов вычислений и принять решение о дальнейших действиях: уточнить постановку, выполнить настройку алгоритмических параметров и т.д. Автоматическое решение ЗОУ, в отличие от обсуждаемого в работе «автоматизированного», пока остается невозможным.

1. Гурман В.И., Орлов А.Г. Достаточные условия оптимальности сложных процессов // Автоматика и телемеханика. 1978. № 4. С. 127–134.
2. Евтушенко Ю.Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. М.: Наука, 1982.
3. Гурман В.И., Бельшев Д.В. Интеллектуальные процедуры оптимального управления // Автоматика и телемеханика. 2002. № 5. С. 147–155.
4. Маджара Т.И. Интеллектуальная система для решения задач оптимального управления с вычислительными особенностями // Автореф. канд. дисс. 05.13.01. Владивосток, 2011. 20 с.

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

ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОЙ АППРОКСИМАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ВОРОНКИ ДЛЯ ПОЛИЭДРАЛЬНО УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ

Т.С. Зароднюк, А.Ю. Горнов

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
tz@icc.ru, gornov@icc.ru

Оптимизация управляемых динамических систем с ограничениями на управляющие воздействия полиэдрального типа предполагает использование специализированных методов для эффективного поиска решения в таких задачах. С увеличением допустимой области определения управляющих воздействий и изменением его структуры сложность соответствующей задачи оптимального управления может существенно возрастать.

В работе рассматривается технология решения задач оптимального управления (ЗОУ) с полиэдральными ограничениями. Эффективным подходом к исследованию подобных задач является метод стохастической аппроксимации в комбинации с алгоритмами генерации управляющих воздействий релейного типа с фиксированным числом точек переключения, использующийся для решения задач фазового оценивания и оптимального управления с ограничениями более простой структуры [1]. Предложенная вычислительная технология включает также программные реализации методов интегрирования систем дифференциальных уравнений, генерации управляющих воздействий, глобальной оптимизации [2], а также обобщенные методы аппроксимации множества достижимости для задач с полиэдральными ограничениями на управления.

Приведем пример семейства ЗОУ с полиэдральными ограничениями возрастающей площади. Управляемый динамический процесс описывается системой из двух дифференциальных уравнений

$$\dot{x}_1 = 1 + u_1 \sin x_1 + u_2 \cos x_2,$$

$$\dot{x}_2 = u_1 \cos x_1 + u_2 \sin x_2,$$

с заданными значениями начального фазового вектора $x_1(0) = 5$, $x_2(0) = 1$ и фиксированным интервалом времени функционирования системы $t \in [0,1]$. Рассмотрено семейство задач данного типа с полиэдральными ограничениями на управления $u(t) \in U_i, i = \overline{1,4}$, представленными на рис. 1.

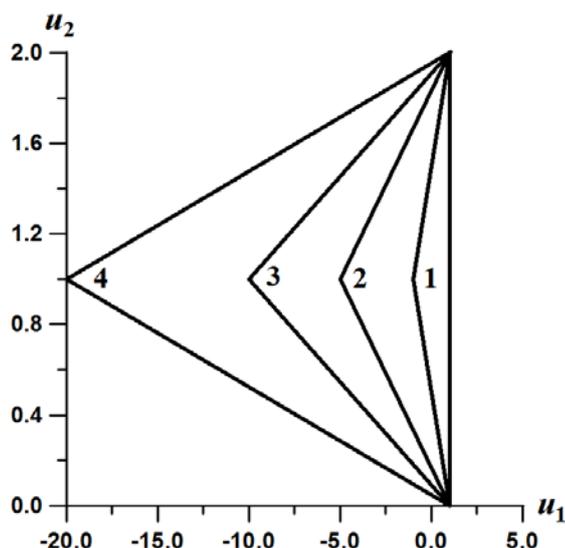


Рис.1. Полиэдральные множества допустимых управлений для семейства тестовых ЗОУ

Исследована эффективность предложенной вычислительной технологии при выборе разных значений алгоритмических параметров: числа точек переключения релейных управлений k и количества стохастических проб p . Результаты аппроксимации множества достижимости рассмотренного семейства тестовых задач при $k = 5$ и $p = 3 \cdot 10^5$ приведены на рис. 2.

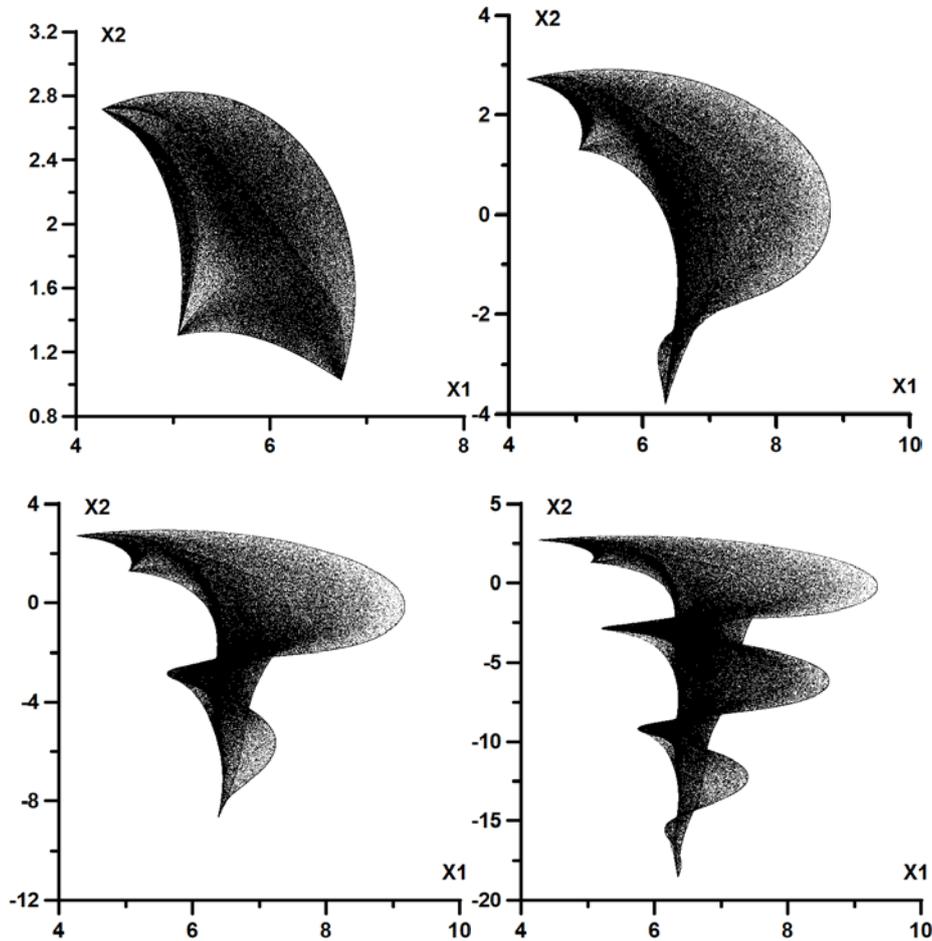


Рис. 2. Аппроксимация множества достижимости управляемой динамической системы для рассмотренного семейства тестовых задач

Проведено многовариантное тестирование разработанных алгоритмов и вычислительных технологий с помощью сформированной коллекции тестовых задач рассматриваемого типа. Исследована зависимость качества покрытия множества достижимости от выбранного числа переключений управляющих воздействий.

1. Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S., Anikin A.S., Finkelstein E.A. Extension technology and extrema selections in a stochastic multistart algorithm for optimal control problems // Journal of Global Optimization. 2019. DOI: 10.1007/s10898-019-00821-x.
2. Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S., Anikin A.S. The computational technique for nonlinear nonconvex optimal control problems based on modified gully method // DEStech transactions on Computer Science and Engineering: Proc. IX Intern. Conf. on Optimization and Applications (OPTIMA 2018). P. 152–162.

ТЕХНОЛОГИЯ АППРОКСИМАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ПЛОСКОСТИ*

Т.С. Зароднюк, А.Ю. Горнов, А.С. Аникин

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
tz@icc.ru, gornov@icc.ru, anikin@icc.ru

Задача анализа временных рядов является одной из самых популярных проблем в машинном обучении. В большинстве работ неявно применяется гипотеза о достаточно высокой степени взаимонезависимости измеренных и/или оцифрованных траекторий, что позволяет декомпозировать задачу на набор отдельных «одномерных» задач и тем самым существенно упрощает. Проблема анализа многомерных рядов возникает при проверке гипотез, часто весьма правдоподобных, о присутствии в изучаемом процессе нескольких тесно взаимосвязанных динамически меняющихся факторов, только в совокупности способных описать изучаемое явление. Проблема анализа многомерных рядов несомненно сложнее, что делает задачу разработки новых подходов и алгоритмов для нее весьма актуальной.

В докладе обсуждается набор алгоритмических подходов, реализованных в виде программных технологий, ориентированных на оснащение динамических систем, способных служить моделями для взаимосвязанных временных рядов. В настоящее время в состав библиотеки модельных шаблонов включены кусочно-линейный аппроксиматор, сплайн-аппроксиматор [1], шаблон на технике квадратичной кривой Безье [2], аппроксиматоры на стандартном операторе Шепарда и на самообучающемся операторе Шепарда. В качестве дополняющего ко всем указанным модельным шаблонам реализован дробно-рациональный аппроксиматор, включающий, как частный случай, технологию на основе метода Паде [3, 4]. В структуру всех реализованных моделей входят наборы шаблонных параметров, позволяющие производить обучение на конкретных обучающих выборках, а также предусмотрены страховочные расширяющие области, работающие при вероятном выходе запросов за пределы заранее задаваемых диапазонов.

Предложенная технология основывается на построении динамических систем, включающих в правые части вышеуказанные шаблонные компоненты, дополнении дискретных рядов до непрерывных с помощью сплайн-техник, формулировке функционалов-невязок, штрафующих за отклонение моделей от эталонных и/или экспериментальных траекторий и решении задач обучения (параметрической идентификации). Невыпуклость формируемых функционалов при таком подходе «практически гарантирована», что требует применения глобализованных технологий оптимизации. Работоспособность предложенного инструментария проверена на двумерной тестовой задаче восстановления траекторий динамической системы, описывающей нелинейные колебания маятника. С использованием всех обсуждавшихся модельных шаблонов удалось построить достаточно хорошие аппроксимации исследуемых временных рядов.

Представлены результаты проведенных вычислительных экспериментов.

1. De Boor C. A Practical Guide to Splines. N.Y.: Springer-Verlag, 1978.
2. Bezier P. Definition numerique des courbes et surfaces // I. Automatisme, XI: 625–632, 1966.
3. Padé H. Sur la représentation approchée d'une fonction par des fractions rationnelles // Thèse de Doctorat présentée à l'Université de la Sorbonne, 1892.
4. Бейкер Дж., Грейв-Моррис П. Аппроксимации Паде. М.: Мир, 1986.

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

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЛОКАЛЬНОГО УСЛОВИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Т.С. Зароднюк, С.П. Сорокин

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
tz@icc.ru, sorsp@mail.ru

Построение новых эффективных алгоритмов для нелинейных задач оптимального управления продолжает оставаться одной из самых актуальных задач теории оптимизации. Появление новых условий оптимальности [1], как и переосмысление возможностей, заложенных в классических результатах [2], позволяет надеяться на серьезные продвижения в этой интереснейшей проблеме.

Работа посвящена построению нового алгоритма приближенного поиска оптимального управления, опирающегося на предварительное формирование набора успешно решенных задач с дальнейшей экстраполяцией заложенных в базе оптимальных решений. Рассматривается однопараметрическое семейство задач оптимального управления, по единственному параметру которого формулируется и решается набор точечных задач. С использованием традиционных нелокальных методик анализа данных на основе полученной «обучающей выборки» строятся приближения к решению целого семейства задач оптимального управления, каждая из которых соответствует определенному значению параметра. Для проверки качества сформированных приближений полученный результат используется как начальное значение в локальном алгоритме оптимизации, глубина спуска которого и может выступать в качестве оценки эффективности предложенного способа экстраполяции имеющихся точечных решений. Задачи оптимального управления в предложенной схеме решаются с использованием метода приведенного градиента [3], для построения нелокальной экстраполяции применяется метод Шепарда [4].

В качестве примера рассмотрим классическую модельную задачу о стабилизации нелинейного маятника

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \dot{x}_2 = u - \sin x_1, \\ u(t) &\in [-1, 1], t \in [0, 3], x_1(0) = p, x_2(0) = 0, \\ I(x(t_1)) &= x_1^2(3) + x_2^2(3) \rightarrow \min, \end{aligned}$$

где p – параметр семейства задач. Для получения информационной базы решаем набор задач при значениях параметра $p = 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7$, соответствующие оптимальные решения позволяют сформировать таблицу – обучающую выборку. Используя эту обучающую выборку, строим начальные приближения для всех задач с промежуточными значениями параметра $3.25, 3.75, \dots, 6.75$, и для каждого из них проводим решение задачи оптимального управления. Для значений параметра из диапазона 3.25 – 4.25 , как видно из таблицы, произошло заметное улучшение целевого функционала, что говорит о невысокой точности экстраполяции на данном интервале. Но для значений параметра из диапазона 4.75 – 6.75 почти не удалось добиться улучшения функционала, полученные приближенные решения мало отличались от оптимальных.

В представленной таблице: в 1-м столбце указаны номера решенных задач; 2-й столбец отражает значения параметра задачи p – начального состояния для первой фазовой переменной; 3-й столбец – значения функционала $I_p^*(x(t_1))$, полученные с помощью предложенной экстраполяционной методики; в 4-м столбце выделены точные значения задач $I^*(x(t_1))$ из обучающей выборки, остальные получены в соответствии с предложенной процедурой (табл. 1).

Таблица 1. Результаты решения модельной задачи оптимального управления при разных значениях параметра p

n	p	$I_p^*(x(t_1))$	$I^*(x(t_1))$	n	p	$I_p^*(x(t_1))$	$I^*(x(t_1))$
1	3		0.5219	10	5.25	22.9952	22.9817
2	3.25	1.1583	1.0441	11	5.5		21.5470
3	3.5		1.8928	12	5.75	19.5910	19.5791
4	3.75	3.9045	3.3188	13	6		17.3345
5	4		6.4337	14	6.25	15.1213	15.0728
6	4.25	13.6350	12.9080	15	6.5		13.0060
7	4.5		19.1913	16	6.75	11.3739	11.3048
8	4.75	22.5746	22.5331	17	7		10.0499
9	5		23.5037				

Успешность предложенной методики получения приближенного решения оценивается разницей между значениями функционала в 3-м и 4-м столбцах для строк с четными номерами $I_r^* = |I_p^*(x(t_1)) - I^*(x(t_1))|$ (рис. 1).

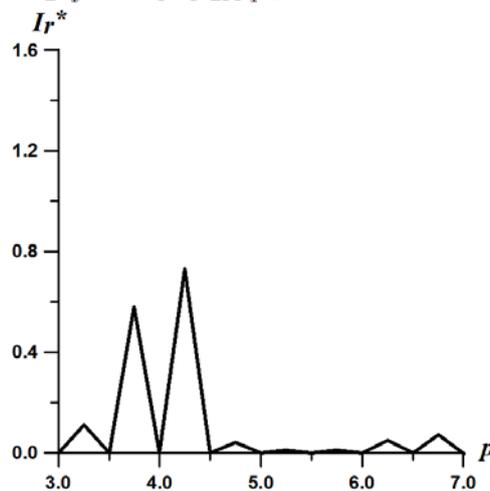


Рис. 1. Отклонение от точных решений рассматриваемой модельной задачи на заданной сетке при разных значениях начального фазового вектора

Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили как принципиальную работоспособность, так и достаточно высокую точность предложенного алгоритма.

Предложенная процедура генерации управлений (и соответственно, траекторий исходной и сопряженной систем) может быть использована в методе позиционных вариаций, основанном на позиционном принципе минимума [1]. Ее применение может оказаться эффективным на этапе построения позиционных управлений спуска по функционалу за счет множественности сопряженных траекторий.

1. Dykhta V., Sorokin S. Feedback minimum principle for optimal control problems in discrete-time systems and its applications // Lecture Notes in Computer Science, Proc. 18th Intern. Conf. on Mathematical Optimization Theory and Operations Research, MOTOR 2019. Ekaterinburg. 2019. Vol. 11548. P. 449–460.
2. Krotov V.F. Global methods in optimal control theory. N.Y.: Marcel Dekker, 1996.
3. Горнов А.Ю. Вычислительные технологии решения задач оптимального управления. Новосибирск: Наука, 2009.
4. Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data // Proc. of the 23rd ACM national conference. 1968. P. 517–524.

О ЧИСЛЕННОМ ИССЛЕДОВАНИИ НЕКОТОРЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО
КОМПЛЕКСА OPTCON-IEOPP*

Т.С. Зароднюк, С.П. Сорокин

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
tz@icc.ru, sorsp@mail.ru

Методы оптимизации традиционно находят свое применение в экономике. Динамическая оптимизация не является исключением: в научной и учебной литературе по математической экономике зачастую фигурируют ставшие классическими динамические модели и задачи оптимального управления в них, например, модель Видала-Вулфа оптимизации рекламной стратегии фирмы, модель экономического роста Мэнкью-Ромера-Вейла и ряд других [1]. На сегодняшний день множество из этих постановок и их модификаций изучено (в том числе аналитически). Несомненно, этот набор задач (и известных их решений) представляет интерес в качестве «тестового поля» для разрабатываемых методов и средств численного решения экономических задач оптимального управления.

Работа посвящена развитию программного комплекса (ПК) OPTCON-IEOPP [2], новая версия которого ориентирована на исследование нелинейных задач оптимизации в управляемых экономических моделях. С ее помощью решен ряд тестовых и содержательных задач.

Для примера рассмотрим следующую задачу, которая в [1] демонстрирует возможность наличия магистральных участков решения в нелинейных по управлению задачах оптимального управления (следует подчеркнуть, что для экономических задач характерно существование магистральных участков на оптимальных процессах):

$$\dot{x}_1 = x_1 + u, \quad \dot{x}_2 = x_1 - 3u - u^2, \quad 0 \leq u(t) \leq 2, \quad t \in [-1, 2], \\ x(-1) = (5, 0), \quad J[u] = x_2(2) \rightarrow \min.$$

В результате численного исследования задачи установлено, что решение достигается на одном управлении, терминальная точка соответствующей траектории обозначена черным крестиком на выпуклом множестве достижимости динамической системы (рис. 1). Заметим, что оптимальное управление имеет типичную структуру для подобного класса нелинейных задач – сочетание граничных значений с внутренним магистральным участком.

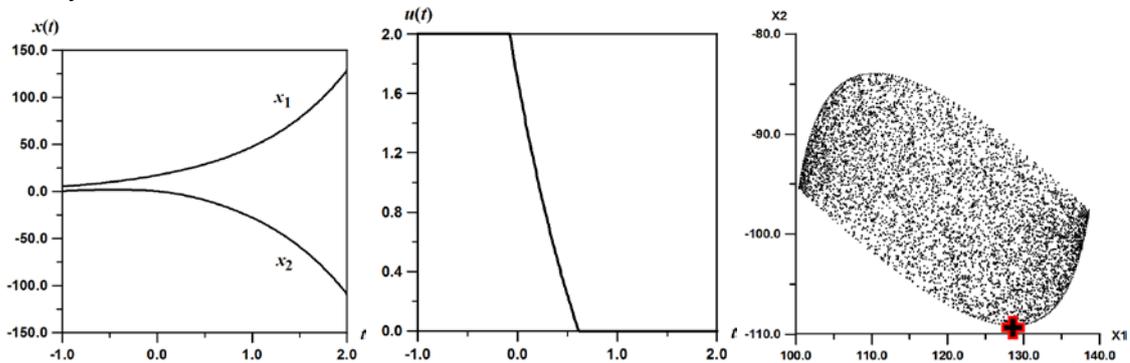


Рис. 1. Результаты численного решения модельной задачи
в исходной постановке

*Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта № 66 Комплексной Программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018-2020 гг.

Далее, рассмотрим модификацию задачи, связанную с введением во второе дифференциальное уравнение тригонометрической зависимости от первой компоненты фазового вектора; кроме того, изменены значения траектории в начальный момент времени и целевой функционал

$$\dot{x}_2 = 4 \sin x_1 - 3u - u^2, x(-1) = (-1, 0), J[u] = -x_1(2) - x_2(2) \rightarrow \min.$$

В результате применения ПК OPTCON-IEORP найдены оптимальные траектория и управление (рис. 2). Примечательно, что в представленном варианте задачи имеется 3 экстремума (из них два локальных, правые концы траекторий которых на графике обозначены белыми крестиками), а множество достижимости невыпукло.

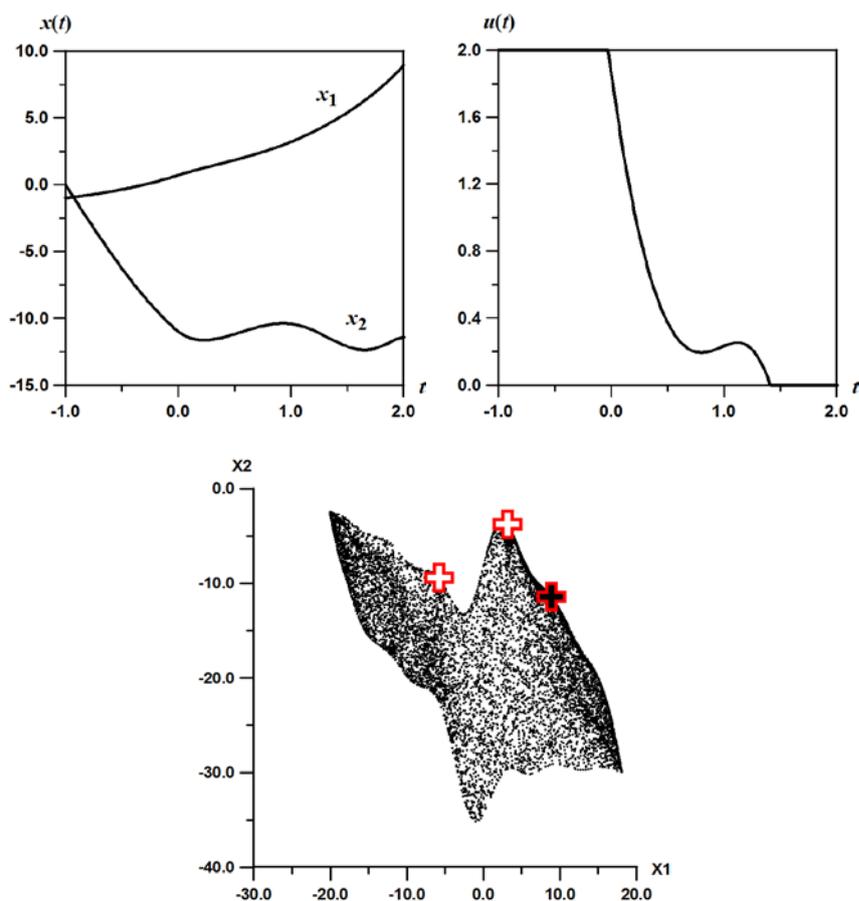


Рис. 2. Результаты численного решения возмущенной постановки исследуемой модельной задачи оптимального управления

В заключение отметим, что было проведено тестирование модификации комплекса OPTCON-IEORP на ряде известных экономических задач. При этом вычислительные эксперименты продемонстрировали применимость разработанного комплекса программ для решения экономических задач оптимального управления.

1. Дыхта В.А., Деренко Н.В. Модели оптимального управления в макро- и микроэкономике. Иркутск: Иркутская. гос. эконом. академия, 2002.
2. Суслов В.И., Горнов А.Ю., Лемперт А.А. Программный комплекс для задач оптимизации в линейных экономических моделях с невыпуклыми функционалами // Материалы конф. «Ляпуновские чтения», 2018. С. 81.

О ВЫДЕЛЕНИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЕМЕЙСТВ ИНВАРИАНТНЫХ
МНОГООБРАЗИЙ В КАЧЕСТВЕННОМ АНАЛИЗЕ
ВПОЛНЕ ИНТЕГРИРУЕМЫХ СИСТЕМ

В.Д. Иртегов, Т.Н. Титоренко

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

irteg@icc.ru, titor@icc.ru

В докладе обсуждаются задачи качественного анализа консервативных систем с использованием средств компьютерной алгебры. Эффективность предлагаемых подходов демонстрируется на примерах анализа ряда классических задач динамики твердого тела, описываемых уравнениями Эйлера, Кирхгофа, Пуанкаре-Жуковского, уравнениями на алгебрах Ли [1-3]. Акцент сделан на вопросы выделения и исследования семейств инвариантных многообразий (ИМ). Так, например, уравнения движения волчка Лагранжа в центральном поле сил (тиссерановское приближение)

$$\begin{aligned} A\dot{p} &= (A - C)r_0q + z_0\gamma_2 - \mu(A - C)\gamma_2\gamma_3, \quad A\dot{q} = (C - A)r_0p - z_0\gamma_1 - \mu(C - A)\gamma_1\gamma_3, \\ \dot{\gamma}_1 &= r_0\gamma_2 - q\gamma_3, \quad \dot{\gamma}_2 = p\gamma_3 - r_0\gamma_1, \quad \dot{\gamma}_3 = q\gamma_1 - p\gamma_2, \quad \dot{r} = 0 \end{aligned}$$

(здесь $p, q, r, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – проекции угловой скорости и направляющие косинусы) имеют следующее семейство ИМ:

$$p = \lambda\gamma_1, \quad q = \lambda\gamma_2, \quad z_0 - \lambda Cr_0 + [\mu(C - A) + \lambda^2 A]\gamma_3 = 0. \quad (1)$$

Последние уравнения определяют семейство регулярных прецессий тела, λ – параметр семейства. Для элементов этого семейства движений получены достаточные условия устойчивости

$$\mu(C - A) + \lambda^2 A > 0.$$

Если $\lambda = 0$, то уравнения (1) определяют перманентное вращение тела вокруг наклонной оси ($\gamma_3 = z_0 / (\mu(A - C))$) и это движение устойчиво при $C > A$.

