

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

ЛЯПУНОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

2 – 6 декабря 2024 года

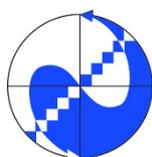
Материалы конференции



А.А. Ляпунов

А.М. Ляпунов

Международная конференция «Ляпуновские чтения - 2024»



Иркутск – 2024

Научное издание

Материалы 40-й международной конференции «Ляпуновские чтения – 2024» (г. Иркутск, 2 – 6 декабря 2024 г.). – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2024. – 271 с.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на 40-й международной конференции «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 2 – 6 декабря 2024 г.). Конференция организована с целью обсуждения актуальных результатов исследований научных сотрудников, аспирантов и студентов по математике, механике, теории управления, информационным и вычислительным технологиям. Для обсуждения результатов достижений в области современных подходов мониторинга и прогнозирования экологической обстановки в рамках конференции проводится специальная секция «Методы и технологии экологического мониторинга». В целях популяризации науки в рамках конференции проводится секция для юных исследователей. В 2024 году в связи с 90-летием со дня рождения выдающегося российского учёного-математика В.И. Гурмана секцию "Математическая теория управления" решено посвятить его памяти.

Тематика конференции:

- Математическая теория управления
- Дифференциальные уравнения и математическая физика
- Математическое моделирование, системный анализ и оптимизация
- Информационно-вычислительные технологии
- Специальная секция «Методы и технологии экологического мониторинга»
- Специальная секция для школьников

КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ОДНОГО УРАВНЕНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ТИПА

М.О. Абулов

Университет информационных технологий и менеджмента,
Республика Узбекистан, г. Карши
abulov1959@mail.ru

В области $Q = \{(x_1, x_2, x_3, t) : -1 \leq x_i \leq 1, i = 1, 2, 3, 0 \leq t \leq T\} = D \times [0, T]$ рассматривается интегральное уравнение эллиптического типа [1]

$$\Delta_x u(x, t) + \int_0^t \sum_{i=1}^3 b_i(x, \xi) \frac{\partial^2 u(x, \xi)}{\partial x_i^2} d\xi = f(x, t), \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, x_3)$, $b_i(x, t)$, $i = 1, 2, 3$, $f(x, t)$ – заданные, достаточно непрерывные функции.

Известно, что многие явления в биологических системах существенно зависят от предыстории этой системы, т. е. являются эредитарными (по терминологии Вольтерра). Эти явления, как правило, описываются нагруженными дифференциальными уравнениями, например, в частности, уравнениями (1) [1, с. 92]. Нетрудно видеть, что дифференцируя по t уравнение (1), получим дифференциальное уравнение третьего порядка

$$Lu \equiv \Delta_x u_t(x, t) + \sum_{i=1}^3 b_i(x, t) u_{x_i x_i}(x, t) = f'(x, t). \quad (2)$$

Отметим, что уравнение (1) Вольтерра назвал интегродифференциальным уравнением эллиптического типа [1].

Краевая задача. Найти в области Q решение уравнения (2), удовлетворяющее следующему краевому условию:

$$u|_{\partial D} = 0, \quad u|_{t=0} = u_0(x). \quad (3)$$

Для решения задачи (2), (3) применяется метод Галеркина, получаются априорные оценки и с помощью этих полученных оценок доказывается, что решение поставленной задачи существует и единственно в пространстве $W_2^{2,1}(Q)$ [2].

Определение 1. Обозначим через $W_2^{2,1}(Q)$ пространство функций, полученное замыканием функций из $C^\infty(Q)$, удовлетворяющих условию (3) по норме [2]

$$\|u\|_{W_2^{2,1}(Q)} = \int_Q (u_{ix}^2 + u_{xx}^2 + u_x^2 + u^2) dQ$$

Определение 2. Функцию $u(x, t) \in W_2^{2,1}(Q)$ будем называть п.в. решение задачи (2), (3), если она удовлетворяет уравнению (2) почти всюду [3].

Теорема. Пусть выполнено условие $f, f_i' \in L_2(Q)$. Тогда решение задачи (2), (3) существует и единственно в пространстве $W_2^{2,1}(Q)$.

Для доказательства теоремы применяется метод Галеркина, т. е. решение задачи (2), (3) будем искать в виде

$$u_m(x, t) = \sum_{i=1}^m g_i(t) \varphi_i(x),$$

где функции $\varphi_i(x)$ являются решениями задачи

$$-\Delta \varphi_i = \lambda_i \varphi_i, \quad i = 1, 2, \dots, \quad \varphi_i = 0 \text{ на } \partial D.$$

Далее для приближенного решения получаются априорные оценки, которые позволяют доказать данную теорему.

1. А.М. Нахушев. Уравнения математической биологии. М.: «Высш. шк. 1995, 301 с.
2. С.Л. Соболев. Некоторые применения функционального анализа в математической физике. М.: Наука, 1988, 336 с.
3. В.П. Михайлов. Дифференциальные уравнения в частных производных. М.: Наука, 1976, 392 с.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ГЛУБИНЫ ПО СТЕРЕОПАРЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ*

Ю.В. Авраменко, Р.К. Фёдоров

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

Карта глубины широко применяется в компьютерном зрении для реконструкции сцены в трехмерную модель окружающего пространства. Применяется в дополненной реальности, автоматическом управлении автомобилями и решении других задач. Существует несколько технологий построения карты глубины, основанных на использовании: камеры структурного света; камеры, измеряющей задержку отраженного света; стереопары; пленоптической камеры; лидара сенсоров. Самым распространенным способом является использование стереопары.

Идея построения карты глубины заключается в поиске пары соответствующих точек, для которых, применив триангуляцию, возможно определить координаты относительно камеры. Основная сложность состоит в выборе соответствующих пар точек. Применяется ряд методов, таких как SURF [1], SIFT [2], нейронные сети и другие. Большинство методов требуют настройки параметров и работают хорошо только на тестовых изображениях. На качество влияют различные факторы, такие как освещение, текстура, взаимное расположение объектов, что приводит к возникновению неточностей и шумов.

В данной работе предложен подход автоматизации процесса построения карты глубины по стереопаре. Для левого и правого изображения стереопары происходит их сегментирование при помощи Segment Anything Model [3]. На выходе получаем два множества объектов (L, R) с информацией: об их положении на изображении (x, y), ширине и высоте (h, w), набор признаков (f). К данным множествам применяется алгоритм поиска наилучшего соответствия по метрике косинусного расстояния. В расчетах учитываются ограничения на положение объектов, например, объекты должны находиться на одной высоте (эпиполярной линии), координата объекта на левом изображении должна быть больше соответствующей координаты с правого изображения, ширина и высота объектов должны совпадать с заданной точностью. На выходе получается список объектов, являющихся одним и тем же на левом и правом изображении стереопары. Определение пар точек для объекта происходит по левой и правой границе бинарной маски. Затем рассчитываются расстояния и выбирается медианное значение. На выходе получаем расстояние до левого и правого края объекта, таким образом возможно определить, фронтально расположен объект или нет. В завершении происходит построение карты глубины расположения объектов. Автоматическое построение карты глубины позволит обрабатывать серии стереопар и объединить несколько сцен.

1. H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool. SURF: Speeded up robust features. In ECCV, 2006.
2. D. G. Lowe. Object recognition from local scale-invariant features. Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece, vol.2, 1999, pp. 1150-1157, doi: 10.1109/ICCV.1999.790410.
3. A. Kirillov et al. Segment Anything. 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Paris, France, 2023, pp. 3992-4003, doi: 10.1109/ICCV51070.2023.00371.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта "Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объемов разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искусственного интеллекта, модельно-управляемого подхода и машинного обучения" (№ гос регистрации: 121030500071-2)

ОБУЧЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ДОКУМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ САМООБУЧЕНИЯ И ИНВАРИАНТНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

А.Е. Алексеев

Институт динамики систем и теории управления имени В.М Матросова СО РАН
solmir505@gmail.com

В работе предложен метод для решения задачи обучения представлений изображений документов с помощью глубоких нейронных сетей. Для решения поставленной задачи был собран и подготовлен набор данных, включающий три основных класса: паспорт, водительское удостоверение и чек. Данные были собраны из открытых источников, а также дополнительно обработаны для балансировки классов. Каждый класс включает несколько тысяч изображений. Для решения задачи построена модель на основе ResNet18 для кластеризации изображений [2]. Подход к кластеризации заключается в том, что модель обучается на парах изображений: исходное и аугментированное. Аугментации подобраны так, чтобы изменения не сильно влияли на семантику исходного изображения, так как важно, чтобы пары изображений сохраняли общее абстрактное содержание. Далее оба изображения обрабатываются с помощью ResNet18. Для полученных векторов рассчитывается функция потерь, в качестве которой используется взаимная информация [1]. Использование взаимной информации обусловлено следующими преимуществами: взаимная информация позволяет избежать вырожденные решения, устойчивость к шуму и неизвестным классам. При этом важно, чтобы кластеризация выполнялась на конечном множестве классов, а не в непрерывном пространстве, это позволяет точно вычислить взаимную информацию [3]. Метод продемонстрировал свою эффективность на ограниченном наборе данных, показывая высокие значения метрик качества кластеризации, таких как Adjusted Rand Index (ARI), Homogeneity и Completeness. Это подтверждает применимость предложенного подхода для задач анализа изображений электронных документов. Для дальнейшего исследования метода проведена декомпиляция программного кода и подготовлен новый набор данных, содержащий 16 классов изображений электронных документов, каждый из которых включает 40000 примеров.

1. Xu Ji, Jo˜ao F Henriques, Andrea Vedaldi. Invariant information clustering for unsupervised image classification and segmentation //Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision – 2019, с. 9865-9874.
2. Alexey Dosovitskiy, Philipp Fischer, Jost Tobias Springen- berg, Martin Riedmiller, and Thomas Brox. Discriminative unsupervised feature learning with exemplar convolutional neural networks //IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 38(9):1734-1747, 2015.
3. Ishmael Belghazi, Sai Rajeswar, Aristide Baratin, R Devon Hjelm, and Aaron Courville. Mine: mutual information neural estimation. arXiv preprint arXiv:1801.04062, 2018

АРГУМЕНТНАЯ И КРИТЕРИАЛЬНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ

А.С. Аникин, А.Ю. Горнов

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

Актуальность постановок экстремальных задач, включающих дискретнозначные переменные, не может быть подвергнута никакому сомнению. Помимо собственно задач дискретной оптимизации (см., напр., [1]) в прикладных постановках проблем все чаще встречаются также задачи, включающие как «непрерывные», так и дискретные и/или булевские переменные – т. н. «смешанно-целочисленные» (см., напр., [2, 3]). Однако появление даже в небольшом количестве дискретных переменных резко усложняет задачу, моментально превращая даже самые приятные и удобные постановки (линейное программирование, выпуклое программирование, ...) в задачи невыпуклые, причем невыпуклые «по существу».

Одним из самых популярных приемов борьбы с дискретностью переменных является, конечно, метод штрафа. Для каждой из булевских переменных можно добавить в задачу ограничение $x(1-x)$, для «триплексных» переменных $(-1, 0, 1)$ ограничение $(x-1)x(x+1)$, для дискретных общего вида $\sin^2 2\pi x$. Подобные приемы, очевидно, многократно переизобретались специалистами в различные годы; найти первоисточник нам пока не удалось. Такой подход в ряде работ принято называть непрерывной релаксацией, в данном случае речь идет об аргументной релаксации. Вычислительная практика показывает вполне удовлетворительные в несложных задачах характеристики методик такого типа.

В докладе обсуждается другой подход к учету дискретнозначности переменных, который, на наш взгляд, уместно назвать критериальной релаксацией. Основная идея заключается во введении штрафа за отклонение значения функции в текущей (вообще говоря, непрерывной) точке от значения функции в ближайшей точке с дискретными координатами («опорной точки»). Способов определения опорной точки может быть предложено множество, представляется вполне разумным «для начала» использование минимума «первой нормы» – суммы модулей расхождения двух точек. В опорной точке необходимо вычислить значение функции, что вдвойне увеличивает затраты на получение «ответа оракула» – «общей пробы» для использования в алгоритмах. Однако такие небольшие дополнительные расходы при решении сложных невыпуклых задач представляются вполне допустимыми.

Предлагаемая методика была реализована на основе исследованного нами ранее «непрерывного» алгоритма [1] для задач оптимизации «черного ящика» (Black Box Optimization). Произведенное тестирование на множестве дискретных задач подтвердило принципиальную работоспособность предложенного подхода. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Lee J. A First Course in Combinatorial Optimization. Cambridge Texts in Applied Mathematics, Cambridge University Press. Vol. 36. 2004.
2. Хачатуров В.Р., Веселовский В.Е., Злотов А.В., Калдыбаев С.У., Калиев Е.Ж., Коваленко А.Г., Монтлевич В.М., Сигал И.Х., Хачатуров Р.В. Комбинаторные методы и алгоритмы решения задач дискретной оптимизации большой размерности. М.: Наука, ВЦ РАН, 2000.
3. Хохлюк В.И. Методы дискретной оптимизации. Учебное пособие. НГУ, 2013.
4. Горнов А.Ю. Численное исследование вариантов метода Q-поиска. Ляпуновские чтения, 2022. С. 25.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА КРИВОЛИНЕЙНОГО ВАРЬИРОВАНИЯ ДЛЯ НЕВЫПУКЛЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ*

А.С. Аникин, Т.С. Зароднюк

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

Прием криволинейного варьирования достаточно давно известен в практике численной оптимизации. Например, в знаменитом источнике [1] он использован для преодоления неприятного эффекта «неулучшаемых направлений», генерируемых традиционным методом Ньютона. Сложившиеся технологии обеспечения релаксационности алгоритмов второго порядка тяготеют либо к методике ломаных, когда движение начинается по градиенту, а потом, переломившись, идет к «ньютоновской точке», либо к криволинейной многомерной кривой с аналогичными началом и концом. Однако для задач оптимального управления такие методики долгое время не применялись. Первым алгоритмом динамической оптимизации, использующим эту методику, считается алгоритм из работы [2].

Линейное варьирование управления, доминирующее в численных методах, неизбежно приводит, пройдя через дифференциальный оператор, к криволинейным отображениям на множествах достижимости. С другой стороны, криволинейные способы изменения управления, очевидно, много богаче линейных, которые могут быть включены в них как частный случай. Возникающие при этом риски выхода конструируемых управлений за границы допустимых интервалов могут быть легко погашены с применением операторов геометрического проектирования.

Попытки использования удобных свойств криволинейного варьирования для построения параллельных технологий в задаче оптимального управления нами уже производились [2]. Однако, на наш взгляд, потенциал параллелизма криволинейного варьирования раскрыт еще далеко не полностью. В докладе обсуждается предложенный метод конечномерной оптимизации, основанный на обсуждаемом подходе. Основная идея заключается в построении кривых, исходящих из текущей точки по касательной к градиенту и направленных к заранее сгенерированной достаточно удаленной опорной точке. Вариации такого типа могут гарантировано включать улучшающие приближения (если, конечно, градиент ненулевой) и, с другой стороны, служить инструментом для нелокального поиска. Параллельная технология опирается на применяемый метод одномерного поиска, использующий методику «сжимающихся сеток»: на каждой итерации генерируется случайная сетка на допустимом интервале, значения функции в узлах которой вычисляются в параллельном режиме; затем выбирается новая сетка в малой окрестности наилучшего найденного приближения и т. д.

Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили принципиальную работоспособность предложенного подхода.

1. Дэннис Дж., мл., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. М.: Мир, 1988. 440 с.
2. 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.
3. Аникин А.С., Зароднюк Т.С. Параллельная реализация алгоритма криволинейного поиска для невыпуклой задачи оптимального управления // Ляпуновские чтения, 2020. С. 7.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№^о гос. регистрации: 121041300060-4).

ПРИМЕНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МАКСИМИЗАЦИИ ВЛИЯНИЯ В БУЛЕВЫХ СЕТЯХ*

А.В. Андреев, А.И. Бугровский
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
sasha.andrieiev.2001@mail.ru, aibugrovskii@itmo.ru

Максимизация влияния (Influence Maximization problem, IM) является одной из интенсивно изучаемых задач в науках о сетях (Network Science). Ряд фундаментальных результатов, касающихся IM, были получены в работе [1]. В частности, в этой статье были описаны основные модели распространения информации в булевых сетях: линейная пороговая модель (Linear Threshold Model, LTM) и независимая каскадная модель (Independent Cascade Model). Основным интересом для настоящего исследования является LTM, а точнее, ее детерминированный вариант, обозначаемый через DLTM (от Deterministic Linear Threshold Model). По своей идейной природе DLTM близка к известным пороговым моделям, введенным М. Грановеттером в работе [2]. Для формального определения DLTM удобно использовать синхронные булевы сети (Synchronous Boolean Network, SBN), введенные С. Кауффманом в [3].

Итак, рассмотрим ориентированный размеченный граф $G = (V, A, L)$, где V – множество вершин, A – множество дуг, L – множество меток, приписанных вершинам и дугам G . Для произвольной $v \in V$ множество всех вершин вида $u \in V: (u, v) \in A$ назовем окрестностью вершины v и обозначим его через U_v . Полагаем, что с произвольной дугой вида $(u, v) \in A$ связано неотрицательное вещественное число $B_{(u,v)}$, называемое весом дуги (u, v) . Также свяжем с каждой дугой ее нормированный вес, выраженный следующим числом: $b_{(u,v)} = \frac{B_{(u,v)}}{\sum_{u \in U_v} B_{(u,v)}}$. Для корректности полагаем, что хотя бы одна вершина $u \in U_v$ соединена с v дугой положительного веса. Также свяжем с каждой вершиной $v \in V$ число $\theta_v \in [0, 1]$, называемое порогом вершины v .

Следуя С. Кауффману [3], определим на основе G дискретную динамическую систему (Discrete Dynamic System, DDS), которую также будем обозначать G . Будем полагать, что в каждый момент времени $t + 1$, $t \in \{0, 1, 2, \dots\}$, с произвольной вершиной $v \in V$ связано значение следующей весовой функции:

$$f_v(t + 1) = \begin{cases} 1, & \sum_{u \in U_v} b_{(u,v)} \cdot f_u(t) \geq \theta_v, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Набор значений функций вида (1) всех вершин в произвольный момент t будем называть состоянием DDS G в данный момент времени. Вершины, имеющие в момент t значение функции (1), равное 1, называются активными, остальные вершины неактивны в момент t . Таким образом, состояние G в произвольный момент t – это булев вектор $\alpha(t) \in \{0, 1\}^n$, $n = |V|$. Набор значений функций (1) при $t = 0$ задается отдельно и может быть любым вектором из $\{0, 1\}^n$, после чего значения весовых функций в моменты $t = 1, 2, \dots$ пересчитываются синхронно в соответствии с формулами (1). Состояние $\alpha(0)$ называется начальным.

Описанная DDS является примером синхронной булевой сети (Synchronous Boolean Network, SBN) [4]. Если, начиная с некоторого t , имеет место $\alpha(t) = \alpha(t + 1)$, то состояние $\alpha(t)$ называется неподвижной точкой DDS G . Несложно показать, что для SBN с весовыми функциями вершин вида (1) имеет место следующий факт: для любого начального состояния $\alpha(0)$ DDS G найдется такое $t \in \{0, 1, \dots, n\}$, что состояние $\alpha(t)$,

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 075-03-2020-139/2 (Госзадание 2019-1339).

достигнутое из $\alpha(0)$, является неподвижной точкой данной DDS. Далее начальное состояние DDS G будем обозначать через α , а достигнутую из этого состояния неподвижную точку – через $\bar{\alpha}$.

В большом числе работ по распространению информации в социальных сетях начальное состояние DDS G часто называют целевым множеством (Target Set, TS) и рассматривают задачу выбора целевого множества (Target Set Selection problem, TSS): для заданного числа $R: 1 \leq R \leq n$ найти начальное состояние α с минимальным числом активных вершин, такое что число активных вершин в неподвижной точке $\bar{\alpha}$, достигнутой из α , не меньше R .

С задачей TSS тесно связана проблема максимизации влияния (IM), которая в соответствии с [1] может быть сформулирована в отношении рассматриваемой DDS в следующем виде: для фиксированного $k \in \{1, \dots, n\}$ среди всех векторов $\alpha \in \{0,1\}_k^n$: $wt_H(\alpha) = k$, найти такой, что число активных вершин в неподвижной точке, достигнутой из этого вектора, будет максимальным. Более формально, обозначим через $\{0,1\}_k^n$ множество всех векторов в $\{0,1\}^n$, имеющих вес Хэмминга $k, k \geq 1$. Введем в рассмотрение следующую функцию:

$$\sigma: \{0,1\}_k^n \rightarrow \{k, \dots, n\}. \quad (2)$$

Для произвольного $\alpha \in \{0,1\}_k^n$ значение $\sigma(\alpha)$ определяется как вес Хэмминга вектора $\bar{\alpha}$, задающего неподвижную точку, которая была достигнута DDS G из начального состояния α . Таким образом, величину $\sigma(\alpha)$ можно рассматривать как меру влияния вектора α на сеть G в контексте процесса активации. В рамках IM относительно DLTM требуется найти α , на котором значение функции (2) максимально.

В [1] были приведены аргументы труднорешаемости IM в контексте DLTM: конкретно, была показана NP-трудность данной задачи, а также установлен факт отсутствия приближенных алгоритмов решения IM с гарантированной точностью в предположении, что $P \neq NP$. В статье [5] близкие по смыслу результаты были получены в отношении TSS.

Точные решения TSS могут быть найдены при помощи комбинаторных алгоритмов. В статье [6] для этой цели использовались SAT решатели. Однако соответствующие задачи в форме SAT оказываются слишком сложными уже для сетей с $n > 100$ вершинами и, соответственно, практическая значимость данного подхода ограничена. В работе [7] для приближенного решения TSS в контексте DLTM был использован жадный алгоритм, являющийся модификацией алгоритма из [1]. В статьях [8] и [9] для решения TSS использовались эволюционные алгоритмы. Соответственно, TSS в этих работах ставилась как задача псевдо-булевой оптимизации.

В настоящей работе рассматривается задача IM в контексте DLTM и для ее решения используется вариант (1+1) эволюционного алгоритма, предложенный в статье [10] для поиска специальных структур, называемых ρ –лазейками [11]. Суть данного алгоритма в том, что он совершает специального вида случайные мутации, идейно близкие к тем, которые выполняет стандартный (1+1)-EA [12], [13], с той лишь разницей, что мутации, определенные в [10], являются преобразованиями на множестве $\{0,1\}_k^n$ и, таким образом, хорошо подходят для решения IM. Соответствующий вариант алгоритма (1+1)-EA получил название (1+1)-WEA (от Weighted Evolutionary Algorithm).

В рамках настоящего исследования (1+1)-WEA был использован для решения IM в соответствии со следующей общей схемой. Рассматривается SBN G и соответствующая DDS с функциями вида (1). Строится некоторый вектор $\alpha \in \{0,1\}_k^n$, объявляемый текущим (current). Если α –произвольный текущий вектор, то к нему применяется оператор μ_k^n из [10], выполняющий случайную (1+1)-мутацию на $\{0,1\}_k^n$. Введем обозначение $\alpha' = \mu_k^n(\alpha)$. Если $\sigma(\alpha') > \sigma(\alpha)$, то α' становится текущим вектором ($\alpha := \alpha'$). В противном случае текущий вектор не изменяется. Алгоритм продолжает работу до

тех пор, пока не будет превышен заданный лимит на число мутаций. После этого алгоритм останавливается и выдает значение $\sigma(\alpha)$, где α – текущий вектор.

Для построения начального вектора $\alpha \in \{0,1\}_k^n$ использовался жадный алгоритм из работы [7].

Описанный алгоритм применялся в отношении фрагментов сетей реального мира, доступных в библиотеке [14]. Ниже приводится рисунок (рис. 1), демонстрирующий поведение алгоритма (1+1)-WEA.

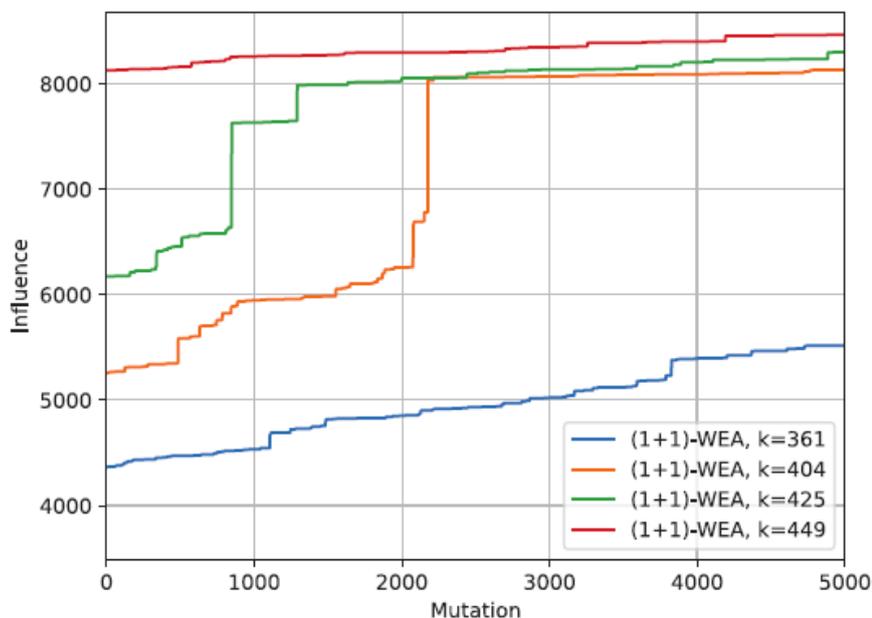


Рис. 1. График поведения алгоритма (1+1)-WEA при решении задачи IM в сети ‘p2p-Gnutella06’ из библиотеки [12] при различных значениях k

На данном рисунке рассмотрен тест ‘p2p-Gnutella06’ из библиотеки [14]. Соответствующий граф имеет 8717 вершин. На оси OY показано число активных вершин сети в неподвижной точке, которая достигнута из начального состояния $\alpha \in \{0,1\}_k^n$ за число мутаций, отображенное на оси OX. Точки при $x = 0$ соответствуют значениям $\sigma(\alpha)$ для состояний $\alpha \in \{0,1\}_k^n$, найденных жадным алгоритмом из [7]. Можно заметить, что в некоторых случаях (при $k = 404$ и при $k = 425$) алгоритм (1+1)-WEA весьма существенно улучшает начальное приближение, найденное жадной эвристикой.

По итогам исследования можно заключить, что алгоритм (1+1)-WEA способен значительно улучшать целевые множества в задаче IM, находимые жадными алгоритмами, и, соответственно, является перспективным вычислительным инструментом для решения этой задачи. В ближайших исследованиях мы планируем использовать для решения IM параллельные версии данного алгоритма.

Авторы выражают благодарность С.Е. Кочемазову и А.А. Семёнову за внимание к настоящему исследованию и многочисленные плодотворные дискуссии.

1. Kempe D., Kleinberg J., Tardos E. Maximizing the spread of influence through a social network. KDD 2003. P. 137-146.
2. Granovetter M (1978) Threshold models of collective behavior. American Journal of Sociology. Vol. 83. N. 6. P. 1420–1443.
3. Kauffman S. A. Metabolic stability and epigenesis in randomly constructed genetic nets. J. Theor. Biol. 1969. V. 22, №.3. P. 437–467.
4. Dubrova E., Teslenko M. A SAT-based algorithm for finding attractors in synchronous Boolean networks. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics. 2011. Vol. 5. N. 7. P. 1393-1399.

5. Ben-Zwi O., Hermelin D., Lokshantov D., Newman I. An exact almost optimal algorithm for target set selection in social networks. In ACM Conference on Electronic Commerce (EC 2009), pages 355-362, 2009.
6. Kochemazov S., Semenov A. Using synchronous Boolean networks to model several phenomena of collective behavior. PLoS ONE. 2014. 9(12): e115156.
7. Swaminathan A. An Algorithm for Influence Maximization and Target Set Selection for the Deterministic Linear Threshold Model. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2014.
8. Kochemazov S. Comparative Study of Combinatorial Algorithms for Solving the Influence Maximization Problem in Networks under Deterministic Linear Threshold Model. Procedia Computer Science. 2018. Vol. 136. P. 190-199.
9. Smirnov M., Kochemazov S., Semenov A. The Study of the Target Set Selection Problem under Deterministic Linear Threshold Model Using Evolutionary Algorithms. In MIPRO 2023. IEEE Xplore. P. 1039-1044.
10. Pavlenko A., Semenov A. Using Island Model in Asynchronous Evolutionary Strategy to Search for Backdoors for SAT. Congress of Evolutionary Computations (CEC) 2024. IEEE Xplore. P. 1-7.
11. Semenov A., Pavlenko A., Chivilikhin D., Kochemazov S. On probabilistic generalization of backdoors in Boolean satisfiability. AAI 2022. P. 10353-10361.
12. Muhlenbein H. How genetic algorithms really work: Mutation and hill climbing. In PPSN 1992. P. 15-26.
13. Droste S., Jansen T., Wegener I. On the analysis of the 1+1 evolutionary algorithm. –Theoretical Computer Sciences. 2002. Vol. 276. P. 51-81.
14. Leskovec J., Krevl A. SNAP Datasets: Stanford Large Network Dataset Collection; 2014. <http://snap.stanford.edu/data>.

ЛОГИКИ С ВЕКТОРНОЙ СЕМАНТИКОЙ В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ И ПРИНЯТИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Л.В. Аршинский, В.С. Лебедев, О.В. Литвинова
Иркутский государственный университет путей сообщения
larsh@mail.ru, lebedevvs97@yandex.ru, mahovsk@yandex.ru

В докладе обсуждаются вопросы применения логик с векторной семантикой в форме V^{TF} -логик для анализа данных. В первую очередь т. н. «больших данных», анализ которых позволяет вырабатывать рекомендации для лиц, принимающих управленческие решения. Особенностью V^{TF} -логик является возможность параллельной обработки аргументов за и против того или иного суждения. В качестве аргументов могут выступать свидетельства, экспертные мнения и т. п. Такой подход позволяет учесть не только полноту и противоречивость, но и достоверность обрабатываемой информации, что также целесообразно принимать во внимание.

В основе формализма лежит понятие вектора истинности:

$$\|a\| = \langle a^+; a^- \rangle, \quad (1)$$

где a – некоторое суждение, $\|a\|$ – его истинность; $a^+, a^- \in [0,1]$ – степени уверенности в том, что суждение, соответственно, истинно и ложно. Значения a^+ и a^- определяются соответствующими аргументами [1, 2].

Вторым элементом обсуждаемого формализма выступает основанное на векторе истинности понятие нестрогой вероятности. Согласно [3] нестрогая вероятность представляется вектором $\langle P^+(A); P^-(A) \rangle$, где $P^+(A)$ – вероятность реализации, а $P^-(A)$ – нереализации события A ; $P^+(A), P^-(A) \in [0,1]$. Компоненты вектора рассчитываются как

$$P^+(A) = \sum_{\omega \in \Omega} F^+(\omega, A) p(\omega);$$
$$P^-(A) = \sum_{\omega \in \Omega} F^-(\omega, A) p(\omega).$$

Здесь $F^+(\omega, A) \in [0,1]$ – позитивный компонент вектора истинности утверждения:

Здесь $F^+(\omega, A) \in [0,1]$ – позитивный компонент вектора истинности утверждения:

$$F(\omega, A) = \text{«Элементарное событие } \omega \text{ благоприятно с точки зрения события } A\text{»}, \quad (2)$$

показывающий, насколько (2) истинно, а $F^-(\omega, A) \in [0,1]$ – негативный компонент этого вектора, показывающий, насколько (2) ложно; $p(\omega)$ – вероятность ω в обычном смысле; Ω – полная группа элементарных событий.

Этот взгляд на вероятность может быть полезен, когда нет полной уверенности в ω . Например, если низко доверие к подтверждающим/опровергающим свидетельствам о его наблюдении.

Этот взгляд на вероятность может быть полезен, когда нет полной уверенности в ω . Например, если низко доверие к подтверждающим/опровергающим свидетельствам о его наблюдении.

Одним из направлений, где могут найти применение указанные подходы, является анализ больших данных (АБД). Сегодня многие корпоративные данные хранятся в базах данных (БД), как правило, реляционных. Способ представления в них – табличный, когда объекту, ситуации и т. п. ставится в соответствие кортеж (запись) $T = \langle t_1, t_2, \dots, t_n \rangle$, где t_i – атрибут. Такое представление хорошо корреспондирует с таблицами совместной встречаемости, используемыми в индуктивном выводе. Кроме того, корпоративные или иные данные могут размещаться в электронных таблицах, что также подсказывает возможность их анализа средствами индуктивной логики. Неуверенность в данных при описываемом подходе к анализу формализуется тем, что качественная информация в

каждой ячейке таблицы сопровождается вектором (1), а количественная переводится в набор непересекающихся интервалов и каждый интервал рассматривается как отдельное качество. Компоненты вектора отражают доверие к данным, задаваемое по объективным или субъективным соображениям [4, 5].

Таблицы совместной встречаемости используются при индуктивном выводе с использованием методов единственного сходства и соединённого метода сходства и различия. В них заносятся результаты наблюдений явлений a_i совместно с наблюдаемым явлением b . Если a_i в наблюдении встречается, то при традиционном подходе в ячейку заносится единица, иначе ноль. Строка, где наблюдается конкретное a_i^* , рассматривается как аргумент в пользу связи $a_i \rightarrow b$, а доля таких строк в общем массиве – как мера уверенности в ней (см., напр., [6, 7]). В векторном случае таблица принимает вид:

Таблица 1. Совместная встречаемость явлений в векторном представлении

	a_1	a_2	...	a_n	b
1	$\langle a_{11}^+; a_{11}^- \rangle$	$\langle a_{21}^+; a_{21}^- \rangle$	...	$\langle a_{n1}^+; a_{n1}^- \rangle$	$\langle b_1^+; b_1^- \rangle$
2	$\langle a_{12}^+; a_{12}^- \rangle$	$\langle a_{22}^+; a_{22}^- \rangle$	...	$\langle a_{n2}^+; a_{n2}^- \rangle$	$\langle b_2^+; b_2^- \rangle$
3	$\langle a_{13}^+; a_{13}^- \rangle$	$\langle a_{23}^+; a_{23}^- \rangle$	...	$\langle a_{n3}^+; a_{n3}^- \rangle$	$\langle b_3^+; b_3^- \rangle$
...
K	$\langle a_{1K}^+; a_{1K}^- \rangle$	$\langle a_{2K}^+; a_{2K}^- \rangle$	...	$\langle a_{nK}^+; a_{nK}^- \rangle$	$\langle b_K^+; b_K^- \rangle$

Здесь $a_{ik}^+, a_{ik}^- \in [0,1]$. В случае соединённого метода сходства и различия (СМСР) значение вектор-функции $\|F(\omega, A)\|$ для каждой строки k вычисляется как

$$\|A(a_{i,k}, \dots, a_{i,k}) \& b_k \vee \neg A(a_{i,k}, \dots, a_{i,k}) \& \neg b_k\|.$$

Для метода единственного сходства (МЕС) это выглядит как:

$$\|A(a_{i,k}, \dots, a_{i,k}) \& b_k\|.$$

Уверенность во взаимосвязи $a_i \rightarrow b$ по этим методам рассчитывается как нестрогая вероятность:

$$P(A) = \left\langle \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [A_k^+ \bullet b_k^+ \oplus A_k^- \bullet b_k^-]; \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [(A_k^- \oplus b_k^-) \bullet (A_k^+ \oplus b_k^+)] \right\rangle$$

– для СМСР и

$$P(A) = \left\langle \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [A_k^+ \bullet b_k^+]; \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [(A_k^- \oplus b_k^-)] \right\rangle$$

– для МЕС. Здесь \bullet и \oplus , соответственно, треугольная норма и ко-норма в инфиксной записи.

Для выбора наиболее предпочтительных результатов могут использоваться числовые меры [3]:

$$\mu_d(A) = P(A^+) - P(A^-) \quad (2)$$

– достоверности (обоснованности);

$$\mu_o(A) = P(A^+) \oplus P(A^-) \quad (3)$$

– определённости;

$$\mu_n(A) = P(A^+) \bullet P(A^-) \quad (4)$$

– противоречия.

Этот приём можно распространить и на более сложные выражения, чем $a_i \rightarrow b$. Например, со связками И, ИЛИ, НЕ левой части (антецеденте).

Индуктивный вывод является средством извлечения знаний продукционного типа: «Если..., то...», которые могут использоваться в системах, основанных на знаниях (СОЗ) и ином программном обеспечении, использующем продукции. Это часть инструментария интеллектуального анализа данных (Data Mining, ИАД). Сегодня ИАД находит широкое применение в системах поддержки принятия решений [8, 9].

Следует отметить, что учёт мало достоверных (точнее, отсутствующих) и противоречивых данных является также частью ДСМ-метода В.К. Финна, однако, если говорить в терминах V^{TF} -логик, в нём используются только значения истинности $\langle 0;0 \rangle$ (неопределённость) и $\langle 1;1 \rangle$ (противоречие) [10, 11]. Представленный же подход более общий.

В вышеупомянутых работах [4, 5] авторами обсуждаются отдельные аспекты извлечения продукции из таблиц индуктивными методами в условиях мало достоверной и противоречивой информации. При этом причинами проблем могут быть как ненадёжность соответствующих источников, так и возможные артефакты данных [7]. Достоинством такого подхода является то, что появляется механизм «мягкого» учёта влияния качества данных на итоговый результат, например – влияния артефактов в них (обычный подход – полное доверие к данным, если доля артефактов ниже некоторого порога и отказ от анализа, если порог превышен [12], своего рода «релейное управление» анализом). Как результат, аналитик данных может количественно оценить влияние плохих данных и учесть это в рекомендациях лицу, принимающему решение.

Ещё одним методом АБД, где может найти применение векторное представление истинности, является OLAP-анализ. В его основе лежит агрегирование количественной информации по измерениям многомерного куба (т. н. OLAP-кубы) [13, 14]. Измерениями выступают атрибуты, связанные с количеством (например, количественный показатель – выручка от продажи единицы товара, а измерения – наименование товара, его тип, производитель, поставщик, дата продажи, и т. п.). Агрегированием может выступать вычисление среднего, минимума, максимума, медианы и т. д. При неполном доверии к количественным данным, например, при исправлении артефактов, хорошо иметь механизм, который позволял бы учитывать это обстоятельство. Если в каждую ячейку OLAP-куба помимо самого показателя количества вносить вектор доверия к нему (1) и при агрегировании, допустим, усреднять компоненты векторов по соответствующим измерениям, можно получить также агрегированный показатель общего доверия к результатам анализа в векторной форме, что представляется полезным. Как и в случае индуктивного вывода это позволяет принимать решение о целесообразности анализа и релевантности его результатов, исходя не из доли «испорченных фактов», а из их фактического влияния на общий результат. Причём с учётом возможной низкой достоверности и противоречивости обрабатываемых таким образом величин. Однако вопрос векторизации OLAP-анализа требует отдельного изучения.

Наконец, третьим направлением может стать интеллектуальный анализ текстовых данных. Его частью служит анализ тональности – определение отношения говорящего, пишущего или другого субъекта к какой-либо теме, либо общей контекстуальной полярности или эмоциональной реакции на документ, действие или событие [15]. Основной метрикой такого анализа является *полярность*, которая представляется числом из определённого диапазона. Например, $[-1,1]$ или $[0,1]$. Оно выражает диапазон между негативной и позитивной тональностью. Свидетельствами в пользу той или иной тональности выступают прилагательные [15]. Одной из проблем здесь является вопрос анализа смешанной (позитивной и негативной) полярности. В [15] отмечается, что для этого вместо метрик полярности используют т. н. *метки* возможных тональностей с оценкой уверенности в них. Причём для смешанной тональности используют отдельную

метку вроде «mixed». Основной аргумент для замены метрик метками в том, что смешанная тональность не может быть выражена в числах [15]. Однако в V^{TF} -формализме этот вопрос снимается достаточно легко: тональность может быть представлена как вектор истинности $\langle a^+; a^- \rangle$ утверждения, например, $a \Rightarrow$ «Тональность данного текста положительная». Его позитивный аспект a^+ формируется позитивными, а негативный a^- – негативными прилагательными. Тогда исключительно позитивной тональности будет отвечать вектор $\langle a^+; 0 \rangle$ (вплоть до $\langle 1; 0 \rangle$), исключительно негативной – вектор $\langle 0; a^- \rangle$ (в пределе – $\langle 0; 1 \rangle$), а смешанной – собственно вектор $\langle a^+; a^- \rangle$, где a^+ и a^- отличны от нуля. Предельная нейтральность («безэмоциональность») текста выражается вектором $\langle 0; 0 \rangle$. Отрицание положительной тональности (негативная тональность) формализуется первой формой отрицания $\| \sim a \| = \langle a^-; a^+ \rangle$ а вторая форма отрицания $\| \sim a \| = \langle 1 - a^+; 1 - a^- \rangle$ отражает дефицит информации для оценки тональности (отрицание в силу недостатка информации) [1].

Меры достоверности, определённости и противоречивости дополняют эту технику.

1. Аршинский Л.В. Методы обработки нестрогих высказываний. Иркутск: изд-во ВСИ МВД России. 1998. 40 с.
2. Аршинский Л.В. Векторные логики: основания, концепции, модели. Иркутск: Иркут. гос. ун-т. 2007. 228 с.
3. Аршинский Л.В. Приложение логик с векторной семантикой к описанию случайных событий и оценке риска. Проблемы анализа риска. 2005. Т.2, № 3. С.231-248.
4. Аршинский Л.В., Лебедев В.С. Объективизация баз знаний интеллектуальных систем на основе индуктивного вывода с использованием нестрогих вероятностей. Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 4(28). С. 190-200.
5. Аршинский Л.В., Лебедев В.С. Обработка данных для индуктивного вывода на основе нестрогой вероятности Информационные технологии и вычислительные системы. 2024. № 2. С. 3-14.
6. Кайберг Г. Вероятность и индуктивная логика / Пер.с англ.М.: Изд-во «Прогресс». 1978. 373 с.
7. Голенков В.В. Статистические основы индуктивного вывода: учеб. пособие. Минск: БГУИР, 2009. 202 с.
8. Орешков В.И. Интеллектуальный анализ данных как современный инструмент поддержки управленческих решений // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2011. № 4 (12). С. 55-59.
9. Медведев Д.А. Большие данные: причины появления и как их можно использовать // Наука и образование сегодня. 2019. № 4(39). С. 14-16.
10. ДСМ-метод автоматического порождения гипотез: Логические и эпистемологические основания / Сост. О.М. Аншаков, Е.Ф. Фабрикантова. М.: Книжный дом «ЛИБРИКОМ»/ 2009, 432 с.
11. Финн В. К. Об определении эмпирических закономерностей посредством ДСМ-метода автоматического порождения гипотез // Искусственный интеллект и принятие решений/ 2010. №4. С. 41-48.
12. Дударев В.А. Подход к заполнению пропусков в обучающих выборках для компьютерного конструирования неорганических соединений // Вестник МИТХТ. 2014. Т.9, №1. С. 73-75.
13. Миронов В.В., Макарова Е.С. Агрегация показателей в OLAP-кубе при сведении по зависимым измерениям // Математическое и программное обеспечение вычислительных машин. 2012. Т. 16, № 3(48). С. 180-186.
14. Эргашев А.А., Садикова Ф.С. Способы и методы анализа многомерной базы данных // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2021. 12(93). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12865>.
15. Корешкова Т. Семантический анализ для автоматической обработки естественного языка. URL: https://rdc.grfc.ru/2021/09/semantic_analysis/

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-МАССООБМЕНА В ПРИСКЛОНОВОЙ ЗОНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

И.А. Асламов, М.М. Макаров, К.М. Кучер
ЛИН СО РАН, г. Иркутск
ilya_aslamov@bk.ru

Бароклинные волновые процессы, а также механизмы их взаимодействия с поверхностными волнами и рельефом дна в прибрежной области в Байкале мало изучены. Учитывая стремительное развитие измерительной аппаратуры и возможностей численного моделирования, детальное натурное исследование и математическое моделирование волновых процессов в озере Байкал (баротропные (сейши), бароклинные (внутренние) волны и инерционные колебания) представляет собой современную актуальную задачу. Разрабатываемая в рамках настоящего крупного научного проекта Институтом гидродинамики математическая модель, будет использована для оценки влияния внутренних волн и сейш на эффективность горизонтального и вертикального массопереноса в литоральной зоне озера Байкал и над крутым северо-западным склоном.

Для натурального исследования термогидродинамических процессов в водоемах наиболее эффективным методом можно считать создание гидрофизических полигонов, включающих в себя, в первую очередь, плотную сеть температурных датчиков, а также измерителей скорости и направления течений. В мировой практике, как правило, такие масштабные проекты реализуются в океанах и морях. В России, например, в настоящее время созданы и успешно функционируют несколько гидрофизических полигонов: два на Черноморском побережье - Черноморский полигон ИО РАН «Геленджик» и Черноморский гидрофизический полигон РАН «Кацивели», а также на дальнем востоке - «Международный научно-образовательный геосферный полигон» ТОИ ДВО РАН (Приморский край, Хасанский р-н, м. Шульца). В озерах на сегодняшний день подобных постоянно действующих гидрофизических полигонов не существует, хотя известны отдельные кампании по постановке экспериментов с уединенными термокосоми.

Создание опытного гидрофизического полигона для исследования процессов тепло-массообмена в присклоновой зоне позволит вывести гидрологические исследования озера Байкал на новый уровень. Местом развертывания полигона выбран район нейтринного телескопа (106 км. КБЖД). Подключение полигона к инфраструктуре нейтринного телескопа позволит воспользоваться резервированным электропитанием и каналами связи. Выбранный район отличается доступностью в летнее и зимнее время года, что облегчит развертывание и обслуживание гидрофизического полигона.

В рамках настоящего проекта планируется разработать и изготовить адресные температурные датчики с чувствительностью до 0.001 °С, что сделает возможным детальное изучение поверхностных и внутренних инерционно-гравитационных волн, а также процессов развития прибрежных апвеллингов не только в периоды летней стратификации (с большими градиентами температур), но и в периоды близкие к гомотермии, а также подо льдом. Датчики в верхней части термокос до глубины сезонного термоклина (~30 м), планируется располагать с шагом 1-2 м. С дальнейшим увеличением глубины шаг датчиков будет увеличен до 10 м, с его последующим сокращением в придонной области до 1 м, с целью детальной регистрации процессов в пограничном слое.

Расстояние между соседними термокосоми будет составлять 30-50 метров. Каждая термокоса будет заякорена на бетонную плиту, устанавливаемую на дне, и растянута в вертикальном положении плавучим буём, размещенным в 4 м от поверхности озера. Отдельные косы будут подключаться нержавеющей кабельтросом КГ-7 к подводному хабу, располагаемому на глубине 10 метров в 200 метрах от берега, образуя топологию

«звезда». Семижильный кабельтрос обеспечит необходимое количество проводников для передачи данных по линии RS485 и подачи напряжения питания 12 вольт, а также будет выполнять грузонесущую функцию, предотвращая сползание термокос вдоль 45-градусного склона. От центра управления нейтринным телескопом до подводного хаба, также будет проложен кабельтрос длиной ~550 метров. В качестве интерфейса передачи данных между центром управления и хабом выбрана линия SHDSL на базе модемов Sigrand SG-17B-3.3-M (Россия). Питание хаба будет осуществляться от 220В переменного тока.

Высокое пространственное и временное разрешение датчиков позволит в дополнение исследовать процессы конвекции и турбулентности, а также развитие термических баров в озере Байкал. Описанные преимущества, несомненно, выводят разрабатываемый полигон на самый передовой уровень исследований в мире, и значительно превосходят существующие Российские аналоги, установленные в морях, в которых разрешение термокос составляет, как правило 0.1 °С. При этом, использование собственных наработок лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИИ СО РАН, а также отечественных материалов и комплектующих позволит на порядки сократить стоимость реализации проекта полигона, по сравнению с закупкой готового импортного оборудования.

Гидрофизический полигон разрабатывается в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

ГЛОБАЛЬНЫЙ ПОИСК В НЕВЫПУКЛЫХ ЗАДАЧАХ КВАДРАТИЧНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ*¹

М.В. Баркова, А.С. Стрекаловский

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

Рассмотрим невыпуклую задачу минимизации квадратичной функции с квадратичными ограничениями-неравенствами следующего вида:

$$\begin{cases} f_0(x) = \langle x, Q^0 x \rangle + \langle b_0, x \rangle + \gamma_0 \downarrow \min_x, x \in S, \\ f_i(x) = \langle x, Q^i x \rangle + \langle b_i, x \rangle + \gamma_i \leq 0, i \in \{1, \dots, m\}, \end{cases} \quad (P)$$

где матрицы $Q^i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – знаконеопределенные, симметричные, $b_i \in \mathbb{R}^n, \gamma_i \in \mathbb{R}, i \in I \cup \{0\}$, множество $S \in \mathbb{R}^n$ – выпуклое и замкнутое.

Введем штрафную функцию $W(x) := \max\{0, f_1(x), \dots, f_m(x)\}$, где $\sigma \geq 0$ – параметр штрафа, и сведем невыпуклую задачу (P) к следующей вспомогательной оштрафованной задаче на выпуклом множестве [1,2]:

$$F_\sigma(x) = f_0(x) + \sigma W(x) \downarrow \min_x, x \in S. \quad (P_\sigma)$$

Поскольку любая квадратичная функция может быть представлена в виде (d.c.) разности выпуклых функций, то запишем целевую функцию оштрафованной задачи в следующем виде $F_\sigma(x) = G_\sigma(x) - H_\sigma(x)$ и применим для решения задачи (P_σ) теорию глобального поиска [1,2]. Разработанный на её основе подход состоит из двух основных этапов. На первом этапе для отыскания критических точек будем использовать специальный метода локального поиска (СМЛП) [3]. Основанный на частичной линейаризации целевой функции по базовой невыпуклости задачи, он заключается в последовательном решении серии выпуклых задач:

$$\Phi_\sigma(x) := G_\sigma(x) - \langle \nabla H_\sigma(v), x \rangle \downarrow \min_x, x \in S. \quad (P_\sigma L(v))$$

На втором этапе реализованы процедуры выхода из полученной СМЛП критической точки, основанные на условиях глобальной оптимальности [2].

Для тестирования предложенного подхода с помощью известной техники генерации тестовых примеров [4] сгенерированы задачи размерности от 100 до 1000 переменных, для которых известны глобальные решения, а также все основные характеристики (количество стационарных точек, число локальных решений). Полученные численные результаты продемонстрировали эффективность подхода, позволяющего отыскать глобальное решение в невыпуклых задачах квадратичной оптимизации повышенной размерности. Программы реализованы на языке C++ с использованием пакета прикладных программ Gurobi для решения вспомогательных выпуклых задач.

1. Стрекаловский А.С. Минимизирующие последовательности в задаче DC оптимизации с ограничениями // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2023. Т. 29, №3. С. 185–209.
2. Strekalovsky A.S. Global optimality conditions and exact penalization // Optim.Lett. 2019. V. 13. P. 597–615.
3. Barkova M.V., Strekalovskiy A.S. Computational Study of Local Search Methods for a D.C. Optimization Problem with Inequality Constraints// LNCS. 2021. V. 13078. P. 94–109.
4. Calamai, P. H., Vicente, L. N., Judice, J.J.: A new technique for generating quadratic programming test problems//Mathematical Programming. 1993. V. 61. P. 215–231.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 24-41-03004

МИНИМАЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО НЕЙРОНОВ В ПОЛНОСВЯЗНЫХ СЛОЯХ ДАННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ (ПЕРВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ)*

О.И. Бернгардт
ИСЗФ СО РАН
berng@iszf.irk.ru

В работе представлен алгоритм поиска минимального количества нейронов в полносвязных слоях нейронной сети, решающей заданную задачу, который не требует многократного обучения сети с различным количеством нейронов. Для полносвязных сетей существуют общие теоремы, позволяющие дать верхнюю оценку числа нейронов для заданных функций активаций, на настоящее время это $\max(N_{in}, N_{out})$, где N_{in}, N_{out} - размерность входных и выходных данных нейронной сети соответственно [1]. Однако это минимальное число зависит от решаемой сетью задачи и может быть ниже этой верхней оценки. Работа [2] содержит обзор качественных методов оценки минимального числа нейронов. В обзоре [3] перечислены различные современные методы упрощения (прунинга) нейронных сетей, используемые в том числе для поиска и удаления неэффективных нейронов.

Предложенный в этой работе алгоритм основан на обучении исходной широкой сети с использованием метода кросс-валидации по крайней мере на трех фолдах. Затем с помощью автокодировщика усеченного сингулярного разложения, вставленного после исследуемого слоя обученной сети, ищется минимальное количество нейронов, как ранг оптимальной матрицы усеченного сингулярного разложения.

Пусть есть двухслойная полносвязанная нейронная сеть S которая выдает значения $T = f^{(S)}(X)$ на наборе данных X :

$$\varphi^{(1)}(W_{j,k}^{(1)} X_{i,j} + B_k^{(1)}) = Y_{i,k} \quad (1)$$

$$\varphi^{(2)}(W_{k,l}^{(2)} Y_{i,k} + B_l^{(2)}) = T_{i,l} \quad (2)$$

где $X \in R^{I \times J}$, $T \in R^{I \times L}$, $Y \in R^{I \times K}$; $\varphi^{(i)}$, $W_{j,k}^{(i)}$, $B_k^{(i)}$ - поэлементная функция активации, веса и смещения нейронов i -го слоя соответственно; $X_{i,j}$, $Y_{i,k}$ - векторы входных признаков для первого и второго слоев соответственно; K, L - количество нейронов в первом и втором слое соответственно. Количество образцов I в наборе данных больше количества нейронов в первом слое сети: $I > K$.

Пусть также есть сеть D идентичной архитектуры, выдающая значения на том же наборе данных X , а и отличающаяся от сети S только количеством нейронов в первом слое, а также весами и смещениями W, B :

$$\varphi^{(1)}(W_{j,m}^{(1)} X_{i,j} + B_m^{(1)}) = Y'_{i,m} \quad (3)$$

$$\varphi^{(2)}(W_{m,l}^{(2)} Y'_{i,m} + B_l^{(2)}) = T'_{i,l} \quad (4)$$

здесь $Y' \in R^{I \times M}$, M количество нейронов в первом слое, $T' \in R^{I \times L}$.

Рассмотрим сначала детерминированную постановку задачи.

Определение 1. Назовем две полносвязанные нейронные сети одинаковой глубины и одинаковых входных и выходных размерностей эквивалентными на наборе данных, если на каждом образце набора данных X они выдают идентичные выходные значения $T_i \equiv T'_i$ и могут отличаться только количеством нейронов в каждом скрытом слое и коэффициентами нейронов W, B (1-2).

Несложно доказать следующие леммы.

Лемма 1. Пусть результаты прохождения первого полносвязного слоя двухслойных полносвязных сетей и D на наборе данных X удовлетворяют условию линейной связи:

$$Y_{i,k} = Y'_{i,m} A_{m,k} \quad (5)$$

$$Y'_{i,m} = Y_{i,k} A_{k,m}^{(1)} \quad (6)$$

где $A, A^{(1)}$ некоторые матрицы, а $Y_{i,k}, Y'_{i,m}$ - выходы первого слоя сетей S и D , соответственно. Тогда эти сети становятся эквивалентными на наборе данных X после соответствующего выбора коэффициентов второго слоя одной из сетей.

Лемма 2. Минимально возможное число нейронов M в первом слое сети среди всех сетей D , эквивалентных сети на наборе данных X и удовлетворяющих ограничениям Леммы 1, не меньше ранга матрицы Y на наборе данных X :

$$(7)$$

Лемма 3. Пусть есть полносвязная нейронная сеть с числом скрытых слоев N , и выходами n -го слоя $Y_{i,j}^{(n)} = Y^{(n)}$ на наборе данных $X, n \in 1, N$. Тогда любая эквивалентная ей сеть на этом наборе данных, имеющая M_n нейронов в n -м скрытом слое и удовлетворяющая ограничениям Леммы 1 в каждом скрытом слое также удовлетворяет условию:

$$M_n \geq \text{rank } Y^{(n)} \quad (8)$$

Следствие Леммы 3. Если сеть D с $\text{rank } Y^{(n)}$ нейронами в скрытом слое n эквивалентна некоторой сети с $Y^{(n)}$ выходами этого слоя на наборе данных X , то она имеет минимально возможное количество нейронов в этом слое среди всех сетей эквивалентных на этом наборе данных, удовлетворяющих ограничениям Леммы 1.

Поскольку процесс обучения нейронной сети стохастичен и ранг $Y^{(n)}$ зависит от того, как была обучена сеть, рассмотрим статистическую постановку задачи.

Определение 2. Назовем две сети S и D одинаковой архитектуры но с разным числом нейронов в слоях (например (1-2)) статистически эквивалентными на наборе данных X с метрикой качества Q и ее пороговым уровнем Q_0 , если сети S и D на наборе данных X выдают прогнозы с метрикой качества Q не хуже Q_0 .

Следствие Определения 2. Все полностью переобученные (полностью повторяющие результаты/метки обучающего набора данных) сети одинаковой архитектуры на наборе данных X статистически эквивалентны в этом наборе данных с любым наперед заданным пороговым уровнем метрики качества Q_0 из области значений этой метрики.

Пусть метрика Q удовлетворяет следующему условию на непересекающихся датасетах X_1, X_2 :

$$Q_{X_1 \cup X_2} = \frac{\text{Dim } X_1 Q_{X_1} + \text{Dim } X_2 Q_{X_2}}{\text{Dim } X_1 + \text{Dim } X_2}; X_1 \cap X_2 = \emptyset \quad (9)$$

здесь $\text{Dim } X_1, \text{Dim } X_2$ - количество образцов в датасетах X_1, X_2 соответственно.

Пусть сеть S полностью переобучена на датасете X_1 ($Q_1 = \text{Best } Q$) и не обучалась на датасетах X_2, X_3 и ($\text{Dim } X_1 = \text{Dim } X_2 = \text{Dim } X_3$), но известно ее качество Q_3 на

датасете X_3 . Тогда из Следствия Определения 2 и из предположения $Q_3 \approx Q_2$ можно оценить ее качество на датасете :

$$Q_0 \approx \frac{Q_3 + \text{Best } Q}{2} \quad (10)$$

Тогда можно ожидать, что сеть D с качеством не хуже Q_0 на датасете $X_1 \vee X_2$ относительно прогнозов сети S будет статистически эквивалентна сети S с качеством Q_3 на неизвестном сети D датасете X_3 (то есть с качеством сети на этом датасете).

Из приведенных рассуждений был создан и исследован следующий алгоритм поиска минимального числа нейронов в полносвязном слое сети.

1. Обучить на решаемой задаче нейронную сеть с выбранной архитектурой (число слоев и функции активации), но выбрать заранее избыточное число нейронов на каждом слое (не менее чем в два-три раза превышающего ожидаемое минимальное число нейронов). Обучение проводить кросс-валидацией на не менее чем трех фолдах и получить соответствующее количество обученных вариантов сети .

2. Выбрать метрику качества, удовлетворяющую (9) и оценить ее среднее значение Q_3 на валидационных датасетах при кросс-валидации на всех вариантах S .

3. В разрыв нейронной сети после исследуемого полносвязного слоя поставить сингулярное матричное разложение и усечь его до такой степени, чтобы качество полученной нейронной сети на датасетах, составленных наполовину из обучающего и наполовину из валидационного датасета при кросс-валидации с результатами работы сети было не хуже Q_0 (10). Выбрать среднее значение достигнутого ранга усеченного сингулярного разложения по всем комбинациям двух фолдов для всех обученных вариантов сети S .

4. В соответствии со Следствием Леммы 3 выбрать минимальное число нейронов в исследуемом слое равным найденному среднему рангу усеченного сингулярного разложения, создать сеть D с этим количеством нейронов на исследуемом слое и проверить ее качество.

Алгоритм был реализован и публично доступен [4]. Результаты работы алгоритма на нескольких задачах классификации и регрессии приведены в Таблице 1. Видно, что получаемые алгоритмом оценки минимальных ширин слоев ниже, чем их оценка сверху из [1], а диапазоны метрик качества новой сети на тестовом датасете близки с качеством исходной сети.

Предложенный алгоритм является первым приближением, так как, с одной стороны, алгоритм не гарантирует, что нейронная сеть с найденным числом нейронов может быть обучена до требуемого качества, а с другой стороны, он ищет минимальное число нейронов в ограниченном классе возможных решений, определяемых Леммой 1.

Идея алгоритма не нова [5], и основной особенностью предложенного решения является оценка качества новой модели по сравнению с исходной моделью с использованием комбинации обучающего и валидационного датасетов после кросс-валидации, с использованием заранее оцененного уровня метрики качества (9-10), что позволило сделать методику сравнительно устойчивой на датасетах больших объемов.

Таблица 1. Проверка алгоритма на тестовых задачах, количество фолдов при кросс-валидации 3. Обозначения: BN - батч-нормализация, FC - полносвязный слой, FL - слой распрямления. Q - значение метрики качества на тестовом датасете.

Задача	Классификация		Регрессия	
	MNIST	Fashion MNIST	California housing	Wine Quality
Датасет	MNIST	Fashion MNIST	California housing	Wine Quality
Метрика Q /Best(Q)	Точность (Accuracy)/1.0		Среднеквадратичное отклонение/0.0	
Исходная сеть для решения задачи				
Формула исходной сети	FCx10 (Softmax), FCx300 (ReLU), FCx300 (ReLU), BN, FL	FCx10 (Softmax), FCx200(ReLU), FCx200(ReLU), BN, FL	FCx1 (linear), FCx200 (ReLU), BN	FCx1 (linear), FCx200 (ReLU), BN
Q	0.926..0.950	0.883..0.887	0.442..0.490	0.476..0.559
$\max(N_{in}, N_{out})$	784	784	8	11
Полученная сеть D с минимальным числом нейронов				
Формула полученной сети D	FCx10 (Softmax), FCx19 (ReLU), FCx68 (ReLU), BN, FL	FCx10 (Softmax), FCx25 (ReLU), FCx36 (ReLU), BN, FL	FCx1 (linear), FCx5 (ReLU), BN	FCx1 (linear), FCx6 (ReLU), BN
Q	0.963..0.965	0.871..876	0.479..0.517	0.547..0.555

1. Cai Yongqiang. Achieve the Minimum Width of Neural Networks for Universal Approximation // The Eleventh International Conference on Learning Representations - 2023, <https://openreview.net/forum?id=hfUJ4ShyDEU>
2. Sheela K. and Deepa S.N. Review on Methods to Fix Number of Hidden Neurons in Neural Networks // Mathematical Problems in Engineering. - 2013. - Vol. 2013, DOI:10.1155/2013/425740
3. Cheng Hongrong, Zhang Miao, and Shi Javen Qinfeng. A Survey on Deep Neural Network Pruning- Taxonomy, Comparison, Analysis, and Recommendations// arXiv:2308.06767 -2023, DOI: 10.48550/arXiv.2308.06767
4. <https://github.com/berng/FCLayerMinimumNeuronsFinder>
5. J. Li, Y. Wu, J. Zhang and G. Zhao, A Novel Method to Fix Numbers of Hidden Neurons in Deep Neural Networks// 2015 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), Hangzhou, China - 2015. - pp. 523-526. - DOI: 10.1109/ISCID.2015.41.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 24-22-00436, <https://rscf.ru/project/24-22-00436/>

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕГРЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ*

М.Е. Боднюк^{1,2}, Д.Н. Карамов^{1,3}

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

² Иркутский государственный университет путей сообщения

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Байкальский институт БРИКС

maks.bodnyuk@mail.ru, dmitriy.karamov@mail.ru

Развитие энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники энергии, требует решения множества специфичных задач, связанных с моделированием элементов энергетических систем, связей между основными узлами, учетом особенностей используемого оборудования, режимов его работы и др. [1]. В работе обсуждается опыт работы с имитационным стендом, моделирующим энергетический комплекс с высокой долей возобновляемых источников электроэнергии, и предлагается проект системы мониторинга для поддержки исследования режимов его функционирования данного энергетического комплекса.

На рис. 1 изображена принципиальная схема имитационного стенда. Стенд состоит из шестнадцати блоков: пяти моделей линии электропередач, четырех моделей трансформаторной подстанции и нагрузки, двух измерителей параметров однофазной сети, двух однофазных трансформаторов, двух блоков однофазного источника питания и преобразователя RS-485-USB. На блоках моделей трансформаторной подстанции и нагрузки, а также на блоках измерителей параметров однофазной сети возможно измерение восьми параметров: тока, частоты, напряжения, реактивной мощности, активной мощности, полной мощности и параметра $\cos(\varphi)$. Помимо измерения на стенде предусмотрена возможность изменения параметров блоков. В моделях трансформаторной подстанции и нагрузки можно изменять мощность индуктивной и реактивной нагрузки, а на моделях линии электропередач – индуктивную мощность. Также присутствует возможность включения и отключения моделей трансформаторной подстанции и нагрузки.

Архитектура системы мониторинга представлена на рис. 2. Она включает два системных модуля и два прикладных приложения. Для обмена информацией в виде JSON-файлов между сервером и сторонними клиентами разрабатывается специализированный API. В базе данных хранятся значения параметров имитационного стенда в реальном времени. Для опроса стенда используется приложение MasterOPC Universal Modbus Server. Из-за специфики объекта мониторинга присутствует возможность включения и отключения блоков. Однако возможно только механическое изменение значений параметров блоков. Поэтому в процессе работы стенда требуется присутствие оператора. Для того, чтобы оператор мог увидеть какие данные необходимо изменить, используется вспомогательное приложение. Мониторинг

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» (рег. № 121032400051-9), грант № 075-15-2024-533 на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

режимов работы осуществляется на блоках моделей трансформаторной подстанции и нагрузки, а также на блоках измерителей параметров однофазной сети.

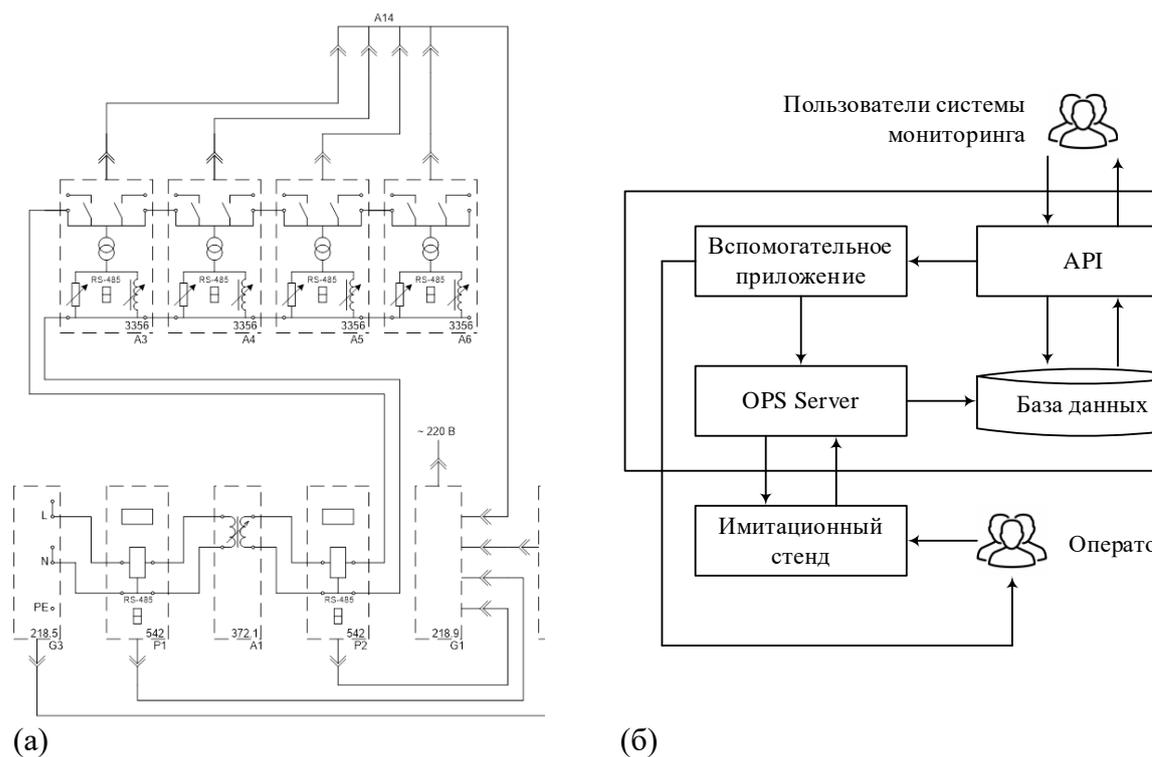


Рис. 1. Принципиальная схема стенда (а) и архитектура системы его мониторинга (б)

Суть и новизна предложенной системы мониторинга заключается в том, что она обеспечивает возможность работы с физической моделью энергетического комплекса. Данная система мониторинга будет использована при решении задач структурно-параметрической оптимизации энергетических комплексов с высокой долей возобновляемых источников энергии в рамках исследования и развития природно-технических систем, расположенных на Байкальской природной территории.

1. Карамов Д.Н., Еделев А.В., Феоктистов А.Г. Моделирование энергоснабжения объектов охраняемой Байкальской природной территории на основе возобновляемых источников энергии // Международный технико-экономический журнал. 2020. № 5. С. 7-24.

ВЫВОД ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ЯДРА ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПЕРАТОРА В ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ COVID-19

А.В. Боровский, С.С. Дорошенко
Байкальский государственный университет
andrei-borovskii@mail.ru, svet201093@mail.ru

Пандемия коронавирусной инфекции активизировала исследования эпидемических моделей. На раннем этапе эпидемии (2020 г.) население России испытало шок от летальности эпидемии и санитарных мер, введённых Российским эпидемическим надзором. Были отменены массовые мероприятия, закрыты увеселительные заведения и предприятия общественного питания, ВУЗы и школы переведены на дистанционное обучение, старшему поколению было запрещено выходить из дома. В общественных местах все обязаны были носить медицинские маски. Были наложены ограничения на перемещения общественным транспортом. Был также введён ряд других мер.

Работы по моделированию эпидемий делятся на два типа. В первом [5] используется эпидемическая кинетика, применимая к населённому пункту или региону. В [6-7] изучены модели COVID-19 с 6 разновидностями популяции (SEIARD и SEIADR). В [8] представлена модель с вакцинацией населения (SVEAIR).

Второй подход [9] описывает пространственное распространение эпидемии. Математическая модель эпидемии гриппа Барояна-Рвачева [10, 11] классифицируется как эпидемическая динамика, поскольку она может описывать волнообразное распространение эпидемии между городами при учете пассажиропотока (модель аналогична уравнениям гидродинамики). Все указанные модели [5-8] не принимают во внимание квазистационарный источник заражения, на необходимость учета которого впервые указано в [1-4]. Только в этом случае можно построить адекватные эпидемические модели, описывающие продолжительное течение эпидемии и совпадающие с реальной статистикой.

Целью данной работы является рассмотрение важного аспекта построения ИДМ с запаздыванием, а именно определение математического выражения для ядра интегрального оператора.

В работе рассмотрена интегро-дифференциальная модель (1) эпидемии COVID-19.

$$\begin{aligned} \frac{dN_-(t)}{dt} &= k_- \left(\int_{t-\tau}^t \frac{dN_-(t')}{dt'} K(t-t') dt' + \gamma_1 \int_0^{t-\tau} \frac{dN_-(t')}{dt'} K(t-t') dt' \right) + A, \\ \frac{dN_+(t)}{dt} &= k_+ N_2(t), \\ \frac{dN_n(t)}{dt} &= k_n N_2(t-\tau), \\ N_1(t) + N_-(t) &= N_0, \\ N_-(t) &= N_2(t) + N_+(t) + N_n(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Ранее для практического использования этой модели мешало отсутствие выражения или числовых данных для ядра интегрального оператора $K(t)$. Ядро заменялось единицей, а модель редуцировалась к системе дифференциальных уравнений эпидемической кинетики (2) с запаздыванием и квазистационарным источником.

$$\begin{aligned}
\frac{dN_-(t)}{dt} &= k_-(N_-(t) - (1 - \gamma_1)N_-(t - \tau)) + A, \\
\frac{dN_2(t)}{dt} &= k_-(N_-(t) - (1 - \gamma_1)N_-(t - \tau)) - k_+N_2(t) - k_nN_2(t - \tau) + A, \\
\frac{dN_+(t)}{dt} &= k_+N_2(t), \\
\frac{dN_n(t)}{dt} &= k_nN_2(t - \tau), \\
N_1(t) + N_-(t) &= N_0, \\
N_-(t) &= N_2(t) + N_+(t) + N_n(t).
\end{aligned} \tag{2}$$

В данной работе проведено исследование, которое позволило получить выражение для ядра интегрального оператора. На основе данных по госпитализации больных с COVID-19 построена статистическая выборка количества выздоровевших в зависимости от длительности госпитализации, рис.1.

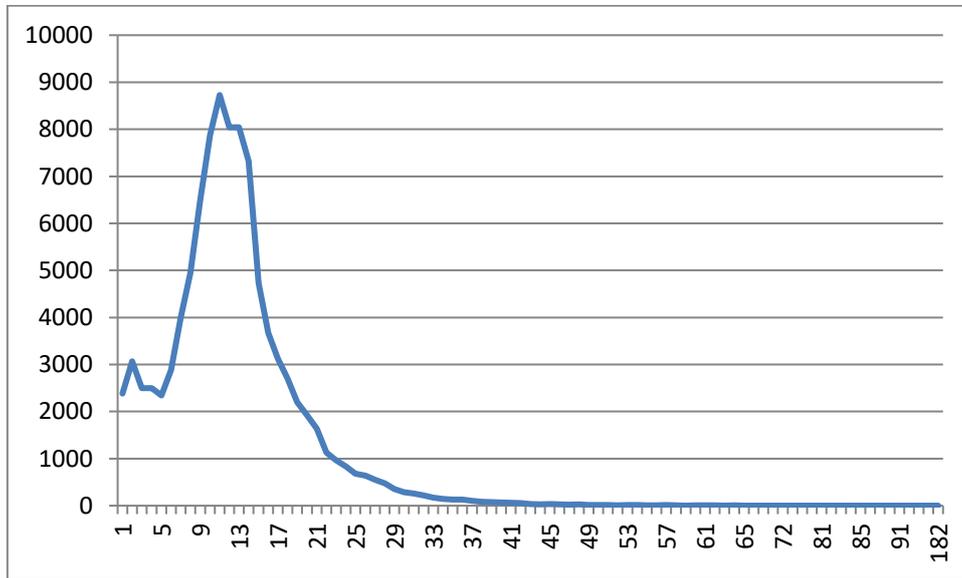


Рис.1. Количество выздоровевших за определённый период

Выборка аппроксимирована гауссовой и лоренцевой функциями с тремя параметрами. При помощи метода наименьших квадратов найдены с высокой точностью значения параметров. Вычислены средне-квадратичные отклонения аппроксимирующих кривых от статистических данных. Показано, что лучшими характеристиками обладает лоренцевская аппроксимация, для которой средне-квадратичное отклонение не превышает 3,3%. Для гауссовской аппроксимации – 5,6%. Лоренцевская аппроксимация использована для аналитического вычисления ядра интегрального оператора в ИДМ. Для ядра получено выражение (3), см. Рис.2.

$$K(t) = \frac{1 - \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{t-c}{d}\right)}{1 + \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{c}{d}\right)}. \tag{3}$$

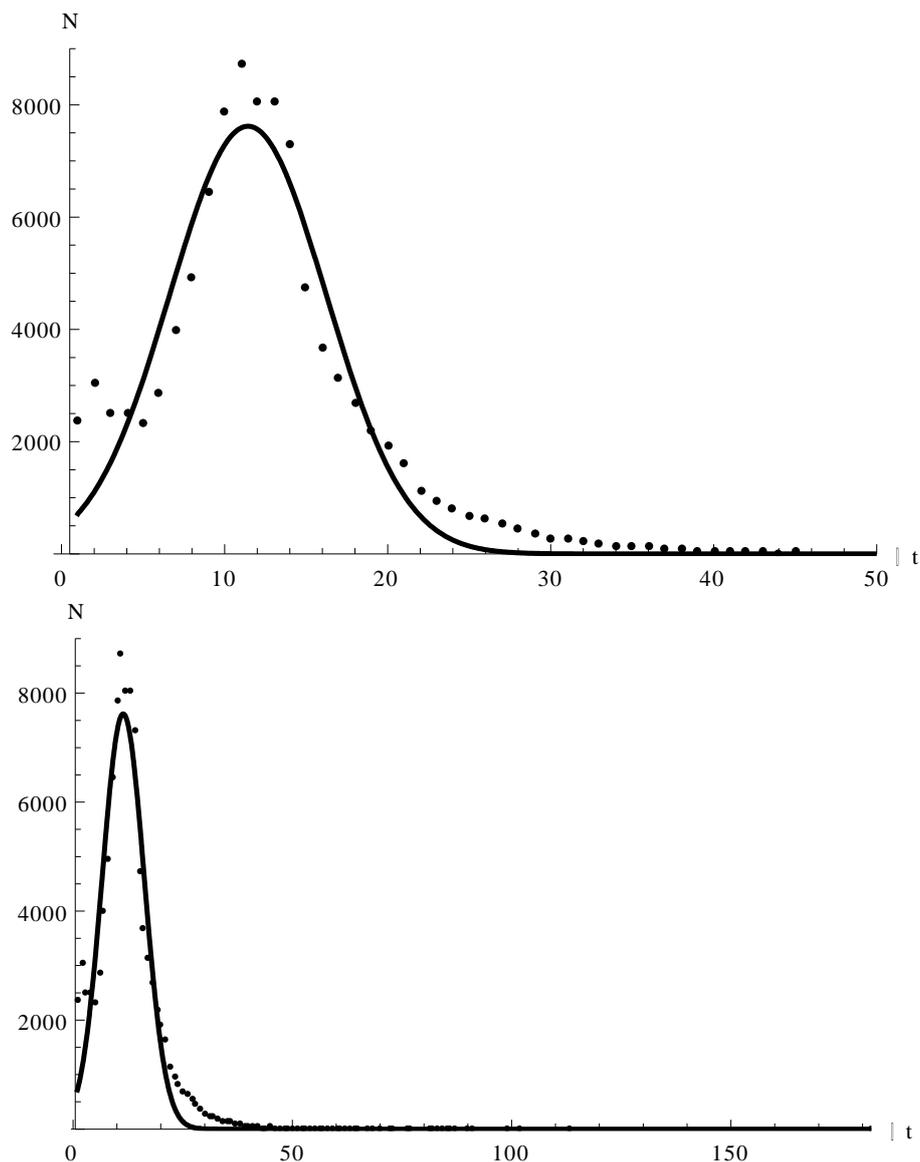


Рис.2. Аппроксимация статистики гауссовой функцией (сплошная линия)

Авторы предлагают также сдвинуть лоренцевскую аппроксимацию на величину длительности инкубационного периода заболевания, чтобы получить более реалистичное ядро интегрального оператора с момента начального заражения больных. В самом деле, в больницы попадают пациенты, которые приобрели инфекцию не в день госпитализации, а несколькими днями раньше.

Интересно отметить, что выражение (3) для ядра интегрального оператора в модели ИДМ (1) зависит только от двух параметров лоренцевской аппроксимации c и d и не зависит от параметра b . Параметры c и d описывают положение максимума распределения и его полуширину на полувысоте. Параметр b описывает абсолютное значение максимума распределения. Независимость ядра от абсолютных значений лоренцевской аппроксимации означает, что выражение для ядра может быть получено с использованием неполной статистики госпитализаций. Достаточно использовать отдельную выборку, скажем, данные для одной инфекционной больницы.

1. Боровский А.В. Модель эпидемии с запаздыванием / А.В. Боровский // System Analysis & Mathematical Modeling. 2020. Т. 2, № 4. С. 53–63.
2. Боровский А.В. Модель квазистационарной эпидемической кинетики / А.В. Боровский, А.Л. Галкин. — DOI 10.17150/2500-2759.2021.31(2).221-229 // Известия Байкальского

- государственного университета. 2021. Т. 31, № 2. С. 221–229.
3. Borovsky A.V. Model of Epidemic Kinetics with a Source on the Example of Moscow / A.V. Borovsky, A.L. Galkin // *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. Vol. 2022. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/6145242>.
 4. Боровский А.В. Усовершенствованная математическая модель эпидемической кинетики и заражение SARS-CoV-2 в поликлиниках / А.В. Боровский, А.Л. Галкин, Н.Н. Ильиных, С.С. Козлова. DOI 10.17150/2500-2759.2022.32(1).161-169//*Известия Байкальского государственного университета*. 2022. Т. 32, № 1. С. 161–169.
 5. X.-P. Li, N. Gul, M. A. Khan et al., “A new hepatitis B model in
 6. light of asymptomatic carriers and vaccination study through Atangana-Baleanu derivative,” *Results in Physics*, vol. 29, article 104603, 2021.
 7. X.-P. Li, Y. Wang, M. A. Khan, M. Y. Alshahrani, and T. Muhammad, “A dynamical study of SARS-COV-2: a study of third wave,” *Results in Physics*, vol. 29, article 104705, 2021.
 8. X.-P. Li, H. A. Bayatti, A. Din, and A. Zeb, “A vigorous study of fractional order COVID-19 model via ABC derivatives,” *Results in Physics*, vol. 29, article 104737, 2021.
 9. Z.-H. Shen, Y.-M. Chu, M. A. Khan, S. Muhammad, A. Al-Hartomy, and M. Higazy, “Mathematical modeling and optimal control of the COVID-19 dynamics,” *Results in Physics*, vol. 31, article 105028, 2021.
 10. A. Arenas, W. Cota, J. Gómez-Gardeñes et al., “Modeling the spatio-temporal epidemic spreading of covid-19 and the impact of mobility and social distancing interventions,” *Physical Review X*, vol. 10, no. 4, article 041055, 2020.
 11. Бароян О.В. Моделирование и прогнозирование эпидемий гриппа для территории СССР / О.В. Бароян, Л.А. Рвачев, Ю.Г. Иванников. — Москва: Изд-во ин-та эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи АМН СССР, 1977. 546 с.
 12. Боев Б.В. Прогнозно-аналитические модели эпидемий (оценка последствий техногенных аварий и природных катастроф): лекция / Б.В. Боев. URL: <https://armscontrol.ru/course/lectures05a/bvb050324.pdf>.
 13. https://datalens.yandex/7o7is1q6ikh23?tab=X1&utm_source=cbregion&state=8f8de434378

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ В ЛЕКСИКОСТАТИСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТОПОНИМОВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

А.В. Боровский, Е.Е. Раковская
Байкальский государственный университет
andrei-borovskii@mail.ru, rakovskaya19@mail.ru

Развитие технологий обработки естественного языка и вычислительных методов находят все большее применение в историко-математической лингвистике, в том числе для сравнения языков, определения генетического родства языков, установления объемов заимствования. Преимуществом вычислительных методов является их быстрота и надёжность [1].

Авторами данной работы была обнаружена значительная степень пересечения между лингвистическими множествами: нерусскоязычными топонимами Иркутской области A , словарями санскрита S ; русского языка R , бурятского языка B . Каждое множество содержало порядка 1000 слов. Сравнение множеств проводилось в современном звучании слов и при переводе звучания слов в классы А.Б. Долгопольского [2]. Для сравнения слов использовалась парная метрика Рэтклиффа-Обершелпа, рассчитывающая долю совпадающих букв в двух словах:

$$\rho_{ik} = \frac{2K_{ik}}{m_i + m_k}.$$

Здесь K_{ik} – число совпадающих символов в самой длинной подстроке, присутствующей в двух строках, m_i, m_k – число символов в словах i и k .

Для сравнения лингвистических множеств использовались формулы статистики. Среднее по полю матрицы, среднее от максимальных метрик по строкам или столбцам матрицы. В современном звучании слов среднее от максимальных мер достигало 60-65%, при переводе слов в классы Долгопольского среднее от максимальных возрастало до 80-85%.

В работе использовались два метода. Метод перебора, где каждое слово из одного списка (множества) сравнивалось со всеми словами из другого списка с выборкой ограниченного количества слов с максимальными парными мерами и метод расчёта матрицы парных мер, где каждое слово сравнивалось с каждым из обоих списков.

Метод перебора. Задача по сравнению топонимов Иркутской области с Санскритом. Имеется множество A топонимов $a_j, j = 1, 2 \dots J$, и словарь санскрита B , состоящий из слов $b_k, k = 1, 2 \dots K$. Для каждого составного элемента a_j множества A найти совокупность элементов $b_m, m = 1, 2 \dots M$, где $M < K$, из множества B , полностью либо частично совпадающих с элементом a_j .

Для каждой пары элементов a_j и b_k множеств A и B находим значение функции $\rho_{jk} = \rho(a_j, b_k)$ – метрики Рэтклиффа-Обершелпа. Для дальнейшей работы использовались 10 пар «топоним – слово на Санскрите» с максимальным значением ρ_{jk} , т.е. $M = 10$ [3].

Метод матрицы парных мер. Задача определения связи между множеством топонимов Иркутской области и русским (бурятским) языком.

Пусть даны множества:

1. R с элементами $r_i, i=1 \dots I$.

Множество R – список слов русского языка,

2. A с элементами $a_k, k=1 \dots K$.

Множество A – список топонимов Иркутской области.

Списки слов (множества) \tilde{R} и \tilde{A} , выраженные с применением классов А.Б. Долгопольского:

$$1. \widehat{D}(R) = \widetilde{R},$$

$$2. \widehat{D}(A) = \widetilde{A}$$

Вычисляем матрицу попарных мер сходства для составных индексных объектов из обоих списков, переведённых в консонантные классы Долгопольского.

$$\rho_{ik} = \rho(\tilde{r}_i, \tilde{a}_k), 1 \geq \rho_{ik} \geq 0, i = 1, 2 \dots I, k = 1, 2 \dots K.$$

Для каждой пары элементов \tilde{r}_i и \tilde{a}_k множеств \widetilde{R} и \widetilde{A} находим значения метрики Рэтклиффа – Обершелпа. Результатом применения метода расчета парных мер является $I \times K$ значений метрик, записанных в виде матрицы мер близости консонантных классов (ММКК) [4].

Для определения связи между множеством топонимов Иркутской области и бурятским языком методика расчета аналогичная.

В данной работе показано, что метод перебора даёт результаты, которые могут быть получены методом матрицы мер, с последующей сортировкой метрик по строкам по убыванию и оставлением для рассмотрения нескольких столбцов отсортированной матрицы. В этом смысле метод перебора - частный случай метода ММКК. Если перебор делается в полном объеме, то метод перебора эквивалентен ММКК.

Приводятся соответствия нерусскоязычных топонимов Иркутской области словам из словаря Санскрита. (Гибель темника Мамая, Боудикка королева Пиктов, Анга=горы, Ангара=города, обгоревшие горы, Катанга=столовые горы и т.д.) Другая этимология происхождения слов не обсуждается.

Пример установления связи топонимов Иркутской области со словами Санскрита (метод перебора)

Топоним	Слово на санскрите	Перевод	Значение метрики Рэтклиффа-Обершелпа
Анга	`an^ga	тело, массив	0,8
	anugam	следовать	0,8
	`agra	острие	0,67
	`anta	конец	0,67
	`anna	еда	0,67
	any`a	другой	0,67
	aagam,	подходить	0,67
	utsan^ga	колени	0,67
	kanva	Канва	0,67
	karna	ухо	0,67
g`an^gaa	Ганга	0,67	
Богодикта	adhika	высший	0,53
	giit`a	песня	0,53
	bhog`a	пища	0,53
	dr^ista	показанный	0,5
	bhakt`a	преданный	0,5
	bhagavad-giitaa	песнь	0,5
	mohit`a	оглушенный	0,5
	rikth`a	богатство	0,5
	abh`itas	вокруг	0,47
Ката	k`ata	циновка	0,89
	kantha	шея	0,8
	katham	кое-как	0,8
	kathaa	разговор	0,8
	atas	потом	0,75

	asta	заход	0,75
	kart	резать	0,75
	nata	актер	0,75
	bata	ох!	0,75
	mata	мнение	0,75

При проведении исследования было замечено, что множества слов бурятского и русского языка имеют высокий уровень буквенного совпадения, а также совпадения в классах А.Б.Долгопольского, но по смыслу близкие по написанию слова различались. Это объясняется историческими причинами.

Буряты и эвенки начали осваивать русский язык в XVI веке. В это время в местах их проживания появились русские переселенцы, буддисты с книгами на Санскрите. Учебников русского языка не было, да никто и не задумывался обучать местных жителей русскому языку. Обучение происходило следующим образом. Называли русские слова и затем жестами и действиями пытались объяснить, что они означают. Местные жители запоминали произношение слов, но вкладывали в них различный смысл в меру своего понимания. Так возникла многозначность слов с русским произношением в бурятском и эвенкийском языках.

1. McMahon A., McMahon R. Language classification by numbers. Oxford University Press, 2005.
2. Долгопольский А.Б. Гипотеза древнейшего родства языковых семей Северной Евразии с вероятностной точки зрения / А.Б. Долгопольский // Вопросы языкознания. 1964. № 2. С. 64-69.
3. Боровский А.В. Изучение корреляции между топонимами Иркутской области и словами санскрита / А.В. Боровский, Е.Е. Раковская, И.А. Картеева // Известия Байкальского государственного университета. 2022. Т. 32, № 3. С. 610–622.
4. Боровский А.В. Лексикостатистика взаимосвязи русского и бурятского языков / А.В. Боровский, В.В. Братищенко, Е.Е. Раковская // System Analysis & Mathematical Modeling. 2023. № 3. С. 303-318.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ В ЖИЛОМ СЕКТОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЙБУЛЛА

А.В. Боровский, А.А. Юменчук
Байкальский государственный университет
andrei-borovskii@mail.ru, andrey.yumenchuk@mail.ru

Планирование модернизации и развития энергосистемы, обеспечение её стабильной работы невозможно без составления достаточно точных прогнозов потребления электроэнергии. Для формирования точного прогноза необходимо также исследование и моделирование энергопотребления коммунально-бытового сектора, в котором объёмы потребления зависят от большого числа факторов: местоположения потребителя, времени года, времени суток, режима трудовой деятельности населения и многих других [1]. Авторами был проведён анализ обезличенных данных энергопотребления, предоставленных Иркутскими электрическими сетями для одного ввода ячейки, обслуживающей посёлок на 500 сельских домов и дачных участков. Анализ энергопотребления посёлка за несколько месяцев показал, что на графиках присутствуют утренние и вечерние пики потребления электроэнергии. Они имеют колоколообразную форму с затянутой правой стороной. Присутствие на графиках энергопотребления жилых домов утренних и вечерних пиков также подтверждается соответствующими исследованиями и наблюдениями [2–4]. На графиках также просматривается уровень постоянной нагрузки, которая может быть обусловлена: использованием населением систем электрического отопления; добычей криптовалют в жилых помещениях с помощью специализированного оборудования; ночным освещением территории посёлка и придомовых земельных участков.

Для моделирования энергопотребления коммунально-бытовых потребителей была построена модель на основе свёртки функции плотности вероятности Вейбулла с функцией энергопотребления типа столбика, описываемой разностью двух функций Хевисайда. Функция плотности вероятности Вейбулла является асимметричной и имеет затянутый правый хвост. Функция плотности вероятности Вейбулла широко используется в промышленной инженерии, электротехнике, анализе надёжности, гидрологии, а также в различных аспектах здравоохранения. Плотность вероятности распределения Вейбулла имеет следующий вид:

$$g(t; \lambda; k) = (k/\lambda)(t/\lambda)^{(k-1)}e^{-(t/\lambda)^k}.$$

В таком случае функция, описывающая энергопотребление N -ого количества приборов мощностью a , если они были включены в момент времени t_1 , а выключены в момент времени t_2 , имеет вид:

$$F(t; t_1; t_2; \lambda; k; t') = \\ = Na \left[\theta(t - (t_1 - t')) \cdot \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{t - (t_1 - t')}{\lambda}\right)^k} \right\} - \theta(t - (t_2 - t')) \cdot \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{t - (t_2 - t')}{\lambda}\right)^k} \right\} \right],$$

где $\theta(t - (t_1 - t'))$ – функция Хевисайда; $t' = \lambda e^{\frac{1}{k} \ln \frac{k-1}{k}}$.

На основе данных об энергопотреблении бытовых приборов, полученных с помощью измерительных блоков-ваттметров, авторами моделируется энергопотребление 500 жилых помещений и выполнено сравнение с реальным энергопотреблением посёлка сопоставимого размера (рис. 1).