Исключая параметр λ из уравнений семейства с помощью первого из них, получим следующие выражения:

$$q\gamma_1 - p\gamma_2 = 0, \quad Cr_0\gamma_1 - Ap\gamma_3 = 0, \quad z_0 + \mu(C - A)\gamma_3 = 0.$$

Как легко проверить, полученные уравнения также определяют ИМ. На этом многообразии лежит регулярная прецессия

$$p - Cr_0\mu(C - A)A^{-1}z_0^{-1}\gamma_1 = 0, \quad q - Cr_0\mu(C - A)A^{-1}z_0^{-1}\gamma_2 = 0, \quad \gamma_3 = z_0[\mu(C - A)]^{-1}.$$

Подобные исследования проведены и для задач, указанных в первой части тезисов. Они потребовали более громоздких вычислений, которые выполнены с использованием средств компьютерной алгебры.

1. Пуанкаре А. О кривых, определяемых дифференциальными уравнениями. М.–Л.: ОГИЗ, 1947.
2. Stekloff V. A. Remarque sur un probleme de Clebsch sur le mouvement d'un corps solide dans un liquide indefini et sur le probleme de M. Brun // Compt. Rend. Acad. Sci. 1902. Vol. 135. P. 526-528.
3. Борисов А.В., Мамаев И.С., Соколов В.В. Новый интегрируемый случай на $so(4)$ // Доклады РАН. 2001. Т. 381, № 5. С. 614-615.

ОБ ОДНОЙ ТЕОРЕМЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ И ЕДИНСТВЕННОСТИ
РЕШЕНИЯ ТИПА ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЫ
ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ИСТОЧНИКОМ

А.Л. Казаков, П.А. Кузнецов

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

kazakov@icc.ru, kuznetsov@icc.ru

Рассматривается краевая задача для нелинейного уравнения теплопроводности/фильтрации [1, 2] в полярных координатах с источником

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

$$u(t, \rho, \varphi) \Big|_{\rho=R(t, \varphi)} = f(t, \varphi). \quad (2)$$

Здесь **Ошибка! Закладка не определена.** $\sigma > 0 - \text{const}$, $u = u(t, \rho, \varphi)$ – искомая функция, $\rho > 0$, $-\pi < \varphi \leq \pi$ – полярные координаты. Функция источника $F(u)$ определена при $u \geq 0$, причем $F(0) = 0$. Достаточно гладкие функции $R > 0$ и f удовлетворяют условиям

$$f(0, \varphi) = 0, \quad f_t \Big|_{t=0}, R_t \Big|_{t=0} \geq 0, \quad (R_t \Big|_{t=0})^2 + (f_t \Big|_{t=0})^2 > 0. \quad (3)$$

Ранее близкие задачи уже исследовались в работах [2, 3] при $F \equiv 0$. Для задачи (1), (2) доказана следующая

Теорема. Пусть R и f – функции, аналитические в некоторой окрестности $t = 0$. Пусть также функция $F(u)$ аналитична в окрестности $u = 0$. Тогда задача (1), (2) имеет в окрестности $t = 0$, $\rho = R(t, \varphi)$ ненулевое аналитическое решение, единственное при выборе направления движения тепловой волны.

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

$$u(t, r, \varphi) = \sum_{n,m=0}^{\infty} \frac{u_{n,m}(\varphi)}{n!m!} t^n r^m; \quad u_n(t, \varphi) = \frac{\partial^{n+m} u(t, r, \varphi)}{\partial t^n \partial r^m} \Big|_{r=0}. \quad (4)$$

Коэффициенты определяются рекуррентно из систем линейных алгебраических уравнений. Затем с помощью метода мажорант доказывается сходимость ряда (4).

Помимо этого, задача (1), (2) рассмотрена в симметричном случае при $u = u(t, r)$ и степенном источнике $F(u) = \alpha u^{\beta}$, $\alpha, \beta - \text{const}$. Исследованы два содержательных случая, не подпадающих под действия доказанной теоремы. В первом действительный параметр $\beta \geq 1$ может быть нецелым, что нарушает условие аналитичности функции источника. При этом задачу можно свести к задаче Коши для нелинейного ОДУ второго порядка, для которой доказать существование достаточно гладкого решения типа бегущей волны. Во втором случае рассмотрена задача об остановившейся тепловой волне [1], когда $f \equiv 0$ и $R - \text{const}$ и условие (3) не выполняется. При этом решение также строится в виде двойного ряда (4), коэффициенты которого определяются принципиально иным образом.

1. Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука, 1987.
2. Сидоров А.Ф. Избранные труды: Математика. Механика. М.: Физматлит, 2001.
3. Казаков А.Л., Кузнецов П.А. Об аналитических решениях одной специальной краевой задачи для нелинейного уравнения теплопроводности в полярных координатах // Сибирский журнал индустриальной математики. 2018. Т. 21, № 2(74). С. 56-65.

КООРДИНАЦИЯ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ТОПЛИВНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

М.Ю. Кензин

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gorthauers@gmail.com

Бурное развитие беспилотной робототехники в последние десятилетия привело к значительному росту приложений для автономных мобильных роботов (АМР). В ситуациях, когда требуется обеспечить мониторинг региона при нехватке времени или ресурсов на развертывание сети статического наблюдения, использование группы таких аппаратов позволяет добиться оперативного освещения обстановки в представляющих интерес областях [1].

Существенным ограничением в аспекте высокой продолжительности проводимых работ является необходимость пополнения группой топливных ресурсов прямо в процессе выполнения миссии и без существенной корректировки текущей групповой стратегии. Таким образом, полностью автономная система группового управления должна не только координировать процесс выполнения заданного множества заданий в условиях действующих ограничений, но и регулировать процедуру регулярной подзарядки аккумуляторов (пополнения баков) всех АМР [2]. При этом необходимо учитывать, что процесс выполнения миссии не должен прерываться на время подзарядки, а значит, необходимо выбирать такой порядок и время пополнения роботами заряда батарей, чтобы остающаяся для выполнения заданий группировка всегда была в состоянии обеспечить эффективный мониторинг области. Эффективность мониторинга в целом на протяжении миссии обеспечивается:

1. поддержанием работоспособности всех роботов в группе (своевременная подзарядка каждого АМР с учетом количества доступных доков);
2. постоянной доступностью всех типов бортового оборудования среди действующей группы АМР, если это возможно;
3. минимизацией количества одновременно заряжающихся роботов;
4. отсутствием излишне частых групповых сборов, сопровождающих каждое событие, связанное с запланированным изменением действующего состава.

В докладе приводится постановка задачи групповой координации в виде вариации задачи составления расписания групповой ротации с учетом функциональной и параметрической разнородности действующих аппаратов, а также предлагается алгоритмическая схема ее решения на основе эволюционного подхода. Разработанная модификация эволюционных алгоритмов реализует быстрое и надежное составление допустимых групповых расписаний, а также их оперативную корректировку в случае возникновения непредвиденных событий. Используется оригинальная схема кодирования решения, позволяющая значительно понизить размерность задачи и вычислительные затраты на поиск ее решения. Специализированные конструктивные эвристики и процедуры локального поиска, интегрированные в тело алгоритма, позволяют получать эффективные решения уже на первых итерациях работы алгоритма. Осуществлена программная реализация предложенного подхода, проведены тестовые расчеты.

1. Dunbabin M., Marques L. Robots for environmental monitoring: Significant advancements and applications // IEEE Robotics and Automation Magazine. 2012. Vol. 19, № 1. P. 24–39.
2. Afshar-Bakeshloo M., Mehrabi A., Safari H., etc. A green vehicle routing problem with customer satisfaction criteria // Journal of Industrial Engineering International. 2016. Vol. 12, № 4. P. 529–544.

ЭФФЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК*

А.М. Клер, П.В. Жарков

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

isem777@mail.ru

Современные теплоэнергетические установки (паротурбинные, парогазовые и др.) имеют сложные технологические схемы, включающие разнотипные элементный состав (камеры сгорания, топки, радиационные и конвективные теплообменники, насосы, турбомашин, трубопроводы и др.). На предпроектных стадиях исследования и при проектировании таких установок необходимо выбрать технологическую схему установки и большое количество ее параметров. Это расходы рабочих тел и теплоносителей, их термодинамические параметры в различных точках схемы, конструктивные параметры отдельных элементов и др. Единственным эффективным способом решения подобных задач является использование методов математического моделирования и нелинейная оптимизация. В ИСЭМ СО РАН такие методы разрабатываются уже много десятков лет [1, 2]. В части математического моделирования созданы методы его автоматизации, основанные на представлении структуры системы алгебраических и трансцендентных уравнений, описывающих установившиеся режимы работы теплоэнергетических установок (ТЭУ) в виде бихроматического графа, имеющего два вида вершин: «белые» и «черные», причем связи (дуги и ребра) могут соединять только вершины различных видов. «Черные» вершины соответствуют переменным, а «белые» вершины – уравнениям, а в более общем случае – отношениям, к которым относятся и векторные функции, которые на основе заданных значений исходных информационно-входных переменных определяют значения искомым информационно-выходных переменных. Связь между «черной» вершиной i и «белой» вершиной j показывает, что переменная i входит в отношение j . Направление связи показывает, является ли i -я переменная информационно-входной или информационно-выходной для j -го отношения.

На основе указанного бихроматического графа решается ряд задач планирования вычислительного процесса: а) определение для каждого уравнения переменной, которая из него вычисляется; б) выделение вычислительных контуров и нахождения переменных, требующих задания начальных приближений, переменных, начисляемых «по цепочке» и не требующих задания начального приближения, а также переменных – исходных данных; в) определение последовательности расположения в программе вычислительных операторов, соответствующих отношениям системы в расчетной программе. Созданная в ИСЭМ СО РАН технология автоматизации математического моделирования реализована в виде ПВК «Система машинного построения программ». Было разработано несколько версий данной системы. С их помощью построено значительное количество математических моделей ТЭУ различных типов.

Следует отметить, что в математических моделях современных ТЭУ со сложными технологическими схемами имеется значительное количество вычисляемых переменных, требующих задания начального приближения. Как правило, имеются десятки таких переменных. Это порождает большое число вычислительных контуров, охватывающих большую часть вычислительных операторов. Среди данных операторов имеются как простые, соответствующее отдельным уравнениям, так и сложные, соответствующие векторным функциям. Как правило, векторные функции представляют математические модели отдельных элементов технологической схемы: теплообменников, турбомашин, камер сгорания и др. Причем, эти модели включают свои «внутренние» си-

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10174).

стемы нелинейных уравнений, которые решаются при каждом обращении к оператору, соответствующему векторной функции.

Среди задач оптимизации схем и параметров ТЭУ базовой задачей является задача нелинейной оптимизации непрерывно-изменяющихся параметров. Для ее решения был предложен градиентный метод «с памятью», в котором на определенном шаге оптимизации для определения допустимого направления, вдоль которого целевая функция улучшается (направление спуска), используется информация не только о значениях градиентов целевой функции и ограничений-неравенств в текущей точке, но и о таких значениях в нескольких предыдущих точках [1]. Для определения направления спуска решаются две вспомогательные задачи линейного программирования. Первая задача находит для текущей точки оценку возможного улучшения целевой функции. В результате решения второй задачи находится направление спуска, для которого за счет «жертвы» части возможного улучшения целевой функции обеспечивается максимальное, в некотором смысле «углубление» направления спуска внутрь допустимой области. Использование метода «с памятью» позволило сократить число обращений к расчету технологической схемы и сократить время решения оптимизационных задач.

В силу сложности математических моделей отдельных элементов и установки в целом единственно возможным методом определения градиентов целевой функции и ограничений является конечно-разностный метод. При этом возникает проблема погрешностей определения производных, обусловленных погрешностями при решении систем нелинейных уравнений, описывающих технологическую схему и отдельные элементы. Другой проблемой, связанной с используемой организацией модели ТЭУ, является проблема выбора начального приближения оптимизируемых параметров. Требуется задать такую начальную точку, в которой системы уравнений, соответствующие установке в целом и ее элементам, имели бы решения. Указанные проблемы затрудняли решение задач оптимизации параметров ТЭУ градиентными методами.

Для решения отмеченных проблем был разработан метод оптимизации, свободный от указанных недостатков [3, 4]. Он имеет следующие свойства.

1. Метод может стартовать из начальной точки, в которой указанные выше системы уравнений не имеют решения.
2. При использовании данного метода оптимизации в математических моделях элементов схемы и установки в целом нет вычислительных контуров. Поэтому вычисление градиентов производится конечно-разностным методом с высокой точностью.
3. Решение всех систем уравнений производится не на уровне математической модели, а на уровне оптимизационного процесса. Причем решение систем с требуемой точностью достигается лишь в оптимальной точке.

Исходная задача оптимизации ТЭУ имеет вид

$$\min f(x, y), \quad (1)$$

$$H(x, y) = 0, \quad (2)$$

$$G(x, y) \geq 0, \quad (3)$$

где f – целевая функция, H – K -мерная система ограничений-равенств (нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений), G – m -мерная система ограничений-неравенств, x – N -мерный вектор независимых оптимизируемых параметров, y – K -мерный вектор вычисляемых из системы (2) параметров.

Суть предлагаемого метода состоит в следующем.

Каждое i -е равенство $h_i(x, y) = 0$ заменяется на два неравенства

$$z - h_i(x, y) / \delta_i \geq 0, \quad (4)$$

$$z + h_i(x, y) / \delta_i \geq 0, \quad (5)$$

$$i = 1, \dots, K,$$

где z – вспомогательная переменная, отвечающая условию $z \geq 0$, δ_i – требуемая точность решения i -го уравнения.

Очевидно, что всегда можно подобрать такое z , чтобы условия (4) и (5) выполнялись как при положительном, так и при отрицательном значении h_i . Предполагается, что в начальной точке x^0, y^0 выполняется система (3) – (4) в виде строгих неравенств. Каждая итерация процесса оптимизации включает два шага.

На первом шаге фиксируется z и решается задача (1), (3) – (5). Оптимизация проводится по параметрам x и y . Обозначим целевую функцию в точке решения этой задачи через f^c . На втором шаге решается задача по минимизации $z \geq 0$ при условиях (3) – (5) и дополнительном условии

$$z + \frac{f^c - f(x, y)}{\sigma} \geq 0, \quad (6)$$

где σ – допустимая погрешность определения оптимального значения целевой функции. Обозначим оптимальное z в точке решения этой задачи через z^c .

На следующей итерации фиксируется z^c и решается задача первого шага.

Зачем фиксируется f^c и решается задача второго шага.

Такой процесс продолжается до тех пор, пока не выполнится условие $z^c \leq z^{треб}$, где $z^{треб} \leq 1$ – параметр, определяющий требуемую точность решения исходной задачи.

Изложенный процесс оптимизации параметров ТЭУ показал намного более высокую эффективность, определяемую точностью приближения к оптимальному решению и необходимым объемом вычислений, чем традиционный подход. В соответствии с этим традиционным подходом при каждом обращении к математической модели ТЭУ из системы (2) при заданном значении вектора x определяется вектор y , вектор ограничений-неравенств G и целевая функция f . Следует отметить, что как при использовании традиционного, так и нового подхода для решения отдельных оптимизационных задач использовался один и тот же метод «с памятью». У разработчиков предлагаемого подхода к оптимизации нет математически строгого доказательства его сходимости, однако инженерный анализ оптимальных решений для значительного количества оптимизированных энергетических установок свидетельствует о близости этих решений к оптимальному.

1. Клер А.М., Деканова Н.П., Щеголева Т.П. и др. Методы оптимизации сложных теплоэнергетических установок. Новосибирск: Наука, 1993. 116 с.
2. Клер А.М., Деканова Н.П., Тюрина Э.А. и др. Теплосиловые системы: Оптимизационные исследования. Новосибирск: Наука, 2005. 236 с.
3. Kler. A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. An effective approach to optimizing the parameters of complex thermal power plants // Thermophysics and Aeromechanics. 2016. Vol. 23, № 2. P. 289 – 296.
4. Эффективные методы схемно-параметрической оптимизации сложных теплоэнергетических установок: разработка и применение / Под ред. А.М. Клера. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 145 с.

ОЦЕНКА ПРИЧИН, ВЫЗЫВАЮЩИХ ГЕНЕРАЦИЮ ПОТОКОВ ГАЗА В ГЛУБОКОВОДНЫХ РАЙОНАХ ОЗЕРА БАЙКАЛ*

В.В. Козлов

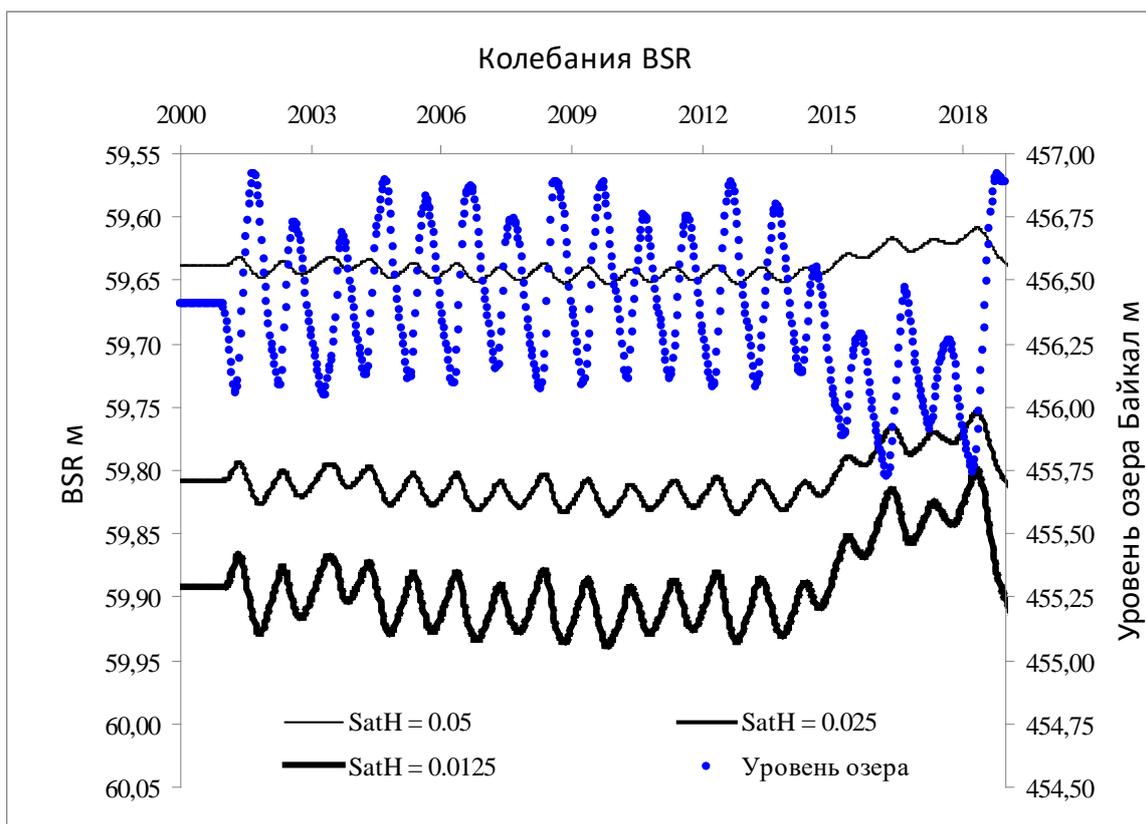
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
boba50@mail.ru

В водной толще озера в последние полтора десятилетия происходит увеличение концентрации растворенного метана за счет повышения интенсивности его выделения из донных отложений [1]. Прирост содержания метана отмечается как в глубинной зоне озера, так и его деятельном слое 0–200 м. Рассмотрение механизмов, обеспечивающих увеличение концентрации растворенного метана, которые могут быть связаны с такими воздействиями, как всплыванием газовых гидратов или импульсных выходов больших объемов газа из донных отложений озера, приводит к необходимости оценки причин, вызывающих генерацию потоков газа из донных отложений в глубоководных районах озера Байкал. Экспедиционные исследования свидетельствуют о возрастании концентраций метана в районах выходов газа. После их обнаружения были начаты работы по поиску и мониторингу выходов газа. Эти работы позволили обнаружить большое количество пузырьковых выходов газа из донных отложений озера [2, 4].

В связи с увеличением фоновых концентраций метана в водах Байкала начат цикл исследований его содержания и распределения в водной толще. При этом встал вопрос об оптимизации метода определения метана [3]. Стандартная процедура статического метода парофазного равновесия для определения метана дополнена измерением давления в закрытой системе. Разработана модификация метода парофазного равновесия с хроматографическим определением наноконцентраций растворенного в воде метана [3, 5].

Проведен анализ материалов по вертикальному распределению растворенного метана в водной толще Байкала, который показал, что одной из причин изменений концентрации метана может быть повышение уровня озера Байкал, обусловленное строительством Иркутской ГЭС [4, 5]. Разработана математическая модель процесса тепло- и массопереноса, позволяющая оценить перемещения нижней границы устойчивости газовых гидратов (BSR), связанного с колебаниями уровня озера. Модель позволила оценить размах перемещения BSR, связанного с колебаниями уровня озера Байкал и вариациями геотермического потока тепла. Получены оценки времени протекания переходного процесса при изменении уровня озера. Вычислительные эксперименты на разных глубинах показали, что при насыщенности гидратами пор донных отложений (SatH) менее 5% положение границы BSR в озере Байкал реагирует как на внутригодовые колебания уровня, так и на длительные изменения уровня, вызванные строительством Иркутской ГЭС. На рисунке показан размах колебаний BSR при различных заданных величинах SatH в зависимости от годовых колебаний уровня озера. Величина геотермического потока фиксирована на 0.075 Вт/м^2 . Расчетная глубина – 456.405 м. Анализ расчетов показывает, что повышение уровня озера, вызванное строительством Иркутской ГЭС, привело к заглоблению BSR. Начался процесс образования газовых гидратов, понижение внутрипластового давления и уменьшение интенсивности выходов метана. В настоящее время наблюдается обратный процесс:

* Работа выполнена при поддержке НИР № 0348-2019-012 и РФФИ № 18-07-00587_a.



нарастание внутрипластового давления и разгрузка флюидов по ослабленным зонам, приуроченным к многочисленным разломам. Это определяет увеличение интенсивности выходов метана и рост его концентраций в водной толще. Приросту содержания метана в байкальских водах также может способствовать активизация глубоководных сипов, выделяющих пузырьковый газ.

1. Гранин Н.Г., Верещагина О.Ф., Козлов В.В., Обжиров А.И., Макаров М.М., Гнатовский Р.Ю., Иванов В.Ф., Блинов В.В., Мизандронцев И.Б. Изменение концентрации метана в озере Байкал: возможная причина // Материалы конф. и тез. докл. «Газовые гидраты в экосистеме Земли» (Новосибирск, 7–10 апреля 2014 г.). Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2014. С. 25.
2. Гранин Н.Г., Верещагина О.Ф., Козлов В.В., Обжиров А.И., Макаров М.М., Гнатовский Р.Ю., Иванов В.Г., Блинов В.В., Мизандронцев И.Б. Причины и последствия повышения концентрации метана в воде оз. Байкал // Вестник научных конференций. 2016. № 12. С. 20. URL: <http://ucom.ru/doc/cn.2016.08.03.pd>.
3. Мизандронцев И.Б., Козлов В.В., Иванов В.Г., Кучер К.М., Гранин Н.Г. Определение наноконцентраций растворенного метана в водной толще озера Байкал // Тез. докл. и стендовых сообщений Междунар. конф. «Пресноводные экосистемы – современные вызовы» (10-14 сентября 2018 г.). Иркутск: ООО «Мегапринт», 2018. С. 245-246.
4. Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Козлов В.В., Макаров М.М., Блинов В.В. Влияние газовых гидратов и метана на гидрофизические характеристики озера Байкал // Тез. докл. и стендовых сообщений Междунар. конф. «Пресноводные экосистемы – современные вызовы» (10-14 сентября 2018 г.). Иркутск: ООО «Мегапринт», 2018. С. 53-54.
5. Мизандронцев И.Б., Козлов В.В., Иванов В.Г., Кучер К.М., Корнева Е.С., Гранин Н.Г. Вертикальное распределение метана в водной толще Байкала // Водные ресурсы. 2020 (в печати).

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ОБЩИХ ФУНКЦИЙ ЛЯПУНОВА ДЛЯ СИСТЕМ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ*

А.А. Косов

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

В современной теории управления активно изучаются гибридные системы, описываемые уравнениями с переключениями правых частей в ходе процесса управления [1-3]. Наличие переключений существенно затрудняет решение задач анализа динамики и синтеза стабилизирующих управлений, поэтому актуальной задачей является развитие теории управления для такого рода гибридных систем [4]. Основным, а часто и единственным строгим методом исследования динамики гибридных систем обычно выступает метод функций Ляпунова (см., например, [5-8]). Как следует из капитальных обзоров [1-3], наиболее изучены вопросы построения общих квадратичных функций Ляпунова (ОКФЛ) для двумерных линейных дифференциальных систем, дискретные системы и системы более высоких размерностей в этом плане значительно менее изучены. В докладе предлагается алгоритм построения общих функций Ляпунова в виде квадратичных форм или форм четвертой степени для семейств трехмерных переключаемых систем, правые части которых являются линейными функциями или однородными полиномами третьей степени.

Рассмотрим семейство систем следующего вида:

$$x(k+1) = A^{(i)}x(k), \quad x \in R^3, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad k \in N_0 = \{0, 1, 2, \dots\} \quad (1)$$

Для этого семейства линейных трехмерных дискретных систем будем строить общую квадратичную функцию Ляпунова в виде $V(x) = x^T S x$, где симметричная матрица $S = (s_{ij}), i, j = 1, 2, 3$ зависит от пяти параметров $\alpha, \beta, d_{12}, d_{13}, d_{23}$ следующим образом:

$$\begin{cases} s_{11} = \alpha, & 0 < \alpha < 1 \\ s_{22} = \beta\sqrt{1-\alpha^2}, & 0 < \beta < 1 \\ s_{33} = \sqrt{(1-\alpha^2)(1-\beta^2)}, \\ s_{12} = s_{21} = d_{12}\sqrt{s_{11}s_{22}}, & -1 < d_{12} < 1 \\ s_{13} = s_{31} = d_{13}\sqrt{s_{11}s_{33}}, & -1 < d_{13} < 1 \\ s_{23} = s_{32} = d_{23}\sqrt{s_{22}s_{33}}, & -1 < d_{23} < 1. \end{cases} \quad (2)$$

Матрица S будет положительно определенной при любых значениях параметров из указанных диапазонов при выполнении неравенства

$$1 + 2d_{12}d_{13}d_{23} - d_{12}^2 - d_{13}^2 - d_{23}^2 > 0. \quad (3)$$

Отметим, что если для семейства (1) существует ОКФЛ, то, не ограничивая общности, ее можно представить так, чтобы коэффициенты удовлетворяли (2) и (3). Вычисляя первую разность от $V(x)$ в силу i -й системы семейства (1), получим квадратичную форму

$$\Delta V_i(x) = x^T (A^{(i)T} S A^{(i)} - S) x. \quad (4)$$

Проверка отрицательной определенности квадратичных форм (4) проводится с помощью критерия Сильвестра.

* Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №~19-08-00746).

Таким образом, алгоритм построения ОКФЛ для семейства (1) заключается в следующем. Разбиваем все пять диапазонов изменения параметров, указанные в (2), сетками из конечного числа точек. Для каждого фиксированного набора значений параметров проверяем неравенства (3) и неравенства критерия Сильвестра для (4). Если все они выполнены, то ОКФЛ построена и задается формулами (2) при текущих значениях параметров. Если же хотя бы одно из упомянутых неравенств нарушено, то переходим к новой точке в пространстве параметров и повторяем все вычисления.

Если вместо семейства дискретных линейных систем (1) рассматривается семейство линейных дифференциальных систем вида $\dot{x} = A^{(i)}x$, то алгоритм построения ОКФЛ остается тем же, только вместо первых разностей (4) используются производные в силу систем $W_i(x) = x^T (A^{(i)T}S + SA^{(i)})x$.

Теперь рассмотрим построение общей функции Ляпунова для семейства (1) в виде формы четвертой степени

$$V_4(x) = V_2^{(1)}(x)V_2^{(2)}(x). \quad (5)$$

Здесь $V_2^{(1)}(x)$ и $V_2^{(2)}(x)$ – квадратичные формы, коэффициенты которых удовлетворяют (2), (3) и выбираются независимо. Поэтому (5) будет положительно определенной формой четвертой степени от трех переменных. Вычисляя первую разность в силу i -й системы (1), получим форму четвертой степени $\Delta V_4^{(i)} = V_4(A^{(i)}x) - V_4(x)$.

Алгоритм построения ОФЛ в классе форм четвертой степени полностью аналогичен описанному выше алгоритму построения ОКФЛ с той лишь разницей, что теперь требуется проводить проверку положительной определенности форм четвертой степени $W_i = -\Delta V_4^{(i)}$. Такую проверку будем выполнять на основе предложенного в [9] перехода к квадратичным формам от большего числа переменных.

Пусть дана форма 4-ой степени от трех переменных $Q_4(x) = q_{1111}x_1^4 + q_{1112}x_1^3x_2 + \dots + q_{3333}x_3^4$. Введем новые переменные

$$y_1 = x_1^2, y_2 = x_1x_2, y_3 = x_1x_3, y_4 = x_2^2, y_5 = x_2x_3, y_6 = x_3^2.$$

В новых переменных форма $Q_4(x)$ принимает вид квадратичной формы

$$P(y) = q_{1111}y_1^2 + q_{1112}y_1y_2 + \dots + q_{3333}y_6^2 = y^T My.$$

Новые переменные не являются независимыми, они связаны квадратичными равенствами

$$\begin{cases} y_1y_4 - y_2^2 = y^T B_1 y = 0 \\ y_1y_6 - y_3^2 = y^T B_2 y = 0 \\ y_4y_6 - y_5^2 = y^T B_3 y = 0 \\ y_2y_3 - y_1y_5 = y^T B_4 y = 0 \\ y_2y_5 - y_3y_4 = y^T B_5 y = 0 \\ y_3y_5 - y_2y_6 = y^T B_6 y = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Если квадратичная форма $P(y)$ положительно определена при квадратичных условиях (6), то форма 4-й степени $Q_4(x)$ также положительно определена. Так как на множестве (6) значения квадратичной формы $P(y)$ совпадают со значениями квадратичной формы с матрицей $M + \sum_{i=1}^6 \lambda_i B_i$ при любых коэффициентах $\lambda_i \in \mathbb{R}$, то тем самым установлена справедливость следующего утверждения.

Утверждение. Если для некоторых коэффициентов $\lambda_i \in \mathbb{R}$, $i = \overline{1,6}$ линейная комбинация $M + \sum_{i=1}^6 \lambda_i B_i$ является положительно определенной матрицей, то форма 4-й степени $Q_4(x)$ положительно определена.

Таким образом, проверка отрицательной определенности первых разностей в алгоритме построения ОФЛ в виде формы 4-й степени для семейства (1) сводится к зада-

че оптимизации в шестимерном пространстве коэффициентов $\lambda_i \in R, i = \overline{1,6}$. Отметим, что предлагаемый здесь подход можно применять и для форм более высоких четных степеней и систем более высокой размерности, однако при этом очень быстро растет размерность получаемой задачи оптимизации.

Как показывают примеры, применение наряду с квадратичными формами также и форм четвертой и более высоких степеней расширяет возможности построения общих функций Ляпунова для систем с переключениями.

1. Shorten R., Wirth F., Mason O., Wulf K., King C. Stability Criteria for Switched and Hybrid Systems // SIAM Rev. 2007. Vol. 49, № 4. P. 545-592.
2. Шпилевая О.Я., Котов К.Ю. Переключаемые системы: устойчивость и проектирование (Обзор) // Автометрия. 2008. Т. 44, № 5. С. 71–87.
3. Hai Lin, Antsaklis P.J. Stability and Stabilizability of Switched Linear Systems: a Survey of Recent Results // IEEE Trans. Automat. Contr. 2009. Vol. 54, № 2. P. 308-322.
4. Unsolved Problems in Mathematical Systems and Control Theory~/~Ed. by V.D. Blondel & A. Megretski. Princeton, Oxford: Princeton University Press, 2004.
2. Liberzon D. Switching in Systems and Control. Boston, MA: Birkhauser, 2003.
3. Васильев С.Н., Косов А.А. Анализ динамики гибридных систем с помощью общих функций Ляпунова и множественных гомоморфизмов // Автоматика и телемеханика. 2011. № 6. С. 27-47.
4. Александров А.Ю., Косов А.А., Чэнь Я. Об устойчивости и стабилизации механических систем с переключениями // Автоматика и телемеханика. 2011. № 6. С. 5-17.
5. Aleksandrov A.Yu., Kosov A.A., Platonov A.V. On the Asymptotic Stability of Switched Homogeneous Systems // Systems & Control Letters. 2012. Vol. 61, № 1. P. 127-133.
6. 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.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ОСВОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА ДВУМЯ ТИПАМИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ РОБОТОВ И ЕЕ ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ*

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

В докладе рассматривается проблема моделирования процесса обследования трехмерного пространства взаимодействующими роботами двух различных типов. Предполагается, что количество роботов настолько велико, что целесообразно перейти к их распределенному описанию в терминах плотностей $u(t, x), v(t, x)$, соответствующих моменту времени $t \geq 0$ и точке пространства $x \in R^3$. Процесс обследования начинается с границы некоторой подобласти $B \subset R^3$ (например, шара), интерпретируемой как база для роботов, на которой плотности могут изменяться как заданная функция времени. Эту функцию можно считать управлением, которое мы можем выбирать. Задача состоит в том, чтобы выбрать такое управление, которое гарантирует обследование (т.е. положительные плотности) в некоторой существенно большей области пространства, содержащей базу роботов $B \subset R^3$ внутри себя. Для решения задачи необходимо использовать математическую модель, для которой можно найти точные решения.

Предлагается следующая распределенная модель освоения пространства двумя типами взаимодействующих роботов, которая описывается параболической системой двух квазилинейных уравнений реакции-диффузии с объемными источниками (стоками)

$$u_t = \nabla \cdot (u^\lambda \nabla u) + \alpha u^{1-\lambda} v^\mu - k_1 u, \quad t \geq 0, \quad x \in R^3, \quad (1)$$

$$v_t = \nabla \cdot (v^\mu \nabla v) + \beta v^{1-\mu} u^\lambda - k_2 v, \quad t \geq 0, \quad x \in R^3. \quad (2)$$

Такого рода системы описывают процессы нелинейной диффузии в реагирующих двухкомпонентных сплошных средах [1-3]. Здесь $u(t, x), v(t, x)$ – искомые функции; ∇ – оператор взятия градиента по пространственным переменным; $\lambda \neq 0, \mu \neq 0$ – вещественные параметры нелинейности среды; $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, k_1 > 0, k_2 > 0$ – некоторые постоянные коэффициенты.

Решения системы уравнений (1), (2) ищем в виде обобщенного разделения переменных [4-7]

$$u(t, x) = \psi_1(t)(W(x) + \varphi_1(t))^{\frac{1}{\lambda}}, \quad v(t, x) = \psi_2(t)(W(x) + \varphi_2(t))^{\frac{1}{\mu}}, \quad (3)$$

$$W(x) = \frac{1}{2}(x, Ax) + (B, x) + C, \quad (4)$$

где ненулевая числовая симметрическая матрица A размера 3×3 , постоянный вектор $B \in R^3$ и константа $C \in R$ подлежат определению.

Будем рассматривать системы алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений

$$A = 2\sigma A^2, \quad B = 2\sigma AB, \quad C = \sigma \|B\|^2, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1 = \left(\frac{\text{tr}A}{\lambda} + \frac{1}{\sigma\lambda^2} \right) \psi_1^{1+\lambda} + \alpha \psi_1^{1-\lambda} \psi_2^\mu - k_1 \psi_1 \\ \dot{\psi}_2 = \left(\frac{\text{tr}A}{\mu} + \frac{1}{\sigma\mu^2} \right) \psi_2^{1+\mu} + \beta \psi_2^{1-\mu} \psi_1^\lambda - k_2 \psi_2 \end{cases} \quad (6)$$

* Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00746).

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \left(\text{tr}A\psi_1^\lambda - \frac{\lambda\psi_1}{\psi_1} - \lambda k_1 \right) \varphi_1 + \alpha\lambda\psi_1^{-\lambda}\psi_2^\mu\varphi_2 \\ \dot{\varphi}_2 = \left(\text{tr}A\psi_2^\mu - \frac{\mu\psi_2}{\psi_2} - \mu k_2 \right) \varphi_2 + \beta\mu\psi_2^{-\mu}\psi_1^\lambda\varphi_1 \end{cases} \quad (7)$$

Здесь $\sigma \neq 0$ – константа разделения.

Справедливо следующее утверждение.

Теорема. Система уравнений (1), (2) имеет точные решения вида (3), где функция $W(x)$ может быть выбрана произвольным полиномом вида (4) с коэффициентами, удовлетворяющими системе алгебраических уравнений (5), а функции $\psi_i(t), \varphi_j(t)$ являются решениями систем обыкновенных дифференциальных уравнений (6), (7).

Пример. Рассмотрим систему (1), (2) при следующих значениях параметров: $\lambda = \mu = \frac{1}{3}$, $k_1 = k_2 = 1$, $\alpha = 1024$, $\beta = \frac{141491}{8388608} = 0.01686704$. Возьмем в (3) $W = \frac{1}{2\sigma}(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)$, где $\sigma = -1$. Тогда у системы уравнений (6) имеется стационарное решение $\bar{\psi}_1 = 1$, $\bar{\psi}_2 = \left(\frac{29}{2048}\right)^3$, которому соответствует система (7) следующего вида:

$$\dot{\varphi}_1 = -\frac{11}{6}\varphi_1 + \frac{29}{6}\varphi_2, \quad \dot{\varphi}_2 = \frac{4879}{12288}\varphi_1 - \frac{4357}{12288}\varphi_2. \quad (8)$$

Эта система является линейной, ее характеристическое уравнение имеет вещественные корни 0.476325862, -2.664232764. На рис. 1 и 2 представлены соответствующие данному примеру точные решения

$$u(t, x) = \bar{\psi}_1(-0.25\|x\|^2 + \varphi_1)^3, \quad v(t, x) = \bar{\psi}_2(-0.25\|x\|^2 + \varphi_2)^3,$$

где использованы решения системы (8) с единичными начальными условиями.

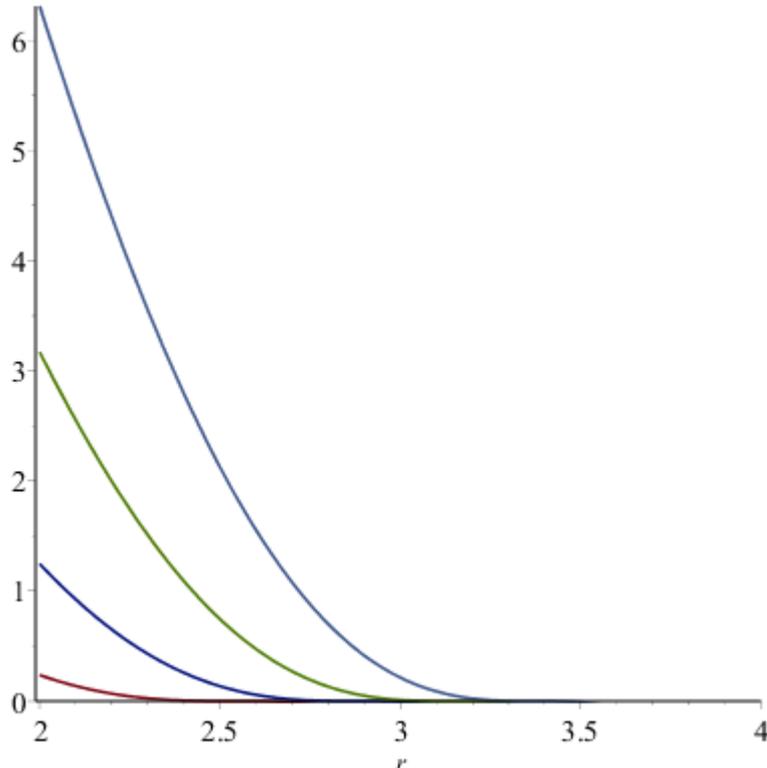


Рис. 1. Решение $u(t, x) = \bar{\psi}_1(-0.25\|x\|^2 + \varphi_1)^3$

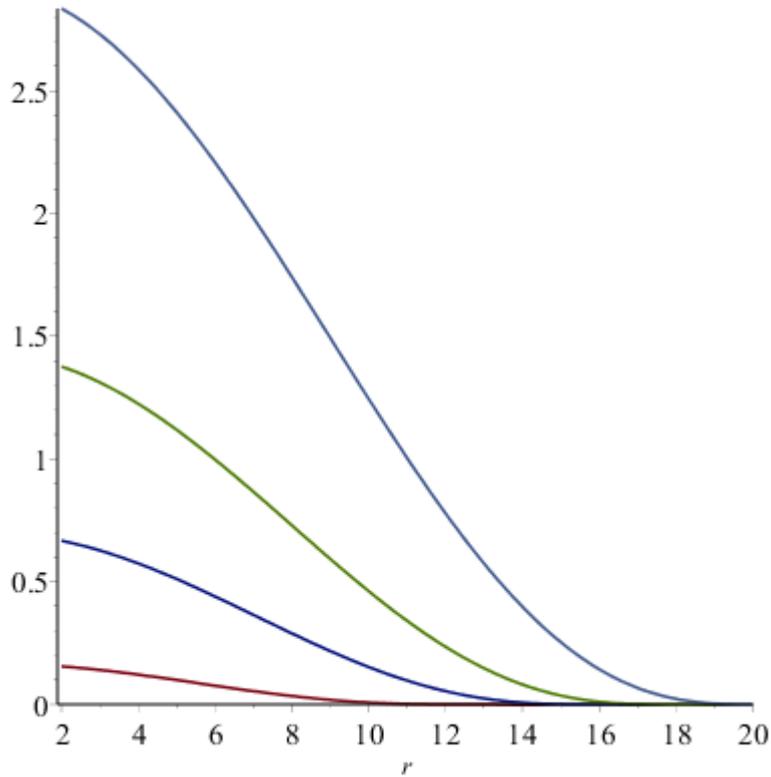


Рис. 2. Решение $v(t, x) = \bar{\psi}_2(-0.25\|x\|^2 + \varphi_2)^3$

На рис. 1 и 2 показаны несколько кривых, соответствующих нескольким моментам времени (более поздним моментам времени соответствуют более высокие кривые), по горизонтальной оси отложена величина $r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$, показывающая расстояние от начала координат. Шар радиуса 2 представляет собой базу для роботов, с поверхности которой начинается процесс освоения пространства роботами двух типов, кооперирующих свои действия (α и β положительны). По вертикальной оси на графиках показаны растущие со временем плотности на границе базы. Форма кривых на рисунках показывает распространение волны в трехмерном пространстве. Точка касания кривой горизонтальной оси показывает, до какой части пространства дошла волна заселения к соответствующему моменту времени.

1. Polyanin A.D., Kutepov A.M., Vyazmin A.V., Kazenin D.A. Hydrodynamics, Mass and Heat Transfer in Chemical Engineering. London and N.Y.: Taylor & Francis, 2002. 387 p.
2. Журавлев В.М. Об одном классе моделей автоволн в активных средах с диффузией, допускающих точные решения // Письма в ЖТЭФ. 1997. Т. 65, вып. 3. С. 285-290.
3. Шмидт А.В. Точные решения систем уравнений типа реакция-диффузия // Вычислительные технологии. 1998. Т. 3, № 4. С. 87-94.
4. Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики: Точные решения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 432 с.
5. Полянин А.Д., Зайцев В.Ф., Журов А.И. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 256 с.
6. Galactionov V. A., Svirshchevskii S.R. Subspaces of nonlinear partial differential equations in mechanics and physics. Chapman & Hall/CRC, 2007. 493 p.
7. Косов А.А., Семенов Э.И. О точных многомерных решениях одной нелинейной системы уравнений реакции-диффузии // Дифференциальные уравнения. 2018. Т. 54, № 1. С. 108-122.

ТОЧНЫЕ МНОГОМЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ

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

В докладе представлены результаты, опубликованные и принятые к печати в цикле статей 2019 года, касающиеся построения точных решений нелинейных систем уравнений в частных производных эллиптического типа [1], параболического типа [2, 3], гиперболического типа [4], а также уравнений первого порядка типа Гамильтона-Якоби, содержащих квадраты градиентов искомым функций [5]. Общая идея, объединяющая методы и результаты для столь разнотипных уравнений, заключается в декомпозиции исследуемой системы и отыскании компонент решения, зависящих от времени и от пространственных переменных по отдельности из систем алгебраических, обыкновенных дифференциальных или иных уравнений.

В [1] изучена нелинейная система двух дифференциальных уравнений эллиптического типа с нелинейностями, зависящими от произведения степеней искомым функций. Получены достаточные условия, при выполнении которых система сводится к одному уравнению. Выделены случаи, для которых найдены классы точных решений, выражаемых через элементарные и гармонические функции и решения уравнения Ливилля.

В [2, 3] исследованы системы типа реакции-диффузии параболического типа со степенными нелинейностями. Построены семейства точных решений, в которых зависимость от пространственных переменных дается полиномом второй степени, а зависимость от времени находится из системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Выделены случаи, когда построенные семейства содержат периодические по времени точные решения, явно выраженные через элементарные функции.

В [4] изучена система двух нелинейных уравнений гиперболического типа четвертого порядка, правые части которой содержат многомерные аналоги уравнения Буссинеска. Выделены случаи, когда удается свести задачу к решению обыкновенного дифференциального уравнения четвертого порядка. Построены примеры точных решений.

В [5] рассматривалась система двух уравнений первого порядка, правые части которой содержат квадраты градиентов искомым функций. Такого рода уравнения, близкие к уравнению Гамильтона-Якоби, встречаются в задачах механики и теории управления. Предложена конструкция для отыскания точных решений, с помощью которой найдены семейства точных решений, в том числе периодических.

1. Kosov A.A., Semenov E.I. Reductions and Exact Solutions of Nonlinear Elliptic Systems of a Special Form // *Differential Equations*. 2019. Vol. 55, № 6. P. 824-831.
2. Kosov A.A., Semenov E.I. Construction of exact solutions and analysis of stability complex systems by reduction to ordinary differential equations with power nonlinearities // *Журнал СВМО*. 2019. Vol. 21, №1. P. 60-69.
3. Косов А.А., Семенов Э.И. Периодические решения системы двух уравнений реакции-диффузии со степенными нелинейностями // *Материалы Междунар. симпозиума, посвящ. 100-летию матем. образования в Вост. Сибири и 80-летию со дня рождения проф. О. В. Васильева*. 2019. С. 140-143.
4. Косов А.А., Семенов Э.И., Тирских В.В. Multidimensional exact solutions of a system of nonlinear Boussinesq type equations // *Известия Иркутского гос. ун-та. Сер. Математика*. 2019. Т. 30.
5. Kosov A.A., Semenov E.I., Tirskikh V.V. On Exact Multidimensional Solutions of a Nonlinear System of First Order Partial Differential Equations // *Bulletin of Irkutsk State University-Series Mathematics*. 2019. Т. 28. С. 53-68.

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНОМ МОДЕЛИРУЮЩЕМ КОМПЛЕКСЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ГРУПП АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ

Д.А. Костылев

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
mail@kostydenis.me

Разработка систем управления группами мобильных роботов является нетривиальной задачей и особое место занимают этапы тестирования и отладки, реализуемые, как правило, с использованием различных программных имитационных моделей. Однако исключительно программные решения не могут учесть всех аспектов функционирования реальных устройств. Для более полного исследования поведения автономных роботов разрабатывается программно-аппаратный моделирующий комплекс [1], включающий в себя тестовый полигон, реальных мобильных роботов, технологию взаимодействия между ними, способы формирования, управления и отслеживания миссий, а также ряд некоторых вспомогательных функций.

Существует три основных архитектуры подобного рода систем: распределенная, централизованная, смешанная. Так как мобильные роботы имеют ограниченную вычислительную мощность, было принято решение перейти от полностью децентрализованной схемы, использованной авторами в [1], к комбинированной.

Для реализации такого подхода были введены виртуальные агенты, которые служат как для имитации полнофункциональных (использующих те же протоколы взаимодействия, что и реальные агенты), но малоподвижных роботов, так и в качестве вспомогательных виртуальных вычислительных модулей для предварительной обработки информации, предназначенной для использования реальными роботами.

Также в данной работе будет представлен подход к реализации сервиса, который обеспечивает локализацию роботов на изображениях, получаемых с видеокамер, установленных над тестовым полигоном, для оценки корректности действий агентов. Проведен сравнительный анализ двух подходов к идентификации роботов и выбран метод, основанный на цветовых метках.

1. Kostylev D., Tolstikhin A., Ul'yanov S. Development of the Complex Modelling System for Intelligent Control Algorithms Testing // Proc. 42nd Intern. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2019. P. 1091–1096.

О ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

О.Д. Костылева*, В.В. Парамонов***, В.В. Ветрова***

*Институт математики экономики и информатики Иркутского государственного университета

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

*** Университет Кентерберри, Новая Зеландия

deltaonshape@mail.ru, slv@icc.ru, varvara.vetrova@canterbury.ac.nz

В работе рассматривается актуальная задача создания технологии прогнозирования экстремальных климатических явлений на примере территории Новой Зеландии. Под экстремальными климатическими явлениями понимаются такие погодные явления, как ураганы, ливневые дожди, наводнения или засухи, которые могут отразиться на изменении климата [1]. Решение поставленной задачи разбивается на несколько этапов (технологических шагов) таких, как сбор данных, выбор методов их анализа. Рассмотрим эти шаги подробнее.

В качестве исходных данных используется информация о погодных явлениях, произошедших на территории Новой Зеландии, собранных в базе данных NIWA*. База данных NIWA является национальной климатической базой данных, содержащей информацию, получаемую с 6,5 тысяч климатических станций страны за последние 170 лет. Получить данные возможно через веб-интерфейс информационного портала NIWA либо с использованием CliFlo API [2]. При использовании веб-интерфейса можно получить информацию лишь за ограниченный период времени и по ограниченному количеству параметров. Доступ к данным через CliFlo API портала позволяет автоматизировать процесс извлечения данных. Взаимодействие с API проводится посредством пакета Clifro [3] для языка R.

Для работы с методами пакета требуется указать идентификационные данные пользователя на портале NIWA, требуемые типы метеорологических наблюдений, станции и затем с помощью CliFlo запроса получить информацию за интересующий период времени. В результате запроса выгружаются сведения о погодных явлениях, содержащие такую информацию, как атмосферное давление, суточные перепады температур, осадки и влажность, скорость и направление ветра. Информация разбивается по сезонам (весна, лето, осень, зима) и сохраняется в виде документов CSV-формата.

Анализ данных, выявление зависимостей и прогнозирование экстремальных климатических явлений планируется проводить, используя методы машинного обучения. Для этого будут рассмотрены некоторые алгоритмы машинного обучения с учителем, такие, как:

- Random Forest (случайный лес) представляет собой набор деревьев решений, таких, что каждое дерево обращается с запросом к данным и получает ответ «да/нет». Таким образом, каждый такой запрос ведет к предсказанию класса, который состоит из «узлов», сформированных по исходным данным [4].

- Linear regression with regularization on coefficients – Lasso and Ridge (линейная регрессия с регуляризацией по коэффициентам) – это метод регрессионного анализа, который представляет из себя выбор переменных и регуляризацию, чтобы повысить точность прогнозирования и интерпретируемость создаваемой статистической модели.

- Elastic net (эластичная сеть) – метод регуляризации аналогичный Lasso, который одновременно делает автоматический выбор переменных и непрерывную усадку и может выбирать группы коррелированных переменных [5].

* NIWA – Национальный институт водных и атмосферных исследований (<https://niwa.co.nz>).

• SVM – Support Vector Machine (метод опорных векторов) принадлежит семейству линейных классификаторов. Особым свойством этого метода является непрерывное уменьшение эмпирической ошибки классификации и увеличение зазора (расстояния между классами данных), т.е. цель – разделить данные так, чтобы между двумя разными категориями было максимальное расстояние, поэтому метод также известен как метод классификатора с максимальным зазором [6].