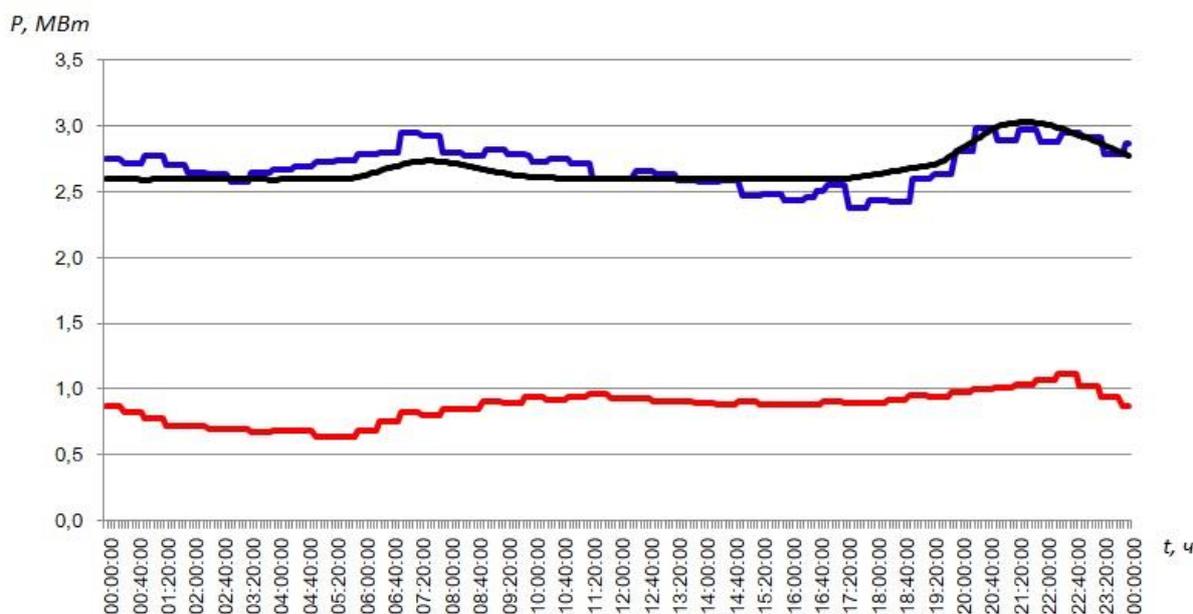


Рис. 1. Функция энергопотребления для 500 жилых помещений (черным); графики энергопотребления посёлка в самый холодный день апреля (синим) и в самый жаркий день июля (красным)

Полученная модель учитывает утренние и вечерние пики энергопотребления, а также демонстрирует практически идентичную суммарную величину расходов мегаватт-часов электроэнергии населённым пунктом за одни сутки, и, по мнению авторов, может служить для достаточно точного прогнозирования энергопотребления в жилом секторе за определённый период.

1. Боровский А.В. Моделирование стохастической нагрузки в жилом секторе / А.В. Боровский, А.А. Юменчук // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024. Т. 12, № 2(45). DOI 10.26102/2310-6018/2024.45.2.034.
2. Соловьева А.С., Шведов Г.К. Сравнительный анализ зимних и летних графиков электрической нагрузки рабочих и выходных дней многоквартирных домов с электроплитами в системах электроснабжения крупных городов. Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 27–37. DOI: 10.14529/power230103.
3. Солуянов Ю.И. Исследование электрических нагрузок многоквартирных жилых комплексов в период распространения новой коронавирусной инфекции / Ю.И. Солуянов, А.И. Федотов, А.Р. Ахметшин, В.И. Солуянов. Вопросы электротехнологии. 2021. № 2(31). С. 57-67.
4. Тарнижевский М.В., Михайлов В.И. Моделирование суточных графиков электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей методом ортогональных разложений. Электричество. 1985;5:66-68.

ПОДГОТОВКА НАБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧИ СЕМАНТИЧЕСКОГО АННОТИРОВАНИЯ РУССКОЯЗЫЧНЫХ ТАБЛИЦ*

А.А. Булах

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

На сегодняшний день таблицы являются достаточно распространенным форматом представления данных. Однако сложности, возникающие при автоматическом понимании табличных данных, замедляют темпы их активного использования. Так таблицы, как правило, не сопровождаются явной семантикой, необходимой для машинной интерпретации своего содержания. Поэтому работы, направленные на автоматическое восстановление семантики табличных данных, являются актуальными. Аннотирование табличного содержимого семантическими типами является важным шагом в обеспечении такого восстановления. Недавно был предложен подход [1] для семантического аннотирования столбцов русскоязычных таблиц на основе предварительно обученной мульти-язычной языковой модели BERT. Однако основным недостатком этого подхода является проблема разреженности данных, которая присутствует в сформированном корпусе таблиц. В связи с этим модель демонстрирует довольно несбалансированное распределение типов (так называемое «распределение с длинным хвостом»). Для решения этой проблемы предлагается использовать методы контрастного обучения (contrastive learning) [2] для изучения табличных представлений, полученных на основе обширного корпуса неразмеченных табличных данных. В данной работе предлагается метод создания и форматирования входного крупномасштабного набора русскоязычных табличных данных, сформированного на таблицах, извлеченных из Википедии, для нового подхода и системы, решающих задачу семантического аннотирования столбцов. Задача подразумевает реализацию алгоритма контрастного обучения, поэтому метод включает в себя также аугментацию данных: создание схожих и отличных по смыслу табличных данных на основе существующих. Такое решение позволит достичь лучших значений по нескольким оценкам в сравнении с передовыми подходами.

1. Tobola K.V., Dorodnykh N.O. Semantic Annotation of Russian-Language Tables Based on a Pre-Trained Language Model. In: 2024 Ivannikov Memorial Workshop (IVMEM). 2024, P. 62–68. DOI: 10.1109/IVMEM63006.2024.10659709.
2. Chen T, Kornblith S., Norouzi M., Hinton G. “A simple framework for contrastive learning of visual representations”. In: Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning (ICML’20), 2020, P. 1597–1607. DOI: 10.5555/3524938.3525087.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПИЛОТНИКА В СРЕДЕ МАТЛАБ

А.П. Васиченко

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

Изучение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является актуальной задачей, так как разработка и испытания новых моделей связаны с рисками их поломки. Компьютерное моделирование в специализированных средах позволяет выявить основные дефекты, которые могут возникнуть в конструкции БПЛА. В данной работе система квадрокоптера была описана с использованием дифференциальных уравнений и исследована в виртуальной среде Matlab.

Моделирование движения квадрокоптера выполнено в Matlab — программной платформе, предназначенной для инженеров и ученых для анализа и проектирования систем. Благодаря использованию матричного языка Matlab обеспечивает естественное выражение вычислительных процессов. Среда Matlab позволяет проводить исследования движения, траекторий и параметров квадрокоптера в режиме реального времени.

Моделирование динамики квадрокоптера, основанное на теории твердого тела и уравнениях Ньютона–Эйлера, делится на два аспекта: поступательное движение и вращательное. При этом учитываются такие факторы, как взаимодействие воздушного потока между роторами, аэродинамическое сопротивление, гироскопические эффекты роторов и корпуса. Это позволяет построить кинематические и динамические модели квадрокоптера как твердого тела.

В работе представлены математическая модель квадрокоптера, структура управляющих элементов, системы координат (земная и связанная с аппаратом), а также внешние воздействия на систему. Результаты моделирования демонстрируют поведение квадрокоптера в реальном времени при решении таких задач: траекторное движение в заданную точку, посадка и удержание высоты и др.

Управляющие сигналы могут подаваться либо одновременно на все двигатели, либо на каждый двигатель по отдельности, в зависимости от поставленной задачи. В процессе симуляции измеряются параметры скорости вращения роторов, углы наклона и положение квадрокоптера в пространстве. Для реалистичности моделирования учитываются такие силы, как сила тяжести и гравитационное притяжение.

1. Luukkonen, T. Modelling and control of quadcopter / T. Luukkonen // School of Science. 2011. 26 p.
2. Elyaalaoui, K. On Novel Fractional-Order Trajectory Tracking Control of Quadrotors: A Predefined-Time Guarantee Performance Approach / K. Elyaalaoui, M. Labbadi, S. Boubaker, S. Kamel, F.S. Alsubaei // Mathematics. 2023. 11. 3582. URL: <https://doi.org/10.3390/math11163582>
3. Гэн, К. Алгоритмы стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера [Электронный ресурс] / К. Гэн, Н.А. Чулин // Наука и образование МГТУ. 2015. № 5. С. 218–235. URL: <http://engineering-science.ru/doc/771076.html>.
4. Юшкин Д. А., Евдокимов С. А. Разработка адаптивного нечеткого ПИД-регулятора системы автоматического управления и стабилизации мультироторного БПЛА типа квадрокоптер // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2015. Т. 2. С. 198.

РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УЧЁТА НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИДСТУ СО РАН

В.С. Ведерников^{1,2}, И.Е. Новоселов^{1,2}

¹Иркутский государственный университет путей сообщения

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
vlad.vedernikov.95@mail.ru, ilya.novoselov.ilya@mail.ru

Учет, анализ и оценка результатов научной деятельности сотрудников является актуальной задачей как для научно-исследовательских институтов, так и для вузов [1,2]. К результатам научной деятельности относят публикации в различных изданиях, доклады на научных мероприятиях, отчеты о выполненных научно-исследовательских работах, патенты на изобретения, свидетельства о регистрации программ и баз данных. Выполнение такой оценки в современных условиях невозможно без использования специализированных информационных систем, обеспечивающих сбор, хранение, анализ данных и подготовку отчетных форм. Данный класс систем именуется Current Research Information Systems (CRIS). На сегодня подобные системы разрабатываются как в России [3], так и за рубежом.

В работе представлены результаты развития информационной системы учета научной деятельности ИДСТУ СО РАН [4-6]. Данная система была создана в 2016 году на базе CMS October. Система обеспечивает сбор данных о публикациях сотрудников института, с учетом показателей изданий в известных библиометрических базах (Web of Science, Scopus), их поиск по заданным критериям (ФИО, подразделение, тип публикации, индексация), представление отчетных форм, а также расчет показателей публикационной активности сотрудников за заданный период. Необходимо отметить, что положение об оценке эффективности сотрудников ИДСТУ СО РАН (Положение об оценке) учитывает не только публикационную деятельность, но и выступление на научных мероприятиях, получение ученых степеней и званий, получение на конкурсной основе стипендий и грантов, преподавание и экспертную деятельность.

В связи с переходом в Российской Федерации на использование Белого списка журналов («Белый список») при проведении различных оценок квалификации научных сотрудников, коллективов и учреждений (например, в рамках отчетности, оценки заявок на гранты и т.д.) в CRIS ИДСТУ СО РАН была реализована возможность задавать публикациям Уровень белого списка (УБС) издания. Теперь при расчете показателей публикационной активности сотрудников в системе можно использовать как квартили изданий из Web of Science, Scopus, так и УБС. При формировании отчетов по публикациям добавлена возможность вывода (флаги) показателей изданий в библиометрических базах (квартили Web of Science, Scopus и УБС). Добавлен флаг на объединение переводных статей, чтобы можно было сразу увидеть статью и её переводную версию.

В рамках работ 2024 года была реализована возможность учета ФИО докладчика при вводе информации о публикациях в трудах конференций, что позволяет автоматически формировать отчетные формы об участии сотрудника в конференциях, а также рассчитывать баллы согласно Положению об оценке. С учетом привязки публикаций к проектам, появилась возможность формировать отчет о докладах по теме проекта.

Изначально CRIS ИДСТУ СО РАН создавалась как инструмент автоматизации деятельности научно-организационного отдела (НОО). Сотрудники НОО осуществляют ввод всей информации о публикациях, проектах, сотрудниках и подразделениях. Научным работникам был доступен просмотр только нескольких отчетов по публикациям. В 2024 году было решено реализовать на базе CRIS подачу

сотрудниками публикационных материалов на экспертизу и получение экспертных заключений о возможности опубликования. Был реализован личный кабинет сотрудника (рис.1), в котором автор может направить авторскую справку и файл своей работы в комиссию для экспертизы. Также был реализован интерфейс секретаря экспертной комиссии, в котором он может просматривать поступившие заявки на экспертизу, готовить материалы для комиссии и после экспертизы формировать необходимый пакет документов (экспертные заключения). По окончании экспертизы отсканированные акты направляются научному сотруднику и доступны для скачивания в личном кабинете.

Главная Поиск Статистика Структура Телефоны Проекты Отчеты Мой профиль **Выйти**

Личный кабинет

Профиль автора

Документы

Экспертиза материала

Настройки профиля

Авторские справки Создать авторскую справку

Автор(ы) * Поиск

Должность(и)

Вид материала *

Полное название работы *

Количество страниц

Количество иллюстраций

Использовались литературные источники и документы, имеющие гриф, а также служебные материалы других организаций;

Использовались сведения, которые могли бы составить предмет изобретения, но не оформлены заявками в Роспатент;

Заимствованы материалы чужого научного произведения без указания источника заимствования (не нарушены авторские права);

Использовались сведения об изобретениях, защищённых авторскими свидетельствами или патентами, опубликованными в Бюллетене изобретений

Изобретения

Есть запрет Роспатента на публикацию в открытой печати.

Рис. 1 – Интерфейс создания авторской справки

В рамках личных кабинетов сотрудников были реализованы авторские профили, где агрегирована вся информация о публикационной деятельности сотрудника, а также его участия в проектах и полученных наградах (рис. 2). Данные для профиля заполняются сотрудниками НОО, сохраняются в базе данных и при открытии авторского профиля группируются по годам, чтобы можно было просто найти информацию о деятельности сотрудника за определенный год. Все эти данные отображаются не только в личном кабинете, но и в общей сводной информации обо всех сотрудниках института в разделе «Структура». Сбор такой информации помогает оценивать деятельность института, а также на основе собранных данных сотрудники могут готовить документы о своих достижениях, формировать типовые документы на конкурсы и для прохождения аттестации. Например, в личном кабинете сотрудник может сгенерировать и выгрузить в виде документов в формате Word «Форму 3.3»,

форму «Список грантов, проектов, в выполнении которых принимал участие сотрудник», форму «Список трудов сотрудника», форму «Сведения о личном участии сотрудника в научных мероприятиях» (рис. 3).

Главная Поиск Статистика Структура Телефоны Проекты Отчеты Мой профиль **Выйти**

Авторский профиль

Бычков Игорь Вячеславович

Автор 571 статей
 должность: Директор
 e-mail: bychkov@icc.ru
 телефон: 427100

Публикации Руководство проектами Участие в проектах Награды

Публикации

2022 ▾

- Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории** **Труды конференций**
 Бычков И.В.
 в журнале *Россия в XXI веке в условиях глобальных вызовов: Сб. материалов Всерос. научно-практической конф. (Москва, 26–27 апреля 2022 г.)*, издательство Государственный университет управления, № 1, с.37–41
- Integration of web processing services with workflow-based scientific applications for solving environmental monitoring problems** **Статья в журнале**
 Feoktistov A., Gorsky S., Kostromin R., Fedorov R., Bychkov I.
 в журнале *ISPRS International Journal of Geo-Information*, № 1, с.
- Classification of Sentinel-2 satellite images of the Baikal Natural Territory** **Статья в журнале**
 Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K., Avramenko Y.V.
 в журнале *Computer Optics*, № 1, с.90-96
- Алгоритмы планирования вычислений с учетом избыточности и неопределенности** **Статья в журнале**
 Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Горский С.А., Бычков И.В., Черных А.Н., Башарина О.Ю.
 в журнале *Труды ИСП РАН*, № 1, с.123-140
- An adaptive data cleaning framework: a case study of the water quality monitoring system in China** **Статья в журнале**

Рис.2. Авторский профиль.

Главная Поиск Статистика Структура Телефоны Проекты Отчеты Мой профиль **Выйти**

Личный кабинет

Профиль автора

Документы

Экспертиза материала

Настройки профиля

От года: 2019 До года: 2024

Сотрудник: Фереферов Евгений Сергеевич

Скачать DOCX формы 33

Скачать DOCX списка проектов

Скачать DOCX о личном участии в научных мероприятиях

Скачать DOCX списка трудов

33_Fereferov_2019_2024_1729768049335.docx

undefined.docx

671/72c/aae/67172caae1730177451577.docx.docx

Рис. 3 – Раздел личного кабинета «Документы»

1. Власова С.А., Каленов Н.Е. Система учета результатов интеллектуальной деятельности ученых как развитие информационной системы «Труды научных сотрудников» // Научный

- сервис в сети Интернет: труды XXIII Всероссийской научной конференции (20-23 сентября 2021 г., онлайн). М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2021. С. 76-93.
2. Харитонов Д.В., Силкин А.Н., Атрохин И.С. Актуальность использования систем учета результатов интеллектуальной деятельности сотрудников научно-производственного предприятия // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 9 (147). С. 90-96.
 3. Садовничий В.А., Васенин В.А. Интеллектуальная система тематического исследования наукометрических данных: предпосылки создания и методология разработки. Часть 1 // Программная инженерия. 2018. Т. 9. № 2. С. 51-58.
 4. Ветров А.А., Фереферов Е.С. Автоматизированная система учета научной деятельности сотрудников учреждения, подведомственного ФАНО России // Материалы конф. «Ляпуновские чтения» (Иркутск, 21-23 ноября 2016г.). 2016. С. 14.
 5. Ветров А.А., Фереферов Е.С. Развитие информационной системы учета научной деятельности // Материалы конф. «Ляпуновские чтения» (Иркутск, 5-8 декабря 2017 г.). 2017. С. 9.
 6. Новоселов И.Е., Ведерников В.С. Развитие информационной системы учёта научной деятельности ИДСТУ СО РАН // Материалы конф. «Ляпуновские чтения» (Иркутск, 4-8 декабря 2023 г.). 2023. С. 78-79.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГРАММНОЙ СИМУЛЯЦИИ РАБОТЫ LIDAR

Е.Р. Викулова, А.А. Толстихин

Институт динамики систем и теории управления имени М.В. Матросова СО РАН
vikulizavet85@gmail.com

LIDAR (Light Detection and Ranging, обнаружение и определение дальности с помощью света) — это технология, использующая лазерный луч для измерения расстояний и воссоздания модели окружающей среды. Основной принцип работы LIDAR заключается в том, что лазерный луч направляется на поверхность объекта, а затем измеряется время, за которое он возвращается к датчику. Анализируя время задержки и угол отклонения луча, можно определить расстояние до объекта. Полученные данные отображаются в виде массива точек, описывающих контуры и структуру окружающей среды. LIDAR широко применяется в геодезии, картографии, робототехнике и многих других областях. В частности, в робототехнике LIDAR используется для создания карты окружающей среды и определения местоположения робота в пространстве, позволяя ему перемещаться без столкновений с препятствиями.

Данная работа заключается в разработке методов программной симуляции работы LIDAR для дальнейшего их применения в рамках комплекса TEMAR [1]. В данном случае установка реальных датчиков на мобильных роботов комплекса невозможна по конструктивным и экономическим соображениям. Однако присутствует система камер и программное обеспечение с использованием алгоритмов компьютерного зрения, способные распознавать препятствия на стенде. Таким образом, задачей модуля симуляции LIDAR является отбор данных, доступных роботу, а также их преобразование в соответствующий формат.

В качестве базисного метода для оценки и сравнения разрабатываемых методов выбран наиболее популярный итеративный подход. Он заключается в последовательном построении лучей в заданном секторе с небольшим шагом до тех пор, пока не будут выявлены границы изображения или не произойдет пересечение с препятствием.

Был предложен аналитический подход с двумя вариантами описания препятствия: с помощью перехода в фазовое пространство и аппроксимацией до геометрических примитивов.

В первом способе применяется детектор границ саппу к изображению для выделения контура препятствия. Каждая точка на контуре может быть связана с бесконечным количеством прямых, которые проходят через нее. Представив эти прямые в виде $x \cos \theta + y \sin \theta = R$, путем их перебора создается кривая в фазовом пространстве относительно угла и радиуса, где каждая точка контура соответствует своей прямой. Затем находим координаты точек с наибольшим количеством пересечений прямых. По этим координатам строятся прямые в аналитическом виде, которые описывают каждую из границ препятствия.

Второй способ описания состоит в том, чтобы аппроксимировать множество точек границы препятствия до некоторого геометрического примитива (квадрат, прямоугольник). На основе имеющегося контура найти его вершины и построить прямые в аналитическом виде для описания границы препятствия.

На основе полученных результатов можно предположить, что аналитический подход с использованием фазового пространства позволяет достаточно четко определить границы препятствий. В сравнении с итеративным методом, этот подход, демонстрирует меньшую скорость выполнения обработки. Однако стоит отметить, что сложные вычисления необходимо проводить лишь один раз, при условии неподвижности препятствий. Аппроксимация до геометрических примитивов,

существенно выигрывает по времени, хотя может приводить к снижению точности из-за процесса аппроксимации. В настоящее время ведется работа над дальнейшим улучшением модуля, нацеленная на повышение частоты обрабатываемых кадров и увеличение точности передаваемых роботам данных.

1. Kostylev D.A., Tolstikhin A.A., Ul'yanov S.A. Development of the complex modelling system for intelligent control algorithms testing // Proc. Intern. Conf. 42nd International Convention MIPRO 2019. Opatija: MIPRO, 2019. Vol. 1. N. 1. P. 1091-1096.
2. Ульянов А.Ю. Метод трассировки лучей как основная технология фотореалистичного рендеринга / А.Ю. Ульянов, Л.А. Катюжанский, Н.Г. Рыжкова // Фундаментальные исследования. 2015. № 11 (часть 6). С. 1124-1128.
3. A. Schmitt, H. Muller, W. Leister Ray Tracing Algorithms – Theory and Practice, In book: Theoretical Foundations of Computer Graphics and CAD (pp.997-1030) Publisher: Springer Verlag.

РАЗРАБОТКА ВЕБ-СЕРВИСА ДЛЯ АНАЛИЗА ВИЗУАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТЕШЕСТВИЙ

Г.А. Воловиков¹, К.Б. Берёзин², Я.О. Степанов¹

¹Иркутский государственный университет

²Сибирский федеральный университет

jezv@ya.ru

Современные цифровые технологии кардинально изменили подход к организации путешествий, предлагая туристам удобные и персонализированные инструменты для планирования поездок. В последние годы растёт популярность мобильных приложений и интернет-сервисов, которые позволяют находить интересные места, составлять маршруты и делиться впечатлениями. На фоне этого развитие методов искусственного интеллекта, в частности технологий компьютерного зрения, открывает новые перспективы для анализа визуальных данных, таких как пользовательские фотографии, и создания решений, учитывающих индивидуальные запросы путешественников. Разработка цифровых сервисов, способных автоматически формировать туристические маршруты на основе фотографий достопримечательностей, становится актуальной задачей. Это обусловлено увеличением объёма визуального контента, развитием алгоритмов анализа данных и изменением ожиданий туристов, стремящихся получить более точные, оперативные и персонализированные рекомендации. Настоящая работа посвящена созданию такого веб-сервиса.

Целью исследования стала разработка системы, способной автоматически формировать маршруты на основе анализа пользовательских фотографий или текстовых запросов. Для достижения цели были поставлены обозначенные ниже задачи.

1. Провести обзор существующих сервисов, использующих методы искусственного интеллекта в туризме для построения маршрутов на основе предпочтений пользователей.
2. Изучить алгоритмы искусственного интеллекта, подходящие для интерпретации пользовательских предпочтений на основе фотографий и текстовых запросов.
3. Спроектировать архитектуру цифрового сервиса.
4. Разработать алгоритмы анализа визуального и текстового контента и сопоставления объектов с базой туристических достопримечательностей.
5. Создать методику автоматического построения маршрутов
6. Реализовать прототип веб-сервиса с предложенными функциональными возможностями.

В качестве основного инструмента для анализа изображений и текстовых описаний была выбрана модель `ruCLIP`. Она позволяет преобразовывать визуальные и текстовые данные в векторы, обеспечивая минимизацию косинусного расстояния между ними. Это позволяет точно сопоставлять пользовательский запрос с данными из базы достопримечательностей. Однако первоначальная реализация модели оказалась недостаточно эффективной: при каждом запросе происходила векторизация всех объектов базы данных, что приводило к значительным задержкам — обработка запроса занимала до 15 секунд, что в реалиях работы сервиса оказывалось достаточно большим временем ожидания. Чтобы устранить эту проблему, было решено предварительно векторизовать все объекты базы данных. Полученные векторы сохранялись в базе данных, что позволило сократить время обработки запросов до 150 миллисекунд. Несмотря на это улучшение, около 140 миллисекунд уходило на векторизацию пользовательского запроса, что требовало дальнейшей оптимизации. В ходе работы также были выявлены проблемы, связанные с устаревшими зависимостями и ошибками

в используемых библиотеках, включая `cuCLIP`. Это увеличивало размер проекта до 10 ГБ и затрудняло его поддержку. Для решения этой проблемы код библиотек был переработан, что позволило избавиться от лишних зависимостей, уменьшить объём проекта и повысить его производительность.

Для дальнейшего ускорения обработки запросов и повышения гибкости архитектуры был выбран фреймворк ONNX. Этот стандарт предоставляет универсальный формат для работы с моделями искусственного интеллекта, что упрощает их интеграцию и замену. Использование ONNX позволило сократить время обработки запросов до 15 миллисекунд. Кроме того, фреймворк упростил замену моделей в системе: для обновления достаточно заменить ONNX-файл, не изменяя основной код. Такая архитектура повысила адаптивность системы и её устойчивость к изменениям. В рамках исследования также был использован инструмент Milvus для работы с базами данных векторных представлений. Он позволил эффективно хранить и обрабатывать векторные данные, что стало ключевым компонентом системы.

Результатом работы стал прототип веб-сервиса, который позволяет автоматически формировать персонализированные туристические маршруты. Использование таких технологий, как ONNX, обеспечило высокую производительность системы, ускорив обработку запросов и повысив гибкость архитектуры. Система включает в себя следующие ключевые компоненты.

1. Анализ пользовательских фотографий для выявления предпочтений: модели компьютерного зрения позволяют точно распознавать объекты на изображениях, что дает возможность выявлять интересы пользователя на основе его визуальных предпочтений.

2. Сопоставление объектов на изображениях с данными из туристической базы: каждый объект, распознанный на фотографиях, сопоставляется с достопримечательностями, хранящимися в базе данных, содержащей подробные описания и координаты мест. Это позволяет предоставлять пользователю точные рекомендации на основе его запросов и интересов.

Задача автоматического создания маршрутов [1,2] с учетом интересов пользователей: на основе полученных данных и предпочтений пользователя система автоматически формирует маршрут, включающий наиболее интересные и релевантные достопримечательности, пока решена не полностью.

Этот проект демонстрирует возможности использования современных технологий для создания инновационных решений. Он открывает перспективы для дальнейшего применения искусственного интеллекта в туризме и других областях, где важны персонализация и автоматизация. В будущем планируется расширить функциональность сервиса за счёт интеграции дополнительных моделей и методов анализа данных. Перспективы применения разработанных решений выходят за рамки туристической отрасли. Сервисы, использующие компьютерное зрение и персонализацию на основе анализа визуального контента, могут быть полезны в образовании, маркетинге, урбанистике и других сферах, где важно учитывать предпочтения пользователей и обеспечивать точную обработку визуальных данных.

1. José, Carlos, Sancho, Núñez., Juan, A., Gómez-Púlido., Rafael, Robina, Ramírez. (2024). Machine learning applied to tourism: A systematic review. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Data Mining and Knowledge Discovery*, doi: 10.1002/widm.1549
2. Jianguo, Yan. (2024). Multi-objective Optimal Tourism Route Planning and Design Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm. 303-312. doi: 10.1007/978-981-97-1983-9_27

ДИСПЕТЧЕР НАУЧНЫХ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ*

М.Л. Воскобойников, А.Г. Феоктистов

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

mikev1988@mail.ru, agf65@yandex.ru

Введение. При разработке приложений для решения сложных ресурсоемких научных и прикладных задач в гетерогенной распределенной вычислительной среде (ГРВС), как правило, применяется модульный подход [1]. Схема решения таких задач зачастую реализуется в виде научного рабочего процесса (НРП). При этом НРП представляет собой информационно-вычислительную структуру, отражающую бизнес-логику предметной области в применении предметно-ориентированных данных и программного обеспечения для решения научных задач в этой предметной области [2]. В этом контексте, начиная с начала 90-х годов прошлого столетия, наблюдается постоянное развитие направления исследований, связанного с разработкой систем управления рабочими процессами (СУРП) [3]. В настоящее время внимание разработчиков направлено на создание и применение СУРП, поддерживающих сервис-ориентированные НРП [4]. К сожалению, проблемы применения стандартизированных сервис-ориентированных НРП, поддерживающих WPS-сервисы, использование которых востребовано при решении актуальных задач экологического мониторинга, и их выполнения в ГРВС в известных СУРП не решены в полной мере. В этой связи разработан новый инструментальный комплекс FDE-SWFs [5], средства которого направлены на решение указанных выше проблем. В работе представлен диспетчер НРП данного инструментального комплекса.

Методы и средства. Исполнительной подсистемой FDE-SWFs является диспетчер НРП. С его помощью конечный пользователь приложения запускает НРП на выполнение и отслеживает процесс вычислений. Диспетчер взаимодействует с метапланировщиками и системами управления заданиями в процессе распределения вычислительных ресурсов ГРВС для выполнения рабочего процесса. В частности, он генерирует паспорта заданий по выполнению модулей НРП для метапланировщиков и систем управления заданиями. Диспетчер также предоставляет доступ к базе расчетных данных и обеспечивает возможность загрузки и последующей визуализации результатов ранее проведенных экспериментов. На основе этой информации можно подготовить исходные данные для новых исследований. По каждому эксперименту в базе хранятся постановка задачи, рабочий процесс, исходные, целевые и необходимые промежуточные параметры задачи, а также системная информация о ходе выполнения вычислительного процесса в виде лог-файлов.

В интерпретатор НРП включены операторы выполнения операций, реализуемых сервисами. Эти операторы обеспечивают выполнение веб-сервисов, представленных на языке WSDL и реализующих вычислительные операции и операции обработки данных в НРП. В частности, поддерживается работа с WPS-сервисами для сбора, обработки и анализа геопространственных данных. Конструктор вычислительной модели контролирует строгое соответствие параметров операций сообщениям сервисов при определении этих объектов.

Рабочий процесс может быть реализован следующими способами: на основе композиции WSDL-сервисов, представленной на языке программирования Python; в

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

виде отдельного WPS-сервиса, который реализуется традиционным НРП на основе исполняемых модулей и заданий для внешних метапланировщиков и систем управления заданиями, таких как Condor DAGMan и HTCondor; с помощью стандартизированного декларативного языка BPEL. В последнем случае, НРП может использоваться любыми внешними СУРП, поддерживающими BPEL. На рис. 1 представлены схемы выполнения НРП под управлением FDE-SWFs.

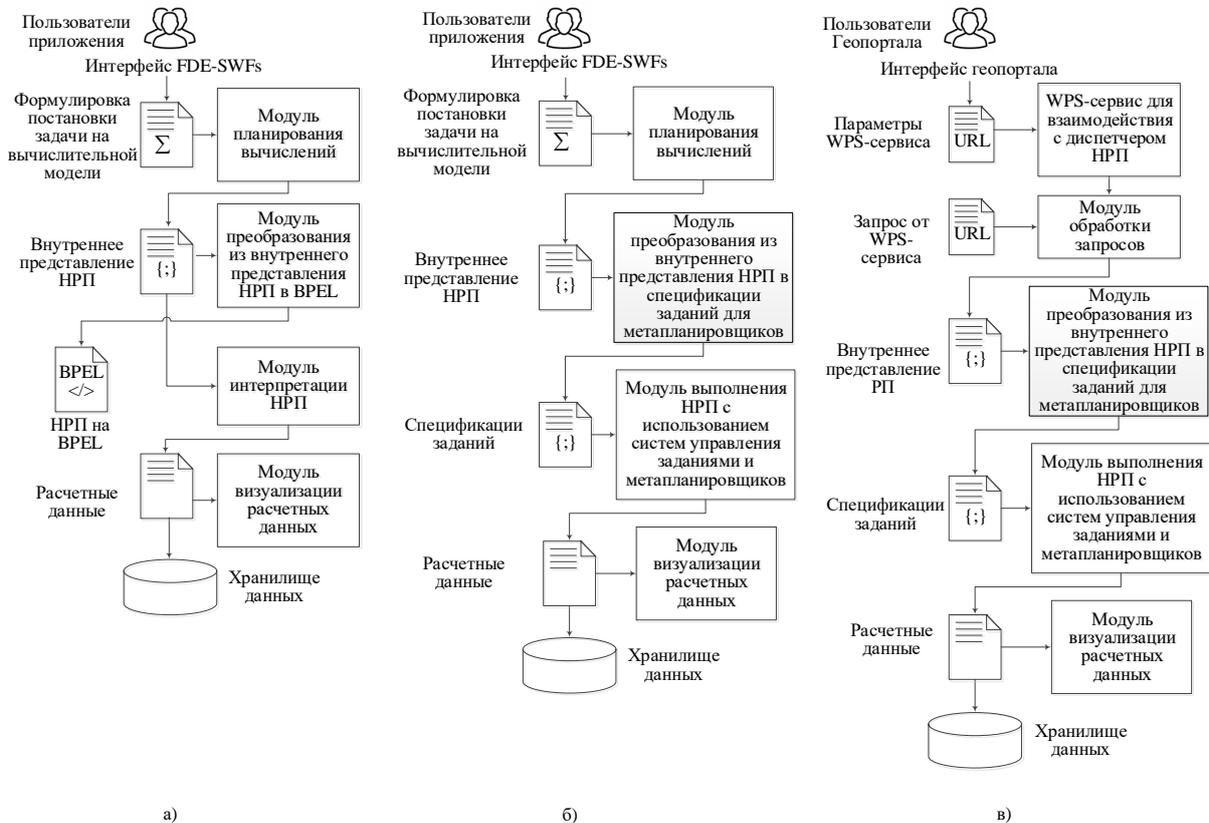


Рис. 1. Схемы выполнения НРП: Схема 1 (а), Схема 2 (б) и Схема 3 (в)

В рамках Схемы 1 (а) пользователь с помощью интерфейса FDE-SWFs формулирует постановку задачи на вычислительную модель предметной области. По сформулированной постановке задачи модуль планирования вычислений выполняет построение плана решения задачи в виде НРП во внутреннем представлении системы. Модуль преобразования производит конвертацию НРП на BPEL для использования во внешних СУРП. Далее модуль интерпретации осуществляет асинхронно параллельное выполнение последовательности операций НРП, представленных в виде композиции WSDL-сервисов. Полученные в результате выполнения композиции WSDL-сервисов расчетные данные сохраняются в хранилище данных. По завершению выполнения НРП пользователь может осуществить визуализацию расчетных данных с целью их дальнейшего анализа.

Схема 2 (б) в отличие от Схемы 1 (а) предполагает, что операции НРП представлены программными модулями. Процесс выполнения НРП состоит в следующем. Специалист предметной области (конечный пользователь) формулирует постановку задачи, подготавливает исходную информацию и исполняемые модули с помощью интерфейса FDE-SWFs. Затем выбирает необходимые ресурсы (ресурсы суперкомпьютерных ЦКП, облачных платформ, собственных высокопроизводительных серверов и др.) с учетом квот на их использование и способы доступа к ним. Диспетчер автоматически строит НРП и генерирует спецификацию вычислительных заданий на основе внутреннего представления НРП. Подсистема контейнеризации осуществляет выделение требуемых ресурсов, подготовку образов в соответствии с классами

ресурсов и прикладными модулями НРП с последующим запуском контейнеров на данных ресурсах (рис. 2). По готовности ресурсов для запуска НРП передается сообщение СУПЗ (HTCondor или PBS Torque), которая также интегрирована в образы. После завершения выполнения НРП метапланировщик отправляет полученные результаты в расчетную базу данных. Пользователь также может произвести визуализацию расчетных данных.



Рис. 2. Выполнение НРП в контейнеризированной вычислительной среде

Возможность выполнения НРП с помощью WPS-сервисов реализуется Схемой 3 (в). В этом случае НРП регистрируются как WPS-сервисы. FDE-SWFs автоматизирует создание, регистрацию и применение WPS-сервисов. В частности, FDE-SWFs автоматически регистрирует программные модули и НРП в виде асинхронных WPS-сервисов в соответствующих каталогах на геопортале. НРП могут включать вызовы других WPS-сервисов, что позволяет работать с наборами сервисов. В FDE-SWFs поддерживается возможность обмена файлами между WPS-сервисами в качестве их параметров, в том числе обмен данными с системой хранения данных геопортала.

Заключение. Практическое применение диспетчера НРП при подготовке и проведении экспериментов по решению задач исследования различных конфигураций природно-технических систем [6-11] показало его гибкую и эффективную работу. Дальнейшее направление развития диспетчера связано с исследованием и разработкой новых методов интеграции и контейнеризации прикладного и системного программного обеспечения в ГРВС.

1. Khot T., Trivedi H., Finlayson M., Fu Y., Richardson K., Clark P., Sabharwal A. Decomposed prompting: A modular approach for solving complex tasks // arXiv preprint. 2022. arXiv:2210.02406.
2. Yu J., Buyya R. A taxonomy of workflow management systems for grid computing // Journal of Grid Computing. 2005. Vol. 3, no. 3-4. P. 171–200.
3. Schäl T. Workflow management systems for process organisations // Lecture Notes in Computer Science. 1996. Vol. 1096. P. 208.
4. Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г. Сравнительный анализ систем управления научными рабочими процессами // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2024. № 3 (35). С. 102–111.
5. Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г., Черных А.Н. Разработка и применение сервис-ориентированных научных приложений в инструментальном комплексе FDE-SWFs // Труды ИСП РАН. 2024. Т. 35, № 6. В печати.
6. Бычков И.В., Горский С.А., Еделев А.В., Костромин Р.О., Сидоров И.А., Феоктистов А.Г., Фереферов Е.С., Федоров Р.К. Поддержка управления живучестью систем энергетики на

- основе комбинаторного подхода // Известия РАН. Теория и системы управления. 2021. № 6. С. 122–135.
7. Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Сидоров И.А., Горский С.А. Башарина О.Ю. Цифровые двойники процессов работы природосберегающего оборудования инфраструктурного объекта // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 1. С. 57-62.
 8. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Башарина О.Ю., Сидоров И.А. Моделирование работы природосберегающего оборудования инфраструктурных объектов в микросервисной среде // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27, № 5. С.30-42.
 9. Феоктистов А.Г. Дискретные модели выбора результатов моделирования работы экологических установок // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 1. С. 102-106.
 10. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Горский С.А., Костромин Р.О., Федоров Р.К. Автоматизация интеграции сервисов веб-обработки данных экологического мониторинга с распределенными научными приложениями // Автометрия. 2022. Т. 58. № 4. С. 67-75.
 11. Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Воскобойников М.Л., Ли-Дэ Д.И. Организация вычислительной среды разработки и применения научных рабочих процессов на основе контейнеризации // Вычислительные технологии. 2023. Т. 28, № 6. С. 151–164.

ПОЧЕМУ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛОХО РАБОТАЮТ АЛГОРИТМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ТЕОРИИ КОНЕЧНОМЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А.В. Гасников¹, А.Ю. Горнов²

¹Университет Иннополис

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Динамичное развитие в последние годы методов выпуклой оптимизации позволяет надеяться на успешное применение развиваемых подходов в близких задачах, в том числе в задачах оптимального управления. Однако наш первый опыт применения самых новых алгоритмов (см., напр., [1]) оказался, к сожалению, не слишком удачным. Для первых экспериментов нами была выбрана экстремальная задача из книги [1], пример 10.1.7, с. 147:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= u, \dot{x}_2 = u^2 + x_1, \\ x_1(0) &= x_2(0) = 0, t \in [0, 4], -1 \leq u(t) \leq 1, \end{aligned}$$

в которой выпуклость целевого функционала представляется очевидной.

Для численного исследования применялись алгоритмы выпуклой оптимизации, опирающиеся на встроенные механизмы оценки константы Липшица [1]. Парадоксальным образом работа этих проверенных и строго обоснованных алгоритмов оказалась совершенно нештатной. Механизм оценки константы Липшица, необходимый для нахождения размеров шагов движения по антиградиентам, давал невероятно завышенные оценки, достигающие миллионных значений. В результате алгоритмы работали с чрезмерно малыми шагами и неконструктивно долго.

В докладе обсуждаются причины наблюдаемого нами артефакта (артефакт – «недостовверный результат научного исследования, возникающий из-за дефектов метода исследования или ошибок экспериментатора» // Большая Российская Энциклопедия, 2005. Т. 2, с. 283). Основной нашей рабочей гипотезой является следующая: свойства решаемых дискретизованных задач не соответствуют свойствам исходных задач бесконечномерных. Был рассмотрен набор аппроксимативных задач с размерностями от 10 до 3000, полученных с применением традиционного способа дискретизации управления – сплайнов первого порядка (кусочно-линейные функции). Для всех этих задач с применением методик предоптимизационного анализа (см., напр., [3]) были получены оценки степени выпуклости и констант роста (Липшица) степени до четвертой включительно.

Для выпуклых функций оценки строго единичны по построению; если оценки хотя бы немного отличаются от 1, это означает, что в допустимой области существуют точки, где функция невыпукла и, следовательно, задача в целом не является выпуклой! Расчёты показали, что оценки степени выпуклости для всех рассматриваемых задач очень далеки от 1 – от 0.49 для задачи в 10 переменных до 0.024 для 3000 переменных (см. Табл. 1, 2-й столбец).

Более того, монотонное падение размеров оценок сообщает нам, что чем больше переменных, т.е. чем лучше выполнена аппроксимация непрерывной задачи, тем хуже становится дискретизованная задача! Кроме того, оптимизируемые функционалы имеют очень большие константы роста, достигающие, например, миллионов для KL3 (см. Табл. 1, 5-й столбец) и миллиардов для KL4 (см. Табл. 1, 6-й столбец), что также явно не способствует устойчивой работе алгоритмов.

Представляется, что причиной проявившейся проблемы являются разрывы производной в узлах аппроксимации управления, и, следовательно, разрывы

производных всех переменных системы дифференциальных уравнений. Косвенно это подтверждается тем фактом, что чем больше шагов дискретизации, тем больше точек разрыва, тем задача, согласно вычисленным оценкам, «находится дальше» от выпуклой.

Табл. 1. Результаты применения методик предоптимизационного анализа для набора аппроксимативных задач с размерностями от 10 до 3000.

1	2	3	4	5	6
N	STV	KL1	KL2	KL3	KL4
10	0.490	3.4e+00	5.3e+01	3.6e+04	8.8e+07
20	0.170	1.7e+00	1.3e+02	8.7e+04	2.9e+08
40	0.095	9.6e-01	4.7e+02	3.1e+05	9.9e+08
50	0.085	8.2e-01	6.7e+02	4.1e+05	1.2e+09
100	0.059	7.3e-01	9.0e+02	6.4e+05	1.7e+09
200	0.058	5.2e-01	9.4e+02	5.3e+05	1.2e+09
500	0.036	5.3e-01	9.4e+02	9.2e+05	2.4e+09
1000	0.033	8.8e-01	1.5e+03	9.3e+05	2.5e+09
2000	0.025	2.4e+00	5.9e+03	3.8e+06	9.0e+09
3000	0.024	2.4e+00	5.9e+03	3.2e+06	7.1e+09

1-й столбец – число точек дискретизации; 2-й столбец – STV, оценка степени выпуклости; 3-й столбец – KL1 – оценка константы Липшица первого порядка; 4-й столбец – KL2 – оценка константы Липшица второго порядка; 5-й столбец – KL3 – оценка константы Липшица третьего порядка; 6-й столбец – KL4 – оценка константы Липшица четвертого порядка.

Произведенные вычислительные эксперименты подтвердили истинность нашей гипотезы. Обнаруженный «дефект метода» связан с методикой дискретизации управления на основе кусочно-линейной интерполяции. Полученный нами ответ на поставленный в заголовке вопрос таков: *алгоритмы выпуклой оптимизации плохо работают для выпуклых задач оптимального управления потому, что дискретизованные аппроксимации выпуклых задач оптимального управления, построенные традиционным образом, есть задачи невыпуклые.*

1. Нестеров Ю.Е. Алгоритмическая выпуклая оптимизация. М.: ЛЕНАНД, 2024.
2. Алексеев В.М., Галеев Э.М., Тихомиров В.М. Сборник задач по оптимизации. Теория. Примеры. Задачи. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
3. Горнов А.Ю. Алгоритмы предоптимизационного анализа невыпуклой функции многих переменных. Ляпуновские чтения». Иркутск, 2015. С. 18–19.

РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ ПО СБОРУ И ОБРАБОТКЕ РАЗНОФОРМАТНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ И ОЗЕРА БАЙКАЛ

А.С. Гаченко

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

В настоящее время проводится комплексная научно-исследовательская работа по разработке фундаментальных основ, методов и технологий для комплексного экологического мониторинга и прогнозирования с использованием цифровых платформ. Целью является создание системы, способной собирать, хранить, обрабатывать и анализировать большие объемы разнородных пространственно-временных данных, а также разрабатывать комплекс математических и информационных моделей, сервисов и методов машинного обучения. Эти разработки апробированы на примере Байкальской природной территории. В проекте участвуют научные коллективы из нескольких академических институтов по всей стране. В рамках проекта проводятся аналитические исследования по сбору разноформатных данных из различных источников, включая распределенные аппаратные датчики различных научных направлений и данных. Эти данные используются для создания и наполнения прикладной цифровой платформы (ПЦП), которая работает на уровне отдельных направлений мониторинга. Платформа поддерживает алгоритмический обмен сервисами между независимыми участниками с использованием единой информационной среды и информационно-технологической инфраструктуры (рис. 1).

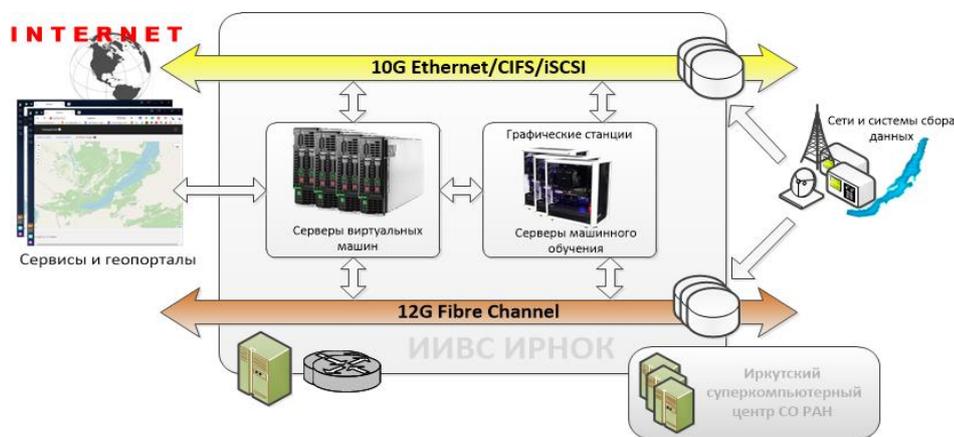


Рис 1. Схема хранения и обработки данных прикладной цифровой платформы

Налажен процесс по сбору данных со станций автоматического мониторинга погодных данных «САМ-ЦБ2» и других важных научных наборов с различных приборов мониторинга, которые предназначены для удаленной автономной регистрации и сбора данных. Передача данных осуществляется с использованием каналов GSM-связи и проводных сетей. Данные поступают на сервер разработчиков в БД. Далее происходит предварительная обработка и нормализация первичных данных при помощи скриптов на языке Python. После этого данные реплицируются на сервер ИДСТУ СО РАН и хранятся в базе данных СУБД PostgreSQL.