Любой из подобных методов обучения базируется на концепции шаблонов. В рассматриваемой задаче шаблонами являются данные о погодных явлениях. Каждый шаблон состоит из набора переменных (характеристики, описывающие погодное явление), называемых маркерами предсказания (предикторами). В качестве таких предикторов будут использованы данные климатических явлений, собранные NCAR's Climate and Global Dynamics Laboratory^{*}, выгруженные и разбитые по сезонам.

Предполагается, что разрабатываемая технология может быть адаптирована для прогнозирования экстремальных климатических явлений в различных регионах Земли (при наличии данных ретроспективных метеорологических наблюдений за некоторый период по рассматриваемой территории).

1. Оверченко А., Опополь Н. Экстремальные климатические явления как фактор риска для здоровья в условиях меняющегося климата // Управление бассейном трансграничного Днестра в условиях нового бассейнового договора. Кишинев: Eco-TIRAS, 2013. С.300-306.
2. National Climate Database. URL: <https://cliflo.niwa.co.nz> (дата обращения 05.11.2019).
3. From CliFlo to *clifro*: An Introduction. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/clifro/vignettes/clifro.html> (дата обращения 05.11.2019).
4. Leo Breiman Random forests // Statistics Department University of California. USA, 2001. С. 2.
5. Hui Zou and Trevor Hastie Regularization and variable selection via the elastic net // Stanford. University, USA. 2005. P. 2.
6. Pijush Samui Sanjiban Sekhar Roy Valentina Emilia Balas. Handbook of Neural Computation. Academic Press, 2017. P. 658.

^{*} <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-interim>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДУБЛИКАТОВ КОНФЛИКТНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ CDCL-ВЫВОДА*

С.Е. Кочемазов, О.С. Заикин, В.С. Кондратьев, А.А. Семенов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
veinamond@gmail.com, zaikin.icc@gmail.com,
vikseko@gmail.com, biclop.rambler@yandex.ru

Проблема булевой выполнимости (SAT) [1] состоит в том, чтобы по произвольной булевой формуле определить, выполнима она или нет. SAT – одна из наиболее известных NP-полных проблем. Это означает, что к ней может быть эффективно сведен широкий спектр практических задач. В настоящее время наибольшую эффективность в решении практических примеров SAT демонстрируют алгоритмы, основанные на алгоритме Conflict-Driven Clause Learning (CDCL) [2]. CDCL осуществляет обход двоичного дерева решений системы ограничений, соответствующих исходной булевой формуле. Во время работы алгоритма порождается множество новых т.н. конфликтных ограничений, каждое из которых является логическим следствием исходной формулы. Эти ограничения могут быть приписаны к исходным и использоваться для определения направления дальнейшего обхода дерева решений.

Техники работы с конфликтными ограничениями играют ключевую роль в эффективности CDCL-решателей. Основная сложность здесь состоит в том, что число порождаемых конфликтных ограничений настолько велико, что в целях ограничения количества используемой памяти, а также для поддержания высокого темпа обхода дерева решений, необходимо большую их часть время от времени удалять. Интересный факт, отмеченный, например, в [3], состоит в том, что иногда некоторые из удаленных конфликтных ограничений генерируются повторно. В докладе будет рассмотрена одна эвристическая технология, которая использует повторно генерируемые конфликтные дизъюнкты для ускорения работы современных CDCL-решателей. SAT-решатели, реализующие предложенную эвристику, заняли первое место в соревновании соответствующих алгоритмов SAT Race 2019 [4, 5].

1. Handbook of Satisfiability / Ed. by A. Biere, M. Heule, H. Van Maaren, T. Walsh. IOS Press, 2009.
2. Joao Marques-Silva, Ines Lynce, Sharad Malik. Conflict-Driven Clause Learning SAT Solvers // Handbook of Satisfiability, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. 2009. Vol. 185. P. 131-153.
3. Кондратьев В.С., Семенов А.А., Заикин О.С. Дубликаты конфликтных ограничений в CDCL-выводе и их использование в задачах обращения некоторых криптографических функций // Выч. мет. Программирование. 2001. Т. 20, № 1. С. 54–66.
4. URL: <http://sat-race-2019.ciirc.cvut.cz/>.
5. Proceedings of SAT Race 2019: Solver and Benchmark Descriptions / Ed. by M. Heule, M. Jarvisalo, M. Suda. Vol. B-2019-1 of Series of Publications B. Department of Computer Science, University of Helsinki, 2019.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-11-10046.

О ВНУТРЕННЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ФОРМАЦИЙ *

А.В. Лакеев

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

lakeyev@icc.ru

Получены необходимые и достаточные условия внутренней устойчивости линейных формаций [1-13].

Определение 1. Будем говорить, что задана линейная формация из l взаимосвязанных объектов, если:

1) задан ориентированный бесконтурный граф $G = (V, E)$ без кратных ребер и петель с множеством вершин $V = \{1, \dots, l\}$ и множеством ребер $E \subseteq V \times V$, называемый в дальнейшем графом формаций. При этом вершины графа отождествляются с движущимися объектами формации, а ребра указывают на наличие взаимосвязей между некоторыми из них. Если $(i, j) \in E$, то i -й объект называется ведомым, а j -й объект – ведущим (ребро $(i, j) \in E$ считаем ориентированным от i к j);

2) динамика движения i -го объекта задается линейным дифференциальным уравнением с управлением

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i, \quad x_i \in R^n, u_i \in R^m, A_i \in R^{n \times n}, B_i \in R^{n \times m}; \quad (1)$$

3) каждому ребру $(i, j) \in E$ сопоставлен вектор $d_{ij} \in R^n$, задающий требуемое взаимное расположение (в идеале) i -го и j -го объектов относительно друг друга, при этом в идеале хотелось бы иметь соотношение $x_i + d_{ij} = x_j$.

Будем обозначать $L_i = \{j \in V \mid (i, j) \in E\}$ – множество ведущих для i -го объекта. Обозначим также $V_0 = \{i \in V \mid L_i = \emptyset\}$ – множество лидеров формации.

Для линейных формаций будем рассматривать следующие классы допустимых управлений:

- если $i \in V_0$, то $U_i = U_i^{pl} = \{u_i \mid u_i : R_0^1 \rightarrow R^m, u_i \text{ – непрерывно}\}, R_0^1 = [0, +\infty)$;

- если $i \in V \setminus V_0$ и $L_i = \{j_{i1}, \dots, j_{is_i}\}$, то $U_i = U_i^{aff} = \{u_i \mid u_i : R^{n(s_i+1)} \rightarrow R^m\}$,

$$u_i(x_i, x_{j_{i1}}, \dots, x_{j_{is_i}}) = S_i x_i + \sum_{r=1}^{s_i} K_{ij_r} x_{j_r} + k_i = S_i x_i + \sum_{j \in L_i} K_{ij} x_j + k_i,$$

где $S_i, K_{ij} \in R^{m \times n}, k_i \in R^m$.

Если $(i, j) \in E$, то обозначим $z_{ij} = x_i + d_{ij} - x_j$ – отклонение (ошибку) от идеального состояния между i -м и j -м объектами, а если $(i, j) \notin E$, то $z_{ij} = 0$ и $z = (z_{ij}) \in R^{l \times l}$ – матрица ошибок.

Для оценки величины отклонений используем стандартные классы функций [14]:

- K – класс функций Хана: $\gamma \in K$ если $\gamma : [0, +\infty) \rightarrow [0, +\infty)$ непрерывная, строго возрастающая, $\gamma(0)=0$;

- функции класса KZ : $\beta \in KZ$ если $\beta : [0, +\infty) \times [0, +\infty) \rightarrow [0, +\infty)$, $\beta(\cdot, t) \in K$ при фиксированном t , $\beta(a, t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow +\infty$ и фиксированном $a \in R_0^1$, $\beta(a, t)$ непрерывна.

Определение 2. Линейная формация называется линейно внутренне устойчивой (или кратко (ЛВУ)), если существуют функции $\gamma_i \in K, i \in V_0$ и функция $\beta \in KZ$ такие,

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 19-08-00746 и № 19-01-00301).

что для любых допустимых управлений $u_i \in U_i^{pr}, i \in V_0$ найдутся управления $u_j \in U_j^{aff}, j \in V \setminus V_0$ такие, что при любых начальных значениях $x_{0i} \in R^n, i \in V$ и любых $t \geq 0$ выполняется оценка

$$\|z(t)\| \leq \beta(\|z(0)\|, t) + \sum_{i \in V_0} \gamma_i (\sup_{\tau \in [0, t]} \|u_i(\tau)\|), \quad (2)$$

где $z(t)$ – матрица ошибок, полученная на решениях уравнений (1) при заданных управлениях $u_i \in U_i$ и заданных начальных значениях $x_i(0) = x_{i0} \in R^n, i \in V$.

Здесь и всюду в дальнейшем нормы векторов и матриц считаются евклидовыми. В кванторном виде это свойство более кратко можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} (\text{ЛВУ}) \equiv & (\exists \gamma_i \in \mathbb{K} : i \in V_0) (\exists \beta \in \mathbb{KZ}) (\forall u_i \in U_i^{pr} : i \in V_0) (\exists u_j \in U_j^{aff} : j \in V \setminus V_0) \\ & (\forall x_{0i} \in R^n : i \in V) (\forall t \geq 0) (\|z(t)\| \leq \beta(\|z(0)\|, t) + \sum_{i \in V_0} \gamma_i (\sup_{\tau \in [0, t]} \|u_i(\tau)\|)) \end{aligned}$$

Будем рассматривать еще два свойства линейных формаций:

$(\text{ЛВУ})_1$ получается из (ЛВУ) перестановкой кванторов $(\forall u_i \in U_i^{pr} : i \in V_0)$ и $(\exists u_j \in U_j^{aff} : j \in V \setminus V_0)$ или, в кванторном виде

$$\begin{aligned} (\text{ЛВУ})_1 \equiv & (\exists \gamma_i \in \mathbb{K} : i \in V_0) (\exists \beta \in \mathbb{KZ}) (\exists u_j \in U_j^{aff} : j \in V \setminus V_0) (\forall u_i \in U_i^{pr} : i \in V_0) \\ & (\forall x_{0i} \in R^n : i \in V) (\forall t \geq 0) (\|z(t)\| \leq \beta(\|z(0)\|, t) + \sum_{i \in V_0} \gamma_i (\sup_{\tau \in [0, t]} \|u_i(\tau)\|)), \end{aligned}$$

$(\text{ЛВУ})_0$ получается из (ЛВУ) при нулевых управлениях лидеров, т.е. $u_i(t) \equiv 0$ для всех $i \in V_0$ (при этом в неравенстве (2) второе слагаемое тождественно равно нулю) или в кванторном виде

$$\begin{aligned} (\text{ЛВУ})_0 \equiv & (\exists \beta \in \mathbb{KZ}) (\exists u_j \in U_j^{aff} : j \in V \setminus V_0) (\forall x_{0i} \in R^n : i \in V) (\forall t \geq 0) \\ & (\|z^0(t)\| \leq \beta(\|z^0(0)\|, t)), \end{aligned}$$

где $z^0(t)$ – матрица ошибок, полученная на решениях уравнений (1) при заданных управлениях $u_j \in U_j^{aff}$ для $j \in V \setminus V_0$, $u_i(t) \equiv 0$ для $i \in V_0$ и заданных начальных значениях $x_i(0) = x_{i0} \in R^n, i \in V$.

Очевидно, что $(\text{ЛВУ})_1 \Rightarrow (\text{ЛВУ}) \Rightarrow (\text{ЛВУ})_0$.

Рассмотрим более подробно граф формации, при этом будем придерживаться терминологии из [15, глава 16].

Во-первых, нетрудно показать, что внутренняя устойчивость формации эквивалентна внутренней устойчивости всех подформаций, определяемых компонентами слабой связности графа G . Поэтому в дальнейшем без ограничения общности будем считать, что граф G слабо связный.

Во-вторых, хорошо известно, что ориентированный граф $G = (V, E)$ является бесконтурным тогда и только тогда, когда он допускает перенумерацию вершин с нижней строго треугольной матрицей смежности [15, с. 235, теорема 16.3]. Поэтому с точностью до перенумерации вершин можно считать, что $L_i \subseteq \{1, \dots, i-1\}$. В частности, всегда $L_1 = \emptyset$, т.е. $1 \in V_0$. Также будем считать, что $V_0 = \{1, \dots, l_0\}$.

В дальнейшем нам также понадобится функция $p : V \rightarrow V$, выбирающая для каждого $i > l_0$ номер одного из его ведущих, а для $i \leq l_0$ считаем, что $p(i) = i$. Для определенности будем считать, что $p(i)$ – это ведущий с наибольшим номером.

Используя функцию p , определим рекуррентным образом следующие вектора $D_i \in R^n$: если $i \leq l_0$, то $D_i = 0$, а если $i > l_0$, то $D_i = d_{ip(i)} + D_{p(i)}$.

Необходимые условия для свойства (ЛВУ)₀.

Путь для формации выполняется свойство (ЛВУ)₀. Выберем функцию $\beta \in \text{KZ}$ и управления для объектов с номерами из $V \setminus V_0$, обеспечивающих это свойство, т.е. матрицы $S_i \in R^{m \times n}$, наборы матриц $\{K_{ij}\}_{j \in L_i}$, $K_{ij} \in R^{m \times n}$ и вектора $k_i \in R^m$ такие, что если обозначить $x_i^0(t, x_{i_0}, \dots, x_{i_0})$ – решения задачи Коши для следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i, & \text{если } i \leq l_0, \\ \dot{x}_i = (A_i + B_i S_i) x_i + B_i (\sum_{j \in L_i} K_{ij} x_j + k_i), & \text{если } i > l_0, \end{cases} \quad (3)$$

с начальными условиями $x_i^0(0, x_{i_0}, \dots, x_{i_0}) = x_{i_0}$, $i \in V$, и, соответственно, ошибки $z_{ij}^0(t) = z_{ij}^0(t, x_{i_0}, \dots, x_{i_0}) = x_i^0(t, x_{i_0}, \dots, x_{i_0}) - x_j^0(t, x_{i_0}, \dots, x_{i_0}) + d_{ij}$ при $(i, j) \in E$, то для всех $t \geq 0$ выполняется оценка

$$\|z^0(t)\| \leq \beta(\|z^0(0)\|, t). \quad (4)$$

Из неравенства (4) получаем следующее необходимое условие.

Необходимое условие 1. $\lim_{t \rightarrow 0} z_{ij}^0(t) = 0$ при любых $x_i(0) = x_{i_0} \in R^n$, $i, j \in V$.

Рассмотрим теперь поведение решений системы (3) при нулевых начальных условиях. Обозначим эти решения $\tilde{x}_i^0(t) = x_i^0(t, 0, \dots, 0)$. Так как очевидно, что $\tilde{x}_i^0(t) \equiv 0$ при $i \leq l_0$, то индукцией по i из необходимого условия 1 получаем следующее утверждение.

Предложение 1. Для всех $i \in V$ существует конечный предел $\lim_{t \rightarrow 0} \tilde{x}_i^0(t) = -D_i$, а если $(i, j) \in E$, то $\lim_{t \rightarrow 0} \tilde{x}_i^0(t) = -(d_{ij} + D_j)$ и, следовательно, $d_{ij} = D_i - D_j$.

Для любого $x_0 \in R^n$ обозначим $x_i^* = x_0 - D_i$, $i \in V$ и $z_{ij}^*(t, x_0) = z_{ij}^0(t, x_1^*, \dots, x_i^*)$, тогда из предложения 1 получаем, что $z_{ij}^*(0, x_0) = (x_0 - D_i) - (x_0 - D_j) + d_{ij} = 0$ и поэтому из неравенства (4) вытекает следующее тождество.

Необходимое условие 2. $z_{ij}^*(t, x_0) \equiv 0$, при любых $x_0 \in R^n$, $t \geq 0$, $i, j \in V$.

Дифференцируя это тождество по t и после этого подставляя $t = 0$, получаем следующее утверждение.

Предложение 2. Для любого ребра $(i, j) \in E$ матрицы $S_i, S_j \in R^{m \times n}$ вектора $k_i, k_j \in R^m$ и наборы матриц $\{K_{is}\}_{s \in L_i}$, $\{K_{jv}\}_{v \in L_j}$, $K_{sj}, K_{jv} \in R^{m \times n}$ удовлетворяют следующей системе линейных уравнений:

$$\begin{aligned} A_i + B_i(S_i + \sum_{s \in L_i} K_{is}) &= A_j + B_j(S_j + \sum_{v \in L_j} K_{jv}), \\ B_i(k_i - S_i D_i - \sum_{s \in L_i} K_{is} D_s) - A_i D_i &= B_j(k_j - S_j D_j - \sum_{v \in L_j} K_{jv} D_v) - A_j D_j, \end{aligned}$$

где для $j \in V_0$ считаем, что $S_j = 0$, $\sum_{v \in L_j} K_{jv} = 0$, $k_j = 0$.

Из слабой связности графа G и предложения 2 получаем следующие утверждения.

Предложение 3. Для всех $i \leq l_0$ все матрицы A_i одинаковы, т.е. $A_i = A_1$, а для $i > l_0$ матрицы $S_i \in R^{m \times n}$ вектора $k_i \in R^m$ и наборы матриц $\{K_{ij}\}_{j \in L_i}$, $K_{ij} \in R^{m \times n}$ удовлетворяют следующей системе линейных уравнений:

$$B_i(S_i + \sum_{s \in L_i} K_{is}) = A_1 - A_i, \quad (5)$$

$$B_i(k_i - S_i D_i - \sum_{s \in L_i} K_{is} D_s) = A_i D_i. \quad (6)$$

Из необходимых условий 1 и 2 получаем также следующее утверждение о свойствах матриц $\tilde{A}_i = A_i + B_i S_i$ и A_1 .

Предложение 4. Для всех $i > l_0$ матрицы $\tilde{A}_i = A_i + B_i S_i$ гурвицевы и, следовательно, пары матриц (A_i, B_i) стабилизируемы, а если $l_0 > 1$, то и матрица A_1 гурвицева.

Необходимые и достаточные условия линейной внутренней устойчивости.

Набор условий для наличия свойства $(ЛВУ)_0$ из предложений 1-4 оказался не только необходимым, но и достаточным. Более точно, верно следующее утверждение.

Теорема. Для линейной формации выполняется свойство линейной внутренней устойчивости тогда и только тогда, когда выполнены следующие условия:

1) для всех $i > l_0$ пары матриц (A_i, B_i) стабилизируемы, т.е. существуют матрицы $S_i \in R^{m \times n}$ такие, что матрицы $\tilde{A}_i = A_i + B_i S_i$ гурвицевы;

2) для всех $i > l_0$ существуют матрицы $N_i \in R^{m \times n}$ и вектора $\tilde{k}_i \in R^m$, удовлетворяющие следующим линейным уравнениям:

$$B_i N_i = A_i - A_i, \quad (7)$$

$$B_i \tilde{k}_i = A_i D_i; \quad (8)$$

3) если $(i, j) \in E$, то $d_{ij} = D_i - D_j$;

4) если $l_0 > 1$, то $A_i = A_1$ для всех $i \leq l_0$ и матрица A_1 гурвицева.

При этом если $S_i, N_i \in R^{m \times n}$ и $\tilde{k}_i \in R^m$ удовлетворяют условиям 1), 2) теоремы, то управления ведомых, обеспечивающие линейную внутреннюю устойчивость, можно выбрать в виде

$$u_i(x_1, x_2, \dots, x_i) = S_i(x_i + D_i) + \sum_{j \in L_i} K_{ij}(x_j + D_j) + \tilde{k}_i, \quad (9)$$

где набор матриц $\{K_{ij}\}_{j \in L_i}$, $K_{ij} \in R^{m \times n}$ удовлетворяет соотношению $\sum_{j \in L_i} K_{ij} = N_i - S_i$ независимо от управлений лидеров, т.е. они удовлетворяют и свойству $(ЛВУ)_1$. Кроме того, по формуле (9) получаются все управления, удовлетворяющие свойству $(ЛВУ)_1$.

Сформулируем ряд следствий из этой теоремы.

Так как все необходимые условия получены из свойства $(ЛВУ)_0$, то верно следующее утверждение.

Следствие 1. Свойства $(ЛВУ)_1$, $(ЛВУ)$ и $(ЛВУ)_0$ эквивалентны.

Далее заметим, что в случае, когда у формации больше одного лидера, то в теореме 1 условие 1) является следствием условий 2) и 4), так как можно взять $S_i = N_i$.

Следствие 2. Для линейной формации, имеющей больше одного лидера, выполняется свойство линейной внутренней устойчивости тогда и только тогда, когда выполнены следующие условия:

1) $A_i = A_1$ для всех $i \leq l_0$ и матрица A_1 гурвицева;

2) выполняются условия условий 2) и 3) теоремы 1.

При этом если $N_i \in R^{m \times n}$ и $\tilde{k}_i \in R^m$ удовлетворяют условию 2) теоремы 1, то управления ведомых, обеспечивающие внутреннюю устойчивость, можно выбрать в виде

$$u_i(x_i) = N_i(x_i + D_i) + \tilde{k}_i,$$

независимо от состояний ведущих и управлений лидеров.

Далее рассмотрим случай формаций, для которых условие 3) теоремы 1 отсутствует. Это формации, граф которых является входящим деревом [15, с. 235], т.е. слабо связным бесконтурным графом, не имеющим полуконтуров, со стоком. Согласно [15, с. 236, теорема 16.4] у формации с таким графом будет один лидер и, кроме того, у всех остальных объектов будет единственный ведущий.

Следствие 3. Для линейной формации, граф которой является входящим деревом, выполняется свойство линейной внутренней устойчивости тогда и только тогда, когда выполняются условия 1), 2) теоремы 1.

При этом если $S_i, N_i \in R^{m \times n}$ и $\tilde{k}_i \in R^m$ удовлетворяют условиям 1), 2) теоремы 1, то управления ведомых, обеспечивающие внутреннюю устойчивость, можно выбрать в виде

$$u_i(x_i, x_{p(i)}) = S_i(x_i + D_i) + (N_i - S_i)(x_{p(i)} + D_{p(i)}) + \tilde{k}_i,$$

независимо от управления лидера.

1. Balch T., Arkin R.C. Behavior-Based Formation Control for Multirobot // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1998. Vol. 14, № 6. P. 926–939.
2. Tanner H.G., Pappas G.J. Formation input-to-state stability // Proc. 15th IFAC World Congr. Autom. Control. Barcelona, 2002. P. 1512-1517.
3. Tanner H.G., Kumar V., Pappas G.J. Stability properties of interconnected vehicles // Proc. 15th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems. South Bend, Indiana, 2002. P. 1-12. Paper number 4615–2. [CD-ROM].
4. Tanner H.G., Pappas G.J., Kumar V. Input-to-state Stability on Formation Graphs // Proc. 41st IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas, NV, 2002. P. 2439-2444.
5. Tanner H.G., Pappas G.J., Kumar V. Leader-to-formation stability // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2004. Vol. 20, № 3. P. 443–455.
6. Oh K.K., Park M.C., Ahn H.S. A survey of multi-agent formation control // Automatica. 2015. Vol. 53. P. 424-440.
8. Lü J., Chen F., Chen G. Nonsmooth leader-following formation control of nonidentical multi-agent systems with directed communication topologies // Automatica. 2016. Vol. 64. P. 112–120.
9. Sontag E.D. Smooth stabilization implies coprime factorization // IEEE Trans. Automat. Control. 1989. Vol. 34, № 4. P. 435–443.
10. Sontag E. D., Wang Y. On characterizations of the input-to-state stability property // Systems & Control Letters. 1995. Vol. 24, № 5. P. 351-359.
11. Дашковский С.Н., Ефимов Д.В., Сонтаг Э.Д. Устойчивость от входа к состоянию и смежные свойства систем // АиТ. 2011. № 8. С. 3–40.
7. Васильев С.Н., Козлов Р.И., Ульянов С.А. Анализ координатных и других преобразований моделей динамических систем методом редукции // Труды института математики и механики УрО РАН. 2009. Т. 15, № 3. С. 38-55.
8. Васильев С.Н., Козлов Р.И., Ульянов С.А. Устойчивость многорежимных формаций // Доклады академии наук. 2014. Т. 455, № 3. С. 269-274.
9. Ul'yanov S. Maksimkin N. Formation path-following control of multi-AUV systems with adaptation of reference speed // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. 2019. Vol. 10, № 3. P. 487-500.
10. Халил Х. К. Нелинейные системы. М.: РХД, 2009.
11. Харари Ф. Теория графов. М.: Мир, 1973.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ДЛЯ КЛАССА ПОЗИТИВНО-ОБРАЗОВАННЫХ ФОРМУЛ БЕЗ НЕОГРАНИЧЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

А.А. Ларионов

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

bootfrost@zoho.com

Язык позитивно-образованных формул (ПОФ) изначально разработан С.Н. Васильевым и А.К. Жерловым для описания и решения задач теории управления [1, 2]. Были реализованы программные системы для автоматического поиска логического вывода в исчислении ПОФ («пруверы») [3]. Реализован ряд методов, улучшающих эффективность поиска логического вывода: индексирование термов, разделяемые структуры данных, стратегии параллельного вывода, стратегии отсроченного присваивания, поиск вывода с возвратом, обработка предикатов равенства, эвристические подходы. Однако тестирование разработанного прuverа на задачах из библиотеки ТРТР [4] (Thousands of Problems for Theorem Provers – библиотека задач, де-факто ставшая стандартом среди сообщества, изучающего автоматизацию рассуждений) в среднем не показало каких-либо преимуществ перед прuverами, основанными на иных методах поиска логического вывода. Преимущества исчисления ПОФ без функциональных символов, указанные в [1, 2], при наличии последних, исчезают. Возникает необходимость перебора эрбрановского универсума, что влечет за собой значительные затруднения при поиске вывода. Таким образом, класс ПОФ без каких-либо ограничений не имеет преимуществ перед иными формализмами с точки зрения реализации стратегий поиска логического вывода, а класс ПОФ без функциональных символов является достаточно узким и уступает по своей выразительности формализмам с функциональными символами.