Также на сервер поступают и другие виды научных данных: пожары, гари, вырубki, грозвые разряды, загрязняющие вещества в атмосфере, уровни воды отдельных рек БПТ и озера Байкал, измерения вертикального распределения

температуры и скоростей течений на пелагических буйковых станциях в озере Байкал, ледовая обстановка и др.

Все данные хранятся и обрабатываются в специализированном центре коллективного пользования (ЦКП).

В результате проведенной работы была создана интегрированная система сбора, хранения и анализа данных, которая позволяет оперативно получать актуальную информацию о состоянии окружающей среды на Байкальской природной территории. Разработанная прикладная цифровая платформа (ПЦП) стала основой для дальнейшего развития системы экологического мониторинга, обеспечивая возможность интеграции данных из различных источников и их комплексного анализа.

Важно отметить, что созданная система не только повышает эффективность мониторинга, но и способствует более точному прогнозированию экологических процессов, что имеет важное значение для принятия своевременных управленческих решений. Кроме того, разработанные методы и технологии могут быть адаптированы и применены в других регионах, где необходим комплексный подход к экологическому мониторингу.

Таким образом, проведенная научно-исследовательская работа открывает новые возможности для развития систем экологического мониторинга и прогнозирования, способствуя улучшению состояния окружающей среды и обеспечению устойчивого развития территорий.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

С.К. Голушко^{1,2}, А.Ю. Горнов³, Т.С. Зароднюк³, А.С. Аникин³,
А.В. Амелина², Л.С. Брындин², В.А. Беляев², А.Г. Горынин^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет

²Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий СО РАН

³Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Исторически сложилась традиция использования формализма краевых задач для моделирования механики различных композитных конструкций – пластин, оболочек и многих других (см., напр., [1]). На этом пути получены серьезные научные результаты и решено большое количество важнейших прикладных задач (см., напр., [2]). Однако применение краевых задач даже для моделей в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, – не столь простая задача, как можно было бы ожидать. В отличие от задачи Коши гарантировать существование решения краевой задачи в общем нелинейном случае не представляется возможным. Кроме того, проблема поиска решения может быть трактована как невыпуклая задача параметрического оптимального управления, объективную сложность которой специалисты оценивают как достаточно высокую.

В докладе рассматривается алгоритм поиска решения краевой задачи для шестимерной системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений на фиксированном интервале времени. Общая идея подхода – редуцировать исходную задачу к задаче динамической оптимизации с тремя управлениями-параметрами и тремя терминальными ограничениями. Формальная постановка задачи, не ограничивая общности, предполагает наличие трех условий у первых компонент на левом конце интервала и трех условий у вторых трех компонент на правом конце. В обсуждаемом варианте алгоритма для оценки значения функционала невязок используется классический метод интегрирования Рунге-Кутты 4 порядка; при необходимости он может быть легко заменен на другой метод или стандартную программу.

Для построения алгоритма исследования формируемых задач трехмерной оптимизации использован безградиентный метод «сжимающих сеток». После построения равномерной сетки по всем переменным во всех ее узлах вычисляется значение целевого функционала – выбирается малый трехмерный интервал, содержащий наименьшее из найденных значений, и процедура покрытия повторяется для него и т.д. Для управления работой алгоритма предусмотрены целочисленный алгоритмический параметр, лимитирующий число итераций сжатия, и вещественный параметр, указывающий требуемую точность решения краевой задачи. Процесс решения отражается в файле протокола расчета, по содержанию которого пользователь может судить о способности алгоритма достичь указанной точности, и, следовательно, о разрешимости поставленной краевой задачи.

Предложенная программная технология прошла тщательное тестирование и может быть рекомендована для решения краевых задач в нежестких системах.

1. Голушко С.К., Немировский Ю.В. Прямые и обратные задачи механики упругих композитных пластин и оболочек вращения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
2. Соломонов Ю.С., Георгиевский В.П., Недбай А.А., Андрияшин В.А. Прикладные задачи механики композитных цилиндрических оболочек. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.

ДИСБАЛАНС АЛГОРИТМИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КЛАССИЧЕСКИХ И ИГОЛЬЧАТЫХ ВАРИАЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ

А.Ю. Горнов

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

Одним из самых популярных методов исследования в теории оптимального управления является, очевидно, метод вариаций, с применением которого выводятся различные необходимые условия экстремума. Классические вариации управления («малые смещения аргумента», «вариации по направлениям», см. [1], с. 63) – функции непрерывного типа, послужили основой для успешного исследования множества постановок экстремальных задач, начиная со старинных задач вариационного исчисления. Авторство таких конструкций приписывается еще Ж. Лагранжу [2]. Более сложные управляемые модели, включающие различные ограничения-неравенства, привели к появлению другого типа инструмента – игольчатых вариаций. Механизм игольчатой вариации («приращение на бесконечно малом отрезке времени») послужил основой для получения мощных теоретических результатов – принципа максимума Понтрягина [3] и его обобщений. Можно, впрочем, сослаться на опубликованную только в интернете книгу воспоминаний Н.Н. Моисеева «Как далеко до завтрашнего дня. 1917–1993»: «...игольчатые вариации придумал еще Лежандр в начале XIX века...». Общим мнением является тезис о том, что игольчатые вариации дают существенно большие теоретические возможности, чем вариации классические.

Однако при конструировании численных методов оценки полезности вариаций обсуждаемых типов, на наш взгляд, прямо противоположны. Многолетние попытки многих групп построить эффективные алгоритмы на основе принципа максимума (и, следовательно, игольчатого варьирования) привели сообщество «вычислителей» к мысли о том, что существует некоторая «стена возможностей» таких алгоритмов, преодоление которой обычно требует специальных усилий и использования специфических особенностей задачи в каждом конкретном случае. Обычно это выражается, например, в резком замедлении сходимости алгоритмов такого типа при подходе к оптимальным точкам. Но использование в алгоритмах классического варьирования традиционно не встречает никаких препятствий и позволяет легко и быстро достигать хорошей точности получаемых оптимальных управлений.

Наша версия указанного дисбаланса возможностей алгоритмов, основанных на игольчатом и классическом варьировании, следующая. Основные типы оптимальных управлений – непрерывные либо релейные функции; экзотические варианты с бесконечно сгущающимися точками переключения, чаттеринг-эффекты и т.д. оставим пока за пределами обсуждения. Построение как релейных, так и гладких вариантов управления с применением классических вариаций удается легко. Построение релейных вариантов управлений с применением игольчатого варьирования также не вызывает больших проблем. Но получение качественной аппроксимации непрерывной функции с применением иголок – очень затруднительно.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. М.: Наука, 1979.
2. Lagrange J. Essai sur une nouvelle methode pour determiner les maxima et minima des formules integrales indefinies. Miscellanea Taurinensia II, 1762. Pp. 173-195.
3. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1968.

МЕТОД ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ МЮЛЛЕРА ДЛЯ ЗАДАЧ БЕЗУСЛОВНОЙ МИНИМИЗАЦИИ

А.Ю. Горнов

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

Среди поисковых методов своими продвинутыми характеристиками и уважаемым возрастом всегда выделялся метод Пауэлла (см., напр., [1]), способный обеспечить быструю, в ряде случаев квадратичную, сходимость к экстремуму. Метод Пауэлла получил существенное развитие, в том числе и для невыпуклых задач (см., напр., [2]).

Однако научная легенда (см., напр., [3]) гласит, что первым, кто использовал приемы параболической интерполяции, был немецкий математик и астроном Иоганн Мюллер (псевдоним Региомонтан, 1436–1476 гг.). Представляется вполне уместным назвать алгоритмы, построенные на основе этой идеи, именем указанного ученого.

В докладе обсуждается способ построения поисковых алгоритмов с возможностью ускоренной сходимости в окрестности экстремума для унимодальных задач. Основная идея заключается в создании надежного алгоритма для задачи минимизации с двумя переменными, который в дальнейшем возможно использовать для построения двухкоординатных схем оптимизации многомерных функций.

Алгоритм двумерной оптимизации. Вокруг текущей точки строится брус с заданными размерами; во всех углах этого бруса производится вычисление функции, выбирается минимальное значение из этих четырех проб. Если в какой-то пробной точке найдено улучшение рекорда, то выполняется переход к следующей итерации. В окрестности наилучшей из угловых точек бросается еще одна, случайная пробная точка. Накопленный базис проб – 6 штук (текущая точка, четыре угловых и случайная) – позволяет построить двумерный квадратичный полином (параболоид), в минимуме которого выставляется следующая пробная точка. Если улучшение функции в минимуме параболоида получить не удалось, из имеющегося базиса удаляется наихудшая точка, новая пробная точка вносится в базис, снова строится квадратичный полином и т. д. Таким образом, алгоритм генерирует динамично меняющееся облако точек, имеющее тенденцию мигрировать по направлению к минимуму. В окрестности оптимума, где функция становится похожей на квадратичную, можно рассчитывать на ньютоновскую скорость сходимости. При возникновении вспомогательных систем линейных уравнений, близких к вырожденным, возможно просто переходить к новой итерации.

Алгоритм многомерной оптимизации. На каждой итерации случайным образом определяются две переменные, по которым производится спуск с применением алгоритма двумерной оптимизации; остальные переменные остаются на итерации без изменения. Предложенный алгоритм многомерной оптимизации прошел тщательное тестирование; алгоритм показал прекрасные вычислительные характеристики и может быть рекомендован к использованию в задачах оптимизации с сотнями и тысячами переменных.

1. Химмельблау Д.М. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975.
2. Горнов А.Ю. Алгоритм поиска глобального экстремума, основанный на методе Пауэлла–Брента. Тез. Всерос. конф. «Математическое моделирование и вычислительно-информационные технологии в междисциплинарных научных исследованиях». Иркутск. 2011. С. 43.
3. Пирумов У.Г., Гидаспов В.Ю., Иванов И.Э., Стрельцов В.Ю., Формалев В.Ф. Численные методы: учебник и практикум. М.: Юрайт (МАИ). 2014.

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ОДНОМЕРНОГО ПОИСКА БРЕНТА ДЛЯ МЕТОДОВ ГРАДИЕНТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А.Ю. Горнов

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

Задача одномерного поиска, несмотря на свою простоту, до настоящего времени вызывает много споров среди информированных специалистов. Авторы самых современных работ всячески избегают включения подзадач одномерного поиска в конструкции алгоритмов (см., напр., [1], с. 229). Основная причина, на наш взгляд, очевидна: для таких задач не удастся произвести привычные уже теоретические оценки числа операций, гарантирующих достижения экстремума с заранее указанной точностью. Однако вычислительная практика дает однозначный ответ о целесообразности применения одномерного поиска в градиентных алгоритмических конструкциях.

Еще одной причиной можно назвать отсутствие в научной литературе и доступных коллекциях алгоритмов стандартной программы, способной надежно решать подзадачи одномерного поиска в градиентных схемах. Наиболее развитый, на наш взгляд, алгоритм для такой задачи был опубликован более полувека назад в книге Р. Брента (см., напр., [2]); специалисты называют представленный там алгоритм «шедевром», в чем с ними сложно не согласиться. Алгоритм Брента основан на хитроумной комбинации метода золотого сечения с методом обратной параболической интерполяции; в первоисточнике имеются строго доказуемые утверждения о его свойствах. Однако применительно к градиентным алгоритмам в этой программной реализации не учитывается несколько «информационных особенностей», способных самым существенным образом повлиять на суммарную эффективность использования в многомерных задачах.

В докладе обсуждается предложенная программная реализация специализированного алгоритма одномерного поиска, разработанная с учетом особенностей задач линейного поиска в градиентных методах. Длина интервала, на которой следует искать минимум, во многих случаях неизвестна («искать от нуля до бесконечности»). Для преодоления этой проблемы в алгоритм включены механизмы выявления («захвата») интервала, основанные на кратном увеличении его пробной длины с сопутствующей проверкой чрезмерного роста функции. На каждой итерации имеется бесплатная информация о значении функции и ее градиента в нулевой точке интервала, полученная в результате вычисления многомерного градиента. С применением этой информации на первом шаге поиска строится «нестандартная парабола», основанная всего на одной пробе функции. Реализованы различные критерии остановки алгоритма: в дополнение к привычной задаче одномерного поиска малости длины интервала неопределенности включены также критерий остановки Гольдстейна и критерий «улучшение при максимальном шаге». Все выполненные по разным механизмам пробы складываются во внутреннюю базу проб и могут быть использованы в дальнейших операциях алгоритма.

Программная реализация обсуждаемого алгоритма прошла тщательное тестирование и использована в составе нескольких методов градиентной оптимизации при решении большого числа задач из различных областей.

1. Нестеров Ю.Е. Алгоритмическая выпуклая оптимизация. ФПМИ МФТИ, 2024.
2. Brent R.P. Algorithms for minimization without derivatives. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1973.

ТРИ ПРАВИЛА УСПЕШНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.Ю. Горнов

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

Под успешным алгоритмом будем понимать алгоритм, способный полезно, без дополнительных усилий («автоматически»), работать в практических задачах динамической оптимизации. Такие задачи, в отличие от т. н. «модельных» задач из учебников, чаще всего появляются из приложений и ставятся конкретным человеком, заинтересованным в их скорейшем решении. Эти задачи в большинстве случаев включают параллелепипедные ограничения на управления, а также терминальные или фазовые ограничения на траектории, что влечет плохую обусловленность их целевых функционалов вследствие применения штрафных либо лагранжевых методик «снятия ограничений».

Имеющийся в нашем распоряжении вычислительный опыт позволяет сформулировать три критерия («три правила»), нарушение любого из которых с большой вероятностью существенно ухудшает свойства алгоритмов.

Правило 1. Алгоритмы должны включать механизмы накопления информации, полученной на предыдущих итерациях. Самым известным примером такого механизма можно указать алгоритмы конечномерной оптимизации со сверхлинейной скоростью сходимости – сопряженных градиентов, квазиньютоновские. Подобные примеры алгоритмов, основанных на теории оптимального управления, мы назвать затрудняемся.

Правило 2. Должны быть включены адекватные механизмы обработки прямых ограничений на управления. Традиционные пороговые алгоритмы «высадки на ограничения», например, широко применяемые в конечномерной оптимизации, носят травмирующий характер для метода и приводят к появлению «высокочастотных паразитических возбуждений» (см. [1]), неизбежно замедляющих процесс сходимости.

Правило 3. Начальные приближения должны соответствовать по типу ожидаемым оптимальным решениям. Например, формирование «высокоэнергичного» стартового приближения для задачи с гладким решением приводит примерно к тем же проблемам замедления сходимости, что и в предыдущем случае.

По нашему анализу, при разработке алгоритмов, основанных на теории оптимального управления, практически во всех случаях нарушается правило 1. С другой стороны, в многочисленных работах по созданию алгоритмов для дискретизованных задач оптимального управления, ведущиеся специалистами в конечномерной оптимизации, правило 2 всегда игнорируется. Основными нарушителями правила 3 являются, на наш взгляд, создатели нелокальных алгоритмов на основе гибридных биоинспирированных (т.н. «меметических») методов, в которых стартовые приближения для локального спуска несут, как правило, чрезмерно экзотический характер.

В качестве примера алгоритмов, не нарушающих ни одного из вышеуказанных правил, можно привести алгоритмы из [2], в течение многих лет доказывающие на практике свою высокую конкурентоспособность.

1. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978.
2. Горнов А.Ю. Двухметодные вычислительные схемы, основанные на преобразовании Гернет–Валентайна. Ляпуновские чтения, 2017. С. 12.

МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ГРАДИЕНТА В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ*

А.Ю. Горнов, Т.С. Зароднюк

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

Проблема вычисления градиента в задаче оптимального управления со свободным правым концом считается давно решенной: интегрируем прямую систему, берем производные терминальной функции, интегрируем сопряженную систему, получаем градиент функционала (см., напр., [1]). Однако любой исследователь, который решится написать программу градиентного численного метода для задачи динамической оптимизации, столкнется с целым рядом проблем, неудачное решение которых может привести к отрицательному результату.

В докладе обсуждаются технические проблемы, которые возникают при численной реализации алгоритмов, и известные нам методики (Табл. 1) решения этих проблем.

Табл. 1. Методики преодоления трудностей, возникающих при численной реализации алгоритмов оценки градиентов в задаче оптимального управления

1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Название</i>	<i>Сопряжен- ная система</i>	<i>Интерпо- ляция управления</i>	<i>Аналити- ческие производ- ные</i>	<i>Вычисли- тельная затрат- ность</i>	<i>Оценка мощ- ности</i>	<i>Оценка удобст- ва</i>	<i>Метод интегри- рования</i>
0 «студенческая»	+	КЛ	+	2	0.1	0.5	Эйлер
1 «асирантская»	+	КЛ	+	2	0.2	0.5	РК
2 «разностные схемы»	–	КЛ	–	$N/2N$	0.4	1.0	любой
3 «ДИСО»	+	КЛ	–	2	0.8	1.0	РК
4 «Евтушенко»	+	КЛ	–	2	0.7	1.0	РК
5 «OPTCON-90»	+	КЛ	–	2	0.6	1.0	Эйлер-2
6 «OPTCON-12»	+	СП	–	3	0.9	1.0	любой
7 «OPTCON-24»	+	СП	–	3	1.0	1.0	любой

Здесь 1-й столбец – название методики; 2-й столбец – необходимость использования сопряженной системы; 3-й столбец – способ интерполяции управления (КЛ – кусочно-линейный, СП – сплайновый, РЕЛЕ – релейный); 4-й столбец – необходимость использования написания аналитических формул для производных; 5-й столбец – затратность методики, суммарное число необходимых задач Коши (здесь N – число узлов в сетке дискретизации); 6-й столбец – оценка мощности методики по условной шкале от 0.0 до 1.0; 7-й столбец – оценка удобства использования по условной шкале от 0.0 до 1.0; 8-й столбец – методы интегрирования (Эйлер – методы Эйлера, РК – методы Рунге-Кутты, любой – любые стандартные программы).

1. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г. Гамкредидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М., Наука, 1969.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№° гос. регистрации: 121041300060-4).

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ В СИСТЕМЕ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ*

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

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

Дифференциальные уравнения с распределенным запаздыванием являются, по-видимому, одним из самых сложных и малоизученных типов систем с отклоняющимся аргументом. Задачи такого типа относятся к классу функционально-дифференциальных уравнений (см., напр., [1, 2]), кроме того, можно также классифицировать их как интегро-дифференциальные уравнения (см., напр., [3, 4]); задачи считаются сложными как для теоретического, так и для численного анализа. Однако модели такого типа имеют довольно обширную сферу приложений, включающую исследование электрических цепей, моделирование взаимодействующих нейронов, исследование нелинейных дисперсионных волн в гидродинамике, моделирование динамики эпидемий, радиационный перенос, поиск уязвимостей методик страхования, финансовая аналитика (см., напр., [3–6]) и другие. Представляется, что проблема создания надежных численных методов для такого класса задач пока еще далека от полного разрешения (см., напр., [7, 8]).

В докладе обсуждается предложенная методика решения начально-краевых задач с точечными и распределенными запаздываниями. На первом этапе формируется расширенный временной интервал, включающий как основной интервал, фигурирующий в постановке задачи, так и стартовый (начальный) интервал, на котором задается начальная функция. Для аппроксимации решения на расширенном интервале используется неравномерная в общем случае сетка дискретизации и кубические сплайны специального типа, т.н. «управляемые сплайны», краевые условия которых не задаются, а варьируются в процессе расчета. Опираясь на сплайновую аппроксимацию и исходное уравнения, формируется экстремальная задача по минимизации невязок; варьируемыми параметрами в ней являются значения дискретной функции, определенной в каждом узле сетки. Для решения сформированной конечномерной задачи оптимизации используются глобализующие алгоритмы Лууса–Яколы и Пауэлла, дополненные локальными квазиньютоновскими алгоритмами.

В работе [9] проведено качественное исследование линейного уравнения, включающего как точечное, так и распределенное запаздывание. Нами выполнена проверка работоспособности предложенного подхода путем численного решения вариантов рассматриваемой в указанном источнике задачи.

Динамика объекта описывается уравнением

$$\frac{d}{dt}(y(t) + y(t - \tau)) = 0.5y(t) + \alpha \int_{t-\tau}^t y(s) ds,$$

здесь $t \in [0, 2]$, $y(t) = \cos(t)$, $t \in [-1, 0]$, $\tau = 1$, $y(0) = 1$. Коэффициент α меняется от 0 до 2.2. Расширенный интервал времени в этой задаче был равен $[-1, 2]$, что позволило охватить всю исследуемую динамику. Число узлов дискретизации было выбрано равным 90.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№^о гос. регистрации: 121041300060-4).

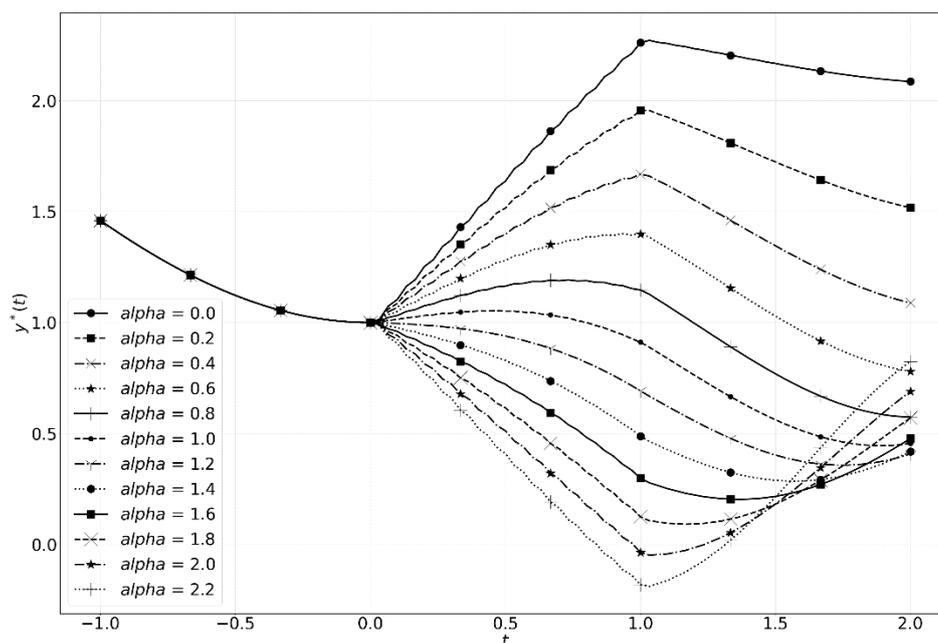


Рис. 1. Результаты численного решения рассматриваемой задачи при разных значениях параметра $\alpha = 0, 0.2, 0.4, \dots, 2.2$

Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного подхода.

1. Долгий Ю.Ф., Сурков П.Г. Математические модели динамических систем с запаздыванием. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2012. 124 с.
2. Демиденко Г. В., Матвеева И. И. Об оценках решений систем дифференциальных уравнений нейтрального типа с периодическими коэффициентами // Сиб. мат. журн. 2014. Т. 55, № 5. С. 1059–1077.
3. Jerri Abdul J. Introduction to Integral Equations with Applications. Canada: A Wiley Interscience Publication, 1999.
4. Corduneanu C. Integral Equations and Applications. Cambridge University Press, 2008.
5. Brunner H. Volterra Integral Equations: an Introduction to the Theory and Applications. Cambridge University Press, 2017.
6. Briat C. [Linear Parameter-Varying and Time-Delay Systems: Analysis, Observation, Filtering & Control](#). *Advances in Delays and Dynamics*. Heidelberg: Springer-Verlag. 2015.
7. Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. [«Chapter 19. Integral Equations and Inverse Theory»](#) // Cambridge University Press, 2007.
8. Golmankhaneh A., Tejado I., Selvi H., Napoles J. Fractal Delay Equations. In book: *Mathematical Modelling of Complex Patterns Through Fractals and Dynamical Systems*. Singapore: Springer, 2024.
9. Ыскак Т.К. Об устойчивости решений дифференциальных уравнений нейтрального типа с распределенным запаздыванием // Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика. 2018. Т. 25. С. 159–169.

ПРОБЛЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА НЕПРЕРЫВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А.Ю. Горнов, П.С. Сороковиков

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

Генетический метод появился впервые в дискретной оптимизации и пользуется в этой области большой популярностью и авторитетом. Обычно трактовка его удивительно высокой эффективности объясняется способностью находить и быстро тиражировать удачные дискретные комбинации, позволяющие легко переносить обнаруженные «достижения» одних переменных на другие части поискового множества. Совсем другая, на наш взгляд, ситуация в области непрерывных задач оптимизации, в которых вышеуказанный эффект, очевидно, просто невозможен.

Прежде всего, непонятно, что такое генетический метод. При первом же знакомстве с методикой [1, 2] становится очевидно, что имеется множество различных вариантов алгоритмов, но для всех используется одинаковый термин. Настойчивый поиск в научной литературе позволил собрать нижеследующий набор версий метода, отличающихся основными конструктивными механизмами.

Механизм 1. Инициализация (способ генерации стартовой популяции). Варианты: 0 – случайные векторы; 1 – из большого случайного набора выбираются те векторы, в которых меньше значение функции; 2 – из набора выбираются те векторы, которые лежат как можно дальше от текущей рекордной точки.

Механизм 2. Рекомбинация родительских особей («кроссовер»). 0 – покомпонентно случайным образом; 1 – линейной комбинацией; 2 – случайной линейной комбинацией.

Механизм 3. Скрещивание (выбор «родителей»). 0 – 2 случайные особи («панмиксия»); 1 – случайная особь и особь недалеко от нее («имбридинг»); 2 – случайная особь и особь максимально далеко от нее («аутбридинг»).

Механизм 4. Мутации. 0 – изменяется одна особь; 1 – 2 особи; 2 – несколько особей.

Механизм 5. Локальное улучшение. 0 – через одну итерацию; 1 – через 2 итерации; 2 – через несколько итераций.

Кроме того, в программе предусмотрены также алгоритмические параметры: размеры популяции, вероятность и сила мутации, порог исчезновения биоразнообразия. Пока за рамками рассмотрения нами оставлены варианты отбора – турнирная селекция, рулетка, ранжирование и т.д.

Таким образом, в нашей программной реализации уже заложено по 3 варианта для 5 механизмов, т.е. $3^5 = 243$ варианта алгоритма. Если добавить сюда хотя бы один вариативный алгоритмический параметр, например, число особей в популяции, становится очевидным, что протестировать эту «информационную сущность» очень и очень непросто. Заметим, что никакой общепризнанной методики тестирования для этой группы методов нам найти также пока не удалось.

Можно констатировать парадоксальную ситуацию: у нас есть генетический метод, но каковы его свойства и характеристики – мы пока не знаем.

1. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. М.: ДМК Пресс, 2020.
2. Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V. A review on genetic algorithm: Past, present, and future // *Multimed Tools Appl.*, 80. 2021. Pp. 8091–8126.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ АППРОКСИМАЦИИ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ*

А.Ю. Горнов, А.И. Тятюшкин, Т.С. Зароднюк, А.С. Аникин, П.С. Сороковиков
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Дифференциальные уравнения с переменным запаздыванием относятся к классу функционально-дифференциальных уравнений. В отличие от уравнений с постоянными отклонениями аргумента, для которых имеется значительное количество работоспособных методик численного исследования, основанных на «методе шагов», для такого класса задач разработка эффективного алгоритмического обеспечения, по-видимому, только начинается (см., напр., [1, 2]). С практической точки зрения, для приложений, системы с запаздыванием дают возможность, за счет появления запаздывающего воздействия на динамику, получать «эффекты саморегуляризации» системы, что ярко выражено в повышении степени гладкости траекторий по мере движения «по шагам». Но этот механизм воздействия характерен скорее для автоматических способов управления; в случае же интеллектуального управления неизбежно появляется необходимость переменного запаздывающего воздействия.

В докладе обсуждается предложенная технология редукции управляемой системы с переменным запаздыванием к конечномерной экстремальной задаче. В качестве носителя траекторий используются кубические сплайн-функции, определяемые на переменной, вообще говоря, сетке узлов по времени. Неравномерность сетки может оказаться необходимой в случае проявления интервалов резкого изменения траекторий, но точность сплайн-аппроксимации при этом страдает (см., напр., [3]), поэтому использование равномерной сетки является предпочтительным. Еще одним источником погрешности сплайн-аппроксимации является недоопределенность краевых условий, традиционно преодолеваемая доопределением нулевых вторых производных (т.н. «натуральные сплайны») либо экстраполяционным механизмом от соседствующих узлов. Для преодоления этого негативного влияния реализована техника «управляемого сплайна», которая подразумевает включение неизвестных параметров для вторых производных на краях интервала в набор оптимизируемых переменных.

В основной состав оптимизируемых переменных включены значения сеточной функции, определенной в узлах сетки дискретизации, на которой и строятся аппроксимирующие сплайны. В качестве критерия качества используется интеграл от расхождения сплайнового приближения, подставленного в модель динамической системы; задача получения производных в любой точке интервала при таком способе аппроксимации оказывается тривиальной. Для решения формируемых задач конечномерной оптимизации используется набор алгоритмов, включающих методы сопряженных градиентов, Ньютона, квазиньютоновские; глобализующие методы случайного мултистарта, «Basing Hopping», Ланжевена, Пауэлла; биоинспирированные алгоритмы дифференциальной эволюции, «forest», гармонического и генетического поиска, светлячков, роя частиц, «учитель-ученик» и другие.

1. Bellen A., Zennaro M. Numerical Methods for Delay Differential Equations. UK: Oxford University Press, 2003.
2. Fridman E. Introduction to time-delay systems: Analysis and control. Springer International Publishing Switzerland, 2014.
3. De Boor C. A Practical Guide to Splines, Revised Edition. NY: Springer, 2003.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№^о гос. регистрации: 121041300060-4).

ДВУХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПОСТАВОК УГОЛЬНЫХ РЕСУРСОВ С ЗАПАСАМИ*

Т. В. Груздева, А.В. Ушаков

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

gruzdeva@icc.ru, aushakov@icc.ru

В работе предложена математическая модель взаимодействия производственных компаний-поставщиков на рынке угольных ресурсов в виде задачи двухуровневой оптимизации. Цель оператора, принимающего на верхнем уровне решение о закупках и хранении угля, удовлетворить спрос на уголь в каждый временной период $t \in \{1, \dots, \bar{T}\}$, минимизируя издержек на закупку и хранение [1]. Переменными верхнего уровня являются цены (p), объемы угля на складах (s) и решение о закупке угля ($y \in \{0,1\}$) при необходимости. Параметрами верхнего уровня являются: h_t – затраты на хранение, d_t – спрос на уголь, $D_t = \sum_{j=t}^{\bar{T}} d_j$ – суммарный спрос на уголь, начиная с периода t до конца периода планирования \bar{T} .

На нижнем уровне каждая компания-поставщик $i \in \{1, 2, \dots, \bar{I}\}$ максимизирует свою прибыль, варьируя объемами производства угля (x) в зависимости от закупочных цен на него. Параметры нижнего уровня: c_{it} , q_{it} – коэффициенты квадратичных функций, задающих издержки на производство угля ($q_{it} > 0$), \bar{x}_{it} – предельный объем производства, $i \in I, t \in T$.

С учетом введенных обозначений, получаем следующую двухуровневую задачу (с оптимистическим решением):

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} \left[p_t \sum_{i=1}^{\bar{I}} x_{it} + h_t s_t \right] \downarrow \min_{(p,s,y),x}, \quad (1)$$

$$s_{t-1} + \sum_{i=1}^{\bar{I}} x_{it} = d_t + s_t \quad (s_0 = 0), \quad t \in T, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{\bar{I}} x_{it} \leq D_t y_t, \quad t \in T, \quad (3)$$

$$p_t \geq 0, \quad s_t \geq 0, \quad y_t \in \{0,1\}, \quad t \in T, \quad (4)$$

$$x \in \Psi(p) \quad (5)$$

где $\Psi(p)$ задает множество решений задачи нижнего уровня:

$$\sum_{i=1}^{\bar{I}} \sum_{t=1}^{\bar{T}} [(p_t - c_{it})x_{it} - q_{it}x_{it}^2] \uparrow \max_x, \quad (6)$$

$$0 \leq x_{ijt} \leq \bar{x}_{ij} \quad i \in I, t \in T. \quad (7)$$

Произведена редукция двухуровневой задачи (1)-(7) к одноуровневой задаче невыпуклой (DC) оптимизации. Для ее решения разработан подход, основанный на Теории глобального поиска А.С. Стрекаловского [2] и состоящий из двух основных этапов: локального поиска и процедуры выхода из критических точек, полученных методом локального поиска, которая базируется на условиях глобальной оптимальности.

1. Pochet, Y., Wolsey, L.A.: Lot-size models with backlogging: Strong reformulations and cutting planes. *Mathematical Programming*. 1988. V. 40, pp. 317-335.
2. Strekalovsky A.S.: On Solving Optimization Problems with Hidden Nonconvex Structures. *Optimization in Science and Engineering*, 2014, pp. 465-502.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 24-41-03004.

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ЗАДАЧАМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
С ДИВЕРГЕНЦИЯМИ БРЭГМАНА
И ЧАСТИЧНЫМ ПРИВЛЕЧЕНИЕМ УЧИТЕЛЯ*

Т.В. Груздева, А.В. Ушаков

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

Исследовано обобщение базовой модели кластеризации, в котором расстояния между заданными элементами и ближайшими центрами кластеров вычисляются с использованием дивергенций Брэгмана [1, 2], а также введены дополнительные ограничения, позволяющие учитывать экспертные знания о метках данных или заранее известных свойствах кластеров (semi-supervised clustering) [3]. Это обобщение относится к моделям кластеризации, основанным на поиске центров кластеров (center-based clustering), с ограничениями и представляет собой следующую оптимизационную задачу

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m x_{ij} D_F(y^i, a^j) \downarrow \min_{(x,y)}, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^k x_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, m; \quad (2)$$

$$x_{ij_1} - x_{ij_2} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, k; \quad \forall (j_1, j_2) \in M; \quad (3)$$

$$x_{ij_3} + x_{ij_4} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, k; \quad \forall (j_3, j_4) \in L; \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \geq \tau_i \quad \forall i = 1, \dots, k; \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, k; \quad \forall j = 1, \dots, m. \quad (6)$$

Целевая функция (1) задается дивергенцией Брэгмана

$$D_F(p, q) = F(p) - F(q) - \langle \nabla F(q), p - q \rangle,$$

ассоциированной с некоторой выпуклой функцией $F(\cdot)$, и минимизирует сумму расстояний между центрами y^i кластеров и прикрепленным к ним элементами данных a^j [4]. Переменные x_{ij} отвечают за принадлежность элемента j к кластеру i : $x_{ij} = 1$, если элемент данных j назначен кластеру i ; $x_{ij} = 0$, в противном случае, $i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, m$. Ограничения (2) гарантируют, что каждый элемент данных будет назначен ровно одному кластеру. Ограничения (3) и (4) обеспечивают назначение элементов данных из множества M одному кластеру (must-link constraints), а из множества L – разным кластерам (cannot-link constraints), соответственно. Ограничения на размер кластеров (5) определяют нижнюю границу количества элементов данных в каждом кластере.

Широко известными и часто используемыми в машинном обучении дивергенциями Брэгмана являются:

1) квадрат евклидова расстояния между двумя точками, образованный функцией $F(x) = \|x\|^2$;

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации № 121041300065-9.

2) квадрат расстояния Махаланобиса, порожденный выпуклой квадратичной формой $F(x) = \frac{1}{2} \langle x, Qx \rangle$;

3) обобщенная I-дивергенция, образованная функцией отрицательной энтропии $F(x) = \sum x_i \ln x_i$.

Замена ограничений (6) на ограничения вида

$$x_{ij}^2 - x_{ij} \geq 0, \quad 0 \leq x_{ij} \leq 1, \quad \forall i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, m, \quad (7)$$

дает возможность сформулировать исследуемую задачу кластеризации как непрерывную оптимизационную задачу. А возможность представления целевой функции и невыпуклых ограничений (7) посредством разности выпуклых функций (DC-функций) позволяет рассматривать задачу (1)-(5), (7) как задачу DC оптимизации

$$\left. \begin{aligned} G(x) - H(x) \downarrow \min_x, \\ h(x^i) \geq 0, \quad i = 1, \dots, k, \\ x \in S \cap S_M \cap S_L \subset R^{k \times m}, \end{aligned} \right\} \quad (DC)$$

где

$$G(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m (x_{ij} + D_F(y^i, a^j))^2, \quad H(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m (x_{ij}^2 + D_F^2(y^i, a^j)),$$

$$h(x^i) = \left\| x^i - \frac{e}{2} \right\|^2 - \frac{m}{4}, \quad i = 1, \dots, k,$$

–выпуклые функции, $h(x^i)$ получены суммированием квадратичных ограничений в (7),

$$S = \left\{ x_{ij} \in [0,1]: \sum_{i=1}^k x_{ij} = 1, \sum_{j=1}^m x_{ij} \geq \tau_i, \quad i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, m \right\},$$

множества S_M и S_L , заданные ограничениями (3) и (4) соответственно, – выпуклые множества.

Для решения задачи (DC) разработан подход, основанный на Теории глобального поиска А.С. Стрекаловского [6]. Алгоритм состоит из двух основных модулей:

1) специализированного локального поиска, использующего структуру исследуемой задачи;

2) процедуры выхода из критических точек, полученных на этапе локального поиска, которая базируется на условиях глобальной оптимальности.

1. Брэгман Л. М. Релаксационный метод нахождения общей точки выпуклых множеств и его применение для решения задач выпуклого программирования // Ж. вычисл. матем.и матем. физ. 1967. V. 7, с. 200–217.
2. Fischer, A., Levrard, C., Brecheteau, C.: Robust Bregman clustering. Annals of Statistics, 2020.
3. Gancarski, P., Dao, T.B.H., Cremilleux, B., Forestier, G., Lampert, T.: Constrained clustering: Current and new trends. In: Marquis, P., Papini, O., Prade, H. (eds.) A Guided Tour of Artificial Intelligence Research: Volume II: AI Algorithms, pp. 447-484. Springer, Cham, 2020.
4. Gruzdeva, T.V., Ushakov, A.V.: On a nonconvex distance-based clustering problem. Lecture Notes in Computer Science. 2022, V. 13367, pp. 139-152.
5. Gruzdeva T.V., Ushakov A.V.: Semi-supervised K-Means Clustering via DC Programming Approach. Lecture Notes in Computer Science. 2023. V. 13930, pp. 54-67.
6. Strekalovsky A.S.: On Solving Optimization Problems with Hidden Nonconvex Structures. Optimization in Science and Engineering, 2014, pp. 465-502.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МЕЖДУ ЦЕНТРОМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТАМИ И ГРУППОЙ БПЛА СО СТРАТЕГИЕЙ РАЗВЕРТЫВАНИЯ БЕЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

П.А. Даренский, С.В. Пауль

Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ)
pashok.darenskii@gmail.com, paulsv82@mail.ru

Имеется группа беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), выполняющая задачу в режиме развертывания сети без взаимодействия. Каждый БПЛА напрямую подключается к центру управления, что позволяет отслеживать их статус и отправлять команды. Такая стратегия представляет собой единую вычислительную систему, где управление и обратная связь осуществляются через обмен информационными пакетами. В этой стратегии развертывания имеется двунаправленная линия связи от каждого БПЛА к наземной системе управления, позволяющая напрямую передавать данные и команды управления, относящиеся к конкретному приложению. Основное ограничение этой стратегии – наземная станция управления является единственной точкой отказа, в которой может произойти отключение всей сети вместе с задержками передачи.

Предполагается исследовать вариант системы связи с группой БПЛА как замкнутую систему массового обслуживания (СМО) [2, 3, 4].

Рассмотрим замкнутую систему массового обслуживания с N источниками генерации запросов на соединение с сервером. Каждый источник генерирует запрос с постоянной интенсивностью λ/N . Источник, инициирующий сеанс связи с сервером в виде запроса, находится в режиме ожидания и не делает новый запрос до тех пор, пока текущий не обработается. Запрос на соединение передается на свободный сервер и сеанс связи осуществляется в течение экспоненциально распределенного времени с параметром μ . Если сервер оказывается занят в момент инициирования запроса на связь, то происходит задержка передачи в течение экспоненциально распределенного времени с параметром σ/N , после чего источник вновь делает попытку осуществления запроса.

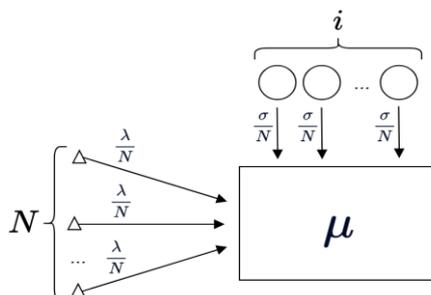


Рис. 1 – Математическая модель замкнутой системы массового обслуживания с повторными вызовами

Введем следующие обозначения: $i(t)$ – число заявок на орбите; $k(t)$ - состояние сервера, 0 – если сервер свободен и 1 – если сервер занят.

Ставится задача нахождения стационарного распределения вероятностей $\{k(t), i(t)\}$. В результате исследования найдены распределение вероятностей числа запросов, ожидающих повторного обслуживания и распределение вероятностей состояний прибора. Обозначим вероятность $P(k, i, t) = P\{i(t) = i, k(t) = k\}$ того, что в момент времени t сервер находится в состоянии k , число задержек передачи – i заявок. Для распределения вероятностей $P(k, i, t)$ состояний рассматриваемой замкнутой RQ-системы составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P(0,i,t)}{\partial t} &= -\left(\frac{N-i}{N}\lambda + \frac{i}{N}\sigma\right)P(0,i,t) + \mu P(1,i,t), \quad k=0, i=0,\dots,(N-1), \\
\frac{\partial P(1,0,t)}{\partial t} &= -\left(\frac{N-1}{N}\lambda + \mu\right)P(1,0,t) + \lambda P(0,0,t) + \frac{1}{N}\sigma P(0,1,t), \\
\frac{\partial P(1,i,t)}{\partial t} &= -\left(\frac{N-(i+1)}{N}\lambda + \mu\right)P(1,i,t) + \\
&+ \frac{N-i}{N}\lambda P(0,i,t) + \frac{N-i}{N}\lambda P(1,i-1,t) + \frac{i+1}{N}\sigma P(0,i+1,t), \quad k=1, i=1,\dots,(N-2), \\
\frac{\partial P(1,N-1,t)}{\partial t} &= -\mu P(1,N-1,t) + \frac{1}{N}\lambda P(0,N-1,t) + \frac{1}{N}\lambda P(1,N-2,t). \quad (1)
\end{aligned}$$

Получить численное решение системы (1) в стационарном режиме функционирования системы в допредельной ситуации возможно путем реализации численного алгоритма. Графики распределений вероятностей числа заявок на орбите представлены на рисунке 2.

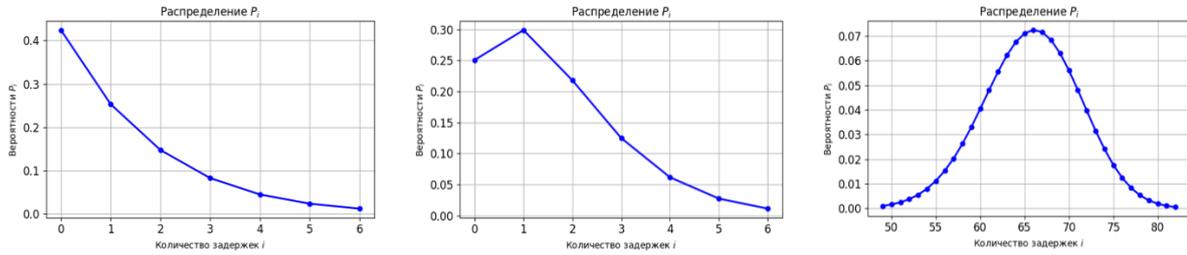


Рис. 2 – Графики допредельных распределений вероятностей числа заявок на орбите при $N = 100$; $\lambda = 3,5$; $1; 3,5$; $\mu = 1,25$; $3,5$; 7 ; $\sigma = 25$; 25 ; 400 соответственно

Для получения аналитического решения системы (1) применим асимптотический метод в предельном условии растущего числа источников генерации запросов, т.е. при $N \rightarrow \infty$. От вероятностей $P(k, i, t)$ перейдем к частичным характеристическим функциям вида $H(k, u, t) = \sum_{i=0}^{N-1} e^{ju_i} P(k, i, t)$, где $j = \sqrt{-1}$, систему (1) перепишем в стационарном виде для функций $H(k, u)$

$$\begin{aligned}
-\lambda H(0, u) + j \frac{\sigma - \lambda}{N} \frac{\partial H(0, u)}{\partial u} + \mu H(1, u) &= 0, \\
\lambda H(0, u) + \left(\frac{N-1}{N}\lambda(e^{ju} - 1) - \mu\right) H(1, u) + \\
+ (\lambda - \sigma e^{-ju}) \frac{j}{N} \frac{\partial H(0, u)}{\partial u} + \lambda(e^{ju} - 1) \frac{j}{N} \frac{\partial H(1, u)}{\partial u} &= 0, \\
\frac{N-1}{N}\lambda H(1, u) + \sigma e^{-ju} \frac{j}{N} \frac{\partial H(0, u)}{\partial u} + \lambda \frac{j}{N} \frac{\partial H(1, u)}{\partial u} &= 0. \quad (2)
\end{aligned}$$

Теорема 1. Пусть $i(t)$ – число заявок на орбите в замкнутой RQ-системе, тогда асимптотическая характеристическая функция $H(u)$ числа заявок на орбите в предельном условии растущего числа источников определяется равенством

$$H(u) = \exp\left\{ju\kappa_1 N + \frac{(ju)^2}{2}\kappa_2 N\right\}, \quad (3)$$

где κ_1 определяется равенством

$$\kappa_1 = \frac{\lambda\sigma - 2\lambda^2 - \mu\sigma + \sqrt{\sigma(4\lambda^2\mu + \sigma(\mu - \lambda)^2)}}{2\lambda(\sigma - \lambda)}, \quad (4)$$

величина κ_2 определяется равенством

$$\kappa_2 = \frac{\sigma \kappa_1 r_0}{\sigma \kappa_1 \varphi_0 + \sigma r_0 + \lambda r_1 - \lambda (1 - \kappa_1) \varphi_1}. \quad (5)$$

Здесь вероятности r_k , $k = 0, 1$ – стационарные вероятности состояний прибора, которые вычисляются по формулам

$$r_0 = \frac{\mu}{\lambda(1 - \kappa_1) + \sigma \kappa_1 + \mu}, \quad r_1 = \frac{\lambda(1 - \kappa_1) + \sigma \kappa_1}{\lambda(1 - \kappa_1) + \sigma \kappa_1 + \mu}, \quad (6)$$

величины φ_k , $k = 0, 1$ определены равенствами

$$\varphi_1 = \frac{(\sigma - \lambda)r_0}{\lambda(1 - \kappa_1) + \sigma \kappa_1 + \mu}, \quad \varphi_0 = -\varphi_1. \quad (7)$$

Теорема 1 показывает, что асимптотическая характеристическая функция числа задержек передачи запросов в рассматриваемой замкнутой системе в предельном условии роста числа источников, которые генерируют запросы на соединение с сервером является гауссовской с математическим ожиданием $\kappa_1 N$ и дисперсией $\kappa_2 N$, что позволяет для допредельного распределения построить достаточно точную дискретную аппроксимацию (Рисунок 3).