Следующим шагом стал поиск классов ПОФ, для которых сохраняются положительные свойства, но которые при этом обладают достаточной выразительностью в сравнении с другими формализмами. Для этого был разработан специальный транслятор [5] задач из библиотеки ТРТР в ПОФ и анализатор полученных формул, размер которых в текстовом виде достигал для некоторых задач порядка 1Гб. Из 6000 задач было выделено два класса ПОФ, для которых возможна эффективная и более специализированная реализация всех перечисленных выше методов. Первый класс формул (всего 1001 задача) представляет собой ПОФ без неограниченных переменных. В языке ПОФ неограниченная переменная – это переменная, управляемая квантором всеобщности, но отсутствующая в его типовом условии (конъюнкте). Второй класс ПОФ представляет собой ПОФ с неограниченными переменными, но без дизъюнктивных ветвлений, с точки зрения выразительности эквивалентна хорновским формулам, являющимся теоретической основой языка Пролог.

В текущей версии прuverа были реализованы все предложенные ранее методы логического вывода, специализированные для класса ПОФ без неограниченных переменных, кроме стратегии отсроченного присваивания, так как она была направлена на отсроченную конкретизацию неограниченных переменных. Процедура унификации заменена на процедуру матчинга (частный случай унификации, когда одним из унифицируемых термов является основной терм – терм, не имеющий в своем составе переменных). Система разработана на языке Rust и представляет из себя ядро логического вывода с функцией прямого перебора. Все стратегии, в том числе предметно-ориентированные, подключаются как отдельные модули и срабатывают независимо друг от друга, что упрощает разработку новых стратегий вывода и делает систему более гибкой. Поскольку в процессе логического вывода генерируется большой объем

новых формул, в качестве хранилища данных можно использовать не только оперативную память, но и твердотельные накопители. Тестирование проводилось также на задачах из библиотеки TPTP. Использовался компьютер MacBookPro с процессором 2,3GHz Intel Corei7 и оперативной памятью 8GB 1600 MHz DDR3. Из 252 тестовых задач решено 203 задачи: для 52 логически выведено противоречие и для 151 доказана невыводимость противоречия. Оставшиеся 49 задач требуют более длительных экспериментов с использованием больших вычислительных ресурсов.

Дальнейшая работа представляет собой формализацию и решение прикладных задач в классе позитивно-образованных формул без неограниченных переменных.

1. Vassiliev S.N. Machine Synthesis of Mathematical Theorems // The Journal of Logic Programming. 1990. Vol. 9, № 2-3. P. 235-266.
2. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федунев Е.А., Федосов Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. 352 с.
3. Cherkashin E.A., Davydov A.V., Larionov A.A. Calculus of positively-constructed formulas, its features, strategies and implementation // Proc. 36-th Intern. convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO'2013/CIS, 20-24 may 2013). Croatia, Opatija, 2013. P. 1289-1295.
4. Sutcliffe G. The TPTP Problem Library and Associated Infrastructure. The FOF and CNF parts, v3.5.0/ Journal of Automated Reasoning. 2009. Vol. 43, № 4. P. 337-362.
5. Давыдов А.В., Ларионов А.А., Черкашин Е.А. Метод трансляции первопорядковых логических формул в позитивно-образованные формулы // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32, № 4. С. 197–206.

О ПРИМЕНЕНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ФЕТАЛЬНОГО АЛКОГОЛЬНОГО СИНДРОМА (ФЕТАЛЬНОГО АЛКОГОЛЬНОГО СПЕКТРА НАРУШЕНИЙ)

Ф.С. Малков^{1,2}, А.Ю. Марьянн^{3,4}.

¹Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН

²Иркутский национальный исследовательский технический университет

³ФГБНУ Научный центр проблем здоровья семьи и репродукции человека

⁴ИГМАПО – филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России

malkov@icc.ru, anait_24@mail.ru

Фетальный алкогольный синдром (ФАС) или алкогольный синдром плода представляет сочетание невральных и экстраневральных аномалий, проявляющихся ante- или постнатальным поражением нервной системы, нарушением роста тела, характерными лицевыми дисморфиями, которые встречаются у младенцев, родившихся от женщин, употребляющих алкоголь во время беременности. Фетальный алкогольный спектр нарушений (ФАСН) – диапазон последствий, которые могут случиться у индивидуума, мать которого употребляла алкоголь в течение беременности. Эти последствия могут включать физические, умственные, поведенческие нарушения, и/или нарушения в обучении с возможными пожизненными последствиями.

На сегодняшний день практически все исследователи измеряют ФАС/ФАСН с помощью ручных измерений [1]. Некоторые исследователи используют специальное программное обеспечение [2], в котором также в ручном режиме, по фотографии и масштабному маркеру проводят измерения. В то же время имеется ряд исследований, основанных на поиске и измерении лицевых ориентиров [3] и анализе тепловых карт [4] по 3D моделям. В настоящий момент все исследования, связанные с применением информационных технологий для анализа ФАС/ФАСН, носят локальный исследовательский характер и не имеют какого-либо распространения среди исследователей ФАС/ФАСН во всем мире.

В докладе рассматриваются вопросы разработки информационной системы исследования фетального алкогольного синдрома и фетального алкогольного спектра нарушений на основе нахождения необходимых лицевых ориентиров, их измерения, исходя из размещаемого на исследуемом маркере. В том числе обсуждаются возможности автоматизации сбора данных, необходимых для анализа и оценки сглаженности губного желобка.

1. Hoyme H. E., Kalberg W. O., Elliott A. J., Blankenship J., Buckley D., Marais A.-S., Manning M. A., Robinson L. K., Adam M. P., Abdul-Rahman O., Jewett T., Coles C. D., Chambers C., Jones K. L., Adnams C. M., Shah P. E., Riley E. P., Charness M. E., Warren K. R., May P. A. Updated Clinical Guidelines for Diagnosing Fetal Alcohol Spectrum Disorders // *Pediatrics*. 2016. Vol. 138, № 2.
2. Susan J. Astley. FAS Facial Analysis Software [Электронный ресурс]. URL: https://depts.washington.edu/fasdpn/pdfs/FAS_Instruction_Manual_v2.1.0-050616.pdf (дата обращения: 24.05.2019).
3. Mutsvangwa T. E. M., Smit J., Hoyme H. E., Kalberg W., Viljoen D. L., Meintjes E. M., Douglas T. S. Design, construction, and testing of a stereo-photogrammetric tool for the diagnosis of fetal alcohol syndrome in infants // *IEEE transactions on medical imaging*. 2009. Vol. 28, № 9. P. 1448–1458.
4. Murawski N. J., Moore E. M., Thomas J. D., Riley E. P. Advances in Diagnosis and Treatment of Fetal Alcohol Spectrum Disorders: From Animal Models to Human Studies // *Alcohol research: current reviews*. 2015. Vol. 37, № 1. P. 97–108.

АНАЛИЗ МАССИВОВ ДАННЫХ ЗАЯВЛЕНИЙ ГРАЖДАН В МФЦ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ*

А.А. Михайлов, А.Е. Хмельнов, Г.М. Ружников

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

В работе рассматривается задача построения предсказательной компьютерной модели на основе данных обращения граждан в отделение МФЦ Иркутской области с использованием методов машинного обучения.

В общем случае задача машинного обучения формулируется следующим образом. Дано некоторое множество признаков X и множество ответов Y . Требуется по этим частным данным выявить неизвестную закономерность, присущую не только этим данным, но и вообще всем прецедентам, даже тем, которые еще не наблюдались. Для решения задачи обучения по прецедентам в первую очередь фиксируется модель, которая будет восстанавливать неизвестную зависимость. Далее выбирается функция оценки качества предсказаний, значения которой характеризуют, насколько хорошо модель описывает наблюдаемые данные. Алгоритм обучения подбирает оптимальный набор параметров в соответствии с функцией оценки качества.

Для анализа работы МФЦ Иркутской области и построения предсказательной модели были получены обезличенные базы данных из системы электронной очереди МФЦ. На основе этих данных задача построения предсказательной модели с использованием методов искусственного интеллекта представляет собой последовательность шагов: подготовка данных (формирование множества признаков и ответов), выбор алгоритма машинного обучения, обучение. В обобщенном виде процесс построения модели изображен на рисунке.



* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области, проект № 17-47-380007.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ СОЗДАНИЯ АГЕНТНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ADSKIT *

О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Б. Столбов

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
nik@icc.ru, asd@icc.ru, stolboff@icc.ru

Система ADSkit (Agent Development Support kit) – это программный комплекс, создаваемый в ИДСТУ СО РАН, задачей которого является поддержка процесса разработки агентных имитационных моделей (АИМ). ADSkit базируется на следующих принципах: нацеленность на специалистов-предметников, не имеющих существенных навыков программирования; использование настраиваемого процесса разработки АИМ путем обеспечения возможности интеграции в ADSkit существующих методик, а также их последующей модификации; ориентация на современные средства разработки программного обеспечения, включая библиотеки для разработки многоагентных систем и АИМ.

ADSkIt разрабатывается на основе авторской инструментальной платформы для создания систем, основанных на знаниях [1, 2], которая позволяет использовать концептуальные модели предметной области, продукции и элементы визуального программирования для описания структуры и поведения элементов АИМ. Конкретная реализация АИМ рассматривается как некоторая программа, обладающая специфичным поведением и функционирующая в гетерогенной среде. С учетом этого для разработки АИМ в системе ADSkit применяется модельно-управляемый подход [3], который для представления информации о структуре и поведении элементов АИМ предполагает разработку четырехуровневой системы моделей и метамodelей (нижний уровень – это АИМ во время ее выполнения), а также методов их трансформаций [4]. Упомянутая система моделей разрабатывается на основе онтологического подхода [5], в рамках которого создаются онтологии предметной и проблемной областей, онтологии верхнего уровня и онтологии приложения. В процессе разработки данные онтологии в свою очередь также детализируются. Например, в онтологии проблемной области выделены онтологии метода и задачи.

Реализация научного прототипа ADSkit осуществлена в виде веб-ориентированной системы с использованием современных программных средств, не имеющих лицензионных ограничений по типу применения: Madkit, JADE (академическая лицензия), DROOLS, PostgreSQL, jQueryUI, jQueryGrid, jsPlumb, Apache и Node.js.

1. Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I., Stolbov A.B. The software platform architecture for the component-oriented development of knowledge-based systems // Proc. of the Intern. Conf. “MIPRO 2018”. Croatia, 2018. P. 1234–1239.
2. Pavlov A.I., Stolbov A.B., Dorofeev A.S. The workflow component of the knowledge-based systems development platform // CEUR Workshop Proceedings, 2nd Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems, ITAMS 2019. 2019. Vol. 2463. P. 47–58.
3. 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.
4. Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I., Stolbov A.B. The Agent-Based Modeling Method for the Study of Unique Mechanical Systems // Advances in Intelligent Systems Research. 2019. Vol. 166. P. 201–206.
5. Berman A., Nikolaychuk O., Pavlov A. The Ontology Model for Automating the Solution of Multidisciplinary Research Tasks // Advances in Intelligent Systems Research. 2018. Vol. 158. P. 1–6.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке №18-07-01164.

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ FO F2

Б.Г. Салимов¹, А.Е. Хмельнов²

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН

salimov@iszf.irk.ru, hmelnov@icc.ru

Одной из областей применения машинного обучения является задача восстановления функциональной зависимости определенного явления на основе известных данных. В общем случае этот поиск можно выразить в подборе таких параметров модели, при которых ошибка предсказания моделируемого результата будет минимальной.

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (F(\vec{x}_i) - \hat{F}(\vec{x}_i, \vec{\theta}))^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

где M — количество наблюдений, \vec{x}_i — вектор признаков явления, $\vec{\theta}$ — вектор коэффициентов модели, F — реальная зависимость, \hat{F} — моделируемая зависимость.

В сложных физических средах, таких, как ионосфера, протекают процессы, которые непросто смоделировать, используя лишь одни физические законы. Однако накопленные данные ионосферных наблюдений позволяют применить машинное обучение для построения эмпирических моделей, которые с некоторой точностью позволяют восстанавливать функциональную зависимость одних физических параметров от других. Определенный интерес представляет зависимость критической частоты ионосферы (foF2) от различных солнечных и геофизических индексов. Вычисление данной частоты имеет важное значение для радиосвязи, так как она определяет характеристики отраженной от ионосферы радиоволны.

Существует множество методов машинного обучения. В данной работе предлагается провести сравнительный анализ и сравнить их качество при предсказании критической частоты foF2 в г. Иркутске. В качестве обучающей выборки были использованы значения солнечных и геомагнитных индексов, а также временные характеристики с 2009 по 2016 г. [1].

Для данного анализа предлагается рассмотреть популярные методы восстановления регрессии: искусственную нейронную сеть, градиентный бустинг и случайный лес. Искусственная нейронная сеть (ИНС) — математическая модель, представляющая собой комбинацию математических нейронов (персептронов), объединенных в слои, связанные между собой. Случайный лес (СЛ) — метод построения ансамбля слабых моделей решающих деревьев (с плохой обобщающей способностью), комбинация которых позволяет добиться приемлемого качества общей модели. Градиентный бустинг (ГБ) над решающими деревьями — подход к построению модели, где итеративно уменьшается ошибка модели с помощью последовательного построения деревьев решений, уменьшающих эту ошибку [2].

Исследование показало, что модель нейронной сети обладает чуть лучшими показателями качества при ее проверке на валидационной выборке, чем методы, основанные на деревьях решений. Кривая обучения модели градиентного бустинга показала, что во время обучения наступает определенный момент, после которого нет смысла увеличивать количество деревьев, из которых состоит модель, так как она начинает переобучаться (т.е. начинает увеличиваться ошибка предсказания на валидационной выборке), поэтому на каждой итерации обучения важно отслеживать величину функции потерь, использующуюся при оптимизации данного алгоритма, не только на обучающей, но и на валидационной выборке.

1. Салимов Б.Г., Хмельнов А.Е., Бернгардт О.И. Построение модели foF2 по индексам солнечной и геомагнитной активности и данным иркутского дигизонда // Материалы конф. «Ляпуновские чтения». Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2018. С. 74.
2. Friedman J.H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. Ann. Statist. 2001. Vol. 29, № 5. P. 1189 – 1232.

О ТЕХНИКЕ СКЛЕИВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ В ПСЕВДОБУЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А.А. Семенов, И.В. Отпущенников

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
biclop.rambler@yandex.ru, otilya@yandex.ru

В докладе речь пойдет о метаэвристической стратегии дискретной оптимизации, которая была описана в [1]. В основе этой стратегии лежит специальная техника, получившая название «склеивание переменных» (merging variables).

Рассматривается задача максимизации произвольной псевдобулевой [2] функции

$$f: \{0,1\}^n \rightarrow \mathbf{R}. \quad (1)$$

Везде далее предполагается, что f определена всюду на булевом гиперкубе $\{0,1\}^n$ и значения этой функции выдаются оракулом O_f (т.о., процесс вычисления значений f не принимается во внимание).

Свяжем с каждой координатой произвольного вектора из $\{0,1\}^n$ булеву переменную, обозначим полученное множество через $X = \{x_1, \dots, x_n\}$. Введем новое множество переменных $Y = \{y_1, \dots, y_r\}$, $r < n$, и рассмотрим произвольную сюръекцию $\mu: X \rightarrow Y$. Отображение μ — это склеивающее отображение (merging mapping). В [1] показано, как с использованием произвольного склеивающего отображения μ построить специальное пространство D^μ и поставить в этом пространстве задачу максимизации функции $F_{f,\mu}: D^\mu \rightarrow \mathbf{R}$, которая называется μ —сопряженной к f . Показывается, что существует биекция между $\{0,1\}^n$ и D^μ и максимальное значение f на $\{0,1\}^n$ совпадает с максимальным значением $F_{f,\mu}$ на D^μ .

Произвольное μ будет порождать для каждой точки из $\{0,1\}^n$ окрестность специального вида и различные μ будут задавать различные системы окрестностей (neighborhood structure) на $\{0,1\}^n$. Таким образом, использование различных склеивающих отображений μ в рамках решения задачи максимизации одной функции вида (1) можно рассматривать как вариант известной стратегии поиска с переменными окрестностями (Variable Neighborhood Search) [3].

Склеивающие отображения можно также использовать совместно с хорошо известным (1+1)-Evolutionary Algorithm ((1+1)-EA) [4]. В [1] описан вариант (1+1)-EA, использующий отображение μ . Показано, что полученный алгоритм сохраняет ряд важных свойств оригинального (1+1)-EA, но при этом имеет асимптотически лучшую верхнюю оценку сложности.

Стратегия склеивания переменных в сочетании с алгоритмом Hill Climbing на $\{0,1\}^n$ была программно реализована в форме многопоточного приложения и применена к решению специальных вариантов задачи MAXSAT, кодирующих обращение некоторых криптографических хеш-функций. Полученный алгоритм на данном классе задач показал существенно более высокую эффективность в сравнении с лучшими многопоточными SAT-решателями.

1. Semenov A. Merging Variables: One Technique of Search in Pseudo-Boolean Optimization // CCIS. 2019. Vol. 1009 (MOTOR-2019). P. 86-102.
2. Boros E., Hammer P.L. Pseudo-Boolean Optimization // Discrete Appl. Math. 2002. Vol. 123, № 1–3. P. 155–225.
3. Mladenovich N., Hansen P. Variable Neighborhood Search // Computers and Operations Research. 1997. Vol. 24, № 11. P. 1097-1100.
4. Rudolph G. Convergence properties of evolutionary algorithms. Ph.D. thesis, Hamburg (1997).

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КЛАСТЕРЫ САТТОНА-ЧЕНА РАЗМЕРНОСТЕЙ ОТ 81 ДО 130 АТОМОВ*

П.С. Сороковиков

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
sorokovikov.p.s@gmail.com

Одной из классических проблем вычислительной химии является задача поиска низкоэнергетических металлических кластеров, сводящаяся к глобальной минимизации потенциальных функций – специальных моделей (см., напр., [1]). Типичный представитель указанного класса задач – потенциал Саттона-Чена [2], часто используемый в расчетах свойств нанокластеров таких металлов, как серебро, родий, никель, медь, золото, платина. Потенциальная функция является невыпуклой, имеет огромное количество локальных экстремумов, которое очень быстро растет в зависимости от числа переменных.

Работа посвящена поиску вероятных оптимальных конфигураций для кластеров Саттона-Чена сверхбольших размерностей. Целевая функция имеет следующий вид:

$$f(x) = \varepsilon \sum_i \left[\frac{1}{2} \sum_{j \neq i} \left(\frac{a}{r_{ij}} \right)^n - c \sqrt{\sum_{j \neq i} \left(\frac{a}{r_{ij}} \right)^m} \right] \rightarrow \min, \quad r_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^3 \left(x_{3(i-1)+k} - x_{3(j-1)+k} \right)^2},$$

где $\varepsilon = 1.0$, $c = 144.41$, $a = 1.0$, $n = 12.0$, $m = 6.0$ – специальные параметры.

С помощью алгоритмического и программного обеспечения, представленного в [3], были проведены системные расчеты для кластеров Саттона-Чена из 81 – 130 атомов (см. табл. 1).

Таблица 1. Наилучшие найденные значения оптимизируемой функции

N	Значение	N	Значение	N	Значение
81	-79382.0486	101	-100559.4244	121	-121197.8264
83	-81403.5270	103	-102339.0141	122	-122239.0746
85	-83552.3954	105	-104635.8467	123	-123161.0703
87	-85627.6685	107	-106534.7214	124	-124338.9616
89	-87689.9154	109	-108639.6763	125	-125544.1312
91	-89817.3875	111	-110675.4711	126	-126394.8683
93	-91827.6375	113	-112899.2666	127	-127376.7934
95	-93916.8247	115	-115064.4226	128	-128348.7348
97	-96121.8664	117	-117002.2997	129	-129626.4128
99	-98222.4219	119	-119356.7139	130	-130585.2199

Автору неизвестно о других попытках проведения системных расчетов для кластеров Саттона-Чена указанных размерностей.

1. The Cambridge Energy Landscape Database. URL: <http://www-wales.ch.cam.ac.uk/CCD.html>.
2. Doye J.P.K., Wales D.J. Global minima for transition metal clusters described by Sutton–Chen potentials // New journal of chemistry. 1998. Vol. 22, No. 7. P. 733–744.
3. Anikin A., Gornov A., Sorokovikov P. Algorithms for global minimum search of atomic–molecular clusters of extremely large dimensions // Системный анализ: моделирование и управление: Материалы Междунар. конф., посвященной памяти академика А.В. Кряжжского. М.: МАКС Пресс, 2018. С. 9–10.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-07-00587.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ НЕВЫПУКЛОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С СИСТЕМАТИЧЕСКИМ РАЗДЕЛЕНИЕМ НА НЕСКОЛЬКО МНОЖЕСТВ*

П.С. Сороковиков

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
sorokovikov.p.s@gmail.com

Работы по созданию численных методов решения задач невыпуклой оптимизации в последние годы ведутся все активнее во многих научных организациях как в России, так и за рубежом. К настоящему времени исследователями представлено большое количество методов и алгоритмов различных типов [1], отличающихся друг от друга вычислительными характеристиками. При этом многообразие задач глобального поиска не позволяет найти единый метод, позволяющий с высокой эффективностью решать любые задачи. Следовательно, представляются целесообразными создание библиотеки алгоритмов с систематическим разделением на несколько подмножеств, сравнительный анализ как подмножеств алгоритмов между собой, так и алгоритмов внутри каждого подмножества с помощью проведения многовариантных вычислительных экспериментов на коллекции тестовых задач. Работа посвящена разработке вышеуказанных вычислительных технологий решения задач невыпуклой оптимизации с прямыми ограничениями.

В работе не рассматриваются алгоритмы, требующие больших затрат оперативной памяти компьютера (интервальные, диагональные методы, методы семейства «alfa-BB» и другие) в связи с жесткими ограничениями на классы и размерности решаемых задач. Библиотека алгоритмов разработана на языке C и включает в себя приведенные ниже подмножества методов.

I. Методы глобального одномерного поиска (11 алгоритмов).

- 1.1. Алгоритмы, основанные на условии Липшица (Гельдера) функции [2] (4 алгоритма: модификации методов Евтушенко, Пиявского, Стронгина, комбинированный алгоритм на основе методов Стронгина и «парабол»).
- 1.2. Алгоритмы, основанные на условии Липшица производной функции [3] (2 алгоритма: модификация метода Брента, алгоритм Lera–Сергеева).
- 1.3. Алгоритмы, основанные на эвристической идеологии [4] (2 алгоритма: модификация метода «парабол», алгоритм «сжимающего перебора»).
- 1.4. Семейство «вероятностных» R-алгоритмов Жиглявского–Жилинскаса (3 алгоритма: методы на основе гладких, винеровских, интегрально-винеровских моделей процессов).

II. Поисковые методы многомерной невыпуклой оптимизации (21 алгоритм).

- 2.1. Алгоритмы, основанные на методах глобального одномерного поиска [4–5] (7 алгоритмов: модификации многомерного метода «парабол», туннельного алгоритма, метода Пауэлла, партан-метода, методов Розенброка, криволинейного поиска, сферического поиска).
- 2.2. Поисковые алгоритмы, не использующие методы одномерной оптимизации (5 алгоритмов: метод Растригина, модификация метода Лууса-Яаколы, метод поиска с запретами, метод случайных покрытий, экспертный метод).
- 2.3. Поисковые алгоритмы, «вдохновленные» живой природой [6] (9 алгоритмов).
 - 2.3.1. Эволюционные алгоритмы (2 алгоритма: модификация генетического алгоритма, метод дифференциальной эволюции).
 - 2.3.2. Популяционные алгоритмы (4 алгоритма: метод биогеографии, метод роя частиц, алгоритм светлячков, алгоритм опыления цветков).

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-37-90065.

2.3.3. Алгоритмы, «вдохновленные» неживой природой и человеческим обществом (3 алгоритма: метод гармонического поиска, алгоритм обучения, культурный алгоритм).

III. Градиентные методы локального поиска (квазиньютоновские BFGS, L-BFGS, методы сопряженных градиентов).

Тестирование алгоритмов необходимо для исследования их свойств, особенностей, преимуществ и недостатков, выявления классов задач, на которых они наиболее эффективны, определения областей их применимости. В качестве типа тестирования в данной работе используется сравнительное тестирование, которое заключается в решении тестовых задач разными алгоритмами с целью дальнейшего сопоставления результатов и выбора наилучших вариантов алгоритмов. Качество алгоритма оценивается по трем критериям [7]: точность (способность находить решение, достаточно близкое к эталонному), надежность (способность находить приемлемое решение для любой задачи из множества задач, для которого он предназначен), эффективность (способность находить решение задачи за приемлемое число вызовов целевой функции). Коллекция тестовых задач включает в себя как модельные, так и содержательные задачи невыпуклой оптимизации с прямыми ограничениями.

На основе проведенного тестирования можно сделать вывод о работоспособности предложенной методики разделения библиотеки алгоритмов на подмножества. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Floudas C.A., Pardalos P.M. Encyclopedia of optimization. Springer Science & Business Media, 2001.
2. Sorokovikov P. Nonlocal algorithms for one-dimensional search based on the Holder condition // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Nonlinear Analysis and Extremal Problems (NLA-2018). Irkutsk: ISDCT SB RAS, 2018. P. 128–129.
3. Сороковиков П.С. Программная реализация метода Брента для мономерной задачи оптимизации с автоматической оценкой константы Липшица // Материалы конф. «Ляпуновские чтения». Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2018. С. 77.
4. Gornov A., Sorokovikov P., Zarodnyuk T. Computational technology for global search based on modified algorithm of the univariate nonlocal optimization // Advances in Intelligent Systems Research: Proc. of the VI Intern. Workshop “Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security” (IWCI 2019). Atlantis Press, 2019. P. 189–193.
5. Sorokovikov P. Software implementation of algorithms for global minimum search based on nonlocal methods for one-dimensional optimization // Book of Abstracts of the IX Intern. Conf. “Optimization and Applications” (OPTIMA-2018). M.: DCC RAS, 2018. P. 158.
6. Khandarov F., Sorokovikov P. Numerical study of bioinspired methods for solving global optimization problems // Abstracts of the 17th Baikal intern. school-seminar “Methods of Optimization and Their Applications”. Irkutsk: ESI SB RAS, 2017. P. 45.
7. Горнов А.Ю. Вычислительные технологии решения задач оптимального управления. Новосибирск: Наука, 2009.

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ*

П.С. Сороковиков, Т.С. Зароднюк

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
sorokovikov.p.s@gmail.com, tz@icc.ru

Задачи оптимального управления (оптимизации динамических систем, траекторной оптимизации) повсеместно возникают при рассмотрении и исследовании механических систем. Одним из самых актуальных и современных классов задач траекторной оптимизации являются прикладные задачи из области управления роботами. Многие задачи данного класса являются задачами оптимального быстродействия, которые заключаются в минимизации времени перевода системы из одной точки в другую. Характерной особенностью подобных задач является наличие фазовых ограничений на траектории управляемой системы.

Работа посвящена численному решению задачи оптимального управления мобильным роботом с фазовыми ограничениями [1–3]. Математическая модель мобильного робота описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0.5(u_1 + u_2) \cos(x_3), \\ \dot{x}_2 = 0.5(u_1 + u_2) \sin(x_3), \\ \dot{x}_3 = 0.5(u_1 - u_2). \end{cases}$$

На управления накладываются ограничения: $|u_i(t)| \leq 10, i = \overline{1, 2}$. Фазовые координаты должны удовлетворять следующим неравенствам:

$$g_1(x) = 1.5 - \sqrt{(x_1 - 2.5)^2 + (x_2 - 2.5)^2} \leq 0,$$

$$g_2(x) = 1.5 - \sqrt{(x_1 - 7.5)^2 + (x_2 - 7.5)^2} \leq 0,$$

$$g_3(x) = 3 - \sqrt{(x_1 - 2)^2 + (x_2 - 8)^2} \leq 0,$$

$$g_4(x) = 3 - \sqrt{(x_1 - 8)^2 + (x_2 - 2)^2} \leq 0.$$

Задача заключается в переводе системы из точки $x(t_0) = (10, 10, 0)$ в точку $x(t_1) = (0, 0, 0)$ при выполнении всех ограничений за минимально возможное время $t_1, t \in [0, t_1]$.

Все фазовые ограничения были приведены к терминальному $x_4(t_0) = 0$ путем введения кубических штрафных функционалов, позволяющих сохранить свойство непрерывности вторых производных, следующим образом:

$$\dot{x}_4 = K \sum_{i=1}^4 \theta(g_i(x)) g_i^3(x),$$

где $\theta(A) = \begin{cases} 1, & A > 0, \\ 0, & A \leq 0 \end{cases}$ – функция Хевисайда, $K \rightarrow \infty$ – параметр штрафа. После данного

преобразования задача приняла стандартный вид задачи оптимального управления с терминальными ограничениями [4]. Таким образом, целевой функционал имеет следующую структуру: $I_0(u) = t_1 + x_4 \rightarrow \min$.

Для численного решения задачи используется дискретизация системы дифференциальных уравнений и приближенные методы решения задачи Коши. Отрезок измене-

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

ния времени делится на $n_u - 1$ частей, т.е. строится равномерная сетка, в узлах которой запоминаются управления и траектории (n_u – число точек дискретизации). Тип аппроксимации управления – кусочно-линейный.

Терминальная задача решалась с помощью многометодной вычислительной схемы, включающей как поисковые (методы «парабол», Пауэлла, Растригина), так и градиентные (BFGS, метод сопряженных градиентов) алгоритмы. Градиенты считались по разностным схемам. В ходе решения удалось получить оптимальное значение функционала $I_0^*(u) = 2,48$ и траектории, которые несколько лучше по сравнению с результатами расчетов, приведенных в [3] (значение функционала $-2,51$). На рис. 1 представлены оптимальные траектории движения мобильного робота для найденного решения: на плоскости (слева), в зависимости от времени (справа). Предложенный подход и примененная многометодная вычислительная схема показали свою работоспособность при решении прикладных задач из области управления роботами.

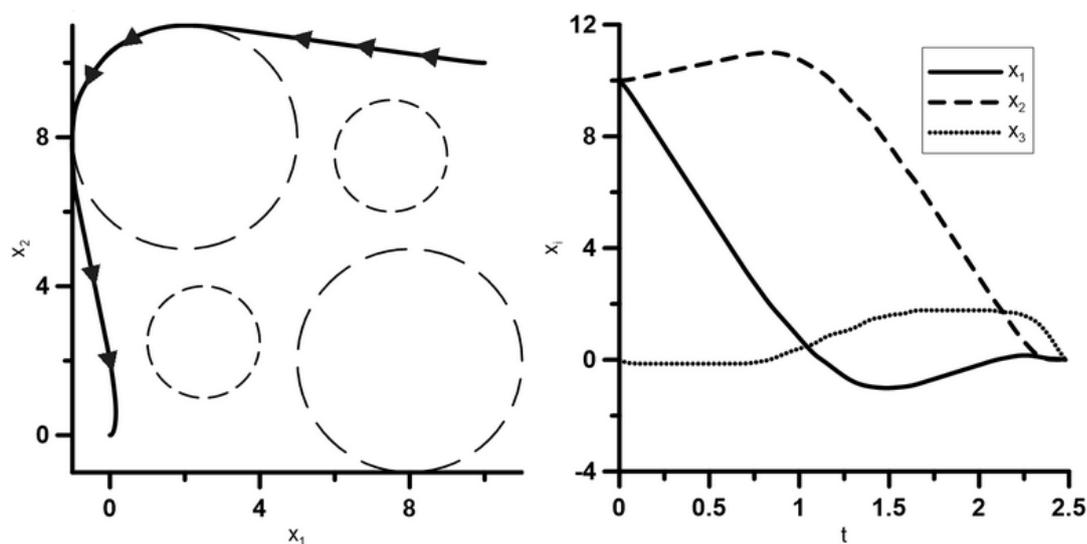


Рис. 1. Оптимальные траектории движения мобильного робота: на плоскости (слева), в зависимости от времени (справа)

1. Рапопорт Л.Б. Оценка области притяжения в задаче управления колесным роботом // Автоматика и телемеханика. 2006. № 9. С. 69–89.
2. Пестерев А.В. Синтез линеаризующего управления в задаче стабилизации движения автомобилеподобного робота вдоль криволинейного пути // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2013. № 5. С. 153–165.
3. Дивеев А.И., Константинов С.В. Исследование эволюционных алгоритмов для решения задачи оптимального управления // Труды Московского физико-технического института. 2017. Т. 9, № 3. С. 76–85.
4. Горнов А.Ю. Вычислительные технологии решения задач оптимального управления. Новосибирск: Наука. 2009.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС OPTCON-IEOPP, ВЕРСИЯ 2019 г. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИЛОЖЕНИЯ*

В.И. Суслов¹, А.Ю. Горнов², А.С. Аникин², Т.С. Зароднюк²

¹Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
suslov@ieie.nsc.ru, gornov@icc.ru, anikin@icc.ru, tz@icc.ru

В рамках Интеграционного проекта Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018-2020 гг. «Подходы к разработке стратегий и программ социально-экономического развития сибирских регионов ресурсного типа с экстремальными природно-климатическими условиями» была поставлена задача создания программного инструментария, позволяющего эффективно исследовать типичные в экономических приложениях оптимизационные задачи, в том числе задачи в динамических постановках (дифференциальные управления, рекуррентные соотношения), с балансовыми и траекторными ограничениями, невыпуклыми терминальными и интегральными функционалами и другие. Этап работы в 2018 г. был посвящен созданию алгоритмов для линейных моделей, рассматриваемых как в непрерывном, так и дискретном времени. Были разработаны интерфейсы программного комплекса, средства верификации программной постановки задачи, технологии визуализации получаемых решений. Алгоритмическое наполнение программного комплекса было выбрано и реализовано относительно несложным – в соответствии с линейным характером изучаемых моделей (см., напр., [1]). Переданная участникам интеграционного проекта первая версия программного комплекса была успешно использована при решении ряда несложных, но содержательных экономических задач.

Однако первый опыт работы с реализованным программным комплексом выявил ряд существенных функциональных ограничений, заложенных на этапе проектирования разработки в 2018 г. В связи с этим на втором этапе работы над интеграционным проектом в 2019 г. была поставлена задача существенного расширения возможностей реализуемого инструментария за счет усложнения постановки задачи – рассмотрения нелинейных вариантов динамических систем. Была существенно пополнена библиотека алгоритмов интегрирования систем дифференциальных уравнений – включены устойчивые модификации алгоритмов Dopr5, Dopr8 и ряда других. В состав библиотеки алгоритмов оптимизации был включен как ряд новых алгоритмов, демонстрирующих высокую конкурентоспособность (см., напр., [2]), так и набор специализированных модификаций традиционных методов, позволяющих обеспечивать надежность выполняемых расчетов [3]). С помощью новой версии программного комплекса OPTCON-IEOPP (2019 г.) был успешно решен ряд новых содержательных задач, связанных с проблемой территориальной связанности России.

1. Суслов В.И., Горнов А.Ю., Лемперт А.А. Программный комплекс для задач оптимизации в линейных экономических моделях с невыпуклыми функционалами // Материалы конф. «Ляпуновские чтения», 2018. С. 81.
2. Горнов А.Ю. Рейдер-метод для квазисепарабельных задач безусловной оптимизации // Материалы конф. «Ляпуновские чтения», 2018. С. 27.
3. Горнов А.Ю. Вычислительные технологии для численного решения задач оптимального управления. Новосибирск: Наука, 2009.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта № 66 Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018-2020 гг.

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО МЕТАЭВРИСТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ НА БАЗЕ WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM

А.А. Толстихин

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
madstaylor93@gmail.com

Стохастические алгоритмы оптимизации в настоящее время получили широкое распространение в различных областях, в частности, при решении комбинаторных задач и в машинном обучении. Ряд проведенных исследований наглядно показал высокую эффективность данных алгоритмов при решении практических задач. Тем не менее, их главным недостатком является невозможность доказать сходимость к глобальному оптимуму за рациональное время.

В данной работе рассматривается применение популяционных метаэвристических алгоритмов дискретной оптимизации для решения задач с разными классами целевых функций: многомерные, недифференцируемые, заданные аналитически, табличным способом и другие. Для решения данной задачи был выбран ряд используемых на данный момент алгоритмов без учета их модификаций и гибридов. Алгоритмы были реализованы в единой программе с использованием одинаковых интерфейсов взаимодействия для минимизации погрешности вычислений. На основе проведенной предварительной серии тестов был предложен гибридный алгоритм, комбинирующий алгоритмы серых волков (GWO)[1] и китов (WOA)[2]. Данный выбор обусловлен высокой скоростью и точностью нахождения экстремума алгоритмами по отдельности и схожестью принципов их работы.

Гибридный алгоритм использует ядро из трех шаблонов поведения агентов: окружение «добычи», поиск «добычи» и сближение с «добычей» по спиральной траектории (метод нападения по сети пузырьков), которые были изначально предложены в WOA. Каждый шаблон выполняется агентом, ориентируясь на координаты трех лидеров группы, как в GWO.

Проведенная серия тестов продемонстрировала более высокую точность поиска экстремума предложенным алгоритмом на большинстве исследуемых целевых функций по сравнению с исходными алгоритмами. Кроме того, была продемонстрирована более высокая скорость сходимости, особенно на первых итерациях. Для чистоты эксперимента было проведено две серии тестов: с случайным и фиксированным начальным распределением агентов по обследуемой области определения функции, которые показали схожие результаты.

В рамках данного исследования в дальнейшем планируется увеличение точности поиска и скорости сходимости алгоритма и его сравнение с другими аналогами, хорошо зарекомендовавшими себя при решении практических задач. Кроме того, планируется рассмотреть применимость разработанного подхода для решения задачи обследования физического поля [3] и построения матриц преобразования для склейки изображений.

1. Mirjalili S., Mirjalili S.M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer // *Advances in Engineering Software*. 2014. Vol. 69, № 1. P. 46-61.
2. Mirjalili S.M., Lewis A. The Whale Optimization Algorithm // *Advances in Engineering Software*. 2016. Vol. 95, № 1. P. 51-67.
3. Tolstikhin A., Bakhvalov S., Dorofeev A., Bazhenov R. The Grey Wolf Optimizer Algorithm Modification for Enhanced Performance of Autonomous Underwater Vehicles in a Physical Field Survey // *Proc. 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019)*. Atlantis Press, 2019. P. 184-190.

МНОГОМЕТОДНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А.И. Тятюшкин

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

Многометодная технология решения задач оптимального управления (см. [1–5]) заключается в параллельном использовании сразу нескольких итерационных методов оптимизации для поиска решения одной и той же задачи. Основной проблемой применения многометодной технологии при численном решении задач оптимального управления является выбор метода для эффективного продолжения процесса оптимизации с того момента, когда ухудшилась сходимость текущего метода. Современные операционные системы позволяют обеспечить решение задачи путем организации параллельных вычислительных потоков для одновременного проведения расчетов несколькими методами. В каждом таком потоке можно реализовывать итерационный процесс одного из методов оптимизации и решение одной задачи вести несколькими методами одновременно. На многопроцессорных компьютерах для реализации каждого метода удобнее использовать отдельный процессор. После нахождения очередного приближения все методы оцениваются, например, по полученному приращению функционала, и из них выбирается наиболее эффективный метод для продолжения оптимизации, а полученное этим методом приближение передается остальным методам в качестве начального для выполнения следующей итерации.

Продолжая итерационный процесс до получения приближения, на котором с заданной точностью будет выполнен критерий оптимальности, найдем приближенное решение задачи. При этом решение будет найдено многометодным алгоритмом, состоящим из последовательности шагов разных методов, подключаемых к процессу оптимизации с целью ускорения его сходимости. Например, в случае параллельного использования трех методов (см. рис. 1) лучшее приближение будет определяться по максимуму приращения функционала, полученного на данной итерации каждым из трех методов: $u_{i_0} = \arg \max_{i \in \{1, 2, 3\}} (I(u_i^k) - I(u_i^{k-1}))$. Затем это приближение передается всем трем методам для выполнения следующей итерации: $u_i^{k+1} = u_{i_0}$, $i = 1, 2, 3$.

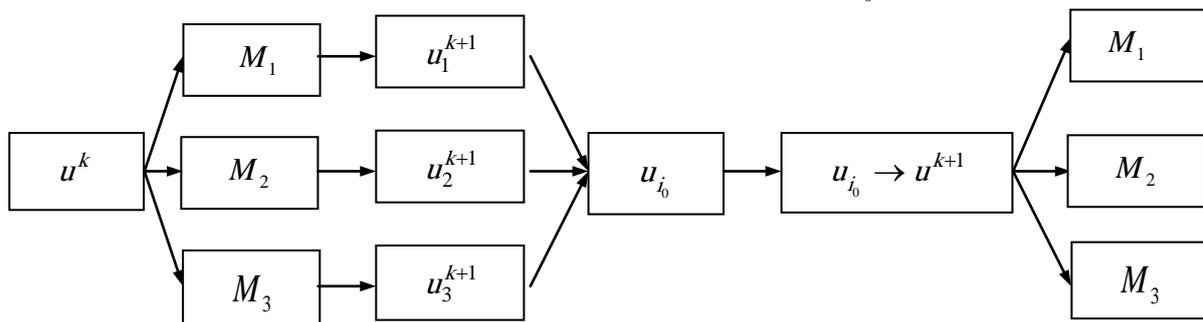


Рис.1. Схема выполнения $k + 1$ -й итерации многометодным алгоритмом для группы из трех методов: M_1 , M_2 , M_3

Пусть задан управляемый процесс с управляющими параметрами как в правых частях так и в начальных условиях

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, w, t), \quad x(t) \in E^n, \quad u(t) \in E^r, \quad t \in T = [t_0, t_1], \\ x(t_0) &= \Theta(v), \quad w \in R^p, \quad v \in R^n \end{aligned} \quad (2.1)$$

с терминальными условиями

$$I_i(u) = h_i(x(t_1)) = 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.2)$$

и фазовыми ограничениями

$$J_i(u, v) = g_i(x(t), t) = 0, \quad t \in T, \quad i = \overline{1, s}. \quad (2.3)$$

Управление и параметры стеснены следующими ограничениями:

$$\begin{aligned} c_i(u, t) &= 0, \quad t \in T, \quad i = \overline{1, l}, \\ u^H(t) &\leq u(t) \leq u^B(t), \quad t \in T, \quad v^H \leq v \leq v^B, \quad w^H \leq w \leq w^B \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$(2.5)$$

Требуется среди управлений и параметров, удовлетворяющих ограничениям (2.4)–(2.6), найти такие, которые обеспечивают выполнение условий (2.3) для управляемого процесса (2.1) и приводят его в точку фазового пространства, где с заданной точностью будут выполнены условия (2.2), а функционал

$$I_0(u) = \varphi(x(t_1)) \quad (2.6)$$

достигнет наименьшего значения.

Градиенты функционалов $I_j(u)$, $j = \overline{0, m}$, с помощью функций $H^j(\psi_j, x, u, t) = \psi_j' f(x, u, t)$ и сопряженной системы

$$\dot{\psi}_j = -f_x(x, u, t)' \psi_j(t), \quad \psi_j(t_1) = -\varphi_x^j(x(t_1))$$

традиционно определяются по формулам:

$$\nabla I_j(u) = -H_u^j(\psi_j, x, u, t), \quad j = \overline{0, m}.$$

Для каждого $t \in T$ можно аналогично вычислить градиенты $J_j(u, t)$, $j = \overline{1, s}$:

$$\nabla I_j(u, t) = -\bar{H}_u^j(\Phi_j, x, u, t, \tau), \quad t_0 \leq \tau \leq t \leq t_1,$$

где $\bar{H}^j(\Phi_j, x, u, t, \tau) = \Phi_j'(t, \tau) f(x, u, \tau)$, $\Phi_j(t, \tau)$, $j = \overline{1, s}$ – решения сопряженной системы

$$\frac{\partial \Phi_j(t, \tau)}{\partial \tau} = -\frac{\partial f(x, u, \tau)}{\partial x} \Phi_j(t, \tau), \quad \tau \in [t_0, t]$$

с краевыми условиями

$$\Phi_j(t, t) = -\frac{\partial g^j(x(t))}{\partial x}, \quad j = \overline{1, s}.$$

Матрица-якобиан линеаризованных ограничений составляется из градиентов ∇I_i , $i = \overline{1, m}$, и $\nabla J_j(t)$, $j = \overline{1, s}$, $t \in T$, и так как правые части и начальные условия системы (2.1) зависят еще и от параметров, то необходимо иметь также градиенты функционалов I_i , $i = \overline{1, m}$, и $J_j(t)$, $j = \overline{1, s}$, $t \in T$, по этим параметрам:

$$\nabla_v I_i(u^k, w^k, v^k) = -\psi_i(t_0)' \Theta_v(v^k), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.7)$$

$$\nabla_w I_i(u^k, w^k, v^k) = -\int_{t_0}^{t_1} \psi_i(t)' f_w(x^k, u^k, w^k, t) dt,$$

$$\nabla_w J_i(u^k, w^k, v^k, t^j) = -\int_{t_0}^{t^j} \Phi_i(t)' f_w(x^k, u^k, w^k, t) dt, \quad (2.8)$$

$$\nabla_v J_i(u^k, w^k, v^k, t^j) = -\Phi_i(t_0)' \Theta(v^k), \quad i = \overline{1, s}, \quad j = \overline{1, N}. \quad (2.9)$$

На каждой итерации внешнего метода спроектированного лагранжиана решается вспомогательная задача минимизации модифицированного функционала Лагранжа

$$\begin{aligned} L = & \varphi(x(t_1)) - \lambda^{k'} [h(x(t_1)) - \bar{h}^L] + \frac{\rho}{2} [h(x(t_1)) - \bar{h}^L]' [h(x(t_1)) - \bar{h}^L] - \\ & - \int_{t_0}^{t_1} \mu^{k'}(t) [g(x(t), t) - \bar{g}^L] dt + \frac{\rho}{2} \int_{t_0}^{t_1} [g(x(t), t) - \bar{g}^L]' [g(x(t), t) - \bar{g}^L] dt - \\ & - \int_{t_0}^{t_1} \gamma^k(t) [c(u, t) - \bar{c}^L] dt + \frac{\rho}{2} \int_{t_0}^{t_1} [c(u, t) - \bar{c}^L]' [c(u, t) - \bar{c}^L] dt, \end{aligned}$$

(2.10)

при линеаризованных на k -м приближении ограничениях

$$I^k + \sum_{j=0}^N \nabla_u I^k(t^j)' (u_j - u_j^k) + \nabla_w I^k(w - w^k) + \nabla_v I^k(v - v^k) = 0, \quad (2.11)$$

$$J_j^k + \sum_{i=0}^j [\nabla_u J^k(t^j)' (u_i - u_i^k) + \nabla_w J^k(t^j)' (w - w^k) + \nabla_v J^k(t^j)' (v - v^k)] = 0,$$

$$j = \overline{0, N}.$$

(2.12)

Задача (2.7) – (2.12) решается методом приведенного градиента [2] – [3], а полученное решение используется для выполнения следующей итерации метода линеаризации, решающего исходную задачу (2.1) – (2.6).

1. Тятюшкин А.И. Параллельные вычисления в задачах оптимального управления // Сибирский журнал вычислительной математики. 2000. Т. 3, № 2. С. 181–190.
2. Тятюшкин А.И. Многометодная технология для расчета оптимального управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2003. № 3. С. 59 – 67.
3. Тятюшкин А.И. Многометодная технология оптимизации управляемых систем. Новосибирск: Наука, 2006. 343 с.
4. Тятюшкин А.И. Численные методы решения задач оптимального управления с параметрами // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2017. Т. 57, №10. С. 1615–1630.
5. Тятюшкин А.И. Многометодная оптимизация управления в сложных прикладных задачах. // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2019. Т. 59, № 2. С. 235-246.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ МЕТАПЛАНИРОВЩИКОВ РЕСУРСОВ В ПРОЦЕССЕ ВЫПОЛНЕНИЯ СХЕМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ *

А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
agf65@yandex.ru, roman@kostromin.net

Введение. В настоящее время эффективность управления вычислительными ресурсами в гетерогенной распределенной вычислительной среде (РВС) во многом зависит от адаптации программного обеспечения мета-уровня (такое, как GridWay и HTCCondor) к динамически изменяющимся условиям среды и учета характеристик ее узлов (кластеров), а также административных политик, установленных в этих узлах.

В данной работе проводится сравнительный анализ распределения синтетического потока заданий между узлами кластеров. В каждом из экспериментов РВС находилась под управлением мета-планировщиков GridWay, HTCCondor и МАС, разрабатываемых коллективом авторов [1]. Задание представляет собой спецификацию выполнения схемы решения задачи в РВС. Характеристики заданий синтетического потока (время поступления, число ядер, размер оперативной и дисковой памяти, время выполнения и др.) полностью соответствуют характеристикам заданий реального потока.

Мультиагентное управление потоками заданий. Рассмотрен механизм обработки поступающих заданий в МАС. Приведены примеры классов заданий и их характеристики. Обсуждается алгоритм распределения заданий между агентами, представляющими вычислительные кластеры. В рамках данного алгоритма организован тендер вычислительных работ, где задания пользователей рассматриваются в виде лотов.

Для каждого агента приведены шкалы намерений выполнять предопределенные классы заданий. На основе шкал намерений, стоимости выполнения работ и других накладных расходов агенты формируют ставки за задания. Задания распределяются между узлами с учетом накладных расходов на пересылку данных между модулями задания, что позволяет сократить общее время выполнения задания.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов по обслуживанию синтетического потока заданий каждой из систем. Выполнен сравнительный анализ таких показателей, как время ожидания задания в очереди, время выполнения всего задания, время выполнения всего потока заданий, средняя загрузка узлов кластеров.

Выводы. Результаты экспериментального анализа показывают, что применение МАС позволяет улучшить наблюдаемые показатели обслуживания потока заданий вычислительного кластера. Ускорение вычислений и повышение эффективности использования ресурсов во много обусловлены использованием агентами результатов анализа вычислительной истории при построении расписания обслуживания кластера.

1. Феоктистов А.Г., Костромин Р.О. Разработка и применение проблемно-ориентированных мультиагентных систем управления распределенными вычислениями // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2016. № 11. С. 65–74.

* Исследование выполнено при поддержке Президиума РАН, программа № 7, проект «Методы, алгоритмы и инструментальные средства децентрализованного группового решения задач в вычислительных и управляющих системах». Результаты по оценке времени выполнения заданий получены при поддержке РФФИ, проект № 19-07-00097-А.

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Е.С. Фереферов¹, А.А. Ветров²

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

Научно-исследовательский центр «Байкальский регион»,

Иркутский государственный университет

fereferov@icc.ru

Проведение археологических исследований связано с получением большого объема разнородной информации: пространственных данных, фотоматериалов, описаний артефактов, результатов геохимических исследований, радиоуглеродного датирования, 3D-сканирования. Применение для обработки полученных данных современных информационных технологий, в том числе геоинформационных, позволяет значительно автоматизировать процессы археологических исследований, а также повысить качество результатов и их доступность. Одной из проблем внедрения информационных технологий в археологию является отсутствие единых стандартов организации исследований и описания получаемых на каждом этапе результатов. Как правило, археологические информационные системы создаются в рамках одного проекта для исследований конкретного археологического объекта или ориентированы на презентацию находок (виртуальные музеи).

В работе представлена архитектура (рис.1) информационной системы для поддержки археологических исследований, обеспечивающая регистрацию, учет и анализ разноформатных археологических данных на всех этапах исследований. Система состоит из набора связанных подсистем, ориентированных на решение отдельных задач археологии. Например, проведение полевых работ, фотофиксацию, учет публикаций и отчетов результатов датирования, сбор и представление данных пространственного размещения. Для создания системы применяются технология и инструментальное средство ГеоАРМ[1-2], обеспечивающие автоматизацию разработки прикладных систем за счет применения декларативных спецификаций. Использование данной технологии позволяет решить задачу гибкой модернизации – обеспечивает расширение перечня показателей без перекомпиляции всей системы, что актуально в условиях формирующихся стандартов археологических исследований. Кроме того, в ГеоАРМ интегрирован картографический модуль, а также есть возможность взаимодействия с внешними подсистемами для решения специфических задач.

Для информационной поддержки исследований непосредственно в местах проведения раскопок в условиях отсутствия доступа к Интернет разработано инструментальное средство подготовки и интеграции данных (ИС ПИД). Пользователь при помощи данного инструментального средства может настроить необходимую конфигурацию локальной (off-line) подсистемы, выбирая спецификации соответствующих подсистем. Затем ИС ПИД сгенерирует необходимые таблицы для СУБД SQLite и спецификацию для работы с ними. Для работы с подсистемами в off-line режиме достаточно установить на переносной компьютер файл БД в формате SQLite, спецификацию и ГеоАРМ. После проведения полевых работ собранные данные загружаются в основную БД при помощи того же инструмента.