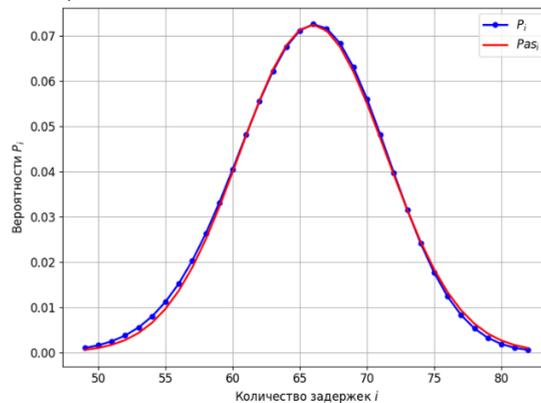


Рис. 3 – Сравнение графиков допредельного распределения вероятностей числа заявок на орбите и асимптотической аппроксимации при заданных параметрах $N = 100$; $\lambda = 3,5$; $\mu = 1,25$; $\sigma = 25$

1. Nazarov A., Sztrik J., Kvach A. Asymptotic waiting time analysis of finite source M/GI/1 retrial queueing systems with conflicts and unreliable server // Publicationes Mathematicae Debrecen. 2022. Vol. 101, № 3-4. P. 397–419.
2. Nazarov A., Sztrik J., Kvach A., Toth A. Asymptotic Analysis of Finite-Source M/G I/1 Retrial Queueing Systems with Collisions and Server Subject to Breakdowns and Repairs // Methodology and Computing in Applied Probability. 2022. Vol. 24, № 3. P. 1503–1518.
3. Nazarov A., Sztrik J., Kvach A., Toth A. Asymptotic sojourn time analysis of finite-source M/M/1 retrial queueing system with collisions and server subject to breakdowns and repairs // Annals of Operations Research. 2020. Vol. 288. P. 417-434.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПАВОДКОВ НА Р. КЫНГАРГА (ТУНКИНСКАЯ ДОЛИНА, ВОСТОЧНЫЙ САЯН)*

А.А. Добрынина^{1,2}, В.А. Саньков^{1,2}, С.А. Король¹, Н.В. Кичигина³,
А.А. Рыбченко¹

¹Институт земной коры СО РАН

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

³Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН

dobrynina@crust.irk.ru

В последние годы с развитием цифровой сейсморегистрирующей аппаратуры и методов обработки все больше внимания уделяется мониторингу микросейсмических шумов (МСШ) в регионах с проявлениями опасных экзогенных процессов. Например, в работе [1] при изучении сейсмических эффектов паводка показано увеличение уровня МСШ в 300 раз относительно спокойного фона с максимумом в частотном диапазоне 2–15 Гц, а также изменение поляризации шума. В работе [2] показано, что при прохождении паводков на расстояниях до 15 км наблюдается повышение уровня МСШ в частотном диапазоне 1–20 Гц более чем в 100 раз с поляризацией в направлении источника.

Тункинская долина в Байкальской рифтовой системе относится к районам с высокой селевой и паводковой опасностью – последний катастрофический сель здесь сошел в 2014 году по реке Кынгарага и южным склонам Тункинских гольцов и представлял собой водокаменный поток по руслу реки и несколько грязекаменных потоков [3, 4], каждый год во время прохождения обильных дождей здесь также наблюдаются паводки [3]. С целью выявления характеристик микросейсмических шумов во время паводков и выделения возможных критериев его начала в настоящей работе проведен анализ вариаций МСШ, генерируемых р. Кынгарага в спокойном состоянии и при значительных подъемах воды (паводки). В работе использовались данные непрерывной регистрации короткопериодной сейсмической станции «Аршан», расположенной на правом берегу р. Кынгарага на расстоянии 250 м от русла реки, данные измерений уровня воды в р. Кынгараге и атмосферных осадков на Пике Любви, проводимых Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН с помощью современных систем мониторинга САМ-ГПР, САМ-ГО (разработаны Институтом мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск). Расстояние от осадкомера на Пике Любви до гидропоста р. Кынгарага – пос. Аршан составляет 1.97 км. Измерения колебаний уровня воды проводятся с частотой 1 раз в 30 минут, атмосферных осадков выполняются с интервалом 1 час.

По значениям вариаций уровня воды были выбраны три крупных паводковых события – в июле 2019 года и в июле и августе 2020 года, менее значимые подъемы уровня воды не рассматривались. В работе проводился сравнительный анализ спектральных и поляризационных характеристик МСШ в фоновом режиме и в период паводков.

Анализ вариаций МСШ, генерируемых р. Кынгарага в спокойном состоянии и при значительных подъемах воды (паводках) показал следующее:

Микросейсмические колебания, зарегистрированные на станции Аршан, не стабильны во времени и имеют значительные вариации, связанные с сезоном. В теплые периоды при таянии ледового покрова и увеличении уровня воды в реке Кынгарага наблюдается усиление сейсмических колебаний в области частот от 4 до 10 Гц.

* Работа поддержана Крупным проектом Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»), проект 075-15-2024-533.

Выпадение обильных жидких атмосферных осадков и следующий за ним значительный подъем воды в реке Кынгарга приводят к изменению амплитудно-частотного состава МСШ – усилению колебаний в частотном диапазоне от 4 до 20 Гц с максимумом излучения в области частот 6–10 Гц. Для разных событий это увеличение значительно варьируется и зависит от количества водных масс, проходящих по руслу реки в единицу времени.

Изменение амплитудно-частотного состава МСШ в летний период относительно зимнего, а также во время паводков относительно меженных уровней происходит в результате увеличения турбулентности потока при возрастании скорости течения, расходов воды и наносов.

Диаграммы движения частиц в среде в спокойном состоянии и при паводках не показывают какой-либо доминирующей ориентации колебаний, что связано с протяженностью источника колебаний, представляющего собой все русло реки.

Анализ временных вариаций количества осадков на Пике Любви, уровня воды на гидрологическом посту на реке Кынгарга, микросейсмических шумов и метеорологической обстановки в Тункинской долине показал, что источником увеличения МСШ могут быть как дожди в Тункинской долине, так и в области водосбора реки Кынгарга в горном обрамлении. Малые частоты дискретизации осадкомера и уровнемера по сравнению с сейсмической станцией, а также значительная удаленность измерительных приборов друг от друга не позволяют оценить временную задержку между разными параметрами. Для достижения более точных результатов необходимо размещение всех приборов в пределах одного наблюдательного пункта, а также увеличение частоты дискретизации осадкомера и уровнемера.

Как показано в работе [2], изменение режима микросейсмических колебаний вследствие паводков может быть зарегистрировано на расстояниях до 15 км. В нашем случае, так как источником высокочастотных микросейсмических колебаний является протяженное русло реки, то на диаграммах движения частиц в среде не наблюдается доминирующей ориентации колебаний, указывающей на источник излучения. При размещении локальной сети станций вдоль русла по обоим бортам р. Кынгарга с одновременной фиксацией количества осадков и уровня воды в реке будет возможно точно определить азимут и расстояние до источников генерации высокочастотных сейсмических волн, точно определять начало паводка, а также давать прогноз о скором подъеме уровня воды. На основе полученных предварительных данных представляется оптимальным в будущем разместить в районе р. Кынгарга пилотную сеть сейсмических, метеорологических и гидрологических станций с целью точного определения времени начала паводка на основе комплекса данных и предупреждения населения.

1. Dietze M., Hoffmann T., Bell R., Schrott L., Novius N. A seismic approach to flood detection and characterization in upland catchments. *Geophysical Research Letters*. 2022. V. 49. e2022GL100170.
2. Chmiel M., Godano M., Piantini M., Brigode P., Gimbert F., Bakker M., Courboux F., Ampuero J.-P., Rivet D., Sladen A., Ambrois D., Chapuis M. Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with Storm Alex. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2022. V. 22. P. 1541 – 1558.
3. Makarov S., Cherkashina A., Atutova Zh., Bardash A., Voropai N., Kichigina N., Mutin B., Osipova O., Ukhova N. Debris Flows of the Tunkinsky Goltsy Mountains (Tunkinsky District, Republic of Buryatia in Eastern Siberia). *International Journal of Geohazards and Environment*. 2016. V. 2(3). P. 166 – 179.
4. Чечельницкий В.В., Макаров с.А., Добрынина А.А. Прохождение катастрофического водокаменного селя на реке Кынгарга (Республика Бурятия) 27–29 июня 2014 г. по сейсмическим данным. Доклады академии наук. 2018. Т. 481, № 6. С. 675–679.

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АНКЕТИРОВАНИЯ В ПЛАТФОРМЕ JAICP НА ОСНОВЕ ПЛАТФОРМЕННО-ЗАВИСИМОЙ МОДЕЛИ

Н.В. Допиро

Иркутский национальный исследовательский технический университет
dopironikita@yandex.ru

Искусственный интеллект уже прочно вошел в обыденную жизнь современного человека. Одним из самых популярных его применений стали виртуальные помощники — сервисы, которые взаимодействуют с пользователем в соответствии с заданными сценариями, выполняя разнообразные функции и предоставляя нужную информацию.

Сегодня виртуальные помощники уже встроены в большинство современных устройств. Они способны объяснять сложные концепции, переводить текст и помогать с изучением языков, заказывать товары и услуги и т.д.

Актуальность проведения научных исследований в данной области обусловлена возрастающим интересом к использованию виртуальных помощников (таких как Yandex «Алиса», Apple «Siri», «Google Assistant») и расширением ассортимента программных инструментов для их создания. В компаниях и организациях виртуальные помощники стали неотъемлемой частью рабочего процесса. Они помогают автоматизировать обслуживание клиентов, оптимизировать рабочие процессы и повысить эффективность работы пользователей.

Данная работа является продолжением исследования проектирования генератора моделей виртуальных помощников [1, 2]. Эта работа способствует развитию методов автоматизации процесса разработки виртуальных помощников. Аналогично работе [1], для создания генератора будет применен MDA-подход с использованием ранее разработанных MDA-моделей и их трансформаций, а также платформенно-зависимой модели JAICP.

Для созданной платформенно-зависимой модели разработан генератор кодов для анкетирования. Под кодами подразумевается сценарий, написанный на языке DSL, а также разговорный интерфейс виртуального помощника.

Для генерации кодов использовалась база данных, в которой хранятся характеристика и свойства виртуального помощника. Сам генератор поддерживает следующие режимы генерации сценария для проведения анкетирования:

1. С вложенными состояниями.
2. Без вложенных состояний, где переход между ними осуществляется с помощью условных конструкций с дополнительными переменными.

Также при генерации сценария для каждого вопроса добавляются следующие дополнительные варианты ответов:

1. «Не знаю».
2. «Не хочу отвечать».
3. «Завершить опрос».
4. Обратная связь виртуального помощника, предусмотренная для случаев, когда сообщение пользователя не подходит ни под одно установленное состояние, с учетом контекста.

В свою очередь, обратная связь виртуального помощника включает следующие варианты реакции:

1. Типовое поведение в случае, если виртуальный помощник не распознал ответ пользователя.
2. Отображение подсказки о предполагаемом ответе от пользователя.
3. Повторение вопроса.

4. Возврат к предыдущему состоянию.

В качестве примера был разработан чат-бот для проведения медицинского анкетирования. Чат-бот включает следующие состояния: состояние для отображения вопросов, состояния для приема ответов от пользователя, состояние для отправки результатов анкетирования; а также такие сущности, как место проживания, факт курения, пол, и сущности для вариантов ответов.

Сущности и намерения были описаны на основе общей модели разговорного интерфейса [3]. Состояния и переходы между ними описаны в разрабатываемой в настоящее время проблемно-ориентированной модели диалога. Основной задачей генератора является создание кодов для проведения анкетирования, включающего разговорный интерфейс и управляющий код для диалога, написанный на сценарном языке JAICP DSL.

Алгоритм работы генератора включает следующие этапы:

1. Отправка запроса к базе данных для получения требуемых данных. Этими данными являются описание и характеристики анкеты.
2. Получение запрошенных данных.
3. Анализирование типов вопросов.
4. Заполнение объектов информационной модели (интерфейса генератора).
5. Для каждого типа вопросов запускаются функции программного средства для генерирования кода управления диалогом в виде сценария на языке JAICP DSL и языкового интерфейса на основе данных из объектов.
6. Объединение и анализирование полученных результатов генерации.
7. Создание .zip-архива с готовым проектом.

Фрагменты работы генератора кодов представлены далее:

1. Режим генерации кода сценария DSL с вложенными состояниями:

```
state: q1
  a: Если Вы студент, подскажите, пожалуйста, где
  проживаете в настоящее время?
  script:
    $session.answers_q1 = ['в общежитии', 'снимаю
    квартиру', 'проживаю с родителями']

    state: a1
    intent: /choose_dom
    script:
      $session.var_dom = $parseTree._var_dom
    go!: /q2

    state: Finish_question_q1
    intent: /FinishQuestion
    go: /End

state: Do_not_answer_q1
  intent: /DoNotAnswer
  script:
    $session.var_dom = null
  go!: /q2

state: NoMatch
  event: noMatch
```

```

a: Ваш ответ: «{{ $request.query }}».
a: Но ожидается ответ среди следующих его
вариантов: ««{{ $session.answers_q1[0] }}»»,
««{{ $session.answers_q1[1] }}»»,
««{{ $session.answers_q1[2] }}»»
a: Пожалуйста, ответьте повторно на заданный
вопрос.
go!: /q1

```

2. Режим генерации кода сценария DSL без вложенных состояний:

```

state: q1
a: Если Вы студент, подскажите, пожалуйста, где
проживаете в настоящее время?
script:
  $session.answers_q1 = ['в общежитии', 'снимаю квартиру',
'проживаю с родителями']

state: a1
intent: /choose_dom
script:
  $session.var_dom = $parseTree._var_dom
go!: / TheResultOfTheq1

state: Finish_question_q1
intent: / FinishQuestion
go!: /End

state: Do_not_answer_q1
intent: / DoNotAnswer
script:
  $session.var_dom = null
  go!: / TheResultOfTheq1
state: TheResultOfTheq1
script:
  $session.check_var_dom=
  $session.answers_q1.indexOf($session.var_dom)
if: $session.check_var_dom != -1 ||
  $session.var_dom==null
  go!: /q2
else:
  go!: /NoMatch
state: NoMatch
event: noMatch
a: Ваш ответ: «{{ $request.query }}».
a: Но ожидается ответ среди следующих его
вариантов: ««{{ $session.answers_q1[0] }}»»,
««{{ $session.answers_q1[1] }}»»,
««{{ $session.answers_q1[2] }}»»
a: Пожалуйста, ответьте повторно на заданный вопрос.
go!: /q1

```

В приведенном фрагменте кода DSL виртуальный помощник задает вопрос пользователю о месте его проживания, ожидая три варианта ответа: «в общежитии»,

«снимаю квартиру», «проживаю с родителями». При этом благодаря использованию в JAICP системы обработки естественного языка SAFLA, фактическая форма ответа пользователя может отличаться. В зависимости от его ответа, виртуальный помощник принимает решение о дальнейших действиях. Этот акт диалог был создан в двух различных режимах генерации.

Как видно из примера, сценарный код в этих двух режимах отличается как по структуре, так и по сценарному коду. В первом режиме виртуальный помощник, основываясь на ответе пользователя, переходит в определенные вложенные состояния для выполнения дальнейших действий, переход осуществляется с использованием намерений. Во втором же режиме состояния не являются вложенными, и решения принимается в побочном состоянии «TheResultOfTheq1» благодаря сохраненным ответам из прошлых состояний диалога.

В данной работе был проведен анализ и разработка генератора программного средства для анкетирования, основанного на платформенно-зависимой модели и технологии JUST AI с использованием платформы JAICP, реализованной через подход Model-Driven Architecture (MDA). Основной целью исследования стало создание эффективного инструмента для автоматизации процесса разработки виртуальных помощников для анкетирования.

Был представлен пример работы генератора, демонстрирующий практическое применение разработанных концепций. Этот пример показал эффективность и функциональность генератора в создании виртуальных помощников на базе JUST AI с использованием платформы JAICP.

1. Н.В. Допиро. Разработка генератора платформенно-зависимой модели для системы проектирования виртуальных помощников. Материалы VI Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2024), 1-5 июля, 2024, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024. 225 с. 91-96.
2. Dorodnykh, N.O., Nikolaychuk, O.A., Yurin, A.Y., Stolbov A.B. Towards knowledge-based virtual assistant development with the aid of ontology transformations. Proceedings of the 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). -2022. pp. 830–834.
3. А.Б. Столбов, Н.О. Дородных, О.А. Николайчук, А.Ю. Юрин, Н.В. Допиро. Генерация и трансформация специализированных моделей для проблемно-ориентированного интеллектуального помощника. Материалы конференции «Ляпуновские чтения 2023». Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2023. 184 с.

РАСЧЕТНЫЕ НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ ТРОСОВЫХ АМОРТИЗАТОРОВ: ПОСТРОЕНИЕ НА БАЗЕ ОГРАНИЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ

С.В. Доронин, Е.М. Рейзмунт
Федеральный исследовательский центр
информационных и вычислительных технологий
sdoronin@ict.nsc.ru

Системы амортизации, построенные с использованием тросовых амортизаторов, являются эффективным решением для виброгашения и снижения динамических нагрузок. Тросовый амортизатор внешне представляется довольно простым устройством, основным упругим и демпфирующим элементом которого является трос, с помощью планок удерживаемый в заданной пространственной конфигурации.

Характеристикой нелинейной жесткости тросовых амортизаторов являются нагрузочные диаграммы, выражающие взаимосвязь нагрузки (силы) F , приложенной к одной из планок, и перемещения s этой планки в направлении действия нагрузки. Нагрузочные диаграммы получаются экспериментально, как правило, для 1-3 направлений действия силы в плоскостях, определяемых геометрической формой амортизатора. Таким образом, экспериментальные нагрузочные диаграммы (ЭНД) имеются для весьма ограниченного числа направлений действия сил.

Во многих случаях возможно возникновение нагрузок в произвольном по отношению к геометрической форме амортизатора направлении. Организация получения соответствующих экспериментальных данных обычно затруднительна из-за временных ограничений и отсутствия специальной оснастки для проведения механических испытаний с варьированием угла приложения нагрузки. В связи с этим для произвольного направления действия силы актуально получение расчетных нагрузочных диаграмм (РНД) с учетом информации, содержащейся в ограниченном количестве ЭНД.

Рассматривается три варианта объема доступных экспериментальных данных (одна, две или три ЭНД, лежащих в одной плоскости) и две модели амортизатора. Первая из них представлена линеаризованной численной (конечно-элементной) 3D моделью с изотропным кривым брусом-имитатором троса [1]. Другая численная модель реализована в виде системы взаимно перпендикулярных пружин с индивидуальными и нелинейными характеристиками жесткости [2, 3]. Установление взаимосвязи вида $F=f(s)$ (построение РНД) в рамках настоящего исследования осуществлялось с использованием аналитической и численной суперпозиции ЭНД, линейной и нелинейной интерполяции ЭНД и параметров численных моделей, проведения многовариантных вычислительных экспериментов. В зависимости от объема доступных экспериментальных данных (количества имеющихся ЭНД) и применяемых моделей амортизаторов, и алгоритмов установления взаимосвязи вида $F=f(s)$ определены семь вариантов подходов (сценариев) к построению РНД (рис. 1).

При наличии единственной ЭНД – непосредственное вычисление РНД путем многовариантной реализации линеаризованной численной 3D модели, эффективный модуль Юнга которой определен с помощью имеющейся ЭНД (сценарий 1).

Имея две ЭНД, можно использовать один из следующих возможных сценариев:
вычисление РНД путем аналитической суперпозиции двух ЭНД (сценарий 2);
использование линеаризованной численной 3D модели для установления эффективного модуля Юнга по каждой ЭНД, его линейной интерполяции для варьлируемого направления нагружения с последующим непосредственным вычислением РНД путем многовариантного вычислительного эксперимента (сценарий 3);

непосредственное вычисление РНД путем многовариантного численного анализа системы взаимно перпендикулярных нелинейных пружин (сценарий 4);

определение РНД путем суперпозиции результатов, полученных с помощью системы взаимно перпендикулярных пружин, нагружаемых по направлениям имеющихся ЭНД (сценарий 5).

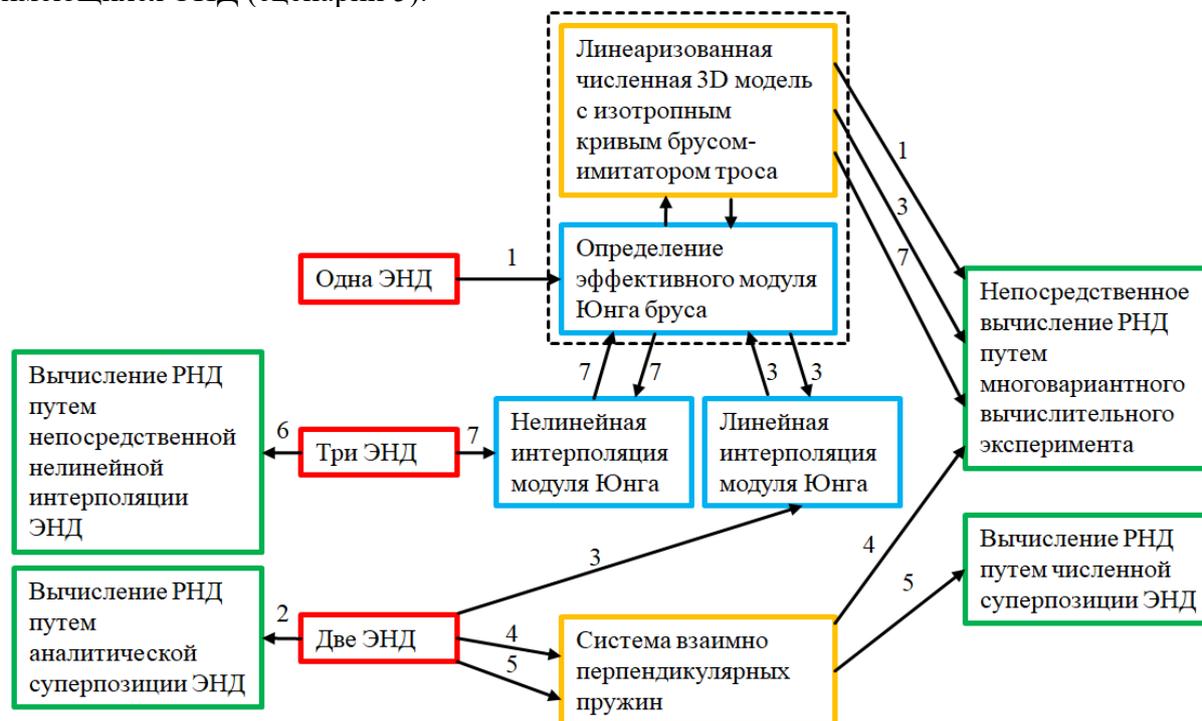


Рис. 1. Варианты построения РНД в связи с доступным числом ЭНД

С помощью трех ЭНД возможна реализация следующих сценариев:

вычисление РНД путем непосредственной нелинейной интерполяции трех ЭНД (сценарий 6);

использование линеаризованной численной 3D модели для установления эффективного модуля Юнга по каждой ЭНД, его нелинейной интерполяции для варьируемого направления нагружения с последующим непосредственным вычислением РНД путем многовариантного вычислительного эксперимента (сценарий 7).

При реализации этих сценариев для удобства вычислений (варьирования либо нагрузки, либо перемещений) экспериментальные нагрузочные диаграммы представлялись в одном из двух вариантов: как зависимости нагрузки от перемещений или как обратные функции – зависимости перемещений от сил. Соответственно количественные объективные оценки погрешности определяются по соотношению расчетных и экспериментальных либо сил, либо перемещений.

Все рассмотренные сценарии, очевидно, характеризуются некоторым уровнем погрешности, который оценивался путем сравнения ЭНД и РНД для одинакового направления действия нагрузки. Отметим, что в настоящем исследовании мы имели три экспериментальные диаграммы. В разных сценариях часть из них использовалась для получения расчетных результатов, другая часть – в качестве базы для сравнения. При этом в случае использования для построения РНД трех (всего множества доступных) ЭНД отсутствует экспериментальная база для сравнительной оценки погрешности. В связи с этим на основании анализа большого числа ЭНД амортизаторов разных производителей предложен качественный и субъективный подход к построению предполагаемых нагрузочных диаграмм как базы для сравнительного анализа. Это

обусловило качественный и субъективный характер оценок погрешности для 6 и 7 сценариев. Качественная оценка погрешности в дальнейшем осуществляется визуально наблюдаемой степенью отличия расчетных и предполагаемых диаграмм

В качестве модельного объекта рассматривалась типовая конструкция тросового амортизатора, конфигурация и геометрические размеры которого приведены в [1]. В результате многовариантных расчетов в соответствии с описанными сценариями получены количественные и качественные оценки погрешности построенных РНД (табл. 1).

Таблица 1. Погрешности РНД при реализации разных сценариев

Сценарий	Форма НД	Исходное для построения РНД	База для сравнения	Оценка погрешности РНД		
				Характеристика	Абсолютный максимум	
					в первой половине рабочего диапазона	во всем рабочем диапазоне
1	$F = f(s)$	ЭНД под углом 45°	ЭНД под углами 0° и 90°	$\Delta F(s)$, количественная, объективная	52%	
2	$s = g(F)$	ЭНД под углами 0° и 90°	ЭНД под углом 45°	$\Delta s(F)$, количественная, объективная		25%
3	$F = f(s)$			$\Delta F(s)$, количественная, объективная	29%	
4	$s = g(F)$			$\Delta s(F)$, количественная, объективная		52%
5				$\Delta s(F)$, количественная, объективная		25%
6	$F = f(s)$			ЭНД под углами 0°, 45° и 90°	предполагаемые НД	ΔF , качественная, субъективная	незначительная
7		чрезмерная				

Максимальные значения погрешности как в первой половине рабочего диапазона амортизатора (как наиболее вероятной), так и во всем рабочем диапазоне. Как видно, при наличии только одной экспериментальной диаграммы нет возможности получить расчетную с приемлемой погрешностью. Если есть две экспериментальные диаграммы, можно получить расчетную с погрешностью до 25% путем суперпозиции либо непосредственно этих диаграмм, либо результатов численного моделирования системы перпендикулярных пружин. Погрешность довольно велика, но уже позволяет выполнять предварительные оценочные расчеты при эскизном проектировании систем амортизации. А в случае доступности трех экспериментальных диаграмм непосредственная их нелинейная интерполяция позволяет получить расчетные диаграммы, приемлемые для практического применения.

Перспективным направлением дальнейшего развития исследований представляется разработка полномасштабной численной модели амортизатора, идентификация ее параметров и верификация по данным экспериментального анализа.

1. Доронин С.В. Линеаризация жесткости трехмерной модели тросового виброизолятора при анализе динамического поведения системы амортизации. Материалы конференции «Ляпуновские чтения 2023» (г. Иркутск, 4-8 декабря 2023 г.). Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2023. С. 28-30.
2. Вибрация энергетических машин. Справочное пособие. Под ред. д-ра техн. наук проф. Н.В. Григорьева. Л.: Машиностроение, 1974.
3. Доронин С.В., Рейзмунт Е.М. Анализ погрешности модели тросового амортизатора в виде системы взаимно перпендикулярных пружин при статическом нагружении. Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. Вып. 5. С. 547-551.

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТРИЦЫ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СШИВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Н.А. Душкина, А.А. Толстихин

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

Получение единой панорамы или изображения с высоким разрешением из нескольких перекрывающихся изображений является одной из распространённых задач обработки. При этом изображения могут быть получены в разное время, с разных точек зрения или с разных датчиков. Решение данной задачи сводится к применению технологии сшивания изображений или автоматическому нахождению области перекрытия и совмещению отдельных изображений. Большое значение задача сшивания изображений имеет в области медицинской визуализации, компьютерного зрения, спутниковых данных и автоматического распознавания военных целей, а также возникает при аэрофотосъёмке или микросъёмке длинной детали. Данная задача была поставлена и в рамках испытаний комплекса TEMAR.

Задачу сшивания изображений можно разделить на 4 этапа [1]:

- Определение ключевых точек (осуществляется, например, при помощи алгоритмов ORB, SURF, SIFT и др.);
- Построение матрицы перспективного преобразования;
- Искажение изображений при помощи матрицы преобразований;
- Смешивание изображений (получение панорамы).

При этом качество полученного изображения во многом зависит от нахождения и построения матрицы перспективного преобразования. В данной работе для её построения сравниваются следующие методы:

- RANSAC (RANdom SAmple Consensus) [2] – классический широко используемого в настоящее время итерационный метод, предложенный в 1981 году Фишлером и Боллесом.
- Метод наименьших квадратов (МНК) – базовый метод регрессионного анализа для оценки неизвестных параметров регрессионных моделей по выборочным данным.
- Роевые алгоритмы стохастической оптимизации [3] – алгоритмы, стремительно набирающие популярность в задачах оптимизации, главным преимуществом которых является возможность параллелизации вычислений.

Поскольку матрица преобразования является девятимерной, важнейшим критерием для её подбора является точность при работе с многомерными задачами. В то же время задача сшивная изображения вносит ограничение по времени. В проведенном ранее исследовании [4] нами были определены лидеры, удовлетворяющие данным критериям.

Критерий сравнения результатов настоящего исследования:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \|x_i - x'_i\|^2}{n} \rightarrow \min,$$

где x_i – i -ые координаты ключевой точки на первом изображении, x'_i – координаты парной -ой ключевой точки в пространстве координат первого изображения, n – количество пар ключевых точек.

В результате данного исследования были определены достоинства каждого метода в контексте решаемой задачи, а также проведено их сравнение с используемым

базовым методом сшивания изображений. Реализации данных алгоритмов на языке Java были оформлены в виде библиотеки для удобства использования в дальнейшем исследовании.

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р. 3-е издание. Москва: Техносфера, 2012. 1104 с.
2. Fischler M. A., Bolles R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography / Martin A. Fischler, Robert C. Bolles // Commun. ACM. 1981. № 24(6). P. 381-395.
3. Карпенко А. П., Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие / Карпенко А. П. 2-е издание. Москва: Издательство МГГУ им. Н. Э. Баумана, 2017, 446 с.
4. Душкина Н. А. Сравнение популяционных алгоритмов оптимизации, вдохновленных живой природой / Душкина Н. А. Материалы v международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2023). Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. С. 130-133.

ПОЗИЦИОННЫЕ УСИЛЕНИЯ МЕТОДА КРОТОВА
Светлой памяти профессора Владимира Иосифовича Гурмана посвящается

В.А. Дыхта

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

1. Введение. Различные варианты метода Кротова [1, 2] – это любимый математический инструмент Владимира Иосифовича для исследования разнообразных задач теории управления и её приложений [1-5]. В данной заметке традиционный метод Кротова обобщается и существенно усиливается путем использования метода позиционного спуска относительно кротовского лагранжиана задачи по образцу позиционного принципа минимума [6, 7].

Будем рассматривать следующую задачу Больца (P_B):

$$\dot{x} = f(t, x, u), \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

$$u(t) \in U, \quad t \in T = [t_0, t_1], \quad (2)$$

$$x(t_1) \in C, \quad (3)$$

$$J[\sigma] = l(x(t_1)) + \int_{t_0}^{t_1} F(t, x(t), u(t)) dt \rightarrow \inf.$$

Здесь через σ обозначены пары функций (x, u) с управлениями из класса $\mathcal{U} := L_\infty(T, U)$, U – компактное множество в R^m , вектор-функции $f(t, x, u), F(t, x, u)$ непрерывны, гладкие по x , и удовлетворяют условию подлинейного роста, C – замкнутое множество в R^n .

Через Σ обозначим множество всех пар σ , удовлетворяющих системе (1), (2), а через $D \subset \Sigma$ – множество допустимых пар (процессов) задачи (P_B).

2. О традиционном методе Кротова. Начнем с модифицированной версии метода Кротова [2, 8], которая естественна для его позиционного усиления и использует подходы работ [9, 10], повышающие его эффективность. Кроме того, мы детально остановимся на связи метода Кротова с проверочными функциями Каратеодори [11-14], которая раскрыта в публикациях поверхностно.

Обозначим через Φ_θ множество всех липшицевых, гладких по x функций $\varphi: T \times R^n \rightarrow R$, удовлетворяющих неравенству

$$R[\varphi](t, x, u) := \varphi_t(t, x) + \varphi_x(t, x) \cdot f(t, x, u) + F(t, x, u) \geq 0 \\ \forall (t, x, u) \in T \times R^n \times U, \quad (4)$$

или эквивалентному неравенству Гамильтона-Якоби

$$P[\varphi](t, x) := \varphi_t(t, x) + \min_{u \in U} [\varphi_x(t, x) \cdot f(t, x, u) + F(t, x, u)] \geq 0 \\ \forall (t, x) \in T \times R^n. \quad (5)$$

Введенное обозначение Φ_θ связано с интерпретацией неравенств (4), (5): если ввести функцию $\theta(t, x, y) = \varphi(t, x) + y$ и расширенную управляемую систему

$$\dot{x} = f(t, x, u), \quad \dot{y} = F(t, x, u), \quad x(t_0) = x_0, \quad y(t_0) = 0, \quad u(t) \in U, \quad (6)$$

то функция θ окажется сильно возрастающей относительно системы (6) (см. [13, 14]); иными словами, она не убывает вдоль любой траектории системы (6), и, в частности,

$$\varphi(t_1, x(t_1)) + y(t_1) - \varphi(t_0, x_0) \geq 0. \quad (7)$$

Пусть $\bar{\sigma} = (\bar{x}, \bar{u}) \in D$ – пара функций, исследуемая на оптимальность. Функцию $\varphi \in \Phi_\theta$ назовем *нормализованной функцией Кротова для пары $\bar{\sigma}$* [8], если выполнены следующие условия:

$$A) \quad R^\varphi(t, \bar{x}(t), \bar{u}(t)) = 0 \quad \text{п. в. на } T \quad (8)$$

или, что эквивалентно,

$$P^\varphi(t, \bar{x}(t)) = 0 \quad \forall t \in T;$$

здесь R^φ , P^φ – функции, определенные равенствами (4), (5), но без операторной трактовки;

$$B) \min\{G^\varphi(x) \mid x \in E^\varphi\} = G^\varphi(\bar{x}(t_1)) = 0, \quad (9)$$

где

$$G^\varphi(x) = l(x) - \varphi(t_1, x), \quad E^\varphi = \{x \mid x \in C, \varphi(t_1, x) - \varphi(t_0, x_0) \geq 0\} \quad (10)$$

Заметим, что неравенство монотонности в определении множества E^φ наследуется из (7).

Опишем кратко практическую схему выхода на условия А), В), модифицированную по отношению к обычной.

Пусть выбрана некоторая функция $\varphi \in \mathcal{F}$, где \mathcal{F} – класс липшицевых, гладких по x функций. Для любой такой φ условие А) всегда можно обеспечить путем известного приёма нормировки [8; 10, раздел 3]. Для этого сначала решается задача

$$R^\varphi(t, x, u) \rightarrow \min, \quad (x, u) \in R^n \times U \quad \text{при } \forall t \in T. \quad (11)$$

Она отнюдь не элементарна в силу негладкости после перехода к функции P^φ путем взятия минимума по $u \in U$. Предлагаемая далее позиционная версия метода Кротова представляется наиболее естественной и эффективной для её решения. Но допустим, что так или иначе, задача (11) решена и получена некоторая пара $\bar{\sigma} = (\bar{x}, \bar{u}) \in \Sigma$ (за её принадлежность к D «отвечает» условие В)). Если для $\bar{\sigma}$ выполнено условие А), т.е. равенство (8), то переходим к условию В). Но в общем случае равенство (8) окажется нарушенным. Тогда, используя нормировку, перейдем к функции

$$\varphi^1(t, x) = \varphi(t, x) + \int_t^{t_1} R^\varphi(s, \bar{x}(s), \bar{u}(s)) ds,$$

удовлетворяющей равенству (8), так что можно обратиться к условию В). Чтобы не усложнять обозначений, можно считать, что φ удовлетворяет условию А).

Условие В) является, по существу, проверочным для уже полученной точки $\bar{x}(t_1)$: если она оказалась решением экстремальной задачи (9), (10), даже без равенства нулю её значения в (9), то $\bar{\sigma}$ – глобально оптимальный процесс. Более того, если это значение оказалось равным нулю, то мы получаем неравенство

$$l(x) - \varphi(t_1, x) \geq l(\bar{x}(t_1)) - \varphi(t_1, \bar{x}(t_1)) = 0 \quad \forall x \in E^\varphi \quad (12)$$

и лаконичную формулу

$$\min(P_B) = \varphi(t_0, x_0). \quad (13)$$

Последняя вытекает из (8), (12) и формулы для *обобщенного лагранжиана Кротова*

$$\begin{aligned} K^\varphi[x(\cdot), u(\cdot)] &= J[x(\cdot), u(\cdot)] - \varphi(t, x(t)) \Big|_{t_0}^{t_1} + \int_T \dot{\varphi}(t, x(t), u(t)) dt = \\ &= l(x(t_1)) - \varphi(t_1, x(t_1)) + \int_T R^\varphi(t, x(t), u(t)) dt + \varphi(t_0, x_0). \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь $\dot{\varphi}(t, x, u)$ – производная функции φ в силу системы (1), (2) (сравните (14) с целевыми функциями задач (9), (10) и (11)).

Если же в задаче (9), (10) её значение $m \neq 0$, то переходом от φ к нормализованной функции $\varphi^2(t, x) = \varphi(t, x) + m$, получим функцию из Φ_θ , удовлетворяющую условиям А), В), аналогу формулы (13) и, конечно, гарантирующей оптимальность $\bar{\sigma}$.

На этом описание схемы заканчивается, но осталось сказать, что если на шаге В) $\bar{x}(t_1)$ не является точкой минимума, то об оптимальности $\bar{\sigma}$ ничего сказать нельзя и φ не является функцией Кротова для $\bar{\sigma}$.

Примечательно, что в случае положительного заключения нормализованная функция Кротова «почти» совпадает с проверочной функцией Каратеодори (см. определение в [13, 14], а факт «почти» совпадения – в [10]). Поэтому, следуя Июффе с

Тихомировым [15], можно использовать термин «К-функция» применительно как к Кротову, так и Каратеодори.

Эпитет «почти» связан с граничными условиями для К-функций в методах Кротова и Каратеодори. В данной версии Кротова это граничное условие

$$\varphi(t_1, x) \leq l(x) \quad \forall x \in E^\varphi$$

следует из (12), а в методе Каратеодори это неравенство должно выполняться на более широком множестве $C \supset E^\varphi$ и, следовательно, является более жёстким. Как следствие, априорная оценка снизу функционала J на D в методе Кротова больше, нежели в методе Каратеодори (формально они совпадают: $\inf(P_B) \geq \varphi(t_0, x_0)$, но φ в методах разные). Второе немаловажное обстоятельство – метод Каратеодори даёт только нижнюю оценку функционала, а метод Кротова указывает конструктивный способ достижения соответствующей оценки (если это вообще возможно) через экстремальные задачи условий А), В).

Возникает естественный вопрос: при каких условиях на задачу и процесс $\bar{\sigma}$ К-функция существует? Следующая теорема 8.1 из обзора [14] «является кульминацией многолетних усилий по обоснованию метода (Каратеодори)».

Теорема 1. Для оптимальности процесса $\bar{\sigma}$ в нормальной задаче (P_B) необходимо и достаточно существование липшицевой проверочной функции Каратеодори.

Поясним, во-первых, что здесь речь идет о глобальной оптимальности, во-вторых, нормальность задачи означает, что $\bar{\sigma}$ и все оптимальные процессы задачи являются нормальными экстремальными принципа максимума Понтрягина. Последнее свойство означает, что в условии экстремальности множитель Лагранжа при целевом функционале (λ_0) отличен от нуля (см. [17, §6.2; 16, §4.2]), а в противном случае котраектория $\psi(t) \equiv 0$ (это следует из условия нетривиальности $\lambda_0 + \|\psi(t)\|_{C(T)} > 0$, $\lambda_0 \in \{0; 1\}$).

В связи с комментарием о связи методов Кротова и Каратеодори, совершенно необходимо дополнить его в отношении важной теоремы 1. Если метод Кротова применять в стандартном варианте – в конечной задаче (9), (10) о минимуме G^φ вместо E^φ взять C , – то теорема 1 будет относиться и к функции Кротова (граничные условия К-функций совпадают). Но для изложенной модифицированной версии Кротова (с неравенствами монотонности в E^φ) теорема 1 неверна в части необходимости и является слишком грубой в части достаточности (см. далее пример 1). Еще в бóльшей степени это заключение относится к позиционному усилению метода Кротова.

3. Позиционный метод Кротова. В этом пункте будут использоваться позиционные управления $v(t, x)$ со значениями в некотором компакте из R^m . В связи с этим для решений систем (1), (2) (и (6)) с таким управлением будут применяться пучки движений Красовского-Субботина [18-20] $\mathcal{X}(v)$ ($\mathcal{X}'(v)$ в системе (6)) – равномерные пределы соответствующих ломаных Эйлера.

К задаче минимизации кротовского лагранжиана K^φ (14) применим позиционный метод спуска по образцу позиционного принципа минимума [6, 7]. Для этого при выбранной функции $\varphi \in \mathcal{F}$ находится -экстремальное отображение

$$U_\varphi(t, x) = \underset{u \in U}{\text{Argmin}}[\varphi_x(t, x) \cdot f(t, x, u) + F(t, x, u)],$$

которое задаёт множество своих селекторов \mathcal{V}_φ – функций $v(t, x) \in U_\varphi(t, x)$ при $t \in T$, $x \in R^n$. Обозначим через $\mathcal{X}(v)$ ($\mathcal{X}'(v)$) пучок движений Красовского-Субботина при $v \in \mathcal{V}_\varphi$, дополненных решениями Каратеодори, если таковые существуют.

В частности, если выбран борелевский селектор $\bar{v}(t, x)$, то расширенная система (6) имеет решение Каратеодори $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ с управлением $\bar{u}(t) = \bar{v}(t, \bar{x}(t))$ класса \mathcal{U} . Согласно схеме п. 2, можно, не умаляя общности, считать, что пара (\bar{x}, \bar{u}) удовлетворяет условию А), т.е. равенству (8). После этого тестируем $\bar{x}(t_1)$ свойством В) и выносим заключение в соответствии с п. 2.

Аналогичная процедура применяется и в общем случае, когда селектору $v(t, x)$ соответствует решение овыпукленной системы (6), задающее скользящий режим – процесс овыпукленной задачи ($соP_B$). На деталях этой ситуации не будем останавливаться.

Пример 1. [21] с нарушением условия нормальности. $\dot{x}_1 = u, \dot{x}_2 = 2x_1u, x(0) = (0, 0), x_2(1) = 0, J = x_1(1) \rightarrow \min$.

По утверждению автора в этом примере $\bar{x} \equiv 0$ – единственная допустимая и, следовательно, оптимальная траектория.

Здесь терминальная функция Лагранжа

$$l = \lambda_0 x_1 + \lambda x_2$$

и условия принципа максимума:

$$\dot{\psi}_1 = -2u, \quad \psi_1(1) = \lambda_0, \quad \psi_2 \equiv \lambda \in R, (\psi_1(t) + \lambda x_1)u \rightarrow \min.$$

Отсюда для $\bar{x} \equiv 0$ получаем $\lambda_0 u \rightarrow \min$, следовательно, $\lambda_0 = 0$, так как все постоянные управления генерируют \bar{x} . Имеем бесчисленное множество аномальных экстремалей. Заметим, что функция $w = x_2 - x_1^2$ – первый интеграл управляемой системы и, следовательно, $\dot{w}(x) \equiv 0 \Rightarrow w$ сильно монотонна в любом смысле, и мы возьмем $\varphi = w$. Тогда:

$$R^\varphi(x, u) = \dot{w}(x) \equiv 0 \Rightarrow \text{её min есть } \forall (x(\cdot), u(\cdot)) \in D,$$

$$G^\varphi(x) = x_1 - x_2 + x_1^2 \text{ имеет min в точке } \bar{x}_1 = 0 \\ \text{на множестве } E^\varphi: x_2 = 0, \quad x_2 = x_1^2.$$

Следовательно, все пары $(\bar{x}, u(\cdot)) \in \mathcal{U}$ оптимальны.

Таким образом, гладкая нелинейная $\varphi = w$ оказалась глобально разрешающей функцией Кротова для всех указанных пар.

Интересно, что $\bar{x} \equiv 0$ – не единственная оптимальная траектория, причем устанавливается это с линейной К-функцией $\varphi(t, x) = \langle \psi(t), x \rangle$.

Действительно, возьмем $\varphi(t, x) = x_1 + \lambda x_2$ при $\lambda_0 = 1$. Тогда

$$\min_{|u| \leq 1} \dot{\varphi}(t, x, u) = -|1 + 2\lambda x_1| (= P(x), \quad \text{см. (5)}).$$

Эта вогнутая функция достигает минимума по x_1 на границе множеств достижимости и управляемости уравнения

$$\dot{x}_1 = u, \quad x_1(0) = 0, \quad x_1(1) = 0 \quad \left(\text{т. к. } \min_D J = 0 ! \right), \quad |u| \leq 1,$$

т.е. на отрезках прямых $x_1^1 = t, x_1^2 = 1 - t, x_1^3 = 0$ даёт уже найденные экстремали с \bar{x} .

Пересечение x_1^1, x_1^2 образуют допустимую траекторию $x^0(t)$ с релейным управлением $u^0(t) = \chi_{[0, \frac{1}{2}]} - \chi_{[\frac{1}{2}, 1]}$ (χ_A – характеристическая функция множества A).

Пара $(x^0(t), u^0(t))$ глобальна оптимальна, вместе с $\sigma^* = -\sigma^0$.

Замечание. Использование вогнутости $P(x)$ рационально. Но его можно заменить использованием экстремальной стратегии

$$v(x_1) = -\text{sign}(1 + 2\lambda x_1)$$

с подбором множителя λ из финального условия $x_1(1) = 0$. Оказывается, что $\lambda = -1$.

Пример 2 с бесчисленным множеством экстремалей построен В.Ф. Кротовым [1]. $\dot{x} = u, x(-1) = x(1) = 0, |u| \leq 1, J = -\int_T tx^2 dt \rightarrow \min$.

Зададимся линейно-квадратичной функцией

$$\varphi(t, x) = \psi(t)x + \frac{1}{2}S(t)x^2, \quad \psi(\cdot), S(\cdot) \in AC,$$

и выберем $S(t)$ из условия независимости лагранжиана K^φ от x^2 . В результате получим задачу

$$K^\varphi[x(\cdot), u(\cdot)] = \int_T (\psi(t)u(t) + S(t)x(t)u(t))dt \rightarrow \min,$$

где $S(t) = c - t^2$, $c \in R$ – параметр, а интегрант – это в точности $\dot{\phi}(t, x, u)$. Отсюда находим

$$\min_{|u| \leq 1} \dot{\phi}(t, x, u) = -|\psi(t) + (c - t^2)x|.$$

Это вогнутая функция от x , задающая экстремальную стратегию, и минимум которой по x достигается на границах множества достижимости и управляемости системы

$$\dot{x} = u, \quad |u| \leq 1 \text{ с началом в } (\tau, 0) \text{ и концом } (1, 0).$$

Здесь τ – правый конец отрезка $[-1, \tau]$ с $x = 0$, с которого начинаются все экстремали (это следует из принципа максимума).

Этот вывод задаёт структуру оптимального процесса σ^0 с траекторией x^0 в верхней полуплоскости $x \geq 0$ и симметричное решение σ^* с $x^* = -x^0$. Эти процессы определены с точностью до конкретизации параметров $\tau \in (-1, 0)$, $c \in R$ из вспомогательной задачи минимизации. Остальные (не оптимальные) экстремали отсеиваются полученным выводом.

Пример 3 с бесчисленным множеством экстремалей разобран В.И. Гурманом в [2]. $\dot{x} = u, x(0) = x(3\pi) = 0, |u| \leq 1, J = \int_{\tau} \cos x(t) dt \rightarrow \min, T = [0, 3\pi]$.

Траектории экстремалей – ломаные, накапливающиеся вдоль оси t – траектории особого режима. Особенность примера – наличие двух симметричных магистралей $x = \pm\pi$ с минимально возможным значением интегранта $\cos(\pm\pi) = -1$.

Положим $\phi(x) = \cos(x)$. Тогда

$$\dot{\phi}(x, u) = -u \sin x, \quad \min_{|u| \leq 1} \dot{\phi}(x, u) = -|\sin x| < 0,$$

$$U_{\phi}(x) = \{v(x)\}, \quad v(x) = \begin{cases} 1, & \sin x > 0, \\ -1, & \sin x < 0 \\ [-1, 1], & \sin x = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Рассмотрим движение с $v(x)$.

В момент $t = 0$ $\sin x_0 = \sin 0 = 0$ и мы имеем многозначность. Выберем (наугад) $v(x) = 1$ в $O_+(0)$. Тогда $x(t) = t$ и $\sin t > 0$ до момента $\tau = \pi$ выхода на магистраль $x = \pi$. Легко убедиться, что выбор $v(x) = \pm 1$ в $O_+(\pi)$ противоречит стратегии (15). Остается только движение по магистрали с управлением $u = 0$ при сохранении равенства $\sin x = \sin \pi = 0$ для функции переключения.

Но движение по магистрали придётся прекратить в момент $\tau' = 2\pi$, чтобы прийти в цель $x(3\pi) = 0$ по траектории $x(t) = 3\pi - t$. Выбор τ' не случаен: он соответствует максимально возможному времени движения по магистрали. В итоге мы получили трехзвенную ломаную \bar{x} с релейным управлением \bar{u} . Пара (\bar{x}, \bar{u}) оптимальна в соответствии с позиционной схемой Кротова. В силу симметрии примера оптимальна и пара $(x^0, u^0) = -(\bar{x}, \bar{u})$. Приведенное решение проще и короче традиционного [2], состоящего из трех этапов на стр. 92, 93, 130-132 с привлечением условия типа Якоби.

4. Заключение. В статье предложен и обоснован позиционный метод Кротова, существенно расширяющий область применимости и эффективности традиционного формализма. Этот метод имеет интересные (и нетривиальные) обобщения, например, на задачи с ограничениями на оба конца траектории. Этот случай требует оперирования бипозиционными функциями типа Ляпунова-Кротова $V(t, x; t_0, x_0)$ и $V(t, x; t_1, x_1)$. Теория Гамильтона-Якоби для таких задач не работает, а понятие позиционного управления требует формализации.

1. Кротов В.Ф., Букреев В.З., Гурман В.И. Новые методы вариационного исчисления в динамике полета. М.: Машиностроение, 1969. 287 с.
2. Кротов В.Ф., Гурман В.И. Методы и задачи оптимального управления. М.: Наука, 1973.
3. Гурман В.И. Вырожденные задачи оптимального управления. М.: Наука, 1977.
4. Гурман В.И. Принцип расширения в задачах управления. М.: Наука, 1985.

5. Гурман В.И. Принцип расширения в задачах управления. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, Физматлит, 1997
6. Дыхта В.А. О множестве необходимых условий оптимальности с позиционными управлениями, порожденном слабо убывающими решениями неравенства Гамильтона—Якоби. Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2022. Т. 28, № 3. С. 83-93.
7. Дыхта В.А. Метод штрафных оценок и позиционный принцип минимума в задачах оптимального управления с терминальными ограничениями. Материалы Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Красовского (Екатеринбург, 9-13 сентября, 2024 г.). Екатеринбург: ИММ УрО РАН, ООО «Издательство УМЦ УПИ». С. 111-114.
8. Krotov V. F., *Global Methods in Optimal Control Theory, Monographs and Textbooks in Pure and Applied Mathematics*; V. 195, Marcel Dekker, New York, 1996.
9. Дыхта В.А. Неравенство Ляпунова–Кротова и достаточные условия в оптимальном управлении. Итоги науки и техн. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз.. 2006. Т. 110. С. 76-108.
10. Дыхта В.А. Неравенства Гамильтона–Якоби в оптимальном управлении: гладкая двойственность и улучшение. Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2010. Т. 15, № 15. С. 405-425.
11. Vinter R.B. Convex duality and nonlinear optimal control. *SIAM J. Control Optim.* 1993.V. 31. Pp. 518-538.
12. Clarke F.H., Nour C. Nonconvex duality in optimal control. *SIAM J. Control Optim.* 2005. V. 43. Pp. 2036-2048.
13. Clarke F.H., Ledyaev Yu.S., Stern R.J., Wolenski P.R., *Nonsmooth Analysis and Control Theory*. N.Y.: Springer-Verlag, 1998. 276 p.
14. Clarke F.H., Ledyaev Yu.S., Stern R.J., Wolenski P.R. Qualitative properties of trajectories of control systems: A survey. *J. Dyn. Control Syst.* 1995. V. 1, no. 1. Pp. 1-48.
15. Иоффе А.Д., Тихомиров В.М. Теория экстремальных задач. М.: Наука, 1974.
16. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В., *Оптимальное управление*. М.: Физматлит, 2005.
17. Vinter R.B. *Optimal Control*. Boston: Birkhauser, 2000.
18. Красовский Н.Н., Субботин А.И. *Позиционные дифференциальные игры*. М.: Физматлит, 1974.
19. Субботин А.И. *Обобщенные решения уравнений в частных производных первого порядка. Перспективы динамической оптимизации*. Москва–Ижевск: Ин-т компьютер. исследований, 2003.
20. Субботина Н.Н., Колпакова Е.А., Токманцев Т.Б., Шагалова Л.Г. *Метод характеристик для уравнения Гамильтона-Якоби-Беллмана*. Екатеринбург: РАН, УрО, Ин-т математики и механики им. Н. Н. Красовского, 2013. 244 с.
21. Vinter R.B. Dynamic programming for optimal control problems with terminal constraints // *Lecture Notes in Math.* 1985. V. 1119. Pp. 190-202.

ПРИМЕНЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ «ГЕНЕРАТОРОВ ПОГОДЫ» В СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЛОКАЛЬНОГО УРОВНЯ*

А.В. Еделев^{1,2}, Д.Н. Карамов^{2,3}, О.Ю. Башарина^{2,4}, В.А. Огородников⁵,
Н.А. Каргаполова⁵, М.С. Акентьева⁵

¹ Институт систем энергетики СО РАН

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

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет

⁴ Уральский государственный экономический университет

⁵ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

flower@isem.irk.ru, dmitriy.karamov@mail.ru, basharinaolga@mail.ru,

ova@osmf.sccc.ru, nkargapolova@gmail.com, akenteva@sscc.ru

Ярким примером природно-технических систем, расположенных на Байкальской природной территории (БПТ), являются энергетические комплексы локального уровня (микросети) [1]. В микросетях из-за жестких экологических ограничений, накладываемых законодательством РФ в отношении БПТ, можно использовать только возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Такие ВИЭ, как ветроэлектрические установки (ВЭУ) и фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), являются неуправляемыми источниками. Неравномерность выработки ими электроэнергии должна компенсироваться аккумуляторными батареями (АБ) и дизель-генераторными установками (ДГУ), включение которых в проектируемую микросеть значительно увеличивает капитальные и эксплуатационные затраты [2].

В данной работе предпринята попытка разработки комплексного подхода к структурно-параметрической оптимизации микросетей с учётом воздействия различных возмущений. Представленная многоуровневая схема оптимизации позволяет лицам, принимающим решения, за приемлемое время получить целый спектр альтернативных перспективных конфигураций микросети, обеспечивающих устойчивое и бесперебойное энергоснабжение потребителей в заданных неблагоприятных условиях. Стохастические «генераторы погоды» [3] в данной схеме необходимы для формирования модельных временных рядов природно-климатических данных разной длительности в заданном географическом положении, близких по статистическим свойствам к реальным данным, при проверке эффективности промежуточных и окончательных результатов расчёта.

1. Карамов Д.Н., Еделев А.В., Феоктистов А.Г. Моделирование энергоснабжения объектов охраняемой Байкальской природной территории на основе возобновляемых источников энергии. *Международный технико-экономический журнал*. 2020. № 5. С. 7-24.
2. А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина Моделирование автономной микросети. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. – 2023. № 3(31). С.74-85. DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
3. Akenteva M.S., Kargapolova N.A., Ogorodnikov V.A. Development of a numerical stochastic model of joint spatio-temporal fields of weather parameters for the south part of the Baikal natural territory. *Russian journal of numerical analysis and mathematical modelling*, 2022. vol. 37. no.2. pp.73-83.

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СВЕРХСМЕРТНОСТИ В ПЕРИОД ПАНДЕМИИ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Н.В. Ефимова¹, Т.С. Зароднюк², А.Ю. Горнов², П.С. Сороковиков²

¹Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
medecolab@inbox.ru, gornov@icc.ru

В докладе обсуждается предложенная методика оценки смертности населения в период коронавирусной пандемии. Методика состоит из нескольких итераций. Во-первых, изучены показатели смертности в фоновый период и период пандемии новой коронавирусной инфекции (ПНКИ). В качестве фонового на основе полученных ранее собственных результатов [1] и данных ряда исследователей [2, 3] выбран 2017 год. Известно, что показатель смертности от болезней системы кровообращения (БСК) «в первом приближении» зависит от возраста [4]; эволюционные модели описываются уравнениями экспоненциального типа: $y = \beta \cdot e^{\alpha x}$, где y – повозрастной коэффициент смертности, x – возраст, β – константа тренда, которая показывает тенденцию возрастания уровней y при изменении x . Коэффициенты α, β находились нами методом наименьших квадратов – путем минимизации суммы квадратов отклонений расчетных данных от фактических. Программная реализация алгоритма выполнена на языке С в рамках программного комплекса OPTCON [5], ориентированного на численное исследование широкого класса задач оптимизации.

Качество аппроксимации оценивалось по коэффициенту детерминации (R^2), ошибке аппроксимации (A) и среднему коэффициенту эластичности (E), показывающему, на сколько процентов в среднем по совокупности изменится результат y от своей средней величины при изменении фактора x на 1% от своего среднего значения.

На втором этапе проведен расчет избыточной смертности от БСК в период пандемии в старшей возрастной группе (60 лет и старше), во-первых, связанной с влиянием суммы обсуждаемых факторов, и, во-вторых, от воздействия аэрополлютантов, тропных к системе кровообращения. На территории Братска, например, осуществляется мониторинг трех ингредиентов, для которых доказано негативное действие на сердечно-сосудистую систему: PM10, CO, гидроксibenзол). Расчеты проведены согласно Руководству Р 2.1.10-3968-23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания», исходя из представления о бинарности явления смертности по уравнению логистической регрессии. Вероятность дополнительных случаев смерти, связанных с экспозицией, проведена по формуле вида:

$$\Delta p_i = \frac{1}{1 + e^{-\alpha i + \beta \cdot C_i}} - \frac{1}{1 + e^{-\alpha i + \beta \cdot RfC_i}}$$

где α, β – коэффициенты, C_i – среднегодовое содержание i -го вещества в атмосферном воздухе, RfC_i – референтная концентрация для хронического ингаляционного действия i -го вещества. Величины α, β определены по регрессионным уравнениям, описывающим зависимость коэффициентов смертности от расчетных концентраций PM10, за период 2000–2019 годы. Дополнительное количество умерших определено с учетом численности населения возрастной группы риска

$$P_i = \Delta p_i \cdot Pop,$$

где Pop – численность экспонированного населения в возрасте старше 60 лет.

В соответствии с результатами расчетов максимальный уровень сверхсмертности от БСК в пандемию составил в возрастных группах: старше 80 лет – 35,92 случая на

1000 человек данного возраста, 70–79 лет – 8,48 %, в 60–69 – 1,03 %. Исходя из численности отдельных возрастных групп в Братске количество дополнительных случаев смерти оценивается соответственно следующими величинами: 305,7 (95%-й доверительный интервал (ДИ) 305,3–306,1) случаев; 114,8 (114,6–115); 27,7 (27,6–27,8). Суммарное число дополнительных случаев смерти от БСК составило 448,2 (448,0–448,4).

В 2017 году вероятность сверхсмертности рассчитана для PM10 и составила 0,003977. При этом число дополнительных случаев смертности от БСК, ассоциированных с воздействием PM10 в возрастной группе старше 60 лет оценивается в 194,4 (193,6–195,1) или 17,4% от всех случаев смерти по причине БСК. В 2021 году среднегодовое содержание веществ, обладающих негативным действием на сердечно-сосудистую систему значительно ниже, чем в 2017 году. Вероятность сверхсмертности, связанной с экспозицией PM10, составила 0,000273, гидроксibenзола – 0,000101. Следовательно, число дополнительных случаев смертности от БСК в возрастной группе старше 60 лет оценивается в 18,4 (ДИ 18,0–18,7).

Преимущества использованной методики заключаются, на наш взгляд, в применении надежных подходов нелинейного регрессионного анализа для выявления вариативности тенденций повозрастной смертности в фоновый период и во время пандемии на территории загрязнения атмосферного воздуха.

Обсуждаются результаты вычислительных экспериментов.

1. Ефимова Н.В., Рукавишников В.С. Оценка загрязнения атмосферного воздуха г. Братска на основе анализа многолетних наблюдений. Гигиена и санитария. 2022; 101(9):998–1003. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-9-998-1003>.
2. Асламова В.С., Плеханова О.С., Асламов А.А. Регрессионные модели оценки атмосферных выбросов загрязняющих веществ в городах Братск и Черемхово. Математические методы в технологиях и технике. 2023; 11:79–82. https://doi.org/10.52348/2712-8873_ММТТ_2023_11_79.
3. Май И.В., Клейн С.В., Максимова Е.В. Результативность мероприятий федерального проекта «чистый воздух» по ключевым показателям – качеству атмосферного воздуха и риску для здоровья населения г. Братска. Гигиена и санитария. 2023; 102(12): 1367–1374. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-12-1367-1374>.
4. Tadayan S, Wickramasinghe K, Townsend N. Examining trends in cardiovascular disease mortality across Europe: how does the introduction of a new European Standard Population affect the description of the relative burden of cardiovascular disease? // *Popul. Health Metr.* 2019;17(1):6. <https://doi.org/10.1186/s12963-019-0187-7>.
5. Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S., Anikin A.S., Sorokovikov P.S., Tyatyushkin A.I. Software Engineering for Optimal Control Problems. *Lecture Notes in Networks and Systems.* 2022; 424: 415–426. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-97020-8_38.

СЦЕНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СЕВЕРОБАЙКАЛЬСКОГО УЧАСТКА БАМА С УЧЕТОМ ПРИРОДООХРАННЫХ ТРЕБОВАНИЙ*

М.Л. Жарков, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт

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

В настоящее время наблюдается увеличение спроса на железнодорожные перевозки из западных районов России в страны Азиатско-Тихоокеанского региона [1]. При этом текущая загрузка Транссиба уже приблизилась к его максимальной пропускной способности, из-за чего особое внимание уделяется развитию БАМа. Согласно паспорту проекта [2], планируется полная электрификация магистрали и создание полноценного двухпутного сообщения. Однако реализация таких планов потребует существенных финансовых затрат, а также приведет к значительному ущербу для окружающей среды [3], в частности, к вырубке леса в полосе строительства и разработке новых карьеров для добычи материала при построении насыпей под железнодорожным полотном.

В связи с вышесказанным, актуальной проблемой является поиск альтернативных решений, которые могут повысить пропускную способность БАМа при меньшем негативном влиянии на окружающую среду: создание двухпутного сообщения только на проблемных перегонах; использование частично пакетного графика движения поездов [4]. Для сравнительного анализа этих вариантов модернизации используется сценарное моделирование.

Математическая модель работы железнодорожного участка строится в виде сети массового обслуживания (СеМО), представляющей собой набор $S < \infty$ систем массового обслуживания (узлов), в которой заявки переходят из одного узла в другой в соответствии с заданным маршрутом [5]. Для описания входящих поездопотоков используется Batch Marked Markovian Arrival Process (БММАР) – обобщение неординарного Пуассоновского потока, в котором присутствуют разные типы заявок, а размеры их групп и интенсивность поступления могут меняться со временем [6]. В результате в модели могут быть учтены иерархическая структура участка, частично пакетный график движения поездов, наличие нескольких маршрутов, в том числе и кольцевых, недетерминированное время следования и обслуживания и т.п.

Объектом исследования выбран Северобайкальский участок БАМа, который включает семь станций, имеет однопутную систему движения и три различных маршрута следования пассажирских и грузовых поездов. Он расположен на Байкальской природной территории, вследствие чего к проектам его реконструкции предъявляются строгие экологические требования.

В докладе будут представлены математическая модель движения поездов по Северобайкальскому участку и результаты ее численного исследования, на основании которого установлено следующее. Участок способен пропустить в штатном режиме до 27 пар поездов в сутки. Применение частично пакетного графика является в данном случае нецелесообразным, поскольку не позволит увеличить пропускную способность сколь-нибудь существенно. Организация двухпутного сообщения на трех проблемных перегонах, напротив, целесообразна и позволит пропустить до 32 пар п./сут., однако такое решение является временным, поскольку в 2025 году пропускная способность Северобайкальского участка должна быть значительно выше и достичь 43 пар п./сут. Таким образом, единственным эффективным способом существенного увеличения

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 121041300065-9

пропускной способности Северобайкальского участка БАМа является создание полноценного двухпутного сообщения.

Реализация данного проекта, как упоминалось ранее, несет заметные экологические риски. Помимо указанных выше негативных факторов, увеличение интенсивности движения поездов ускоряет перенос агрессивных инвазивных организмов на новые территории: насекомых, растительных паразитов и патогенов. Таким образом, требуется разработка соответствующих природоохранных мер, в частности, установка барьеров, которые не позволят инвазивным видам распространяться.

Предложенная модель применима для выявления узких мест в структуре различных железнодорожных участков и анализа эффективности мер по их устранению. Также предлагаемый подход позволяет оценить задержки поездов при их движении по участкам и построить долговременный прогноз работы таких систем при наличии неопределенностей в объемах грузоперевозок и структуре поездопотоков в будущем.

1. Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of a Coal Transshipment Complex Based on a Queuing Network. *Appl. Sci.* 2024. Vol. 14. P. 6970.
2. «Об утверждении паспорта инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (третий этап)»: Распоряжение Правительства РФ от 20.04.2024 N 981-р.
3. Povoroznyuk O., Vincent W.F., Schweitzer P., Laptander R., Bennett M., Calmels F., Sergeev D., Arp C., Forbes B.C., Roy-Léveillé P., Walker D.A. Arctic roads and railways: social and environmental consequences of transport infrastructure in the circumpolar North. *Arctic Science.* 2023. Vol. 9(2): P. 297–330.
4. Бычков И.В., Казаков А.Л., Жарков М.Л. Формирование предложений по увеличению пропускной способности Улан-Баторской железной дороги с применением теории массового обслуживания // *Вычислительные технологии.* 2023. Том 28, № 6. С. 17–36.
5. Ивницкий В.А. Теория сетей массового обслуживания. М.: Физматлит, 2004. 772 с.
6. Вишневецкий В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И. Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. М.: Техносфера, 2018. 564 с.

О ПРИМЕНЕНИИ СЕТЕЙ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УГОЛЬНОГО ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КОМПЛЕКСА*

М.Л. Жарков, А.А. Лемперт, А.В. Супруновский

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
zharkm@mail.ru, as.irgups@gmail.com, lempert@icc.ru

В настоящее время наблюдается устойчивый рост экспорта российского угля. К 2035 году планируется увеличить объемы отгрузки с текущих 213 млн. тонн в год до 259–392 млн. тонн. Основные поставки осуществляются из угольных бассейнов Сибири по железной дороге, и далее – водным путем в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, из-за чего морские терминалы Дальнего Востока и связанные с ними железнодорожные станции испытывают высокую загрузку и нуждаются в увеличении перегрузочных мощностей.

Целью данной работы является построение математической модели, которая способна описать функционирование портовой инфраструктуры и связанного с ней наземного транспорта как единой системы. Объектом исследования является один из крупнейших и современных экспортных перегрузочных комплексов в России, включающий угольный терминал Дальтрансуголь и взаимодействующую с ним сортировочную станцию Токи.

Угольный перегрузочный комплекс – портовый технологический комплекс, предназначенный для перегрузки угля и имеющий специализированные системы для уменьшения выделения угольной пыли [1].

Модель работы перегрузочного комплекса строится в виде сети массового обслуживания (СеМО), которая представляет собой совокупность конечного числа S систем массового обслуживания (узлов) [2]. Заявки между ними движутся согласно заданному маршруту, хранящемуся в маршрутной матрице. Функционирование структурных элементов моделируется разными узлами, за счет чего учитываются их пропускная способность и различная вместимость. Для описания поступающих вагонопотоков с углем применяется ВММАР-поток – обобщение неординарного Пуассоновского потока, объединяющий несколько подпотоков, каждый из которых имеет свои распределение размеров поступающих групп заявок, их тип и интенсивность прибытия [3]. Для учета различных маршрутов у пассажирских, транзитных грузовых и угольных поездов используются разные типы заявок, каждый из которых имеет отдельную маршрутную матрицу. Таким образом, модель учитывает влияние случайных факторов на поступление поездов и отправление судов с углем из системы, ее сложную иерархическую структуру, маршруты движения разных категорий поездов, различные параметры обслуживания и особенности работы отдельных элементов комплекса.

В докладе будет более подробно представлена математическая модель работы рассматриваемого комплекса. Также будут приведены результаты ее численного исследования, полученная на их основе оценка пропускной способности выбранного объекта и рекомендации по ее увеличению.

1. Кузнецов А.Л., Купцов Н.В., Кириченко А.В., Соляков О.В. Морские перевозки угля. М.: Моркнига, 2023. 228 с.
2. Ивницкий В.А. Теория сетей массового обслуживания. М.: Физматлит, 2004. 772 с.
3. Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of a Coal Transshipment Complex Based on a Queuing Network // Appl. Sci. 2024. Vol. 14. P. 6970.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00264).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕКСТОВОГО СЛОЯ PDF ДОКУМЕНТОВ СО СЛОЖНЫМ ФОНОМ

М.В. Загородников

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

В работе предложен подход к извлечению текста из PDF-документов со сложной структурой, фоновыми элементами и некорректной кодировкой, которая затрудняет применение стандартных методов OCR [1], таких как Tesseract [2]. Основным методом заключается в использовании данных о шрифтах и символах, хранящихся в самом PDF-документе. Для распознавания глифов шрифтов и восстановления текста была разработана и обучена свёрточная нейронная сеть (CNN) с использованием библиотеки Keras.

Для обучения модели подготовлен набор данных, аналогичный EMNIST [3], а именно grayscale изображения формата 28x28 пикселей. Датасет включает в себя символы русского и английского алфавитов, цифры, знаки препинания и специальные символы — всего 160 классов, 43633 изображений. Данные были разбиты на три выборки: train (данные для обучения), val (данные для валидации) и test (данные для тестирования нейронной сети). Данные были разделены в выборки в следующих пропорциях 76:26:4

Тестирование эффективности подхода проводилось на PDF-документах с некорректной кодировкой, текст которых предварительно извлекался вручную для создания эталонных данных — всего 14 документов, 12442 символа. В ходе тестирования использовалась метрика Accuracy, по результатам которой предложенный метод продемонстрировал точность 95%. Для сравнения, точность извлечения текста с использованием Tesseract оказалась на 45% ниже, что подтверждает преимущество разработанного подхода.

В дальнейшем планируется разработать веб-сервис для извлечения текста из PDF-документов со сложной структурой, фоновыми элементами и некорректной кодировкой с использованием стека React.js и FastAPI, а также совершенствование методов постобработки текста после работы нейронной сети для устранения омоглифов русского и английского языка.

1. Mithe R., Indalkar S., Divekar N. Optical character recognition //International journal of recent technology and engineering (IJRTE). 2013. Т. 2. №. 1. С. 72-75.
2. Dome S., Sathe A. P. Optical character recognition using tesseract and classification // 2021 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI). IEEE. 2021. С. 153-158.
3. EMNIST: Extending MNIST to handwritten letters / G. Cohen [и др.] // 2017 international joint conference on neural networks (IJCNN). IEEE. 2017. С. 2921-2926.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ФАКТОРОВ СНИЖЕНИЯ ВИДОВОГО РАЗНООБРАЗИЯ В ЗАПОВЕДНИКАХ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

К.М. Зырянова, Е.М. Тимофеев, П.А. Ожигова
Иркутский государственный университет, Иркутск

Проблема утраты биоразнообразия в Байкальском регионе стала одной из ключевых экологических тем. Для анализа ситуации использовались данные государственного доклада о состоянии озера Байкал и мерах по его охране [1], и научные публикации о местных обитателях животного мира [2, 3]. Анализ проводился с применением современных инструментов визуализации данных в BI Tableau, что позволило выявить взаимосвязи и представить результаты в виде инфографики, доступной для широкой аудитории.

Графики показали существенное снижение видового разнообразия с 2017 года. Выдвинутая гипотеза связывает этот спад с лесными пожарами 2015 года [1], охватившими огромные территории и приведшими к разрушению экосистем, что нарушило кормовую базу и репродуктивные циклы животных. Данная гипотеза подтвердилась с помощью наглядных визуализаций: летне-осенний сезон 2015 года стал одним из самых катастрофических в истории Байкальского региона из-за лесных пожаров, охвативших значительные территории в течение трёх месяцев.

Благодаря визуализации данных мы обнаружили, что вторым фактором, усилившим экологический кризис, стало обмеление Байкала, наблюдавшееся в 2015–2016 годах [1]. Уровень воды в озере в этот период опускался ниже предельно допустимой отметки в 456 метров. Подобное явление оказывало негативное влияние на водную экосистему.

Третьим важным фактором стало увеличение численности большого баклана (*Phalacrocorax carbo* L.) [2, 3], что опять же не было бы настолько очевидным, если бы мы не использовали для анализа данных графики. После многолетнего отсутствия этот вид вновь начал гнездиться на территории Байкала: впервые их колонии были зафиксированы в 2004 году на острове Омудевый Камешек. Однако уже к 2015–2016 годам численность гнездящихся бакланов увеличилась до 3400–3590 пар. Бакланы, обладая высокой прожорливостью, стали представлять угрозу для популяции омуля, особенно в нерестовый период.

Снижение видового разнообразия в заповедниках Байкальского региона — это результат сложного взаимодействия нескольких факторов: масштабных лесных пожаров, обмеления Байкала и роста численности бакланов. Эти события нанесли значительный ущерб экосистеме и поставили под угрозу её устойчивость. Проведённый анализ, дополненный средствами визуализации, помог выявить ключевые тенденции и представить их в наглядной форме. Это подчёркивает важность визуальных методов в современном экологическом исследовании и их роль в формировании экологической ответственности у общества.

1. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 году». Иркутск: ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2023. 372 с.: илл.
2. Численность большого баклана в Чивыркуйском заливе (оз. Байкал): результаты учета 2021/2022 / Ананин А.А., Елаев Э.Н., Аюрзанаева И.А. // Эколого-биологические и географические исследования в решении региональных проблем, 2022. С. 73.
3. История гнездования и динамика численности большого баклана (*Phalacrocorax carbo* L. 1758) в Байкальской Сибири / Э. Н. Елаев, Ц. З. Доржиев, А. А. Ананин [и др.]. Вестник Бурятского государственного университета. Биология. География. 2021. № 3. С. 21–32.

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ PYTHON

Е.Д. Иванушкин
Институт земной коры СО РАН
ivanushkinE1@yandex.ru

В настоящее время сейсмологи постоянно сталкиваются с необходимостью анализа больших объемов данных о сейсмической активности. Классические методы визуализации и анализа данных, реализуемые вручную, требуют значительных временных и трудовых затрат, что затрудняет анализ и интерпретацию результатов.

Существует множество различных инструментов для визуализации данных о землетрясениях, однако многие из них либо обладают ограниченным набором функций, либо требуют глубоких знаний в программировании. Предлагаемое в данном исследовании решение, разработка приложения, которое автоматизирует процесс визуализации данных сейсмической активности и предоставляет интуитивно понятный интерфейс для специалистов-предметников.

Приложение принимает на вход Excel-файлы (каталог), который представляет собой список (таблицу) сейсмических событий на определенную территорию за некоторый период времени. Он должен содержать следующую информацию о землетрясениях: дата (день, месяц, год), время в очаге UTC (час, минута, секунда), координаты эпицентра (широта и долгота в градусах), энергетический класс землетрясения. Пользователь может выбрать из 6 типов графиков: графики N/t (количество событий во времени), графики E/t (энергия событий во времени), кумулятивные графики N/t и E/t, графики InterEventTime (время между событиями) и график, показывающий распределение энергетического класса во времени. Энергия землетрясений рассчитывается, исходя из определения энергетического класса K как десятичного логарифма энергии в Дж. Количество землетрясений в выбранный интервал времени рассчитывается относительно времени возникновения заданного пользователем землетрясения, что позволяет, например, оценивать интенсивность афтершокового процесса после главного толчка. При анализе предусмотрен выбор временного окна для графиков, а также в целом выбор всего исходного каталога событий или его части, а также возможность экспорта массива данных, по которому строился график, в виде файла.

Преимущества разработанного приложения:

- 1) Автоматизация: значительно сокращает время и усилия, для анализа данных
- 2) Гибкость: возможность выбора и построения нескольких типов графиков
- 3) Экспорт данных: позволяет использовать результаты в дальнейших исследованиях и публикациях
- 4) Интуитивный интерфейс: простой и удобный для пользователя

Разрабатываемое приложение представляет собой полезный инструмент для сейсмологов, значительно упрощающий и ускоряющий анализ сейсмической активности. Возможность экспорта данных позволяет исследователям использовать результаты анализа в своих работах.

1. Celso Reyes URL: <https://github.com/CelsoReyes/zmap7>
2. Anthony Lomax URL: http://alomax.free.fr/seisgram/ver70/SeisGram2K_install.html

СОЗДАНИЕ ГИБКОГО ФРЕЙМВОРКА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ НАУЧНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА БАЗЕ LARAVEL

И.Н. Игнатьев

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

Создание фреймворка на базе Laravel, MySQL и других современных веб-технологий для организации научных мероприятий позволяет решить ключевые проблемы, которые остаются нерешёнными существующими решениями. Большинство существующих платформ не обладают гибкостью, необходимой для адаптации к специфическим требованиям научных конференций и мероприятий. Стандартные решения часто ограничивают возможности настройки, что усложняет интеграцию модулей для управления регистрацией участников, сбора и рецензирования научных материалов, а также ведения учёта взаимодействий с пользователями. Создание специализированной веб-инфраструктуры – наилучший вариант для автоматизации научно-организационной деятельности [1].

Разрабатываемый фреймворк позволяет создать высокоадаптивную и масштабируемую платформу с возможностью расширения функционала за счёт модульного подхода и использования встроенных механизмов безопасности, таких как валидация данных и защита от CSRF-атак [2]. Благодаря архитектуре Model-View-Controller, Laravel упрощает разработку логики обработки пользовательских данных, а интеграция с MySQL обеспечивает высокую производительность при работе с большими объёмами данных, что важно для масштабных мероприятий, регулярно проводящихся научным институтом.

Фреймворк также обеспечивает удобные интерфейсы для работы с рецензированием и оценкой научных материалов, позволяя организаторам легко управлять процессами редакторской и рецензентской работы, а также настроить систему так, чтобы автоматически собирать информацию о всех принятых докладах и сформировать программу конференции с расписанием и списком бейджиков, а также создать автоматическую генерацию сертификатов после завершения мероприятия, основываясь на данных о поданных докладах и участии, значительно ускоряя организационные процессы [3].

Разработка позволит упростить процесс участия в научных мероприятиях и конференциях для всех категорий пользователей [4]. Основной идеей является то, что участники регистрируются в системе только один раз, вводя свои личные и профессиональные данные, которые будут сохраняться и использоваться при всех последующих регистрациях. Это позволит участникам быстро подавать заявки на участие в мероприятиях, не тратя время на повторный ввод информации.

1. Т.Р. Вартанова, Автоматизация процессов разработки и поддержки веб-порталов с помощью систем управления контентом. Сборник трудов международной конференции Инновационные подходы к решению технико-экономических проблем, 2020, М., Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», с. 220–225.
2. Laravel - The PHP Framework for Web Artisans. URL: <https://laravel.com/>
3. И.Н. Игнатьев. Автоматизация веб-поддержки подготовки и проведения научно-организационных мероприятий. Информационные, вычислительные и управляющие системы для распределенные сред: практика и опыт. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024. с. 30-33
4. I. N. Ignatev, M. Abdollahzadeh, Framework for developing web portals to support scientific and organizational activities, in: Current Trends in Multidisciplinary Research: Materials of IV International Student Scientific and Practical Conference, April, 25 2024, Irkutsk, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University, 2024, pp. 135–140.

TIME-OPTIMAL CONTROL OF A HARMONIC OSCILLATOR WITH VARIABLE FREQUENCY

V.P. Ilyutko, D.V. Kamzolkin, V.V. Ternovski
Shenzhen MSU-BIT University and Lomonosov Moscow State University
ilyutko@smbu.edu.cn, kamzolkin@smbu.edu.cn, ternovski@smbu.edu.cn

We investigate the time-optimal control of a harmonic oscillator described by the second-order differential equation:

$$x''(t) + \omega^2(t)x(t) = 0,$$

where $x(t)$ represents the system's position, and control function $\omega(t)$ is the time-varying frequency constrained by $0 < \omega_0 \leq \omega(t) \leq 1$. The objective is to determine the minimal time $T > 0$ for transitioning the system from an initial state $x(0) = x_0, \dot{x}(0) = v_0$ to a final state $x(T) = x_T, \dot{x}(T) = v_T$, while satisfying boundary conditions and ensuring continuity of the solution.

An analytical solution for this problem, if attainable, would provide immense insight into the optimal strategy for $\omega(t)$. Such a solution would require:

- Closed-form expressions for optimal time T as a function of the initial and final states (x_0, v_0, x_T, v_T) .

- Explicit criteria for the timing and form of variations in $\omega(t)$, minimizing reliance on numerical optimization (this mathematical problem is not well-posed). Achieving an analytical solution would not only reduce computational overhead but also reveal deeper structures in the interplay between oscillatory dynamics and control constraints. However, the bilinear optimal problem and the discontinuous nature of $\omega(t)$ make this a formidable challenge.

This problem has broad applications across various domains, including:

- Mechanical systems: time-optimal control of vibrations and damping systems, where rapid state transitions are crucial for performance and stability.

- Signal processing: designing systems that require swift transitions between states to maintain signal integrity or adapt to changing input conditions.

- Robotics and aerospace engineering: trajectory optimization under strict control constraints, enabling precise and efficient movements in robotic arms, drones, and spacecraft.

- Energy-efficient systems: minimizing energy expenditure during transitions while maintaining adherence to dynamic constraints.

By addressing the interplay between frequency constraints and system dynamics, the insights gained from our research could influence the design of more efficient and responsive systems in these fields.

The study of time-optimal control for harmonic oscillators with bounded frequency is a rich area of research [1, 2]. The time optimal control problem was solved and the following results were obtained: the theorem of the existence of an optimal solution was proven, the solution itself was obtained (see Fig. 1) and various cases were investigated. While numerical methods provide practical solutions, the pursuit of analytical methods remains an exciting and challenging goal, promising deeper insights and more efficient strategies.

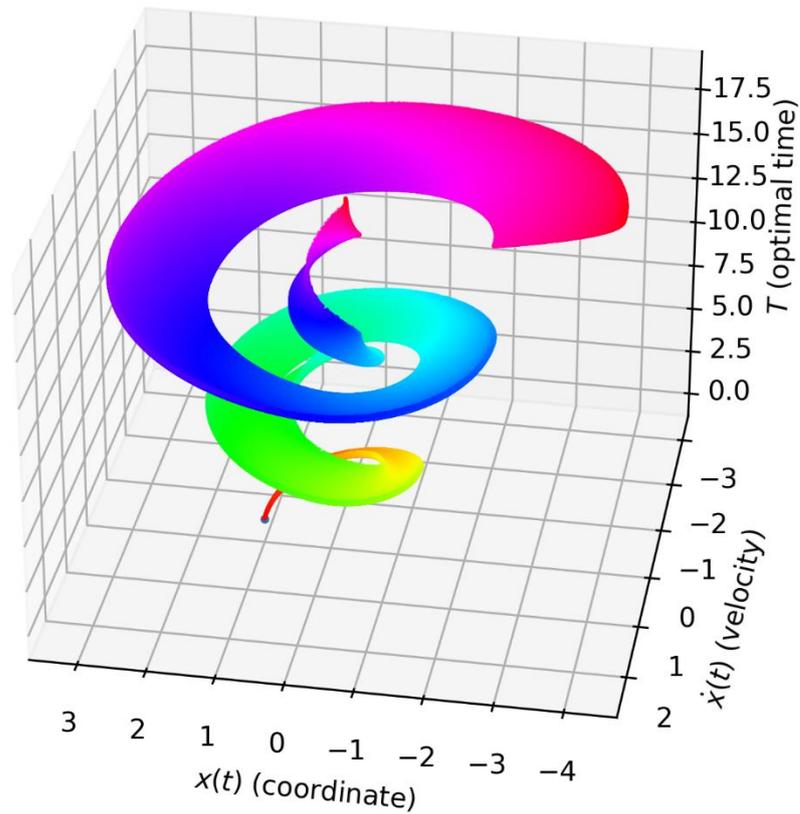


Figure 1. Optimal time T as a function of the final state (x_T, v_T) for fixed initial point (x_0, v_0)

1. Ternovski, V.; Ilyutko, V. Control the Coefficient of a Differential Equation as an Inverse Problem in Time. *Mathematics* 2024, 12, 329. <https://doi.org/10.3390/math12020329>.
2. Kamzolkin, D.; Ternovski, V. Time-Optimal Motions of a Mechanical System with Viscous Friction. *Mathematics* 2024, 12, 1485. <https://doi.org/10.3390/math12101485>.

О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА
УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ШАРА С МНОГОСВЯЗНОЙ ПОЛОСТЬЮ,
ЗАПОЛНЕННОЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТЬЮ

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 представлены результаты качественного анализа дифференциальных уравнений, описывающих движение без скольжения шара по неподвижной горизонтальной плоскости под действием силы тяжести. Шар содержит многосвязную полость, целиком заполненную однородной идеальной несжимаемой жидкостью, совершающей безвихревое движение. Уравнения движения системы имеют вид [1]:

$$\begin{aligned} A_{*1}\dot{\omega}_1 + (A_{*3} - A_{*2})\omega_2\omega_3 + A_{*3}\Omega_3\omega_2 - A_{*2}\Omega_2\omega_3 &= \gamma_1\omega_n, \\ \dot{\gamma}_1 = \omega_3\gamma_2 - \omega_2\gamma_3 \{1 \ 2\ 3\}, \quad (\omega_n = \dot{\omega}_1\gamma_1 + \dot{\omega}_2\gamma_2 + \dot{\omega}_3\gamma_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $A_{*i} = A_i / (m\rho^2) + 1$, $\Omega_i = k_i / (A_i + m\rho^2)$ ($i = 1, 2, 3$), m – сумма масс твердого тела и жидкости, ρ – радиус шара, A_i ($i = 1, 2, 3$) – момент инерции шара, $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ – вектор угловой скорости тела, $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ – единичный вектор, направленный по вертикали вверх, $\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3)$ – вектор момента количества циклического движения жидкости.

Система (1) допускает следующие первые интегралы:

$$\begin{aligned} E &= A_{*1}\omega_1^2 + A_{*2}\omega_2^2 + A_{*3}\omega_3^2 - \bar{\omega}_n^2 = const, \quad (\bar{\omega}_n = \omega_1\gamma_1 + \omega_2\gamma_2 + \omega_3\gamma_3) \\ V_1 &= [A_{*1}(\omega_1 + \Omega_1) - \bar{\omega}_n\gamma_1]^2 + [A_{*2}(\omega_2 + \Omega_2) - \bar{\omega}_n\gamma_2]^2 + [A_{*3}(\omega_3 + \Omega_3) - \bar{\omega}_n\gamma_3]^2 = const, \\ V_2 &= A_{*1}(\omega_1 + \Omega_1)\gamma_1 + A_{*2}(\omega_2 + \Omega_2)\gamma_2 + A_{*3}(\omega_3 + \Omega_3)\gamma_3 - \bar{\omega}_n = const, \quad V_3 = \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1 \end{aligned}$$

и является вполне интегрируемой.

Методом Рауса-Ляпунова [2] находятся стационарные инвариантные множества уравнений (1), дается их механическая интерпретация и исследуется устойчивость по Ляпунову. Указанным методом найдены семейства стационарных решений, соответствующие положением равновесия и перманентным вращениям исследуемой системы, а также стационарные инвариантные многообразия, которым эти решения принадлежат. Для ряда решений получены достаточные условия устойчивости и сопоставлены с необходимыми.

Рассмотрен случай, когда механическая система находится под воздействием двух потенциальных силовых полей. Показано, что добавление еще одного потенциального силового поля приводит к появлению маятниковых колебаний системы.

1. Маркеев А. П. Об интегрируемости задачи о качении шара с многосвязной полостью, заполненной идеальной жидкостью. Изв. АН СССР. МТТ. 1986. Т. 21, № 1. С. 64–65.
2. Ляпунов А. М. О постоянных винтовых движениях твердого тела в жидкости. Соб. соч. 1954. Т.1. С. 276–319.

ТЕОРЕМА СУЩЕСТВОВАНИЯ, ТОЧНЫЕ И ПРИБЛИЖЕННЫЕ РЕШЕНИЯ С НУЛЕВЫМИ ФРОНТАМИ ДЛЯ ВЫРОЖДАЮЩЕЙСЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ХИЩНИК-ЖЕРТВА»*

А.Л. Казаков¹, Л.Ф. Спевак²

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

²Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН

kazakov@icc.ru

Введение и постановка задачи. Рассматривается нелинейная (квазилинейная) параболическая система второго порядка

$$u_t = \alpha_1 u_x + \beta_1 (uv_{xx} + u_x v_x) + F(u, v), \quad v_t = \alpha_2 v_x - \beta_2 (vu_{xx} + u_x v_x) + G(u, v). \quad (1)$$

Здесь $u(t, x), v(t, x)$ – искомые функции; t, x – независимые переменные; $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ – константы; F, G – известные достаточно гладкие функции своих аргументов, причем $F(0, 0) = G(0, 0) = 0$. Данное условие, в частности, обеспечивает наличие у (1) тривиального решения. Можно видеть, что, если одна из искомым функций обращается в нуль, то зануляется также один из множителей перед старшей (второй) производной, что приводит к вырождению системы.

Известно, что для нелинейных параболических уравнений и систем с подобными свойствами существует специальных класс решений, которые описывают возмущений, распространяющиеся по покоящемуся (нулевому) фону с конечной скоростью, и, в зависимости от физической интерпретации, именуются тепловыми [1], фильтрационными [2] или диффузионными [3] волнами.