* Работа выполнена в рамках гранта Правительства РФ, проект № 075-15-2019-866 "Байкальская Сибирь в каменном веке: на перекрестке миров".

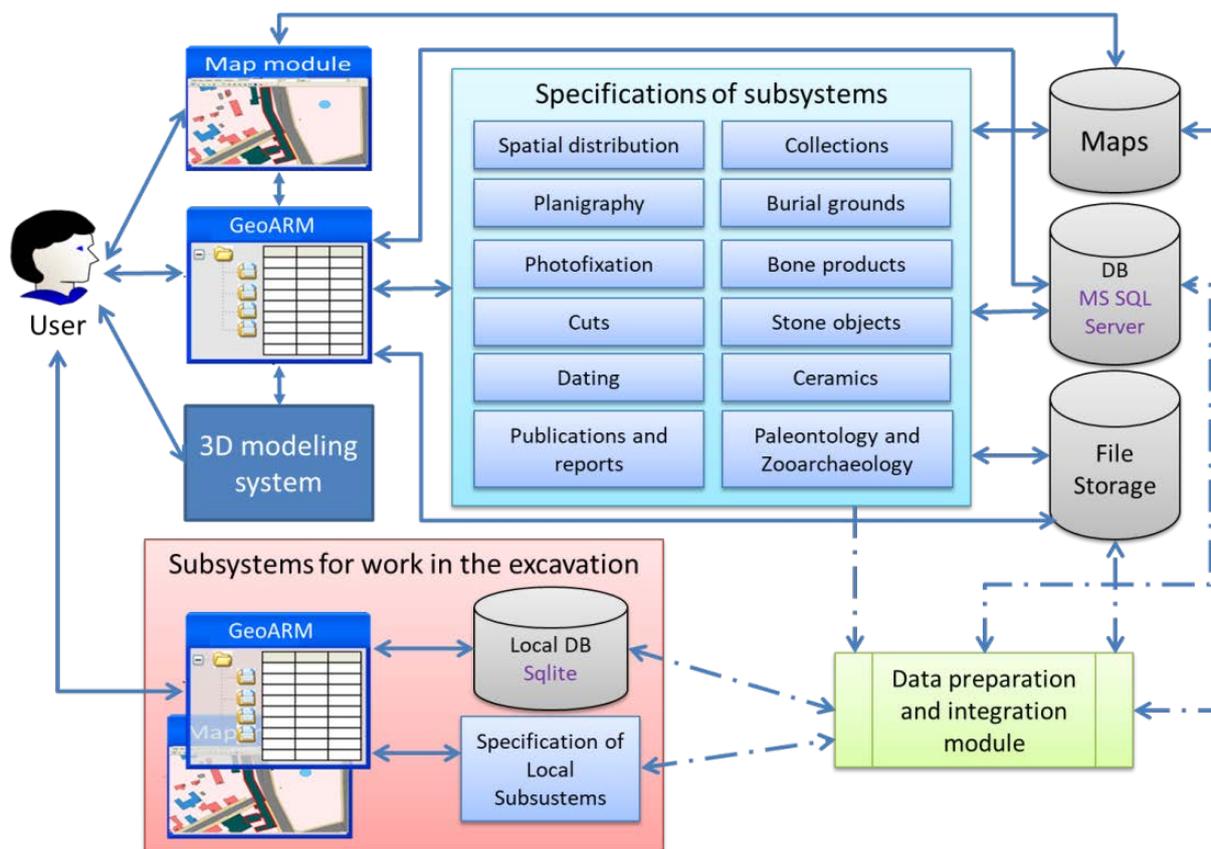


Рис.1. Архитектура АИС «Геоархеология»

Кроме того, в рамках проекта была реализована поддержка визуализации 3D моделей ландшафтов и археологических находок. 3D модели объектов, созданные известными системами моделирования (например, Agisoft[3], Meshmixer[4]), в формате obj могут быть сохранены в БД. Просмотреть такие 3D модели можно непосредственно из АИС «Геоархеология». Визуализация 3D моделей объектов реализована при помощи библиотеки Tree.js [5].

1. Фереферов Е.С., Бычков И.В., Хмельнов А.Е. Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 5. С. 85–100.
2. Bychkov I.V., Hmelnov A.E., Fereferov E.S., Ruginov G.M., Gachenko A.S. Methods and tools for automation of development of information systems using specifications of database applications // Proc. of the 3rd Russian-Pacific Conf. on Computer Technology and Applications (RPC 2018). 2018.
3. Agisoft Metashape URL: <https://www.agisoft.com/> (дата обращения: 25.08.2019).
4. Meshmixer. URL: <http://www.meshmixer.com/> (дата обращения: 16.08.2019).
5. Tree.js – JavaScript 3D library URL: <https://threejs.org/> (дата обращения: 19.08.2019).

АЛГОРИТМ СИНТАКСИЧЕСКОГО РАЗБОРА ПРОСТЫХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ И СЛОВСОЧЕТАНИЙ РУССКОГО ЯЗЫКА, ОСНОВАННЫЙ НА СОГЛАСОВАНИИ СЛОВОФОРМ

А.Е. Хмельнов

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

Задачи обработки естественного языка сейчас приобрели особую актуальность в связи с развитием алгоритмов распознавания речи и появлением таких систем, как, например, Алиса от Яндекса. Также обработка естественного языка необходима для решения ряда других задач, например, извлечения информации из неструктурированных (неразмеченных) текстов.

Необходимым этапом обработки текстов на естественном языке является синтаксический разбор предложений. Задачей этого этапа является построение дерева разбора предложения, при этом должен быть сделан выбор нормальной формы и грамматических параметров (например, рода, числа и падежа для существительного), соответствующих каждому слову предложения.

Значительный вклад в разработку теории синтаксического анализа текстов внесли англоязычные авторы. В результате была разработана теория формальных языков, формальные грамматики и алгоритмы синтаксического разбора [1], основанные на использовании этой теории. Этот подход хорошо работает для предложений английского языка, поскольку в этом языке структура предложения определяется порядком слов. Также хорошо формальные грамматики могут описать ряд других языков, например, китайский, в которых тоже отсутствуют падежи и основную роль играет порядок слов.

Подход, основанный на формальных грамматиках, дополнительно учитывающих согласование слов по грамматическим параметрам, является доминирующим и для русского языка [2, 3]. Так, в документации к Томита-парсеру явно сказано, что «Извлечение фактов происходит при помощи контекстно-свободных грамматик и словарей ключевых слов». В документации АОТ утверждается, что «Из того, что две синтаксических группы пересекаются, следует, что одна лежит в другой (т.е. является ее подотрезком)». При этом не учитывается то, что порядок слов в русском языке играет гораздо меньшую роль. Например, рассмотрим предложение «*Я иду домой*»: любая из 6 перестановок его трех слов является корректным предложением с точки зрения русского языка. Еще один пример «*В городском я иду саду*» показывает, что, на самом деле, синтаксические группы иногда могут разрываться. Попытка загнать такую языковую свободу в прокрустово ложе формальных грамматик потребует создания слишком большого числа правил и, скорее всего, обречена на провал.

Другим часто встречающимся недостатком многих исследований по обработке естественного языка является преждевременное снятие неоднозначности. Действительно, существуют омонимы и другие совпадающие словоформы разных слов. Например, словоформы *стали*, *сели*, *мели*, *пила* являются формами и глаголов, и существительных. При выполнении синтаксического разбора часто делаются попытки определить нормальную форму на ранней стадии, основываясь, например, на статистике употребления слов, или во что бы то ни стало получить единственный вариант разбора предложения на стадии синтаксического анализа. Такой подход несет риск «выплеснуть с водой ребенка», т.е. пропустить правильный вариант, соответствующий семантике используемых слов. Даже с учетом семантики слов одного предложения не всегда удастся снять неоднозначность. Так, в качестве иллюстрации этого утверждения часто упоминается предложение «*Эти типы стали есть на нашем складе*» – здесь для снятия неоднозначности необходимо учесть контекст, в котором употребляется предложение.

Рассматриваемый в данной работе алгоритм синтаксического разбора предложений русского языка основан на согласовании словоформ, порядок слов в нем играет второстепенную роль. Порядок слов учитывается только для некоторых видов связей между словами. Наиболее показательный пример связи, для которой важен порядок слов – это предложная группа: предлог не может управлять словами, стоящими перед ним, при этом следующее слово группы должно стоять непосредственно после предлога.

Другой особенностью алгоритма является использование поиска с возвратами для генерации всех синтаксически корректных вариантов разбора. Для выбора корректного варианта должен далее использоваться семантический анализ.

Программа, демонстрирующая работу алгоритма, реализована на языке Python и использует для работы со словарем русского языка библиотеку r morphology2. Работа алгоритма управляется набором правил, описывающих возможные связи между словами. Каждая связь задает отношение подчинения между участвующими в ней словами (первое управляет вторым). Каждой части речи сопоставляется список правил, в которых она является первым аргументом. Список правил, использованный при тестировании алгоритма, приводится в следующей таблице:

Из части речи	Правило	Кардинальность	В часть речи	Согласовывать	Из грам- мемы	В грам- мему	Пример
PREP	Prep	1:1	есть падеж				из дерева
NOUN NPRO VERB INFN ADJF ADJS PRTF PRTS ADV B GRND	Not	1:1	PRCL			"не" "ни"	не курить
NOUN NUMR NPRO	Noun Adjf	1:n	ADJF PRTF	case gen- der num- ber			стол же- лезный
	Noun Adjs	1:n	ADJS PRTS	gender number	nomn		поезд скор
	Noun Whose	1:1	NOUN			gent	ножка сто- ла
VERB	VerbAgen sNPro	1:1	NPRO	person gender number	nomn		идешь ты
	VerbAgen sNoun	1:1	NOUN NUMR	gender number	person = 3per	nomn	едет поезд
	Verb Grnd	1:n	GRND				идти при- храмывая
ADJF ADJS	Adjf Advb	1:n	ADV B				быстр очень
VERB INFN PRTF PRTS GRND	Verb Advb	1:n	ADV B				ехать быстро
	Verb Prep	1:n	PREP				идти по
	Verb Patiens	1:1	NOUN		tran	accs	варить суп
	VerbAblt	1:n	NOUN			ablt	бить рукой
VERB PRTF PRTS GRND	VerbInfn	1:1	INFN				начал есть

Приведенные в таблице правила связывают исходные части речи (столбец «Из части речи») с целевыми («В часть речи»). В некоторых правилах накладываются требования на определенную форму (например, падеж) исходного («Из граммемы») и целевого («В граммему») слова, а также требуется согласование форм слов («Согласовывать»). Обозначения частей речи и грамем описаны в [4]. Некоторые правила ограничивают кардинальность отношений: по такому правилу можно задавать только одно соответствие для главного слова, например, предлог может управлять лишь одним словом. Для предлогов реализован специальный вид правил, которые учитывают таблицу соответствия предлогов возможным падежам управляемых ими слов.

Алгоритм разбора предложения выполняет следующие шаги:

1. Разбить предложение на лексемы (слова и знаки препинания) с использованием `rumorphy2.tokenizers.simple_word_tokenize`.
2. Для каждого слова в списке получить список вариантов его значений из словаря с использованием `MorphAnalyzer.parse`.
3. Из каждого варианта значения сделать экземпляр объекта `Variantinfo`, в котором для удобства сопоставления дополнительно кодируется маска падежей, и впоследствии будут запоминаться обнаруженные связи между словами.
4. Удалить сокращения без точки (иначе, например, предлог «в» воспринимается, как инициал имени).
5. Найти все пары соответствий между вариантами значений слов предложения и запомнить в списки исходящих и входящих связей для этих вариантов.
6. Выполнить поиск с возвратами вариантов выбора значений всех слов предложения, дающих максимальное число связей.
7. Упорядочить варианты разбора с максимальным количеством связей по их качеству. Качеством варианта является суммарная длина пропусков в группах слов, относящихся к одному узлу дерева связей.

На шаге 5 выполняется преобработка возможных отношений между вариантами значений слов с запоминанием результатов проверки правил сопоставления. Наиболее сложной частью алгоритма является пункт 6. Здесь выполняется выбор значения для каждого из слов предложения и связей между этими значениями, которые не противоречат ограничениям правил для связей, например, ограничению кардинальности. Предпочтение отдается вариантам, содержащим максимальное количество связей. Поиск с возвратами работает по принципу алгоритмов A*: при наличии достаточно хорошего варианта разбора поиск прекращается, если нет шансов достичь его уровня. Если в итоге наилучших вариантов окажется несколько, то они упорядочиваются по дополнительной оценке качества на шаге 7: предпочитаем варианты с меньшим количеством разрывов между словами одной синтаксической группы.

Для иллюстрации работы алгоритма приведем результаты разбора предложения «*Эти типы стали есть на нашем складе*» (для компактности листинг отредактирован – объединены варианты, различающиеся только одушевленностью слова *типы*):

- 3: есть VERB,impf,intr plur,3per,pres,indc быть
- 1: типы NOUN,anim/inan,masc plur,nomn тип **VerbAgensNoun**
 - 0: Эти ADJF,Apro,Subx,Anph plur,nomn этот **NounAdjf**
 - 2: стали NOUN,inan,femn sing,gent сталь **NounWhose**
- 4: на PREP на **VerbPrep**
- 6: складе NOUN,inan,masc sing,loct склад **Prep**
 - 5: нашем ADJF,Apro masc,sing,loct наш **NounAdjf**
- 3: есть INFN,impf,tran есть
- 4: на PREP на **VerbPrep**
 - 6: складе NOUN,inan,masc sing,loct склад **Prep**

- 5: нашем ADJF, Apro masc, sing, loct наш **NounAdjf**
- 1: типы NOUN, inan, masc plur, accs тип **VerbPatiens**
- 0: Эти ADJF, Apro, Subx, Anph inan, plur, accs этот **NounAdjf**
- 2: стали NOUN, inan, femn sing, gent сталь **NounWhose**
- 2: стали VERB, perf, intr plur, past, inde стать
- 1: типы NOUN, **anim/inan**, masc plur, nomn тип **VerbAgensNoun**
- 0: Эти ADJF, Apro, Subx, Anph plur, nomn этот **NounAdjf**
- 3: есть INFN, impf, tran есть **VerbInfm**
- 4: на PREP на **VerbPrep**
- 6: складе NOUN, inan, masc sing, loct склад **Prep**
- 5: нашем ADJF, Apro masc, sing, loct наш **NounAdjf**
- 2: стали VERB, perf, intr plur, past, inde стать
- 3: есть INFN, impf, tran есть **VerbInfm**
- 4: на PREP на **VerbPrep**
- 6: складе NOUN, inan, masc sing, loct склад **Prep**
- 5: нашем ADJF, Apro masc, sing, loct наш **NounAdjf**
- 1: типы NOUN, inan, masc plur, accs тип **VerbPatiens**
- 0: Эти ADJF, Apro, Subx, Anph inan, plur, accs этот **NounAdjf**

В каждой строке листинга показаны: <№ слова в предложении>: <Слово> <Граммемы> <Нормальная форма> <Имя правила, использованного для установления связи>. Алгоритм нашел четыре варианта интерпретации, каждый из которых имеет право на существование, если не использовать семантические знания:

1. «*Эти типы стали* [из железа] *есть* [имеются в наличии] *на нашем складе*».
2. «*Эти типы стали* [из железа] [необходимо] *есть* [/употреблять в пищу] *на нашем складе*! – повелительное наклонение]».
3. «*Эти типы* [/люди] *стали* [/начали] *есть* [/питаться] *на нашем складе*».
4. «*Эти типы* [печенья] *стали* [/начали] *есть* [/поедать] *на нашем складе*».

Все варианты используют 6 связей, объясняя присутствие всех 7 слов в предложении.

Для первых трех вариантов оценка качества равна 0, т.е. ни один из фрагментов предложения, соответствующих поддеревьям дерева разбора, не содержит посторонних слов. Для последнего варианта оценка равна 1, т.к. слово *стали* разрывает фрагмент предложения, подчиненный слову *есть*. Оценка качества позволяет учесть близость слов и отдать предпочтение тем деревьям разбора, в которых из нескольких вариантов подчинения выбирается ближайший. Например, для предложения «*Пограничник охраняет крутой берег*» вариант разбора, в котором слово *крутой* относится к слову *берег*, получает оценку 0, а вариант с подчинением слову *пограничник* – 2.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет разбирать простые предложения с учетом особенностей русского языка. Основным недостатком алгоритма на текущий момент является его неспособность работать с пунктуацией и однородными членами предложения. Например, в предложении «*Саша и Маша пошли в кино*» оба сказуемых находятся в единственном числе, но им соответствует сказуемое, находящееся во множественном числе. Поддержка таких связей требует модификации графа, полученного на этапе преобработки или ослабления ограничений, задаваемых правилами.

1. Хопкрофт Дж., Мотвани Р., Ульман Дж. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: Вильямс, 2002 (пер. издания Addison Wesley).
2. Yandex/tomita-parser. URL: <https://github.com/yandex/tomita-parser>.
3. Автоматическая Обработка Текста. Синтаксический анализ. URL: <http://aot.ru/docs/synan.html>.
4. OpenCorpora. Граммемы. URL: <http://opencorpora.org/dict.php?act=gram>.

5. СВОЙСТВА КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

В.Ф. Чистяков

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

В докладе рассматриваются краевые задачи для линейных и квазилинейных дифференциально-алгебраических уравнений общего вида, включая системы второго и выше порядка, возмущенные операторами Вольтерра и Фредгольма [1-3]. Получены условия разрешимости таких задач для таких уравнений. Обсуждаются возможные подходы поиска численного решения и влияние малых возмущений входных данных на решение начальных задач.

1. Чистяков В.Ф., Чистякова Е.В. О разрешимости вырожденных систем квазилинейных интегро-дифференциальных уравнений общего вида // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16, № 5. С. 100-113.
2. Чистяков В.Ф., Чистякова Е.В. Линейные дифференциально-алгебраические уравнения с возмущениями в виде интегральных операторов Вольтерры // Дифференц. уравнения. 2017. Т. 53, № 10. С. 1309-1320.
3. Chistyakova E.V., Chistyakov V.F. Solution of differential algebraic equations with the Fredholm operator by the least squares method // Applied Numerical Mathematics (In Press, Corrected Proof).

ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА ОБУЧЕНИЯ FORLABS

А.С. Шабалин

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
Иркутский государственный университет
mail@alshabalin.com

Реализация электронного обучения в соответствии с Федеральным законом «Об образовании в Российской Федерации» № 273-ФЗ (ст. 16, п. 3) предъявляет особые требования при создании электронной информационной образовательной среды, включающей в себя электронные информационные и образовательные ресурсы, совокупность информационных технологий, соответствующих технологических средств и обеспечивающей освоение обучающимися образовательных программ в полном объеме независимо от места нахождения обучающихся.

В 2014 году на факультете сервиса и рекламы ИГУ отсутствовала электронная информационно-образовательная среда, определенная законом об образовании РФ. В рамках учебного процесса использовалась система Гекадем [1], где были представлены разрозненные курсы без интеграции с учебным процессом, имелся высокий уровень уязвимости безопасности содержания тестов, когда студенты легко могли найти доступ к правильным ответам на вопросы тестов.

Для выбора системы управления обучением на факультете были рассмотрены несколько известных систем (Eliademy, TeachBase, Edmodo и прочие), которые представляли функциональность только как SaaS-платформы, что не позволяло бы их использование на собственном сервере факультета.

Среди Open-Source-систем был выделен фреймворк для построения учебных курсов – система Moodle [2]. После детального анализа возможностей фреймворка Moodle были выявлены серьезные недостатки системы:

- отсутствует возможность интеграции с учебным процессом: обеспечена возможность создания только отдельных электронных курсов без возможности учета успеваемости учащихся по всем дисциплинам;
- архитектура фреймворка не следует принципам MVC (схема разделения данных приложения, пользовательского интерфейса и управляющей логики на отдельные компоненты: модель, представление, контроллер), что усложняет развитие системы;
- сложный для понимания интерфейс системы (недружественный интерфейс).

В результате было принято решение о разработке авторской системы для управления обучением Forlabs.

В настоящее время система Forlabs внедрена на факультете, успешно эксплуатируется в течение трех лет и обладает следующей функциональностью: управление учебными курсами и заданиями, управление группами студентов, учет посещаемости, учет успеваемости, проведение тестирований, интерактивное расписание предметов, портфолио студентов, веб-хостинг для студенческих работ.

В дальнейшем планируется развитие системы Forlabs на основе методов адаптивного обучения, когда кривая обучения каждого студента будет формироваться на основе его индивидуальных возможностей, интересов и успеваемости на основе использования методов онтологического моделирования и машинного обучения.

1. Гекадем. Режим доступа: <http://www.hecadem.irk.ru/> (дата обращения 18.11.2019).
2. Moodle. Режим доступа: <https://moodle.org/> (дата обращения 18.11.2019).

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ОСЦИЛЛЯЦИЙ НЕЙТРИНО В СРЕДЕ ПРИ ПОМОЩИ РАЗЛОЖЕНИЯ МАГНУСА

А.В. Шайдурова, В. П. Ломов

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
lomov.vl@yandex.ru

В настоящее время работает несколько крупных нейтринных экспериментов, которые детектируют события от приходящих нейтрино, проходящих по мере своего пространства как через вакуум, так и через вещество, что необходимо учитывать при анализе собранных данных. В случае обычного вещества путь от собранных данных до достоверного определения значений параметров требует массивных численных интегрирований линейной однородной системы обыкновенных дифференциальных уравнений с коэффициентами, зависящими от расстояния, которое нейтрино проходят вдоль среды.

Интегрирование этой задачи классическими методами, например, схемами Рунге-Кутты, не сохраняет норму решения на каждом этапе. Необходимы эффективные методы численного интегрирования, сохраняющие унитарность решений уравнения Шредингера, в качестве которого и выбран метод, основанный на разложении Магнуса.

Результаты работы реализованного нами на языке Си данного алгоритма для моделей Солнца и сверхновой согласуются с данными, полученными другими авторами [1]. Вычисленное алгоритмом значение асимптотической величины вероятности выживания электронного нейтрино $\langle P_{ee} \rangle^{\text{num}} = 0,547738$ близко к теоретическому значению $\langle P_{ee} \rangle^{\text{theor}} = 0,547829$, что говорит о применимости метода к решению задачи о нейтринных осцилляциях в среде.

Сканирование по пространству параметров для случая электронного нейтрино позволяет сделать следующие выводы:

- при вычисленных оптимальных значениях параметров счета решение стабильно и сохраняет семь значащих цифр после запятой;
- изменение разных углов смешивания оказывает влияние на разных интервалах диапазона энергии нейтрино: на отрезке E в МэВ $\in [10^{-4}, 10^{-8}]$ изменение Θ_{13} влияет на $[10^{-2}, 10^5]$, Θ_{12} — на оставшуюся часть; что дает возможность к их независимому экспериментальному анализу и уточнению значений;
- при энергиях нейтрино больше 10^{-2} МэВ применение частичного счета не приведет к потере имеющейся точности и может быть использовано.

1. Casas F., D'Olivo J. C., Oteo J. A. Efficient numerical integration of neutrino oscillations in matter // Phys. Rev. 2016. Vol. D94, № 11. P. 113008._1611.06814.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАБЛИЦ НА ПРИМЕРЕ ОТЧЕТОВ ПО ЭКСПЕРТИЗЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ*

А.Ю. Юрин, Н.О. Дородных

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

Концептуальные модели остаются основным методом визуализации и формализации основных понятий и отношений любой предметной области, выполняя коммуникативную функцию между экспертами предметной области и разработчиками. Несмотря на существование методического, лингвистического и программного инструментария для концептуального моделирования, проблема восстановления информации о понятиях и отношениях или обратного инжиниринга остается актуальной. Электронные таблицы являются одним из источников информации для решения данной задачи. В настоящее время несколько сотен миллиардов фактов накоплено и представлено в данной форме. При этом электронные таблицы характеризуются большим разнообразием и неоднородностью компоновок, стилей и содержания. Это разнообразие определяет две группы решений для их обработки:

- частные решения, ориентированы на определенную компоновку или область исследований;

- универсальные решения, использующие предварительную обработку произвольных электронных таблиц с целью их преобразования в некоторый унифицированный (канонический) формат для дальнейшей автоматизированной обработки [1, 2].

В данной работе предлагается подход для извлечения (восстановления) семантики предметной области в виде концептуальных моделей, основанный на автоматизированном анализе и преобразовании таблиц из электронных документов.

Основными результатами применения подхода являются фрагменты концептуальной модели, которые могут быть объединены в целостную модель предметной области. Диаграммы классов UML используются в качестве целевого формализма для визуализации полученных моделей. Алгоритм формирования автоматизированной концептуальной модели реализован в редакторе для создания продукционных баз знаний Personal Knowledge Base Designer (PKBD) [3]. Инструментальное средство TabbyXL [4] использовано для получения канонических (реляционных) таблиц на основе анализа электронных таблиц произвольной компоновки. Для тестирования используется набор данных Troy200 [5] и набор данных, содержащий электронные таблицы из отчетов по экспертизе промышленной безопасности (ЭПБ) (ISI-161) [6].

Произведена оценка полноты и точности преобразований на примере ISI-161:

	Полнота	Точность	F
Преобразование таблиц с произвольной компоновкой в каноническую форму (TabbyXL)	0.86	0.99	0.92
Преобразование таблиц в канонической форме в концептуальные модели (PKBD)	0.98	0.95	0.96
Средние значения	0.92	0.97	0.94

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-10001).

Также осуществлено качественное сравнение содержимого восстановленных концептуальных моделей и моделей, полученных ранее при моделировании ЭПБ [7]:

	Кол-во элементов	Кол-во понятий	Кол-во свойств	Кол-во отношений
ISI-161 восстановленные	429	59	338	32
ISI-161 уточненные (56% от ISI-161 восстановленных)	242	25	196	21
ISI-models (фрагмент из 21 модели)	400	98	249	53
Имеющие соответствие (17% от ISI-models)	69	14	51	4
Имеющие соответствие и дополняющие (24% от ISI-models)	106	14	88	4

Сделан вывод о возможности использования данного подхода для формирования предварительного набора понятий предметной области и отношений на подготовительном этапе процесса анализа определенной предметной области.