Система (1) предложена в классической монографии [4] в качестве популяционной модели "хищник-жертва" (predator-prey) и является обобщением известного полулинейного параболического уравнения Колмогорова–Петровского–Пискунова [5]. Проблема построения для (1) решений, имеющих вид диффузионных волн, ранее была рассмотрена в работах [6] (в одном конкретном случае) и [7] (в более общей постановке). В частности, удалось доказать теоремы существования и единственности нетривиальных аналитических решений (1) с граничными условиями

$$u|_{x=a(t)} = 0, \quad v|_{x=a(t)} = 0, \quad (2)$$

где $a(t)$ – достаточно гладкая функция, которая определяет *нулевой фронт* для обеих искомым функций. Несмотря на несомненную значимость данного результата для теории дифференциальных уравнений, исследование свойств полученных решений показало, что они не могут быть рассмотрены как составные части диффузионных волн, поскольку искомые функции u и v в выколотой окрестности нулевого фронта имеют разные знаки. В этой связи актуальность приобретает проблема нахождения решений, удовлетворяющий условию

$$u|_{x=a(t)} = 0, \quad v|_{x=b(t)} = 0, \quad (3)$$

где функции $a(t), b(t)$ определяют различные нулевые фронты для двух искомым функций, которые в промежутке между фронтами одновременно принимают положительные значения. При этом нулевые фронты могут быть как известными, так и подлежать определению. В последнем случае наиболее понятная и естественная постановка граничных условий имеет следующий вид:

$$u|_{x=0} = f(t), \quad v|_{x=0} = g(t). \quad (4)$$

* Исследования выполнены в рамках госзадания Минобрнауки России по проектам «Аналитические и численные методы математической физики в задачах томографии, квантовой теории поля и механике жидкости и газа», № гос. регистрации: 121041300058-1

Тогда получаем (1), (4) – задачу об иницировании диффузионной волны заданным краевым режимом (для отдельных уравнений соответствующего вида ее иногда называют задачей А.Д. Сахарова об иницировании тепловой волны [2,8]).

Результаты. Отметим, предваряя краткое описание результатов, что наличие особенности в задачах (1), (3) и (1), (4) не позволяет применять для их исследования стандартные методы и требует разработки специальных подходов.

Итак, получено 5 групп результатов:

1. Теорема существования и единственности нетривиального неотрицательного решения задачи (1), (4), удовлетворяющего условию (3), в классе аналитических функций. Решение строится в виде кратных рядов с рекуррентно вычисляемыми коэффициентами, которые определяются индукцией по суммарному порядку дифференцирования при решении систем линейных алгебраических уравнений. Сходимость рядов доказывается методом мажорант [9]. Нулевые фронты определяются одновременно с построением решения задачи. Аналогичное утверждение ранее было доказано для квазилинейной параболической системы более простого вида [10].

2. Точные решения (1), имеющие вид полиномов по степеням пространственной переменной x с коэффициентами, зависящими от времени t

$$u = \sum_{k=0}^n A_k(t)x^k, \quad v = \sum_{k=0}^n B_k(t)x^k. \quad (5)$$

Доказывается, что подобные представления возможны тогда и только тогда, когда $n = 2$, а функции $F(u, v), G(u, v)$ являются линейными. В таком случае A_2, B_2 – это константы, а функции $A_0(t), B_0(t), A_1(t), B_1(t)$ определяются при интегрировании линейной неоднородной системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. При этом за счет выбора констант становится возможным получить решения вида (5), удовлетворяющие условиям (3) и (4).

3. Точные решения, которые строятся с использованием обобщенного разделения переменных. В литературе подобный подход иногда называют "прямым методом Кларксона-Краскала" [11]. Как и при классическом разделении переменных, промежуточным итогом преобразований является редукция исходного уравнения к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, при этом вместо пространственной переменной используется анзац специального вида $z = \xi(t, x)$, который подбирается таким образом, чтобы нулевые фронты (3) принимали вид $z = \text{const}$.

4. Приближенный алгоритм построения решений задачи (1), (4) на заданном конечном промежутке времени. В основе алгоритма лежит дискретизация по времени с разностной аппроксимацией. На каждом шаге по времени $t = t_k$ формулируется задача, состоящая в определении искомым функций $u(t_k, x)$, $v(t_k, x)$ и положения нулевых фронтов $a(t_k)$, $b(t_k)$. Задача состоит из системы двух уравнений Пуассона, соответствующих (1), и граничных условий, следующих из (3), (4). Решение строится итерационно методом коллокаций с применением разложений по радиальным базисным функциям [12]. Поскольку метод является эмпирическим, как, впрочем, и практически все численные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с особенностями, верификация результатов расчетов выполняется с помощью точных решений, найденных в ходе проведенных исследований, и отрезков построенных рядов.

5. Комплексный вычислительный эксперимент.

Во-первых, проводится исследование поведения аналитического решения вблизи начального момента времени. Именно, на примерах численно оцениваются невязки уравнений системы (1) при подстановке в них отрезков кратных степенных рядов,

построенных в ходе доказательства теоремы. В результате определяются моменты времени, когда наблюдается сходимость рядов, а также моменты времени, в которые ряды, очевидно, расходятся.

Во-вторых, с помощью предложенного алгоритма строятся численные решения, корректность которых проверяется сравнением с отрезками рядов в области сходимости последних. Демонстрируется сходимость численного алгоритма относительно шага по времени.

В-третьих, оцениваются невязки уравнений системы (1) при подстановке численных решений вне области сходимости рядов, где также наблюдается сходимость относительно шага по времени.

Также выполняются иллюстрирующие численные расчеты, демонстрирующие содержательные с точки зрения предметной области примеры точных решений, описанных в пп. 2, 3. Для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, возникающей при построении анзаца прямым методом Кларксона-Краскалла, предлагается итерационный алгоритм, основанный на методе коллокаций и разложении по радиальным базисным функциям.

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. Kazakov A., Kuznetsov P., Lempert A. Analytical solutions to the singular problem for a system of nonlinear parabolic equations of the reaction-diffusion type. *Symmetry*. 2020. Т. 12, № 6. P. 999.
4. Murray J.D. *Mathematical biology II: Spatial models and biomedical applications. Interdisciplinary applied mathematics. Vol. 18.* New York: Springer, 2003. 837 p.
5. Колмогоров А.Н., Петровский И.Г., Пискунов Н.С. Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием количества вещества, и его применение к одной биологической проблеме. *Бюл. МГУ. Математика и механика*. 1937. Т. 1, № 6. С. 1-26.
6. Кузнецов П.А. Аналитические диффузионные волны в нелинейной параболической модели “хищник-жертва”. *Труды Института математики и механики УрО РАН*. 2022. Т. 28, №2. С. 158-167.
7. Казаков А.Л., Кузнецов П.А. Аналитические решения с нулевым фронтом для нелинейной вырождающейся параболической системы. *Дифференциальные уравнения*. 2022. Т. 58, № 11. С. 1461-1470.
8. Баутин С.П. Аналитическая тепловая волна. М: Физматлит, 2003.
9. Баутин С.П., Казаков А.Л. Обобщенная задача Коши и ее приложения. Новосибирск: Наука, 2006.
10. Казаков А.Л., Кузнецов П.А., Спевак Л.Ф. Задача об иницировании диффузионной волны для нелинейной параболической системы второго порядка. *Труды Института математики и механики УрО РАН*. 2023. Т. 29, № 2. С. 67-86.
11. Казаков А.Л., Орлов С.С. О некоторых точных решениях нелинейного уравнения теплопроводности. *Труды Института математики и механики УрО РАН*. 2016. Т. 22, № 1. С. 112-123.
12. Chen C.S., Chen W., Fu Z.J. *Recent Advances in Radial Basis Function Collocation Methods.* Berlin/Heidelberg: Springer, 2013.

ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИСТОРИЙ НА ОСНОВЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ О ЗАПОВЕДНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

А.А. Кедрина, М.И. Сахарова, П.О. Серебренникова, Е.А. Турусина
Иркутский государственный университет
nkedrina@list.ru , evilunicorn669@gmail.com, smy_mail@mail.ru, turusinak@gmail.com

Создание аналитических историй на основе визуализации данных о заповедных территориях включает в себя несколько ключевых этапов, начиная с определения целей, выбором методов визуализации и оформлением полученных результатов. Этот процесс позволяет эффективно представлять сложные данные, выявлять закономерности и поддерживать принятие решений.

В ходе выполнения проекта была поставлена задача визуального представления информации из датасетов о лесах и животных. Проект был направлен на создание плакатов, которые позволили отобразить особенности заповедных территорий Байкальского региона.

Для аналитических историй использовались данные о животном мире заповедников и национальных парков, о вылове рыбы, об охотничьих ресурсах, о вырубке лесов и площадях пожаров. Источником статистических данных стали материалы Сибирского филиала ФГУНПП «Росгеолфонд». Этап очистки собранных данных позволил удалить аномальные выбросы и ошибки для последующего преобразования информации в удобный для анализа и визуализации формат.

Для наиболее эффективного отображения информации был выбран ряд методов визуализации, которые помогли объединить анализ разных таблиц и данных в истории с общим оформлением. В аналитические истории была включена геопространственная визуализация, работа с которой предполагала использование карт для отображения географической информации о национальных парках и заповедниках, границах их территорий, сегментировании по видам животных. Создание различных диаграмм и графиков позволило показать временные изменения численности видов и динамику охотничьего промысла на линейных графиках, доленое представление видов — на круговых диаграммах, сравнение количественных показателей — на гистограммах.

После создания визуализаций была проведена интерпретация полученных результатов, которая позволила сделать выводы по проделанной работе. Количество животных видов, охраняемых на заповедных территориях, увеличивается, объемы промысловой охоты в Байкальском регионе растут, пожары чаще всего становятся следствием незаконной вырубки лесов.

Итоговое оформление визуальных материалов в одну историю стало последним этапом работы над проектом. В созданном оформлении была учтена эстетика для привлечения внимания и соответствия теме проекта, ясность представленной информации для легкого восприятия, степень детализации этническими элементами и иллюстрациями для объединения визуализаций в истории. Дополнительно в проект была добавлена мультимедийность с помощью инструментов создания интерактивных графиков и их анимации. Динамические данные, анимированные в программе TouchDesigner, наиболее полно показали проблему охоты на Байкале и позволили произвести яркое визуальное впечатление.

Формирование материалов на основе методов инфографики и визуализации данных позволило применить компьютерные технологии для создания аналитических историй о природе, животном мире и важных проблемах Байкальского региона.

1. Оценка состояния и использования лесов Байкальской природной территории в 2006 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: http://www.geol.irk.ru/baikal/baikal/bulletins/forest_06/public/public.htm (дата обращения 22.08.2024)
2. О состоянии озера Байкал и мерах его охраны в 2015 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: http://www.geol.irk.ru/baikal/baikal/rep_2015/pdf/baikal2015_p1-2-4.pdf (дата обращения 22.08.2024)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ ЛОКОМОТИВА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОБУЧАЮЩЕГО ЧАТ-БОТА

Т.К. Кириллова, Ж. Нацагдорж
Иркутский государственный университет путей сообщения
kirillova_tk@irgups.ru, natsagdorj.j9999@gmail.com

Повышение объемов грузоперевозок в 2024 г. транзитом через Улан-Баторскую железную дорогу требует увеличения ее пропускной способности. Соответственно внедрение цифровых сервисов, включая предлагаемое решение в виде обучающего чат-бота будет способствовать уменьшению времени проведения технического осмотра, повышению качества обслуживания и безопасности при внештатных ситуациях.

В работе проанализирован процесс проведения технического осмотра. Продемонстрирована потенциальная польза для обслуживания подвижного состава от введения обучающего чат-бота. Основные преимущества внедрения обучающего чат-бота «Ремонт деталей локомотива»:

- не тратится дополнительное время на поиск печатного технологического режима, все это доступно онлайн;
- рабочие смогут онлайн получить ответы на вопросы по техническому осмотру локомотива;
- инженеры-стажеры будут самостоятельно обучаться всему, независимо от уровня знаний, изучать незнакомые технологические режимы, не беспокоя других специалистов;
- количество несоответствий, возникающих из-за недостатка знаний, будет значительно сокращено;
- в будущем можно будет готовить и передавать технологические режимы в видео формате в виде коротких видеороликов.

Проведение технических работ регламентируется инструкциями и ведением журналов ТУ-152, ТУ-28. Технологический инженер регламентирует перечень проводимых работ при проведении технического осмотра. Этапы его проведения показаны на рисунке 1.



Рис. 1. Проведения технического осмотра

По результатам проведения регламентных работ по ТО-2 проводится дальнейшая диагностика локомотива ТО-3 или в случае выявления поломок осуществляются ремонтные работы ТР-1.

В целях обеспечения пожарной безопасности принимающая локомотивная бригада обязана:

- проконтролировать наличие и исправность средств пожаротушения, автоматической пожарной сигнализации;
- визуально убедиться в отсутствии признаков нарушения электрических контактов, отсоединенных, незаизолированных и незакрепленных проводов или проводов с обгоревшей или поврежденной изоляцией, нетиповых плавких предохранителей (жучков);
- проверить состояние пожароопасных мест, очистив их от скопления масла, тряпок, ветоши, обтирочного материала и других горючих веществ.

В случае, когда при приемке локомотива в ремонтном локомотивном депо, ДСО или ПТО локомотивной бригадой обнаруживается неисправность, которая не может

быть устранена за время, предусмотренное на приемку локомотива, машинист должен поставить об этом в известность дежурного по эксплуатационному локомотивному депо, произвести запись неисправности в журнале формы ТУ-152. По распоряжению дежурного по эксплуатационному локомотивному депо, производится замена неисправного локомотива.

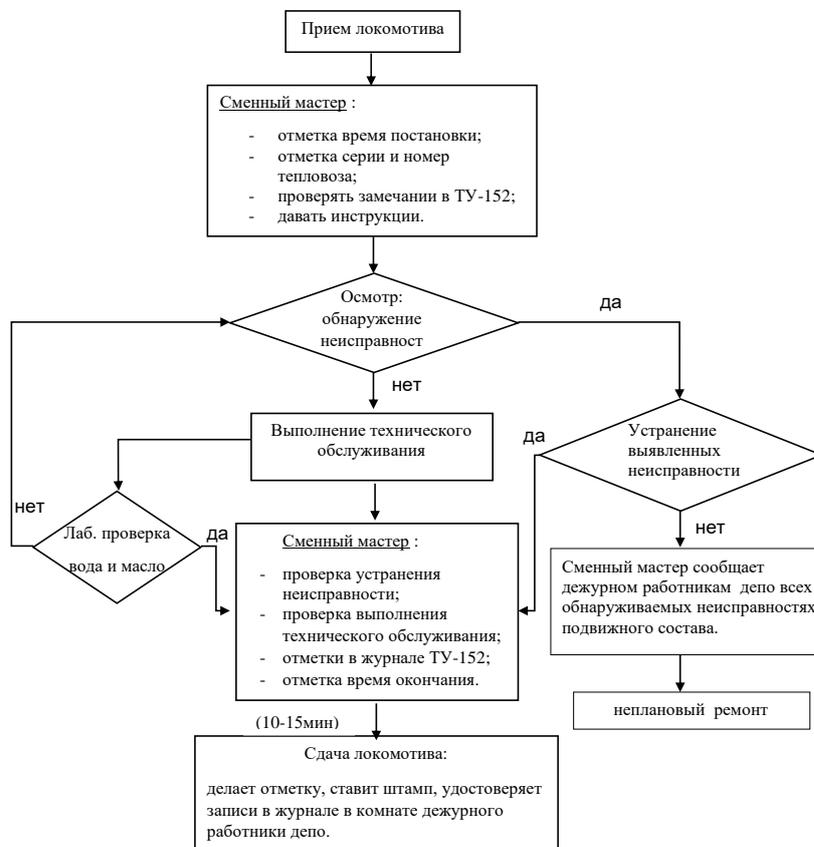


Рис. 2. Алгоритм работы ТО-2 в ПТО

Дежурный по эксплуатационному локомотивному депо обязан произвести запись о неисправности, в результате которой был отставлен локомотив, в настольный журнал дежурного по депо формы ТУ-1 в раздел о постановке локомотива на неплановый ремонт. Начальник эксплуатационного локомотивного депо, начальник ДСО или начальник ремонтного локомотивного депо и их заместители должны производить детальный анализ причин каждого повторного ремонта локомотивов с принятием мер по предупреждению случаев замены локомотива при приемке локомотивной бригадой.

Внедрение цифровых сервисов позволяют значительно повысить качество и быстрдействие всех этапов работ. Разработка и внедрение предлагаемого чат-бота «Ремонт деталей локомотива», как дополнительного помощника в проведении технического осмотра на Улан-Баторской дороге в долгосрочной перспективе в значительной степени повысит лояльность работников, упростит взаимодействие, позволит выстраивать новые модели по оценке технического состояния локомотивов. Ремонтный персонал, машинисты, инструкторы смогут в режиме «онлайн» дать рекомендации по устранению неисправности в пути следования. Чат-бот будет интегрирован с базами данных автоматизированных систем ОАО «УБЗД» такими как АСУ Т, АСУ ПРИГ, АС ЭП МВПС, АСУТ НБД и т. д.

1. Перспективные проекты в Монголии. АО «Издательский дом «Гудок». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://1520international.com/content/2024/avgust-2024/a-key-transport-artery/>(дата обращения: 18.10.2024).

2. Технологическая инструкция. Техническое обслуживание электровозов и тепловозов в эксплуатации. Утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 01 апреля 2014г № 814 р.
3. Перфильева Е.В., Мелехова А.Д., Благоразумова О.В., Подвербный В.А. Программа «Элегия» для принятия решения в условиях риска. Фундаментальные и прикладные исследования в условиях геополитической нестабильности. Материалы XXIII Всероссийской научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2023. С. 11-14.
4. Программа технической модернизации и развития АО «УБЖД» на период 2014 – 2020 годы / ОАО «ИЭРТ», ИПИИ «Иркутскжелдорпроект» – филиал ОАО «Росжелдорпроект», 2013. 5 этап. Том 2. ПЗ. Часть 1. 263 с.
5. Бурэн-Итгэл Г. Повышение эффективности использования автономных локомотивов для грузоперевозок на железных дорогах Монголии [Текст] дис. ... канд. техн. наук: 2.4.2 /Гантумур Бурэн-Итгэл Московский энергет. институт М. – 2022. – 131 с.
6. Мунгунхуяг Г., Кириллова Т.К. Проектирование мобильного приложения мониторинга технического состояния локомотива и ремонтных работ ТО-2 на Улан-Баторской железной дороге. Молодая наука Сибири. 2023. № 3 (21). С. 123-129.
7. Балжир Мунхдэлгэр Организация и развитие грузовых перевозок на сети Монгольской железной дороги : диссертация кандидата технических наук. М.: МГУПС (МИИТ), 2015. 129 с

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СЕРВИСОВ*

М.С. Климонов

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

Одной из отличительных особенностей геопортала ИДСТУ СО РАН [1] является возможность доступа и работы с уникальными геопространственными данными и веб-сервисами стандарта OGC WPS для их обработки и отображения. На геопортале существует уже более 200 сервисов, которые предназначены как реализации функциональности для конкретных прикладных областей (ботаника, метеорология и др.), так и для выполнения универсальных задач таких как, загрузка данных и их отображение. Основными пользователями геопортала являются учёные, которым для работы необходимо вызвать как отдельные сервисы, так и их последовательности. Часто ученые не знают о том, какие сервисы разрабатывают и используют их коллеги. Для решения этой проблемы было принято решение о разработке и внедрении системы для рекомендации релевантных для их предметной области веб-сервисов. Был проведен обзор основных видов рекомендательных систем.

В качестве основной технологии была выбрана коллаборативная фильтрация, её суть заключается в том, что она анализирует взаимодействие пользователей и сервисов для создания рекомендаций через исследование предпочтений пользователей. Предполагается, что набор используемых сервисов зависит от предпочтений и предметной области пользователя. В результате чего возникает подзадача определения предметной области (области исследования) пользователей по анализу их вызовов сервисов. В качестве основного метода для определения схожести поведения пользователей (предпочтений) был применен метод ближайших соседей.

Так в рекомендательной системе каждого пользователя можно описать с помощью вектора частот вызовов каждого сервиса. Нормализуем значения данного вектора, чтобы они лежали на отрезке $[0,1]$:

$$q_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{k=0}^m c_{ik}}$$

где c_{ij} - количество вызовов j сервиса i пользователем, m - количество сервисов на геопортале. Таким образом каждого пользователя можно описать вектором $q_i = \{q_{i1}, \dots, q_{im}\}$. Далее пользователи геопортала, чьи предметные области известны, были размечены. С помощью метода кросс-валидации полученные данные были разбиты на произвольные наборы тренировочных и тестовых данных. Далее с помощью библиотечного метода классификации на основе метода ближайших соседей для каждого набора была проведена оценка ошибки классификации с использованием встроенных методов.

В результате проведенной работы было установлено, что точность классификации, определения предметной области исследований ученого по вектору частот вызовов, составляет 100%. Таким образом можно сделать вывод о том, что пользователи из одной предметной области обладают схожими интересами в части использования сервисов на геопортале.

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

* Работа выполнена в рамках гранта Минобрнауки России № 075-15-2024-533 на выполнение крупного научного проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды».

ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДБОР ОГРАНИЧЕНИЙ, ОСЛАБЛЯЮЩИХ ТРУДНЫЕ ПРИМЕРЫ ЗАДАЧИ ПРОВЕРКИ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ БУЛЕВЫХ СХЕМ*

В.С. Кондратьев

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

Быстрое развитие современных полупроводниковых технологий стимулирует рост актуальности такой области как автоматизация проектирования электронных систем (EDA), и, как следствие, алгоритмов, используемых для верификации булевых схем [1, 2]. Одной из важнейших задач в рамках EDA является задача проверки логической эквивалентности (LEC) [3,4], которая заключается в ответе на вопрос, реализуют ли две логические схемы S_1 и S_2 одну и ту же функцию:

$$f_1: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^m, f_2: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^m: f_1 \cong f_2.$$

Для решения LEC-задач используются два основных метода: двоичные диаграммы решений [5] и сведение к задаче о булевой выполнимости (SAT). Сведение LEC к SAT осуществляется эффективно за счет преобразований Цейтина [6], после чего к полученной конъюнктивной нормальной форме (КНФ) применяется полный SAT-решатель. Схемы являются эквивалентными тогда и только тогда, когда построенная КНФ невыполнима. На практике современные SAT-решатели, основанные на алгоритме CDCL [7], часто сталкиваются с трудностями при решении таких задач. Особенно сложными оказываются задачи, связанные с проверкой эквивалентности различных алгоритмов умножения. В связи с этим возникает необходимость улучшения эффективности алгоритма CDCL для этого класса задач.

Одним из способов решения подобных крайне сложных экземпляров SAT, является декомпозиция исходной задачи на более простые подзадачи. Существует несколько способов построения подобных декомпозиций, к примеру, Cube-and-Conquer [8] или метод псевдобулевых интервалов, использующийся в этом исследовании. Декомпозиция данного типа была впервые предложена Семёновым А.А. и Чухаревым К.И., была описана ими в личной переписке с автором данного исследования, а ее краткое описание приводится в этой работе с их согласия. На данный момент подготовлена журнальная статья, содержащая детальное представление этого метода. Идейно данный метод декомпозиции схож с методом, описанным в [9]. Метод псевдобулевых интервалов задает ограничения над переменными, кодирующими вход схемы, описанным далее образом.

Пусть есть схема S , построенная по ней КНФ C и $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – булевы переменные, кодирующие вход схемы. Множество всех таких целых неотрицательных чисел r , что имеет место

$$0 \leq a \leq r < b \leq 2^n, \quad (1)$$

будем называть интервалом и обозначать через $[a, b)$. Несложно видеть, что число r принадлежит интервалу $[a, b)$ тогда и только тогда, когда коэффициенты двоичного представления этого числа удовлетворяют следующему псевдо-булевому неравенству:

$$a \leq x_1 + 2 * x_2 + \dots + 2^{n-1} * x_n < b. \quad (2)$$

Данное неравенство может быть эффективно закодировано в КНФ за счет использования стандартной техники кодирования псевдо-булевых ограничений [10]. Таким образом, становится возможным декомпозировать задачу на более простые подзадачи, задавая границы интервалов так, чтобы они не пересекались и

* Исследование выполнено в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Теоретические основы, методы и высокопроизводительные алгоритмы непрерывной и дискретной оптимизации для поддержки междисциплинарных научных исследований» поддержке 121041300065-9.

удовлетворяли (1). Поскольку любое число из $[0, 2^n)$ принадлежит одному из построенных интервалов, то решение всех подзадач из построенной таким способом декомпозиции дает решение исходной задачи:

- 1) если все КНФ в декомпозиции оказались невыполнимыми, то и исходная КНФ невыполнима;
- 2) если при решении одной из подзадач декомпозиции был получен набор значений переменных, обращающий формулу в 1, то этот набор значений актуален и для исходной задачи.

Описанный метод естественным образом подходит для параллельного решения подзадач из декомпозиции. Важно отметить, что при уменьшении размера каждого интервала, как правило, подзадачи становятся менее сложными. Однако время, необходимое для решения каждой подзадачи, заранее неизвестно и может значительно варьироваться от одной подзадачи к другой. Таким образом, актуальным становится вопрос выбора числа интервалов, на которые будет разбиваться исходная задача. Это обусловлено необходимостью равномерной загрузки ресурсов и желанием пользователя отслеживать прогресс решения. Например, декомпозиция крайне сложной задачи на малое число подзадач не даст возможности увидеть прогресс решения, так как подзадачи не будут решены за разумное время. Декомпозиция же на слишком большое число подзадач приведет к тому, что подзадачи станут нецелесообразно простыми и «накладные расходы» (построение ограничений, пересылка задачи процессору, запуск решателя) будут занимать значительную часть времени решения.

В рамках данного исследования предложена эвристика динамического изменения числа интервалов в процессе решения для формирования подзадач, по сложности не превышающих заданный пользователем уровень (например, в виде ограничения на максимальное время решения). Эвристика заключается в том, что пользователь задает исходное число интервалов k , верхнюю границу времени решения каждой подзадачи t и делитель d . Алгоритм получает на вход КНФ C , построенную по булевой схеме, строит первоначальную декомпозицию из k подзадач C_1, C_2, \dots, C_k и формирует очередь из подзадач для дальнейшего решения в параллельном режиме при помощи SAT-решателя. Решатель запускается на подзадаче C_i с ограничением по времени решения t , в случае достижения которого решение подзадачи останавливается, а закодированный интервал равномерно делится на d новых интервалов, формируя новые КНФ. Новые подзадачи добавляются в очередь решения. Как уже было отмечено, решение всех подзадач из декомпозиции дает решение исходной задачи. Это справедливо и для случая, когда существующая задача, для которой решатель достиг заданного предела, декомпозируется с использованием интервалов меньшего размера.

В качестве тестовых задач были выбраны задачи, кодирующие попарную эквивалентность четырех алгоритмов умножения: умножение столбиком, алгоритм Карацубы [11], умножитель Дадда [12] и дерево Уоллеса [13]. Все схемы алгоритмов кодировали умножение двух 16-битных чисел. ЛЕС-задачи конструировались следующим образом: по булевым схемам S_A и S_B для произвольных алгоритмов умножения A и B строилась т.н. «майтер-схема» $S_{A \oplus B}$, в которой одноименные входы исходных схем объединены, а одноименные выходы этих схем соединены попарно через функцию XOR. Схема $S_{A \oplus B}$ кодировалась в КНФ $C_{A \oplus B}$ и дополнялась условием, что хотя бы один из XOR'ов над выходами должен быть истинным. Такая формула оказывается невыполнимой тогда и только тогда, когда схемы эквивалентны. В противном случае, найдется набор значений переменных, кодирующих вход схем, при котором алгоритмы дают разные результаты.

Соответственно, были получены шесть КНФ: С–Д (Столбик и умножитель Дадда), С–К (Столбик и алгоритм Карацубы), С–У (Столбик и дерево Уоллеса), Д–К (умножитель Дадда и алгоритм Карацубы), Д–У (умножитель Дадда и дерево Уоллеса)

и К–У (алгоритм Карацубы и дерево Уоллеса). Все рассматриваемые задачи являются крайне трудными и их решение при помощи однопоточного решателя может занимать десятки дней. Каждая из КНФ подавалась на вход параллельному алгоритму, использующему в качестве SAT-решателя `cadical_1.9.5`¹, с различными значениями начального числа интервалов, верхней границы времени решения одной подзадачи и параметра d . Вычислительные эксперименты проводились на одном узле кластера «Академик В.М. Матросов» ИДСТУ СО РАН [14], оснащенный двумя 18-ядерными процессорами Intel Xeon E5-2695 v4 и 128 ГБ оперативной памяти. Результаты вычислительных экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты полного решения декомпозиций, построенных по методу псевдобулевых интервалов с различными входными параметрами параллельного алгоритма. Использовалась эвристика динамического изменения числа интервалов. Время указано в секундах.

Задача	k	t	d	Общее число решенных задач	Суммарное время решения подзадач	Реальное время работы алгоритма
С–Д	1000	5000	100	1000	2411709	69944
	1000	100	100	100600	783965	42939
	35	100	35	43995	907864	26394
С–К	1000	5000	100	4700	4139034	119055
	1000	100	100	101000	1442684	51079
	35	100	35	44135	1468058	42299
С–У	1000	5000	100	45400	4280736	123164
	1000	100	100	100700	969986	44766
	35	100	35	43960	1151879	33726
Д–К	1000	5000	100	11100	4434628	126988
	1000	100	100	101000	1621835	53739
	35	100	35	44135	1722140	49549
Д–У	1000	5000	100	53100	4741728	136697
	1000	100	100	100900	1082658	45925
	35	100	35	44065	1321811	38106
К–У	1000	5000	100	87100	6337451	184732
	1000	100	100	101000	1698786	55273
	35	100	35	44135	1830872	52662

Кратко опишем таблицу 1. В первом столбце указана пара алгоритмов умножения, ЛЕС которых закодирована в КНФ. Во втором столбце приведено число

¹ <https://github.com/arminbiere/cadical>

интервалов в начальной декомпозиции. В третьем столбце – ограничение времени решения одной подзадачи из декомпозиции. В четвертом – число интервалов, на которое разбивается подзадача, для которой решатель не смог получить ответ при заданном ограничении по времени. В пятом столбце указано общее число обработанных подзадач, включая те, решение которых было прервано. В шестом столбце указано суммарное время решения всех подзадач из декомпозиции, включая прерванные. В седьмом столбце приведено реальное время работы параллельного алгоритма, использующего 35 ядер для вычислений и одно ядро для работы управляющего процесса, за которое соответствующая исходная задача была решена.

По результатам экспериментов можно сделать вывод об актуальности данного подхода. Продемонстрировано существенное влияние выбора начальных параметров алгоритма как на суммарное время решения подзадач, так и на реальное время работы алгоритма. Использование разработанной эвристики позволяет решать все подзадачи из декомпозиций описанного типа относительно рассмотренных классов КНФ, эффективно используя доступные вычислительные ресурсы.

1. S. Arora and B. Barak. *Computational Complexity: A Modern Approach*. Cambridge University Press, 2009.
2. O. Goldreich. *Computational Complexity: A Conceptual Perspective*. Cambridge University Press, 2008.
3. A. Kuehlmann and F. Krohm. Equivalence checking using cuts and heaps. In *DAC*, pp. 263–268, 1997.
4. P. Molitor and J. Mohnke. *Equivalence Checking of Digital Circuits: Fundamentals, Principles, Methods*. Springer Science & Business Media, 2007.
5. R.E. Bryant. Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation. In *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-35, no. 8, pp. 677-691, Aug. 1986.
6. G. S. Tseitin. On the complexity of derivation in propositional calculus. *Studies in Constructive Mathematics and Mathematical Logic, Part II*, pp. 115–125, 1970.
7. J. Marques-Silva, I. Lynce, and S. Malik. Conflict-driven clause learning SAT solvers. In *Handbook of Satisfiability. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol. 185, IOS Press, pp. 131-153, 2009.
8. M. J. H. Heule, O. Kullmann, S. Wieringa, and A. Biere. Cube and conquer: Guiding CDCL SAT solvers by lookaheads. In *HVC*, pp. 50-65, 2012.
9. Semenov A., Chukharev K., Tarasov E., Chivilikhin D., Kondratiev V. Estimating the hardness of SAT encodings for Logical Equivalence Checking of Boolean circuits. [arXiv:2210.01484](https://arxiv.org/abs/2210.01484) [cs.AI], 2022.
10. N. Eén and N. Sörensson. Translating Pseudo-Boolean constraints into SAT. *Journal on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation*, 2(1-4):1–26, 2006.
11. Карацуба А., Офман Ю. Умножение многозначных чисел на автоматах. *Докл. АН СССР*, 145:2, с. 293–294, 1962.
12. L. Dadda. Some schemes for parallel multipliers. *Alta Frequenza*, 34(5):349–356, 5, 1965.
13. C. S. Wallace. A Suggestion for a Fast Multiplier. In *IEEE Transactions on Electronic Computers*, vol. EC-13, no. 1, pp. 14-17, Feb. 1964.
14. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс]: сайт. Иркутск: ИДСТУ СО РАН. – URL: <http://hpc.icc.ru> (дата обращения 24.11.2024)

ОБУЧАЮЩАЯ ИГРА «ТИПЫ ДИАГРАММ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Е.С. Конова, А.Г. Балахчи
Иркутский государственный университет

Современные технологии открывают новые увлекательные способы обучения, включая игровые методы, которые делают процесс более динамичным и увлекательным, повышая мотивацию участников. Визуальное представление учебных материалов в виде игры способствует лучшему усвоению материала, поэтому разработка образовательных игр становится актуальной задачей.

Создание визуальных учебных материалов сегодня активно использует технологии дополненной реальности (AR). Многие учебные заведения применяют AR и VR для обогащения уроков, что повышает интерес к темам и способствует быстрому усвоению. Также популярна визуализация данных на интерактивных сайтах, обеспечивающих наглядность. С увеличением применения информационных технологий игровой подход к обучению стал проще в реализации, решая проблемы заинтересованности и удержания внимания учащихся. Это решает проблему заинтересованности обучающихся и помогает удерживать их внимание на материале.

Мы разработали обучающую карточную игру «Типы диаграмм» для школьников и студентов, которая помогает запомнить основные типы диаграмм и научиться их строить с помощью специальных библиотек. Игра состоит из карточек с вопросами и заданиями, при наведении на которые пользователь получает правильные ответы и доступ к электронному справочнику с материалами по диаграммам. Мы проанализировали подходящие программные средства для разработки игры и выбрали визуальный редактор Figma для дизайна карточек. Для создания сайта с необходимыми материалами мы использовали язык JavaScript, так как он прост в использовании и популярен среди веб-разработчиков, а также имеет множество полезных библиотек и фреймворков для создания интерактивного контента.

Игра состоит из карточек с диаграммами и заданиями, направленными на изучение типов диаграмм, их особенностей и оформления. Участники взаимодействуют с карточкой-гистограммой, поднимаясь вверх за правильные ответы и спускаясь за неверные. Для проверки ответов нужно навести камеру телефона на карточку с вопросом, после чего на экране появляется ответ с пояснениями. Игроки по очереди выбирают карточки, откладывая использованные. Побеждает тот, кто первым достигнет вершины, набрав необходимое количество очков. Если ни один игрок не достиг вершины, выигрывает тот, кто был на высшем уровне гистограммы.

1. DataYoga. Доступно по ссылке: <https://datayoga.ru/vizcards> (дата обращения: 15 ноября 2024).
2. PolicyViz. Графическая непрерывность: настольная версия. Доступно по ссылке: <https://policyviz.com/2014/11/11/graphic-continuum-desktop-version/> (дата обращения: 15 ноября 2024).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА СОСТАВНОЙ СИСТЕМЫ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ И ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ МЕТОДАМИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ*

Д.Е. Копылов
Иркутский государственный университет
it-daniil@yandex.ru

Моделирование процессов, которые состоят одновременно из дифференциальных уравнений в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), является востребованной, но сложной задачей. Составные системы возникают при моделировании ректификационных колонн [1], также можно выделить моделирование водных каналов, транспортных потоков, динамики популяции. В перечисленных областях возникают модели, которые можно записать как составную систему гиперболических уравнений и ОДУ [2]. При моделировании могут быть неизвестны некоторые параметры, но при этом есть возможность провести эксперимент над реальным объектом или по нему имеются накопленные данные. Как правило, такие параметры лежат на границе.

Решить задачу восстановления параметра можно как задачу оптимального управления (ОУ). Восстанавливаемый параметр в роли управления, а в качестве функционала выступает квадрат отклонения состояния управляемой системы от заданного:

$$J(u) = \int_S (x(s, t_1) - x^1(s))^2 ds + \int_S (y(s, t_1) - y^1(s))^2 ds \rightarrow \min_{u \in U};$$
$$\frac{\partial x}{\partial t} - c_1 \frac{\partial x}{\partial s} = B_{11}x + B_{12}y + b_1, \quad \frac{\partial y}{\partial t} + c_2 \frac{\partial y}{\partial s} = B_{21}x + B_{22}y + b_2;$$
$$\frac{dx(s_1, t)}{dt} = g_1 \cdot (y(s_1, t) - x(s_1, t)), \quad \frac{dy(s_0, t)}{dt} = u \cdot (x(s_0, t) - y(s_0, t));$$
$$x(s, t_0) = x^0(s), y(s, t_0) = y^0(s), (s, t) \in S \times T, S = [s_0, s_1], T = [t_0, t_1].$$

Здесь x, y – неизвестные функции, $B_{ij} = B_{ij}(s, t), b_i = b_i(s, t), g_1 = g_1(t), c_i$ – заданные функции и параметры, $x^0(s), y^0(s), x^1(s), y^1(s)$ – состояние системы в начальный и конечный момент времени, $u = u(t) \in U$ – управление. Решение задачи усложняется следующими обстоятельствами: 1) функционал квадратичный; 2) смешивание состояний в ОДУ.

Для данной постановки задачи ОУ было адаптировано два классических алгоритма [3] (метод линеаризованного принципа максимума, итерационный метод на основе принципа максимума). Алгоритм был реализован на языке программирования Python. Был проведен численный эксперимент, сравнивающий подходы, решающие задачу ОУ с решением задачи просто, как задачи математического программирования.

1. Demidenko N. Optimal control of thermal engineering processes in tube furnace. Chem. Petrol. Eng. 2006. Val. 142. P. 128–130.
2. Arguchintsev A., Poplevko V. An Optimal Control Problem by a Hybrid System of Hyperbolic and Ordinary Differential Equations. Games. 2021. Vol. 12. No. 23. DOI: 10.3390/g12010023.
3. Васильев О.В. Лекции по методам оптимизации. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 1994 г. 344 с. ил.

* Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Иркутского государственного университета для молодых ученых № 091-24-301 «Разработка методов решения задач оптимального управления составными системами гиперболических и обыкновенных дифференциальных уравнений»

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИЗ БИБЛИОТЕК ЯЗЫКА PYTHON С МЕТОДОМ УСЛОВНОГО ГРАДИЕНТА

Д.Е. Копылов, М.А. Карпенков, М.В. Шурик
Иркутский государственный университет
it-daniil@yandex.ru, karpenkov.2004@mail.ru, marriamnii@gmail.com

В данном исследовании проводится анализ библиотек языка программирования Python с точки зрения их применения для решения задач оптимального управления. В предыдущей работе [1] авторы рассмотрели три библиотеки и провели их сравнительный анализ. В настоящей работе представлен алгоритм численного решения задачи оптимального управления, основанный на методе условного градиента [2], и выполнено его сравнение с инструментами библиотек, использующих методы нелинейного программирования и специализированные решатели (в данном случае IPOPT).

Разработанный алгоритм (Spec) состоит из примерно 70 строк программного кода и 10 строк для настройки параметров задачи. Показано, что он решает рассмотренные задачи не менее эффективно, чем алгоритмы, реализованные в специализированных библиотеках. Эти алгоритмы в среднем используют 40 строк кода для настройки параметров. Значимость информации о количестве строк кода обусловлена тем, что библиотеки предназначены для обеспечения быстрого и удобного использования. Однако, для некоторых задач оптимального управления возможна разработка простых и эффективных реализаций без обращения к специализированным библиотекам.

Были решены две задачи из области биологии, описанные в [3]. Эти задачи иллюстрируют приложение теории оптимального управления к моделированию биологических процессов.

Первая задача:
$$J(u) = \int_0^2 [3u(t) + u^2(t) - 2x(t)] dt \rightarrow \min;$$
$$\dot{x} = x(t) + u(t), x(0) = 5;$$
$$0 \leq u(t) \leq 2, \quad t \in T = [0, 2].$$

Вторая задача:
$$J(u) = -x(4) + \int_0^4 u^2(t) dt \rightarrow \min;$$
$$\dot{x} = x(t) + u(t), x(0) = 0;$$
$$0 \leq u(t) \leq 5, \quad t \in T = [0, 4].$$

Для задач известно аналитическое решение [3].

В рамках вычислительного эксперимента получены результаты, представленные в Таблице 1. Отметим, что при реализации всех рассмотренных алгоритмов найдены решения, близкие к аналитическому. Решения представлены на рис. 1.

При решении первой задачи наиболее эффективным оказался специализированный метод (Spec), который продемонстрировал значительное преимущество в скорости по сравнению с другими подходами.

Вторая задача была успешнее решена методами из библиотек. Заметим, что в библиотеках применяется автодифференцирование, а при реализации метода условного градиента (Spec) был использован метод Эйлера. В дальнейшем планируется использовать другие методы численного решения дифференциальных уравнений.

Ещё одной особенностью данного исследования является то, что метод (Spec) был реализован на языке программирования Python, а не на низкоуровневом языке, как это сделано в библиотеках. В представленной реализации этот метод является больше учебным алгоритмом. Для его практического применения планируется реализация

алгоритма на низкоуровневом языке и модификация численных схем для управляемой системы задач.

Задача	Ан.реш. J^*	Gekko [4]		Control [5]		CasADi [6]		Spec	
		Время	J	Время	J	Время	J	Время	J
Задача 1	-68.193	2.325	-71.139	2.681	-67.422	40.469	-69.185	0.147	-68.194
Задача 2	-192.924	1.986	-215.655	79.396	-192.976	50.826	-180.820	48.708	-173.661

Табл. 1. Результаты работы подходов

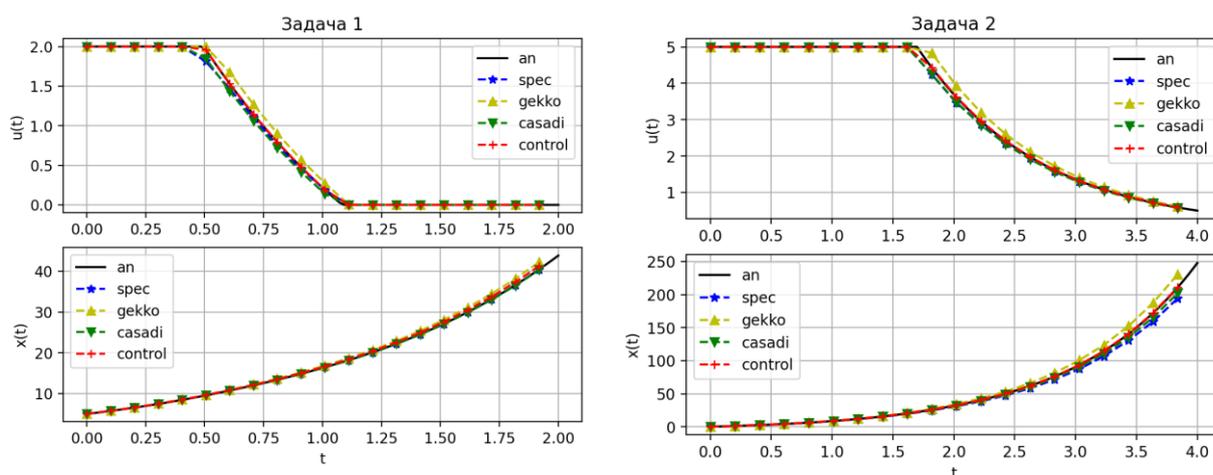


Рис. 1. Графики управления (верхние) и состояния (нижние)

В результате проведённого исследования можно сделать вывод, что использование языка программирования Python для решения задач оптимального управления является перспективным подходом. В большинстве случаев применение библиотечных методов может обеспечить эффективное решение типовых задач. Однако для специфических задач может потребоваться разработка собственных методов и алгоритмов, учитывающих особенности задач. Python может служить подходящим инструментом для создания таких методов.

1. Копылов Д.Е., Карпенков М.А., Щурик М.В. Обзор библиотек языка Python для решения задач оптимального управления. Динамические системы и компьютерные науки: теория и приложения (DYSC 2024): материалы 6-й Международной конференции, Иркутск, 18–23 сентября 2024 года. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2024. С. 117-120. DOI: 10.26516/978-5-9624-2309-8.2024.1-224.
2. Васильев О.В. Лекции по методам оптимизации. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1994. 344 с. ил.
3. Lenhart S.M., Workman J. T. Optimal Control Applied to Biological Models. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC, 2007. 261 p. DOI: 10.1201/9781420011418
4. Beal L.D.R., Hill D., Martin R.A., Hedengren J.D. GEKKO Optimization Suite. Processes. 2018. Vol. 6. No. 8. DOI: 10.3390/pr6080106.
5. Fuller S., Greiner B., Moore J., Murray R. , van Paassen R. Yorke R. The Python Control Systems Library (python-control). CDC. 2021. DOI: 10.1109/CDC45484.2021.9683368.
6. Andersson J., Akesson J., Diehl M. CasADi — A symbolic package for automatic differentiation and optimal control. Recent Advances in Algorithmic Differentiation . 2012. P. 297–307. DOI: 10.1007/978-3-642-30023-3_27.

ГРАФОВЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЗАДАЧЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАКЕТА ДОКУМЕНТОВ*

Д.Е. Копылов, А.А. Михайлов

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
it-daniil@yandex.ru, mikhailov@icc.ru

Графовые нейронные сети (GNN) используются для задач, требующих учет структуры объекта исследования, представленного в виде графа [1]. Такую структуру можно получить и для страницы документа [2-4]. GNN характеризуется следующим: структурой графа, с которой она работает; структурой, которая получается на выходе; как любая нейронная сеть, своей архитектурой. Немаловажным вопросом является процесс обучения, в частности, выбор функции потерь.

GNN работает непосредственно с графами, записанными в виде матрицы. Граф характеризуется парой (V, E) , где V - множество узлов, E - множество ребер. В качестве узлов выступают векторы $v_i \in R^m, i = 1, 2, \dots, n$. Эти векторы могут быть получены из участков документа, в частности, регионов, строк, слов. Ребра между узлами, часто, представляют в виде лапласиана $L \in Z^{n \times n}$ и матрицы свойств для ребер $X \in R^{k \times l}$. Другой распространенный вариант использовать матрицу $A_1 \in R^{n \times n}$, ненулевые элементы которой характеризуют связь, а их значение свойство этой связи (имеет место использование тензоров $[A_1, A_2, \dots, A_l]$ для передачи вектора свойств ребер). Такие матрицы как правило разреженные и хранятся в компактном виде (массив троек из двух индексов и значения).