В частности, использование 161 таблицы из 6 отчетов по ЭПБ позволило в автоматическом режиме создать 24% элементов предметных моделей ЭПБ, обеспечив основу для проведения концептуального моделирования с целью построения онтологий и баз знаний.

Данная работа рассматривается как часть проекта по разработке платформы для создания систем извлечения данных из произвольных электронных таблиц [8].

1. Tijerino Y.A., Embley D.W., Lonsdale D.W., Ding Y., Nagy G. Towards Ontology Generation from Tables // World Wide Web: Internet and Web Information Systems. 2005. Vol. 8, № 8. P. 261–285.
2. Shigarov A.O., Mikhailov A.A. Rule-based spreadsheet data transformation from arbitrary to relational tables // Information Systems. 2017. Vol. 71. P. 123–136.
3. Yurin A.Yu., Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Grishenko M.A. Prototyping Rule-Based Expert Systems with the Aid of Model Transformations // Journal of Computer Science. 2018. Vol. 14, № 5. P. 680–698.
4. TabbyXL wiki. URL: <https://github.com/tabbydoc/tabbyxl/wiki/Industrial-Safety-Inspection>.
5. Nagy G. TANGO-DocLab web tables from international statistical sites (Troy_200), 1, ID: Troy_200_1. URL: http://tc11.cvc.uab.es/datasets/Troy_200_1.
6. Yurin A.Yu., Shigarov A.O., Dorodnykh N.O., Khristyuk V.V. ISI-161: Spreadsheet tables. Mendeley Data. 2019. Vol. 1.
7. Yurin A.Yu., Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Berman A.F., Pavlov A.I. ISI models, Mendeley Data. 2019. Vol. 1.
8. Shigarov A.O., Khristyuk V.V., Paramonov V.V., Yurin A.Y., Dorodnykh N.O. Toward framework for development of spreadsheet data extraction systems // CEUR Workshop Proceedings. Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2018). 2018. Vol. 2221. P. 90-96.

РАСШИРЕНИЕ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ЯЗЫКА ОПИСАНИЯ МОДЕЛЕЙ ТРАНСФОРМАЦИЙ TMRL*

А.Ю. Юрин, Н.О. Дородных, С.А. Коршунов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
iskander@icc.ru

Информационные концептуальные модели предметных областей активно используются в процессе моделирования и проектирования баз знаний (БЗ), при этом перспективным является учет в моделях особенностей различных практических задач, связанных с неопределенностью вербальных характеристик, отсутствием некоторых данных, разной степенью уверенности и т.д., т.е. с учетом различных видов «не-факторов», таких как неточность, неопределенность, нечеткость и др. [1].

В настоящее время существует ряд концептуальных моделей, учитывающих «не-факторы»: нечеткие когнитивные карты (fuzzy cognitive maps), нечеткие модели «сущность-связь» (fuzzy ER models), нечеткие модели UML и др. Подобные модели позволяют описать экспертные знания, выражаемые при помощи лингвистических переменных и функций принадлежности [1].

В данной работе предлагается расширить предметно-ориентированный язык описания моделей трансформаций TMRL (Transformation Model Representation Language, TMRL) [2] с целью обеспечения поддержки преобразования концептуальных моделей в БЗ с учетом фактора нечеткости. В частности, введены термы: лингвистическая (нечеткая) переменная, функция принадлежности, нечеткое множество. Возможны два варианта задания функции принадлежности для определения лингвистической переменной: табличный; аналитический. Определены следующие типы (виды) функций принадлежности для аналитического способа: треугольная; трапециевидная; S-образная сплайн-функция; Z-образная сплайн-функция; линейная S-образная функция; линейная Z-образная функция; П-образная функция.

Описание нечеткого множества имеет вид:

<нечеткое множество> = <вид описания> [<вид функции принадлежности> (<параметры функции принадлежности>)]

<вид описания> = табличное | аналитическое

<вид функции принадлежности> = треугольная | трапециевидная | ...

<параметры функции принадлежности> = (a, b, c) | (a, b, c, d) | ...

Для поддержки и тестирования расширения TMRL разработаны метамодели нечетких продукций и онтологии на примере FuzzyCLIPS [3] и FuzzyOWL 2 [4].

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.
2. Dorodnykh N.O., Yurin A.Y. A domain-specific language for transformation models // CEUR Workshop Proceedings. Proc. for First Scientific-practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems. 2018. Vol. 2221. P. 70-75.
3. Orchard R.A. 1995. FuzzyCLIPS Version 6.04A – User's Guide. Institute for Information Technology, National Research Council Canada. 96 p.
4. Bobillo F., Straccia U. Fuzzy ontology representation using OWL 2 // International Journal of Approximate Reasoning. 2011. Vol. 52. P. 1073–1094.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект 19-07-00927.

МОДУЛИ ПОДДЕРЖКИ СОЗДАНИЯ БАЗ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОНТОЛОГИЙ*

М.А. Грищенко, Н.О. Дородных, С.А. Коршунов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
ООО ЦентраСиб
info@centrasib.ru

Произведена разработка дополнительных модулей (Рис.1), расширяющих основные возможности инструментальных средств Personal Knowledge Base Designer (PKBD) [1] и Knowledge Base Development System в части [2] реализации подхода к созданию баз знаний продукционных экспертных систем на основе преобразования онтологий [3].

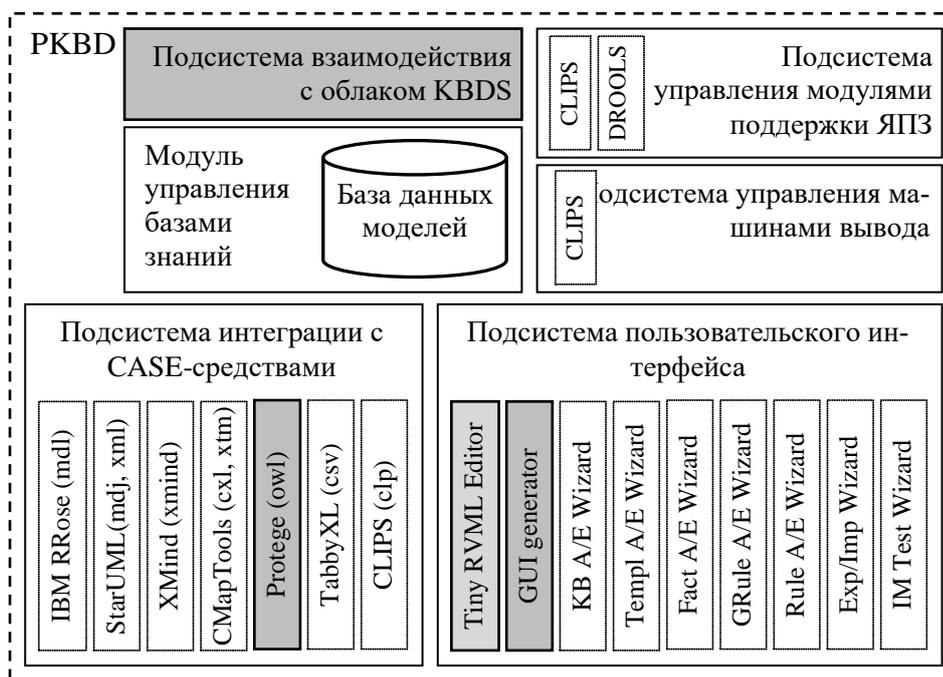


Рис.1. Архитектура PKBD с дополнительными модулями

В частности, разработан «GUI generator» обеспечивающий синтеза графического интерфейса пользователя для создания, просмотра и редактирования элементов продукционных баз знаний (CRUD, create, read, update, delete) и реализующий предложенную ранее концепцию [4]. Данный модуль реализует концепцию интерпретатора, обрабатывающего спецификацию продукционной базы знаний в формате ЕКВ. Интерпретатор обеспечивает распознавание основных языковых конструкций формата: KnowledgeBase (база знаний), Template (шаблон факта), Slot (слот шаблона факта), Fact (факт), Grule (шаблон правила), Rule (правило).

Архитектурно, выделены два основных класса-обработчика:

- TSTDIClass, содержащий методы манипулирования типовыми элементами пользовательского интерфейса, в том числе: добавление текстовой строки (AddLabel), добавления выпадающего списка значений (AddCombo), очистка определенной области экрана (ReleaseObjects), добавление элемента для редактирования дат (AddDateTimePicker), добавление об-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект 18-37-00006.

ласти ввода блоков текста (AddMemo), добавление области ввода строк и чисел (AddEdit);

- URKVCClass, содержащий методы манипулирования элементами баз знаний, использующие методы манипулирования типовыми элементами пользовательского интерфейса. В частности, каждый объект базы знаний имеет методы для его отображения в виде рабочей области (ShowAsPanel), списка (ShowAsList) или графического артефакта (Draw) в нотации RVML [3].

«Tiny RVML Editor» [5] представляет собой подсистему графического моделирования продукции в нотации RVML интегрируемую в PKBD и расширяющую его выразительные способности.

«Модуль интеграции с Protégé» обеспечивает возможность анализа и синтеза кодов на OWL DL, позволяя создавать онтологии на основе продукционных баз знаний и, в свою очередь, создавать базы знаний на основе онтологий.

Для обеспечения взаимодействия с веб-сервисом Knowledge Base Development System в части общего распределенного хранения и использования баз знаний разработан специальный модуль, реализующий специализированные API функции с использованием протокола REST (Рис.2), в частности:

- getModulesList – получение списка программных компонентов с определенным типом и статусом, созданных в KBDS;
- getKnowledgeBasesList – получение списка БЗ с определенным типом и статусом, созданных в KBDS;
- importConceptualModel – импорт концептуальной модели и создание на ее основе БЗ в системе KBDS
- exportKnowledgeBase – экспорт кода БЗ из системы KBDS.

Также определены функции взаимодействия с моделью онтологии: createOntology, generateOWLCode, addConcept, updateConcept, removeConcept, addAttribute, updateAttribute и др.

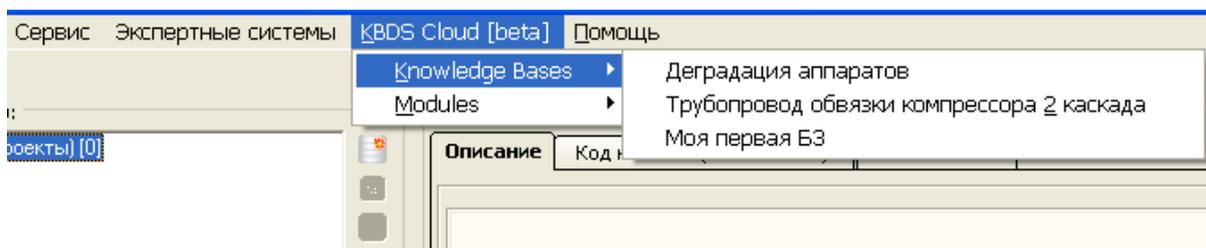


Рис.2. Пример взаимодействия PKBD и KBDS

1. Юрин А.Ю. Personal Knowledge Base Designer // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М. – Рег. № 2016617733 от 14.07.16.
2. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Knowledge Base Development System // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М. – Рег. № 2019661803 от 09.09.19.
3. Грищенко М.А., Дородных Н.О., Коршунов С.А., Юрин А.Ю. Разработка интеллектуальных диагностических систем на основе онтологий // Онтология проектирования. – 2018. – Т.8. – №2(28). – С.265-284.
4. Грищенко М.А., Дородных Н.О. Модуль синтеза CRUD-интерфейса для продукционных баз знаний // Материалы конференции «Ляпуновские чтения», Иркутск, 3-5 декабря 2018 г. – Иркутск: РИО ИДСТУ СО РАН, 2018. – С.35.
5. Дородных Н.О., Коршунов С.А., Юрин А.Ю. Средства поддержки моделирования логических правил в нотации RVML // Программные продукты и системы. – 2018. – №4. – С. 667-672.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СОЗДАНИЯ ПРОДУКЦИОННЫХ БАЗ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОНТОЛОГИЙ*

С.А. Коршунов, Н.О. Дородных
Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН
ООО ЦентраСиб
info@centrasib.ru

В работе произведена экспериментальная оценка эффективности автоматизированного создания баз знаний продукционных экспертных систем на основе подхода [1], основанного на трансформации моделей в виде онтологий.

Применимость и эффективность предложенного подхода оценивалась косвенным и прямым методами. Основными критериями оценки являлось суммарное время разработки и семантическая адекватность разработанных баз знаний. Семантическая адекватность определялась на основе экспертных оценок специалистов Лаборатории информационно-телекоммуникационных технологий исследования техногенной безопасности ИДСТУ СО РАН и Иркутского научно-исследовательского и конструкторского института химического и нефтяного машиностроения «ИркутскНИИХиммаш».

Необходимость использования косвенного метода была обусловлена сложностью и высокой стоимостью экспериментов, оценивающих реальное время разработки баз знаний (когда разработка выполняется стандартным методом, а затем предлагаемым). Косвенный метод позволяет получить теоретические оценки времени разработки баз знаний в соответствии с [2]. При этом этап концептуализации был разделен на три подэтапа: идентификацию проблемы, извлечение знаний и их структурирование:

Этапы создания базы знаний	Стандартный метод (нед.)	На основе модельных трансформаций [1] (нед.)
1. Идентификация проблемы	1-2	0.75-1.5
2. Извлечение знаний	4-12	3-8
3. Структуризация	2-4	1.5-3
4. Формализация	4-8	3-6
5. Реализация (кодификация)	0.5	-
6. Тестирование	1-2	1-2
Итого:	12.5-27.5	9.25-20.5

Оцениваемый подход [1], основанный на модельных трансформациях, показал некоторое сокращение времени разработки баз знаний продукционных экспертных систем за счет исключения этапа реализации (кодификации) за счет использования автоматической генерации кода и исключения (или сокращения времени участия) инженера по знаниям на этапах 1-4.

Прямой метод основан на оценке времени выполнения учебных заданий студентами Института информационных технологий и анализа данных Иркутского национального исследовательского университета (ИрНИТУ). Для оценки использовались результаты выполнения лабораторных работ, связанных с разработкой продукционных и прецедентных баз знаний, в рамках таких дисциплин как «CASE-средства» и «Инструментальные средства информационных систем». Студенты знакомы с основами проектирования программного обеспечения, создания концептуальных моделей и онтологий,

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект 18-37-00006.

а также обладают базовыми знаниями в области создания экспертных систем и баз знаний.

В рамках эксперимента осуществлялось выполнение заданий тремя способами:

- с использованием предлагаемого подхода [1] и реализующих его средств [3-5] (П1);
- с использованием концептуального моделирования и других средств разработки баз знаний, например, CLIPS (C language Integrated Production System) (П2);
- без использования концептуального моделирования, но с использованием средства разработки баз знаний (П3).

Студентам было предложено разработать базы знаний статических экспертных систем для решения тестовых задач диагностирования или прогнозирования в определенной предметной области (20 вариантов). При этом для обеспечения возможности неоднократного повторения процесса решения задач и их временной компактности выполнения были введены ограничения на объем моделей предметных областей: число предметных сущностей: 5-10; число свойств предметных сущностей: до 3; число связей между сущностями: 5-10; число причинно-следственных связей: 3-4; число экземпляров причинно-следственных связей (возможных правил): 10-15.

Следует отметить, что первых 4 пункта представляют ограничения, налагаемые на этап концептуального моделирования (ограничения на элементы онтологии). Последний пункт относится к этапу программирования (реализации) кода базы знаний в среде разработки (ограничение на количество возможных правил в базе знаний).

По результатам оценки (Рис.1) был сделан вывод о сокращении времени разработки при использовании трансформации моделей в виде онтологий, особенно при создании баз знаний с простыми правилами и на основе моделей предметной области с небольшим числом сущностей. Использование более сложных правил приведет к необходимости ручной модификации синтезированных правил.

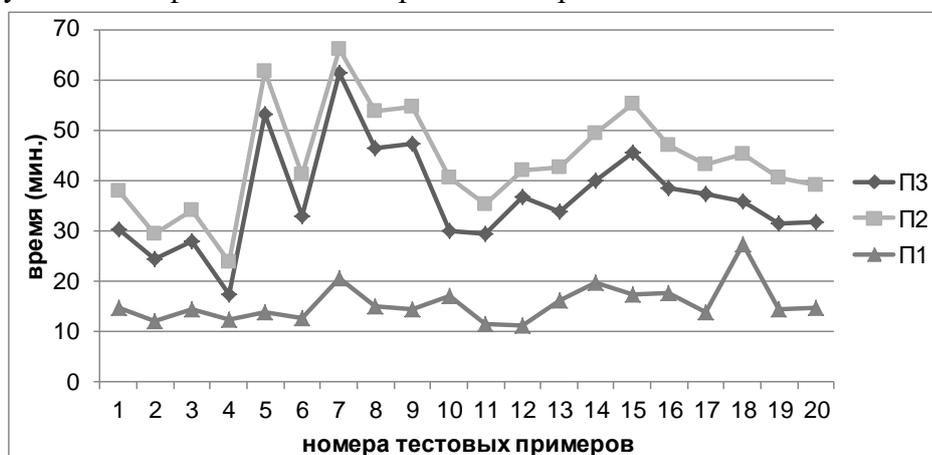


Рис.1. Результаты оценки временных затрат

1. Грищенко М.А., Дородных Н.О., Коршунов С.А., Юрин А.Ю. Разработка интеллектуальных диагностических систем на основе онтологий // Онтология проектирования. – 2018. – Т.8. – №2(28). – С.265-284.
2. Джексон, П. Введение в экспертные системы. Пер. с англ. М: Вильямс, 2001. – 624 с.
3. Дородных Н.О., Коршунов С.А., Юрин А.Ю. Средства поддержки моделирования логических правил в нотации RVML // Программные продукты и системы. – 2018. – №4. – С. 667-672.
4. Юрин А.Ю. Personal Knowledge Base Designer // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М. – Рег. № 2016617733 от 14.07.16.
5. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Knowledge Base Development System // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М. – Рег. № 2019661803 от 09.09.19.

СОДЕРЖАНИЕ

Абдулов А.А. Анализ временных рядов с помощью построения матричного профиля	3
Аникин А.С. Численные эксперименты по исследованию алгоритмических схем типа «Мультистарт с поколениями» для оптимизации невыпуклых воронкообразных функций	4
Аникин А.С. Технология GPU-распараллеливания для оптимизации энергетической модели молекулярного докинга	5
Аникин А.С. Ускоренный покомпонентный метод для разреженных задач выпуклой оптимизации: строгие оценки сложности и практическая эффективность	6
Аникин А.С., Зароднюк Т.С. Безградиентный метод глобальной оптимизации на основе мультиагентной технологии для графического ускорителя	8
Аникин А.С., Ненашев А.В. Исследование параллельных технологий решения задач минимизации потенциала Китинга с размерностями до 10^8 переменных	9
Антонов К.В., Семенов А.А. Алгоритмы поиска линеаризующих множеств в алгебраическом криптоанализе	10
Быков А.Е., Гладилин П.Е., Сайтов И.А. Применение TRANSFER LEARNING в задачах предсказания временных рядов	11
Васильев И.Л., Груздева Т.В., Ушаков А.В. Об одной задаче размещения при наихудшем сценарии потерь объектов обслуживания	13
Верхозин А.С. Характеристики черных дыр через общие понятия механики, термодинамики и молекулярно-кинетической теории	14
Воловикова З.А., Веснин А.М. Возможные подходы к автоматизации калибровки камеры ALLSKY по снимкам звездного неба	17
Воскобойников М.Л. Актуализация данных об использовании сервисов, получаемых с датчиков мобильного устройства	20
Гладкочуб Д.П., Горнов А.Ю., Складов Е.В., Козлов В.В., Донская Т.В. Идентификация моделей взаимодействия мантийных и коровых магм на различных уровнях земной коры	21
Горнов А.Ю., Аникин А.С. Исследование валидности тригонометрической редукции задач «mixed-integer» класса к непрерывным задачам глобальной оптимизации	22
Горнов А.Ю., Аникин А.С., Зароднюк Т.С. Программная реализация метода Понтрягина с использованием параллельных вычислительных технологий	23
Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С. Численное решение траекторных задач молекулярной динамики для систем с различными типами потенциалов	24
Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С., Зиновьева А.Ф., Ненашев А.В. Исследование возможности управления проводимостью массива квантовых точек на примере релаксации фотопроводимости в магнитном поле	25
Грибанова И.А., Семенов А.А. Об отсутствии свойств случайного оракула у полнораундовой хеш-функции MD4	26

Громик Н.А. Разработка виртуальной лаборатории для отработки алгоритмов слежения за движущимися объектами	27
Дмитриев И.Г. Экстраполяция алгоритма получения оптимальных заполнений на 4-мерное евклидово пространство	28
Дьячук П.В., Чащина В.А. Космонавты земли иркутской	32
Жарков М.Л., Казаков А.Л., Павидис М.М. Применение теории массового обслуживания для моделирования железнодорожных сортировочных станций	33
Заикин О.С., Кочемазов С.Е. Применение методов оптимизации для параллельного решения трудных экземпляров проблемы булевой выполнимости	35
Зароднюк Т.С., Горнов А.Ю. Многоэтапная методика повышения надежности численного решения невыпуклых задач оптимального управления	36
Зароднюк Т.С., Горнов А.Ю. Технология численной аппроксимации интегральной воронки для полиэдрально управляемой системы	37
Зароднюк Т.С., Горнов А.Ю., Аникин А.С. Технология аппроксимации многомерных временных рядов с использованием нелинейных динамических моделей на плоскости	39
Зароднюк Т.С., Сорокин С.П. Технология приближенного решения задачи оптимального управления на основе нелокального условия оптимальности	40
Зароднюк Т.С., Сорокин С.П. О численном исследовании некоторых экономических моделей с использованием программного комплекса OPTCON-IEOPP	42
Иртегов В.Д., Титоренко Т.Н. О выделении и использовании семейств инвариантных многообразий в качественном анализе вполне интегрируемых систем	44
Казаков А.Л., Кузнецов П.А. Об одной теореме существования и единственности решения типа тепловой волны для нелинейного уравнения теплопроводности с источником	45
Кензин М.Ю. Координация группы автономных мобильных роботов в условиях топливных ограничений	46
Клер А.М., Жарков П.В. Эффективный подход к математическому моделированию и оптимизации теплоэнергетических установок	47
Козлов В.В. Оценка причин, вызывающих генерацию потоков газа в глубоководных районах озера Байкал	50
Косов А.А. Алгоритм построения общих функций Ляпунова для систем с переключениями	52
Косов А.А., Семенов Э.И. Распределенная модель освоения пространства двумя типами взаимодействующих роботов и ее точные решения	55
Косов А.А., Семенов Э.И. Точные многомерные решения некоторых нелинейных систем уравнений	58
Костылев Д.А. Распределенные вычисления в программно-аппаратном моделирующем комплексе для исследования поведения групп автономных роботов	59
Костылева О.Д., Парамонов В.В., Ветрова В.В. О технологии моделирования экстремальных климатических явлений на основе методов машинного обучения	60

Кочемазов С.Е., Заикин О.С., Кондратьев В.С., Семенов А.А. Использование дубликатов конфликтных ограничений для ускорения CDCL-вывода	62
Лакеев А.В. О внутренней устойчивости линейных формаций	63
Ларионов А.А. Автоматический поиск логического вывода для класса позитивно-образованных формул без неограниченных переменных	68
Малков Ф.С., Марянян А.Ю. О применении информационных технологий для автоматизации исследований фетального алкогольного синдрома (фетального алкогольного спектра нарушений)	70
Михайлов А.А., Хмельнов А.Е., Ружников Г.М. Анализ массивов данных заявлений граждан в МФЦ Иркутской области с использованием методов машинного обучения	71
Николайчук О.А., Павлов А.И., Столбов А.Б. Функциональные особенности системы создания агентных имитационных моделей ADSKIT	72
Салимов Б.Г., Хмельнов А.Е. Сравнение различных моделей машинного обучения для предсказания критической частоты FOF2	73
Семенов А.А., Отпущенников И.В. О технике склеивания переменных в псевдо-булевой оптимизации	74
Сороковиков П.С. Металлические кластеры Саттона-Чена размерностей от 81 до 130 атомов	75
Сороковиков П.С. Программная реализация алгоритмов невыпуклой оптимизации с систематическим разделением на несколько множеств	76
Сороковиков П.С., Зароднюк Т.С. Задача оптимального управления мобильным роботом с фазовыми ограничениями	78
Суслов В.И., Горнов А.Ю., Аникин А.С., Зароднюк Т.С. Программный комплекс OPTCON-IEOPP, версия 2019г. Новые возможности и приложения	80
Толстихин А.А. Разработка гибридного метаэвристического алгоритма оптимизации на базе WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM	81
Тятюшкин А.И. Многометодная оптимизация нелинейных систем управления	82
Феоктистов А.Г., Костромин Р.О. Сравнительный анализ работы метапланировщиков ресурсов в процессе выполнения схемы решения задачи	85
Фереферов Е.С., Ветров А.А. Разработка информационной системы поддержки археологических исследований	86
Хмельнов А.Е. Алгоритм синтаксического разбора простых предложений и словосочетаний русского языка, основанный на согласовании словоформ	88
Чистяков В.Ф. Свойства краевых задач для нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений высокого порядка	92
Шабалин А.С. Информационно-образовательная среда обучения FORLABS	93
Шайдурова А.В., Ломов В.П. Численное решение уравнения осцилляций нейтрино в среде при помощи разложения Магнуса	94

Юрин А.Ю., Дородных Н.О. Восстановление концептуальных моделей из электронных таблиц на примере отчетов по экспертизе промышленной безопасности	95
Юрин А.Ю., Дородных Н.О., Коршунов С.А. Расширение предметно-ориентированного языка описания моделей трансформаций TMRL	97
Грищенко М.А., Дородных Н.О., Коршунов С.А. Модули поддержки создания баз знаний на основе преобразования онтологий	98
Коршунов С.А., Дородных Н.О. Экспериментальная оценка автоматизированного создания продукционных баз знаний на основе преобразования онтологий	100

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 29.11.2019 г.
Формат бумаги 60×84 1/16, объем 4,25 п.л.
Заказ 8. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИДСТУ СО РАН