Для задачи восстановления макета документов есть различные способы построения графа. Самыми распространенными являются k-ближайших соседей и триангуляция Делоне. Для задачи классификации в данной работе используется метод k-ближайших соседей с параметром k=4 (при этом строго контролируется направление поиска каждого из соседей), в качестве расстояния вводится расстояние между блоками, а не их центром. В данной работе графы строятся на основе страниц из набора данных PubLayNet [5], который предобрабатывается (выделяются слова) с помощью OCR Tesseract.

Если на вход в GNN всегда подается граф, то выход будет зависеть от решаемой задачи. Выделяют три вида GNN в зависимости уровня абстракции. Первая задача на уровне графа (graph-level), на выходе получается величина, которая характеризует граф целиком. Такая задача решается в работе, когда классифицируются регионы документа. Работать можно на уровне ребер (edges-level) или даже узлов (nodes-level). Такая задача решается при выделении блоков: удаление связей между словами или строками, группировка слов в строки и строк в регионы.

В работе решается задача сегментации регионов текста и их классификация. Обе задачи рассматриваются отдельно. От сегментации страницы документа требуется удалить ребра построенного графа, которые соединяют узлы из разных регионов. От классификации требуется каждому региону поставить в соответствие класс (текст, заголовок, список, таблица, рисунок).

С точки зрения архитектуры GNN для задачи восстановления макета документа используются сверточные слои [6]. Математически слой представляет собой

$$H_j = \sigma_j(D^{-\frac{1}{2}}(A + I)D^{-\frac{1}{2}}H_{j-1}W_j).$$

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9)

Здесь H – матрица смежностей, D - диагональная матрица с элементами равными числу вершин исходящим из узла, W_j – матрица обучаемых весов на j -м слое, $H_0 = V$. Функция σ_j обеспечивает нелинейность. Как правило число сверточных слоев в задачах, связанных с документами, небольшое, поскольку имеет место эффект размывтия. На практике зарекомендовали себя архитектуры с 2-мя или 3-мя слоями.

Другим важным слоем в моделях GNN является выходной слой. Именно он и будет в конечном итоге отвечать за уровень абстракции. На выходе из модели получают агрегированные величины, в качестве агрегирующих функций используют среднее, максимальное и минимальное значение. На практике зарекомендовала себя выбор максимального значения.

Процесс обучения нейронной сети связан с минимизацией функции потерь. Функция потерь для GNN, работающих на уровне графа, являются стандартными, в отличие от тех, что работают на уровне узлов и ребер. На уровне узлов и ребер как правило выбирают агрегированную функцию потерь для всего множества ребер и узлов. Такой агрегированной функцией обычно выступает среднее.

Подводя итог, GNN нашли применения при решении задач сегментации и классификации блоков документов. Они учитывают структуру, которая явным образом прослеживается в документах.

1. Zhou J., Cui G., Hu S., Zhang Z., Yang C., Liu Z., Wang L., Li C., Sun M. Graph neural networks: A review of methods and applications. AI Open. 2020. Vol. 29. P. 57-81. DOI: 10.1016/j.aiopen.2021.01.001.
2. Maia A. L. L. M., Julca-Aguilar F. D., Hirata N. S. T. A Machine Learning Approach for Graph-Based Page Segmentation. SIBGRAP. Vol. 1018. P. 424-431. DOI: 10.1109/SIBGRAP.2018.00061.
3. Luo S., Ding Y., Long S., Poon J., Han S. C. Doc-GCN: Heterogeneous Graph Convolutional Networks for Document Layout Analysis. arXiv.org. 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2208.10970.
4. Dai HS., Li XH., Yin F., Yan X., Mei S., Liu CL. GraphMLLM: A Graph-Based Multi-level Layout Language-Independent Model for Document Understanding. ICDAR. 2024. Vol. 14804. P. 227-243. DOI: 10.1007/978-3-031-70533-5_14.
5. Zhong X., Tang J., Yepes A. PubLayNet: largest dataset ever for document layout analysis. ICDAR. 2019. P. 1015-1022. DOI: 10.1109/ICDAR.2019.00166.
6. Kips T. N., Welling M. Semi-Supervised Classification With Graph Convolutional Networks. ICML. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1609.02907.

РЕКОНФИГУРАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ НЕПОЛНОМ
ИЗМЕРЕНИИ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ И ВОЗМОЖНЫМИ ОТКАЗАМИ И
ВОССТАНОВЛЕНИЯМИ ДАТЧИКОВ

А.А. Косов

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

В докладе рассматривается линейная управляемая система

$$\dot{x} = Ax + bu. \quad (1)$$

$$y = \Gamma^T x \quad (2)$$

Здесь $x \in R^n$ – вектор состояния, $y \in R^l, l < n$ – вектор измеряемых переменных, A – постоянная матрица размером $n \times n$, Γ – постоянная матрица размером $n \times l$, $b \in R^n$ – постоянный вектор. Скалярное управление u формируется как выходная величина динамического регулятора

$$D(p)u = \sum_{k=1}^m C_k(p)y_k, \quad (3)$$

где $D(p) = p^m + d_{m-1}p^{m-1} + \dots + d_1p + d_0$ и $C_k(p) = c_{m-1}^{(k)}p^{m-1} + \dots + c_1^{(k)}p + c_0^{(k)}$ – полиномы от оператора $p = \frac{d}{dt}$ дифференцирования по времени с постоянными коэффициентами. Задача стабилизации системы (1) с неполным измерением (2) с помощью динамического регулятора (3) состоит в том, чтобы выбрать порядок регулятора $m > 0$ и коэффициенты полиномов $D(p)$, $C_k(p)$ так, чтобы нулевое решение замкнутой системы (1)-(3) было асимптотически устойчиво.

Теорема 1. *Если пара (A, b) полностью управляема, а пара (A^T, Γ) полностью наблюдаема, то при $m = n$ коэффициенты полиномов $D(p)$, $C_k(p)$ можно выбрать так, чтобы нулевое решение замкнутой системы (1)-(3) было асимптотически устойчиво и характеристическое уравнение имело любой наперед заданный набор корней, т.е. можно обеспечить заданную скорость затухания переходных процессов. Если же хотя бы одно из условий теоремы нарушается, то система (1), (2) может быть не стабилизируема регулятором (3) ни при каком $m > 0$. Необходимые и достаточные условия стабилизируемости состоят в том, что неуправляемая часть системы и ненаблюдаемая часть системы являются асимптотически устойчивыми.*

Рассмотрим теперь тот случай, когда в процессе функционирования датчики могут отказывать и восстанавливаться, так что в дискретные моменты времени вектор измерений может скачком изменяться и вместо (2) уравнение измерения принимает вид

$$y^{(\beta(t))} = (\Gamma^{(\beta(t))})^T x, \beta(t) \in \{\alpha, \dots, \omega\} \quad (2a)$$

где функция $\beta(t)$ кусочно-постоянна, правосторонне непрерывна и имеет на каждом конечном отрезке конечное число точек разрыва.

Теорема 2. *Если пара (A, b) полностью управляема, а все пары $(A^T, \Gamma^{(\beta)})$, $\beta \in \{\alpha, \dots, \omega\}$ полностью наблюдаемы, то при $m = n$ коэффициенты полиномов $D^{(\beta)}(p)$, $C_k^{(\beta)}(p)$ для динамических регуляторов типа (3) можно выбрать так, чтобы нулевое решение замкнутой системы (1), (2a) было асимптотически устойчиво при любых переключениях измерителей $\beta(t) \in \{\alpha, \dots, \omega\}$.*

О ТОЧНЫХ РЕШЕНИЯХ МНОГОМЕРНОГО ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ МОНЖА-АМПЕРА

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 обобщенное уравнение Монжа-Ампера для случая $n \geq 2$ пространственных переменных следующего вида:

$$\det H(u) = f(\mathbf{x}, u, \nabla u, \Delta u). \quad (1)$$

Здесь $u = u(\mathbf{x})$ – искомая функция от вектора пространственных переменных $\mathbf{x} \in R^n$, ∇u – оператор градиента и Δu – оператор Лапласа по $\mathbf{x} \in R^n$, $f(\mathbf{x}, u, \nabla u, \Delta u)$ – некоторая функция своих аргументов, $H(u)$ – матрица Гессе из вторых производных от искомой функции, $H(u) = \left\| \frac{\partial^2 u(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j} \right\|_{i,j=1,n}$. Уравнения типа (1) используются в дифференциальной геометрии, газовой динамике, геофизике и других областях при проведении как теоретических, так и прикладных исследований. Поэтому построение точных решений уравнений такого типа представляет несомненный интерес.

Теорема 1. Если при некотором $\sigma \neq 0$ функция $F(\xi)$ удовлетворяет обыкновенному дифференциальному уравнению

$$\left(\frac{\sigma}{2}\right)^n \left(\frac{dF}{d\xi}\right)^{n-1} \left[\frac{dF}{d\xi} + 2\xi \frac{d^2 F}{d\xi^2}\right] = \bar{f}\left(\xi, F, \frac{dF}{d\xi}, \frac{d^2 F}{d\xi^2}\right),$$

где функция $\bar{f}\left(\xi, F, \frac{dF}{d\xi}, \frac{d^2 F}{d\xi^2}\right)$ порождается правой частью уравнения (1) по формуле

$$\bar{f}\left(\xi, F, \frac{dF}{d\xi}, \frac{d^2 F}{d\xi^2}\right) = f\left(\xi, F, \sigma\xi \left(\frac{dF}{d\xi}\right)^2, \frac{\sigma}{2}\left(n \frac{dF}{d\xi} + 2\xi \frac{d^2 F}{d\xi^2}\right)\right),$$

то уравнение (1) имеет точное решение $u(\mathbf{x}) = F(\xi)$, $\xi(\mathbf{x}) = \frac{\sigma}{4} \|\mathbf{x}\|^2$.

В случае, когда правая часть уравнения (1) не зависит от производных искомой функции, уравнение (1) принимает вид

$$\det H(u) = f(\mathbf{x}, u). \quad (2)$$

Теорема 2. Уравнение (2) имеет точное решение $u(\mathbf{x}) = F(\xi)$, $\xi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4}(\mathbf{x}, A\mathbf{x})$, где A – произвольная симметричная невырожденная матрица, а функция $F(\xi)$ является решением обыкновенного дифференциального уравнения

$$\det A \left(\frac{dF}{d\xi}\right)^{n-1} \left[\frac{dF}{d\xi} + 2\xi \frac{d^2 F}{d\xi^2}\right] = f(\xi, F).$$

В докладе приводится ряд примеров точных решений уравнений (1) и (2) для различных случаев задания стоящих в правой части функций.

Рассматривается также задача построения точных решений для нестационарных аналогов обобщенного уравнения Монжа-Ампера.

ЛИНЕЙНЫЕ ЭПИДЕМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ НА ПРИМЕРЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАЛЯРИИ*

Н.О. Косьянов

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

Как известно для описания распространения заболеваний, передающихся человеку от животных и насекомых, могут применяться модели с линейной по состоянию системой управления. Здесь рассматривается одна из возможных моделей распространения малярии, получены оценки для параметров модели на основании данных Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), а также предложен метод для поиска оптимального управления в задаче оптимального управления с линейной системой.

Рассмотрим линейную одновирусную модель SIRD (Восприимчивый, Зараженный, Выздоровевший, Умерший) и обозначим за $S(t), I(t), R(t), D(t)$ – доли восприимчивых, инфицированных и выздоровевших в популяции. В том случае изменение состояний системы SIRD, на некотором временном интервале $T = [t_0, t_1]$, можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(u(t), t), \\ x(t_0) = x_0. \end{cases} = \begin{matrix} I \\ S \\ R \\ D \end{matrix} \begin{cases} \dot{x}_1(t) = \alpha(t)x_2(t) - (\beta + \gamma(t))x_1(t) - u(t), \\ \dot{x}_2(t) = -\alpha(t)x_2(t), \\ \dot{x}_3(t) = \beta x_1(t) + u(t), \\ \dot{x}_4(t) = \gamma x_1(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $x(t_0) = x_0$, $u(t) \in U$, $\alpha(t)$ – параметр интенсивности распространения вируса \mathcal{V} , $\gamma(t)$ – параметр смертности, β – параметр частоты самостоятельного выздоровления заболевших (без медицинского вмешательства). Согласно статистическим данным [2] замечен тренд на снижение параметров $\alpha(t)$ и $\gamma(t)$, а β можно считать постоянным. Для оценки параметров $\alpha(t)$, $\gamma(t)$ и β был применен метод наименьших квадратов (МНК) для данных за период с 1995 года по 2023 (см. табл. 1).

Целевой функционал задачи имеет следующий вид:

$$J(x, u, t) = \int_T \left[\frac{c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t)}{f(x_1(t), x_2(t))} - \frac{c_3 x_3(t)}{g(x_3(t))} \right] dt + \frac{c_4 x_4(t_1)}{\varphi(x_4(t_1))}. \quad (2)$$

Здесь коэффициенты $c_i \geq 0$, $i = \overline{1, n}$ рассматриваются как затраты (или в случае с c_3 бонус) связанные с каждой их групп граждан. Коэффициенты целевого функционала для задачи распространения малярии представлены в таблице 1.

– **Таблица 1. Оценки параметров эпидемической модели распространения малярии**

Параметр	Оценка	Описание
$\alpha(t)$	$10^{-4}(7t + 763)$	интенсивность заражения граждан малярией
β	$10^{-4}(2t + 67)$	частота смертей заболевших граждан
$\gamma(t)$	0,015	частота выздоровлений заболевших граждан
c_1	2 750	стоимость содержания заболевших граждан

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 24-41-03004.

c_2	100	стоимость обеспечения безопасности восприимчивых граждан
c_3	300	доход от использования невосприимчивых к вирусу граждан
c_4	10 000	затраты, связанные со смертью граждан

Под управление в задаче (1-2) понимается $u(\cdot) \in \mathcal{U} = \{u(\cdot) \in L_\infty^r \mid u(t) \in U\}$, $\forall t \in T$. Тогда решением соответствующей эпидемической задачи является

$$u^* = \operatorname{argmax}\{J(x, u, t) \mid u(\cdot) \in \mathcal{U}\}. \quad (3)$$

Поскольку эпидемическая задача распространения малярии относится к классу задач оптимального управления с линейной системой управления (1-2) и выпуклым функционалом Больца, то поиск её решения проводился с помощью метода Игольчатого варьирования [3, 4, 5], основанном на принципе максимума Понтрягина.

1. Brauer F., Castillo-Chavez C. *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. Texts in Applied Mathematics. Springer. 2010. P. 345–393.
2. World malaria report 2023. Geneva: World Health Organization. 2023. P. 6–28.
3. Любушин А. А., Черноусько Ф. Л. Метод последовательных приближений для расчета оптимального управления. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1983. №2. С. 147–159.
4. Васильев О. В. Лекции по методам решения задач оптимизации // Иркутский государственный университет. Иркутск, 1994.
5. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. С. 410–460.

ОБ ОДНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧЕ С ВЫРОЖДЕНИЕМ ДЛЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ХИЩНИК-ЖЕРТВА»

П.А. Кузнецов

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

В докладе рассматривается двумерная система двух квазилинейных параболических уравнений

$$u_t = \nabla[(\bar{\alpha}_1 + \beta_1 \nabla v) \cdot u] + f(u, v), \quad v_t = \nabla[(\bar{\alpha}_2 - \beta_2 \nabla u) \cdot v] + g(v, u). \quad (1)$$

Здесь $u = u(t, x, y)$, $v = v(t, x, y)$ – неизвестные функции, f, g – известные достаточно гладкие функции; $\bar{\alpha}_{1,2}$ – двумерные векторы с положительными вещественными координатами, $\beta_{1,2} \neq 0$ – вещественные константы. Будем также предполагать, что $f(0,0) = g(0,0) = 0$.

В одномерном случае данная система представлена в монографии [1] как система типа «хищник-жертва». Согласно рассматриваемой модели, u и v отображают плотность популяций жертв и хищников соответственно. Тогда содержательный класс решений системы (1) составляют решения с нулевыми фронтами, предполагающие наличие достаточно гладких линий $x = a(t, y)$, $x = b(t, y)$ (границы ареалов обитания популяций) таких, что

$$u_{x=a(t,y)} = v_{x=b(t,y)} = 0. \quad (2)$$

Отметим, что задача (1), (2) относится к классу вырождающихся, так как на фронтах $x = a$, $x = b$ вырождается параболический тип системы. Вырождениям похожей природы, порождающим решения с нулевыми фронтами (а именно, тепловые, фильтрационные и диффузионные волны), уделялось особое внимание в работах академиков Я.Б. Зельдовича [2], А.А. Самарского [3], А.Ф. Сидорова [4]. При этом преобладал случай одного уравнения.

В работе [5] задача (1), (2) исследована в одномерном случае при $a(t) = b(t)$ в классе аналитических функций. В докладе приводится обобщение полученных ранее результатов. Построены решения в виде рядов Тейлора, получены рекуррентные формулы коэффициентов.

1. Murray J.D. *Mathematical Biology II: Spatial Models and Biomedical Applications. Interdisciplinary Applied Mathematics. Vol. 18.* New York: Springer, 2003.
2. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.* М.: Физматлит, 1966.
3. Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. *Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений.* М.: Наука, 1987.
4. Сидоров А.Ф. *Избранные труды: Математика. Механика.* М.: Физматлит, 2001.
5. Казаков А.Л., Кузнецов П.А. Аналитические решения с нулевым фронтом для нелинейной вырождающейся параболической системы. *Дифференциальные уравнения.* 2022. Т. 58. № 11. С. 1461–1470.

ЗАЩИТА ОТ АТАК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОМОГЛИФОВ НА МОДЕЛИ NLP*

А.А. Кузнецов, А.А. Михайлов

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

В работе рассматривается проблема атак на системы обработки естественного языка (NLP) с использованием визуально похожих символов — омоглифов. Омоглифы представляют собой графически идентичные или похожие символы, имеющие разное значение. Возможность изменить текст, не изменяя его визуально, может быть использована многими злоумышленниками для обхода механизмов фильтрации контента, некорректного машинного перевода, ухудшения качества запросов и индексации поисковых систем. Согласно статье [1] многие системы обработки естественного языка не обращают внимания на возможные проблемы: от снижения производительности до некорректной работы. Предлагается новый подход защиты от атак с использованием омоглифов на основе модели T5. Модель T5 — text to text transfer transformer [2], представляет собой предобученную командой SberDevices [3] модель (sage-t5), которая способна корректировать орфографические ошибки на английском языке. Для генерации обучающего корпуса используется алгоритм случайной замены символа на его омоглиф. Составленный словарь омоглифов рассчитан на замену латинских символов. В среднем по 5 омоглифов на каждый символ. Размер обучающего корпуса превышает 2 млн. элементов (алгоритм случайной замены). Промежуточный результат после последних попыток обучения составляет 99% (Assurasy) на сгенерированных данных, а также модель была протестирована на прикладных задачах (см. табл. 1):

Задача	Метрики	Оригинальные данные	Защита без атак	Атакованные данные	Защита с атакой
Text classification (Toxic)	Precision	0.79	0.79	0.68	0.79
	Recall	0.78	0.78	0.64	0.78
	F1	0.78	0.78	0.61	0.78
Q&A	Exact Match	0.86	0.83	0.42	0.82
	F1	0.93	0.92	0.49	0.91

Таблица 2. Результаты тестирования в прикладных задачах

Таким образом, предложенный подход на основе модели T5 является перспективным направлением для разработки эффективных методов защиты от атак с использованием омоглифов. Дальнейшее развитие проекта позволит расширить область применения предложенного метода и повысить уровень безопасности систем обработки естественного языка.

1. N. Boucher, I. Shumailov, R. Anderson, N. Papernot, Bad characters: Imperceptible nlp attacks, in: 2022 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), IEEE, 2022, pp. 1987-2004.
2. M. Guo, J. Ainslie, D. Uthus, S. Ontanon, J. Ni, Y. H. Sung, Y. Yang, Longt5: Efficient text-to-text transformer for long sequences., 2020. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11934>.
3. N. Martynov, M. Baushenko, A. Kozlova, K. Kolomeytseva, A. Abramov, A. Fenogenova, A methodology for generative spelling correction via natural spelling errors emulation across multiple domains and languages, in: Y. Graham, M. Purver (Eds.), Findings of the Association for Computational Linguistics: EACL 2024, Association for Computational Linguistics, St. Julian's, Malta, 2024, pp. 138–155. URL: <https://aclanthology.org/2024.findings-eacl.10>.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9)

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КЛИНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ ЦИТОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДИК ЦЕРВИКАЛЬНОГО СКРИНИНГА

Е.Т. Кузьменко¹, А.Ю. Горнов², В.В. Кузьменко³

¹Иркутский областной клинический консультативно-диагностический центр

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

³ИГМАПО – филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России

ekuzmenko@list.ru, gornov@icc.ru, kw7@mail.ru

Развитие лабораторной диагностики предполагает повышение её качества и информативности путем использования методов, обладающих преимуществами, такими как более точная идентификация биологических объектов, четкое изображение клеточных структур, доступность, ускоренная постановка, низкая стоимость, возможность автоматизации исследования. В частности, для более раннего выявления цервикальной интраэпителиальной неоплазии в ходе скрининга рака шейки матки с целью раннего выявления и профилактики этого заболевания, рекомендован метод жидкостной цитологии с окраской по Папаниколау [1]. При этом на этапе перехода на новую методику необходимо, в соответствии с рекомендациями ГОСТ, обеспечить преимущество результатов исследований, выполненных разными способами [2].

В докладе обсуждаются результаты научного сотрудничества, начатого более 15 лет назад (см., напр., [3]). Целью текущего этапа исследования было сравнение частоты выявления патологии при проведении цервикального скрининга женщин, обследованных разными методами в лаборатории Иркутского диагностического центра – рутинным методом цитологического исследования с окраской мазков по Романовскому–Гимзе и методом жидкостной цитологии с окраской мазков по Папаниколау [1]. В ходе валидации сравниваются «старый» и «новый» методы, их возможности, ограничения, достоинства, недостатки, чувствительность и специфичность.

Обучающая выборка была сформирована на основе результатов обследований пациентов, накопившихся за длительный период. Обследуемые женщины (6986 человек) были разделены на 2 группы, в одной из которых цитологическое исследование проводилось методом с классической подготовкой и окраской мазков, а во второй – методом жидкостной цитологии с окраской по Папаниколау. В каждой из этих групп было выделено 5 подгрупп в зависимости от возраста обследуемых. У женщин пожилого возраста (61–80 лет) 405 из 1 группы и 471 из 2 группы при цитологическом исследовании не было обнаружено впервые выявленных интраэпителиальных поражений шейки матки. Большинство из этих женщин имели состояния постменопаузального атрофического вагинита и вульвовагинита, в том числе и после лечения дисплазии и рака шейки матки в анамнезе. Эта возрастная группа не учитывалась в дальнейшем сравнительном анализе.

Совершенствование методов цитологического исследования цервикального эпителия необходимо для повышения вероятности выявления дисплазии шейки матки с высокой достоверностью на максимально ранних стадиях заболевания. Цитологический метод высоко достоверен, так как показатель ранней диагностики предрака и ранних стадий рака шейки матки равен примерно 70–80%. Однако ошибки метода могут составлять от 5% до 40%, охватывая как обычную вирусную пролиферацию, так и подлинные предвестники рака [1, 4–6].

В работе была поставлена задача сравнения по значимым клиническим характеристикам двух методик – «новой», рекомендуемой консенсусом патологов к регулярному использованию, и «старой» – давно проверенной, привычной, но менее

информативной и не подлежащей автоматизации. Для достижения поставленной цели создана математическая модель, анализ которой позволяет оценивать характеристики, значимые для выявления дисплазии (предраковых состояний) у лиц разного возраста. Объектом изучения была частота встречаемости в обследуемой выборке интраэпителиальных поражений разной степени тяжести.

При сравнении частоты нормальных и патологических цитологических заключений – интраэпителиальных поражений низкой и высокой степени (LSIL, HSIL), полученных разными цитологическими методами, статистически значимых различий нами не обнаружено, в том числе, и для разных возрастных групп. Тем не менее, аномальные цитологические изменения клеток шейки, классифицируемые как атипичные клетки плоского эпителия неясного происхождения (ASCUS), обнаруживались почти в 2 раза чаще у женщин первой группы (окраска по Романовскому–Гимзе), чем у лиц, обследованных с использованием жидкостной цитологии (1,1 % и 0,62 %, соответственно, $P < 0.05$). Большую частоту встречаемости аномальных цитологических изменений в клетках при классическом методе приготовления и окраски мазков можно объяснить ошибками при просмотре толстого многослойного мазка, более частым повреждением клеток из-за плохой фиксации этих мазков, неправильным выбором фиксатора, недостаточным временем фиксации либо ее отсутствием как таковой (фиксация высушиванием).

Предложена модель, которая позволила сравнить по значимым с точки зрения врача-клинициста характеристикам две цитологические методики, используемые для выявления дисплазий при цервикальном скрининге предраковых поражений у женщин. Частота выявления патологии в ходе этого скрининга практически не зависела от используемого цитологического метода. Проведенные наблюдения свидетельствуют о том, что метод жидкостной цитологии с окраской по Папаниколау приготовления и окраски мазков не уступает по основным характеристикам ранее применяемому.

1. Руководство ВОЗ по скринингу и лечению цервикальных предраковых поражений в целях профилактики рака шейки матки. Второе издание. Всемирная организация здравоохранения. 2023. 122 с.
2. ГОСТ Р ИСО 15189. Лаборатории медицинские. Частные требования к качеству и компетентности. М., Стандартинформ. 2015. 52 с.
3. Горнов А.Ю., Кузьменко Е.Т., Аникин А.С., Зароднюк Т.С. Применение алгоритмов аппроксимации экспериментальных данных в задаче выявления значимых медико-социальных факторов. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. Т. 20, № 4. С. 92–96.
4. Аксель Е.М., Виноградова Н.Н. Статистика злокачественных новообразований женских репродуктивных органов. Онкогинекология. 2018, 3. С. 64–69.
5. Гусаков К.И., Назарова Н.М., Прилепская В.П., Стародубцева Н.Л., Франкевич В.Е. Перспективы профилактики рака, ассоциированного с вирусом папилломы человека. Акушерство и гинекология. 2019. № 8. С. 37–42.
6. Кононова И.Н., Башмакова Н.В., Гаева О.Э., Крестьянинова Т.В. Региональный опыт вирусологического цервикального скрининга в Свердловской области. Акушерство и гинекология. 2019. №8. С. 24–28.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПОЛЕЙ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДА *

Р.А. Кузьминых¹, Т.В. Ярославцева^{1, 2}, В.Ф. Рапута¹, А.А. Леженин¹

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

²Новосибирский институт гигиены Роспотребнадзора

ruslana215w@mail.ru

Определение уровней многокомпонентного загрязнения атмосферы в городах является актуальной проблемой. Наряду с наземными методами наблюдений, использование данных дистанционного зондирования снежного покрова города дает возможность детализировать пространственную картину полей концентраций вредных примесей.

В докладе обсуждается проблема интерполяции данных мониторинга загрязнения атмосферы города с редкой сетью постов наблюдений. Для г. Иркутска был проведен корреляционный анализ среднемесячных концентраций бенз(а)пирена (БП), который позволил выявить наличие связей между данными измерений в пунктах наблюдений [1]. На основе этих связей с использованием спутникового снимка снежного покрова города и данных мониторинга на постах Росгидромета было проинтерполировано поле среднегодовой концентрации БП. На рис. 1 представлены результаты интерполяции.

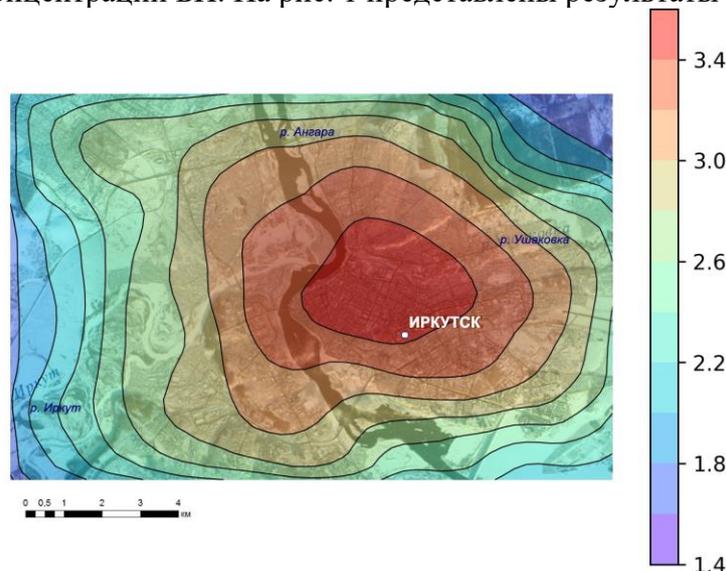


Рис. 1. Численно восстановленное поле среднегодовой концентрации бенз(а)пирена (нг/м^3) в 2019 г. для г. Иркутска

Анализ рис. 1 показал качественное согласие тональности пространственного изменения загрязнения снежного покрова и численно восстановленного поля концентраций БП. Зона максимальных концентраций расположена в центральной части города, что совпадает с областью наивысшей затемнённости снежного покрова на спутниковом снимке. По мере приближения к окраинам города происходит плавное уменьшение уровня загрязнения БП, что также согласуется со снижением тональности снежного покрова на периферии города.

1. Рапута В.Ф., Леженин А.А. Анализ данных мониторинга длительного загрязнения бенз(а)пиреном атмосферы г. Иркутска. Оптика атм. и океана. 2024. Т. 37. № 06. С. 512-518.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № 075-15-2024-533.

ГРАФИЧЕСКИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ДАННЫХ ХОЛТЕРОВСКОГО МОНИТОРИРОВАНИЯ

С.Г. Куклин¹, А.С. Аникин², А.Ю. Горнов²

¹Иркутская государственная медицинская академия последипломного образования – филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России,

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Сердечный ритм является, по-видимому, одним из самых сложных объектов, находящихся в активном изучении. Помимо сложности самого источника электрических импульсов в сердце (синусовый узел), который формирует сердечный ритм (интервалы между сердечными сокращениями), имеется также множество внешних по отношению к нему факторов – изменение режимов функционирования других систем организма, через которые реализуется комплекс воздействий окружающей среды (психофизических, гелиогеофизических, промышленных и т.д.), оказывающих самое непосредственное влияние на колебательный процесс. Несмотря на множество исследований в стране и за рубежом, проблема персонализированной оценки динамики управления сердечным ритмом далека от разрешения.

На текущем этапе исследований используют визуальный, статистический и частотный (в т. ч. спектральный) анализ временного ряда кардиоинтервалов, который получают в результате непрерывной записи в течение суток (мониторирование по Холтеру). Получаемые временные ряды могут содержать около ста тысяч измерений в сутки, что представляется вполне достаточной стартовой информационной базой. Характеристики полученной динамической системы неэргодичны. И неразвитость алгоритмов обработки информации такого типа данных, особенно переходных процессов, продолжает оставаться одной из серьезных проблем в современных кардиологических исследованиях. Одной из основных проблем можно назвать задачу моделирования механизмов обратной связи («регуляторов»), способных быстро восстанавливать состояние человека после физической нагрузки (см., напр., [1, 2]). На предыдущих этапах работы (см. [3, 4]) нами были реализованы простейшие версии диалоговых режимов, направленные на предварительную декомпозицию наблюдаемого исходного временного ряда на сегменты, имеющую медико-биологическую интерпретацию, с использованием когнитивной графики. В докладе обсуждаются возможности реализованного нами нового варианта графического интерфейса, ориентированного на детальную декомпозицию «от интервала к интервалу» процесса перерегулирования. Работоспособность реализованного инструментария проверена экспертами-медиками на данных холтеровского мониторирования пациентов.

1. Иванова О.А., Куклин С.Г. Скорость восстановления сердечного ритма после нагрузки при физической реабилитации кардиологических пациентов. Кардиоваскулярная терапия и профилактика, 17(2), 2008. С. 95–100.
2. Ivanova O., Kuklin S., Titova A. Prognosis of long-term physical exercises efficacy in hypertonic patients. Journal of Hypertension. V. 35, e-Suppl. 2, September 2017. P. 215.
3. Куклин С.Г., Горнов А.Ю. Новая версия программного комплекса анализа данных холтеровского мониторирования. Ляпуновские чтения, 2022. С. 88.
4. Куклин С.Г., Аникин А.С. Интерактивная технология анализа данных холтеровского мониторирования. Ляпуновские чтения, 2023. С. 53.

ПРОГРАММНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ОЦЕНКИ ТРАНСПОРТНОГО СПРОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

И.М. Кулакова, О.А. Лебедева, Е.В. Ерофеев
Ангарский государственный технический университет
iyelkina@mail.ru, kravhome@mail.ru, ermak080@mail.ru

С ростом населения в городах тесно связаны процессы управления и планирования, имеющие ключевую роль в обеспечении устойчивости функционирования транспортной сети. Генерация пассажирских матриц корреспонденций является инструментом планирования городской застройки и транспортного прогнозирования в целом. Этот инструмент используется во многих аналитических задачах, в том числе для: информирования лиц, принимающих решения, о последствиях или преимуществах застройки посредством воздействия на окружающую среду; определения или оценки последовательных или долгосрочных инвестиций; оценки транспортных заторов и требуемых мер по уменьшению этих последствий; анализа транспортного спроса.

Сбор данных о пассажиропотоках проводится с использованием детекторов входа/ выхода расположенных в подвижном составе. Эти данные позволяют генерировать точные и многомерные матрицы «отправление-назначение» (OD), то есть матрицы, которые представляют состояние сети общественного транспорта с точки зрения количества пассажиров.

Реализация модели оценки транспортного спроса основывается на модели гравитации, являющейся ведущим методом среди синтетических моделей распределения в транспортном планировании. Она отражает концепцию гравитации в физике, где поток поездок в зоны и из них зависит от уровня их активности (подобно массе) и расстояния между ними (отражающего расходы на поездку). Этот подход особенно ценен, поскольку он может генерировать матрицы «отправитель-назначение» без предварительных данных. Итеративный процесс гарантирует, что гравитационная модель точно отражает динамику распределения поездок, что делает ее мощным инструментом планирования городского транспорта. Ее способность адаптироваться к различным вариантам, особенно при отсутствии экспериментальных данных, подчеркивает ее важность в разработке эффективных транспортных систем.

Задача оценки транспортного спроса в настоящее время страдает от отсутствия общей модели для предварительной обработки данных о перемещениях, что ограничивает воспроизводимость и сопоставимость научных исследований. Существующие библиотеки сосредоточены на анализе данных, оставляя пользователю, казалось бы, простые шаги предварительной обработки, хотя эти шаги могут существенно повлиять на результаты [1].

Реализация осуществлялась с помощью языка программирования Python, что позволило значительно упростить совместный анализ нескольких наборов данных о перемещениях с различными свойствами. В исследовании предлагается методологическая основа оценки матриц корреспонденций с применением библиотеки NumPy языка программирования Python с открытым исходным кодом для анализа пассажирского транспортного спроса. При моделировании пассажиропотока применялся SciPy - пакет прикладных математических процедур, основанный на расширении NumPy. Обработка данных транспортного спроса реализована через модификацию ячейки с помощью инструмента Python Excel (xlwt/xlrd) [2].

Разработанное программное обеспечение предоставляет функциональные возможности для полного цикла анализа данных о мобильности населения на примере внутризональных пассажирских перевозок: импорт и экспорт данных, собранных с

помощью детекторов входа/выхода, предварительная обработка, оценка качества данных, а также визуализация данных и результатов. Восстановление матрицы корреспонденций на основе гравитационной модели и минимизация ошибок распределения.

1. Лебедева, О.А. Сравнительный анализ методов оценки межстаночной матрицы корреспонденций/ Лебедева О.А., Михайлов А.Ю. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 4 (40). С. 85-88.
2. Python. Работаем с xls через xlwt/xlrd и python-uno <https://adw0rd.com/2012/02/28/python-excel-xlwt-xlrd-xlutils-and-python-uno/> (дата обращения 16.09.2024).

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПОДЪЁМА ДЫМОВЫХ ШЛЕЙФОВ ТЭЦ ПО СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ*

А.А. Леженин, В.Ф. Рапута, Р.А. Кузьминых

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

lezhenin@ommfao.sccc.ru

Наблюдения со спутников дымовых выбросов ТЭЦ создают определённые возможности для оценивания параметров их подъёма. Если ввести по физическим соображениям масштаб длины, связанный с потоком плавучести и скоростью ветра, то через него устанавливается связь высоты подъёма шлейфа с его смещением в поле ветра. На рис. 1 приведён фрагмент спутникового снимка окрестностей Гусиноозёрской ГРЭС и рассчитанные по мезомасштабной модели WRF поля ветра на высотах 300 и 500 м.

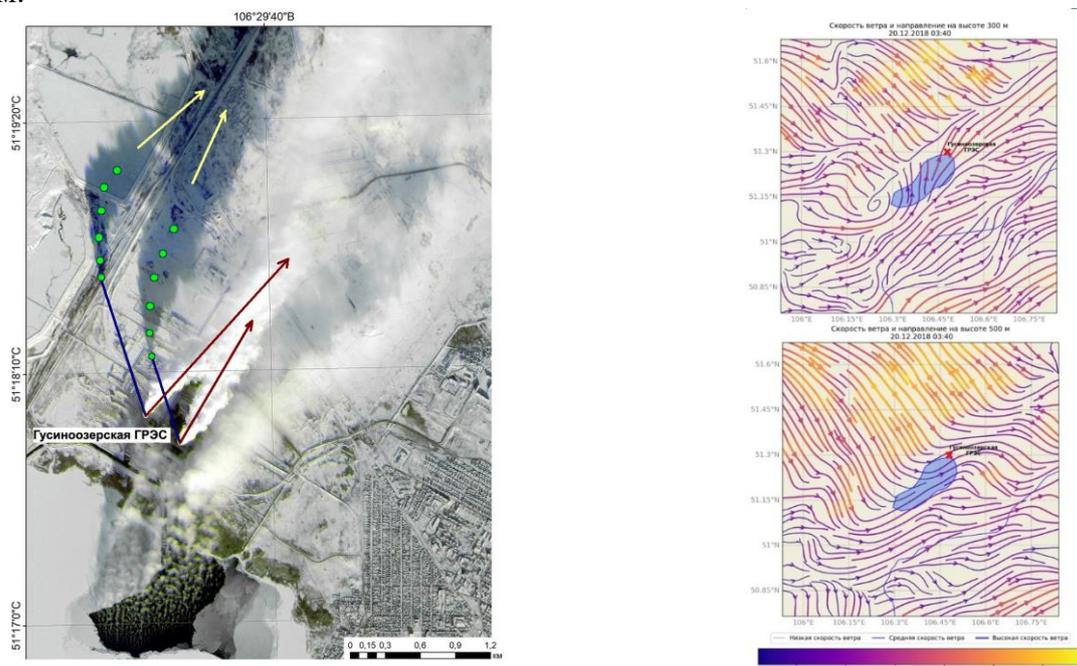


Рис. 1. Фрагмент спутникового снимка Гусиноозёрской ГРЭС с ИСЗ «Конопус-В» № 3 от 20.12.2018 г. 03:40 UTC. Рассчитанные поля ветра в области 100x100 км на высотах 300 и 500 м от поверхности земли

Для численного моделирования атмосферных циркуляций над территорией БПТ была применена модель WRF [1]. Расчёты показали, что конфигурация полей ветра сложно структурирована и скорости имеют большую изменчивость по высоте. Согласно рис. 1 на высотах распространения шлейфов отмечается правый поворот ветра. С использованием спутниковой информации (рис. 1) определены дополнительные высоты подъёма дымовых шлейфов от труб Гусиноозёрской ГРЭС. В рамках фундаментального «закона 2/3» численно восстановлены траектории шлейфов и выполнены оценки вертикальных скоростей подъёма дымовых смесей. Полученные результаты могут быть использованы для внешнего контроля и оптимизации параметров выбросов при эксплуатации дымовых труб тепловых станций.

1. Weather Research and Forecasting (WRF) Model. URL: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № 075-15-2024-533.

О ПОСТРОЕНИИ МИНИМАЛЬНОГО ОСТОВНОГО ДЕРЕВА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

А.А. Лемперт, И.А. Мадаев

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

Задача о построении минимального остовного дерева графа $G(A, E)$ относится к числу классических проблем вычислительной геометрии. Она заключается в поиске набора минимальных по весу рёбер, образующих ациклический подграф для вершин $A = \{A_i(x_i, y_i)\}, i = 1, \dots, n$. В данной работе она рассматривается в неклассической постановке, когда вес ребра $A_i A_j$ определяется как минимальное время перемещения между вершинами A_i и A_j [1].

Пусть задана функция $f(t, x, y)$, кусочно-непрерывная по своим переменным, задающая мгновенную скорость движения в точке (x, y) в момент времени t . Тогда вес ребра $A_i A_j$ находится из решения задачи

$$w_{ij} = \min_{G \in G(A_i, A_j)} \int_G \frac{dG}{f(t, x, y)}, \quad (1)$$

где $G(A_i, A_j)$ - множество непрерывных кривых, соединяющих вершины A_i и A_j .

Необходимо найти множество рёбер минимального остовного дерева $L_m = \{\langle A_i, A_j, w_{ij} \rangle\}, i \neq j$.

Решение задачи происходит в два этапа:

1. Расчёт весов всех рёбер;
2. Выбор ребер для формирования минимального остовного дерева.

На первом этапе применяется оптико-геометрический подход [2], основанный на аналогии между распространением света в оптически неоднородной среде и минимизацией интегрального функционала (1).

Для формирования остовного дерева используется алгоритм Крускала [3]. Список ребер сортируется по возрастанию, затем отбираются $n-1$ вершин с начала списка, которые при добавлении не будут делать дерево циклическим.

Отметим, что в рассматриваемой задаче вес ребер существенно зависит от времени, поэтому ключевым вопросом является выбор вершины графа, из которой стартует построение остовного дерева.

В докладе будут представлены детальное описание разработанных алгоритмов и результаты вычислительного эксперимента.

1. Казаков А.Л., Лемперт А.А. О построении маршрутов в динамической среде с использованием решений уравнения эйконала. Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2021. Т. 58. С. 59-72.
2. Казаков А.Л., Лемперт А.А. Об одном подходе к решению задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике. Автоматика и телемеханика. 2011. № 7. С. 50-57.
3. Kruskal J. V. On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem. Proc. AMS. 1956. Vol 7, No. 1. P. 48-50.

О НАХОЖДЕНИИ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ СУДОВ В АКВАТОРИИ ПОРТА С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ*

А.А. Лемперт¹, И.А. Мадаев¹, Т.В. Чан²

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

²Иркутский национальный исследовательский технический университет

lempert@icc.ru, eliasamotny@mail.ru, ttviet@ictu.edu.vn

В работе рассматривается задача построения маршрутов движения судов на ограниченной территории морского порта. Отличительным свойством водного транспорта является то, что судно должно определять свой маршрут самостоятельно с учетом неблагоприятных факторов: течения, сильного ветра и волн, различных препятствий, таких как мелководье или другие суда, которые ожидают освобождения причала. В таких ситуациях поиск оптимального маршрута требует введения специальной функции проходимости, а расстояние между двумя точками акватории нельзя считать евклидовым. При этом построение маршрута осложняется наличием в акватории других судов, которые рассматриваются как подвижные препятствия, как с заданными, так и с заранее неизвестными траекториями движения.

Пусть заданы ограниченная область $X \in R^2$ и непрерывная функция $0 \leq f(t, x, y) \leq \beta$, определяющая мгновенную скорость движения в каждой точке $(x, y) \in X$. Минимальное время перемещения между точками $A(x_a, y_a)$ и $B(x_b, y_b)$ определяется из решения задачи:

$$\rho(A, B) = \min_{\Gamma \in G(A, B)} \int_{\Gamma} \frac{d\Gamma}{f(t, x, y)},$$

где $G(A, B)$ — множество всех непрерывных кривых, лежащих в X и соединяющих точки A и B .

Пусть также имеется набор объектов $V_i, i = 1, \dots, n$, с заданными стартовыми S_i и целевыми точками F_i . Для каждого объекта необходимо найти маршрут, позволяющий избежать столкновений с другими объектами, и движение по которому требует наименьшего времени. Дополнительно может быть наложено ограничение на радиус кривизны маршрута, если не допускаются резкие повороты.

Для решения указанной задачи разработаны вычислительные алгоритмы, основанные на оптико-геометрическом подходе [1, 2], который, в свою очередь, базируется на вариационных принципах механики и позволяет заменить классическое расстояние между двумя точками временем его преодоления по быстрейшему маршруту.

В докладе будут представлены детальное описание разработанных алгоритмов и результаты вычислительного эксперимента.

1. Казаков А.Л., Лемперт А.А. О построении маршрутов в динамической среде с использованием решений уравнения эйконала. Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2021. Т. 58. С. 59-72.
2. Казаков А.Л., Лемперт А.А. Об одном подходе к решению задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике. Автоматика и телемеханика. 2011. № 7. С. 50-57.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00264, <https://rscf.ru/project/24-21-00264/>

АСИМПТОТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ RQ-СИСТЕМЫ С РАЗНОТИПНЫМИ
ВЫЗЫВАЕМЫМИ ЗАЯВКАМИ И ПРОИЗВОЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ
ВРЕМЕНИ ОБСЛУЖИВАНИЯ

О.Д. Лизюра

Национальный исследовательский Томский государственный университет
oliztsu@mail.ru

Рассматривается система массового обслуживания с повторными обращениями (от англ. retrial queue, RQ-система), на вход которой поступает простейший входящий поток с параметром λ . Заявка, которая в момент поступления застала прибор свободным, сразу же начинает обслуживание. Длительность обслуживания есть случайная величина с произвольным распределением, заданным функцией распределения $B_1(x)$. Если прибор занят в момент поступления, заявка отправляется на орбиту, откуда повторно обращается к прибору с интенсивностью σ . Также, когда прибор свободен, он вызывает заявки извне. Рассматривается система с несколькими типами вызываемых заявок, которые для удобства исследования пронумерованы от 2 до N . Заявки типа n прибор вызывает с интенсивностью α_n и обслуживает случайное время с функцией распределения $B_n(x)$.

Исследуется случайный процесс $i(t)$ – число заявок на орбите в момент времени t . Для нахождения распределения вероятностей этого процесса применяется метод асимптотического анализа в двух предельных условиях: большой задержки заявок на орбите ($\sigma \rightarrow 0$) и согласованно высокой интенсивности вызывания заявок ($\alpha_n \rightarrow \infty$). Рассматривается случай, когда все α_n – величины одного порядка, для этого представляем их в виде $\alpha_n = \alpha \gamma_n$, где $\alpha \rightarrow \infty$, а γ_n – константы.

Для такой системы показано, что предельное распределение числа заявок на орбите является гауссовским в обоих предельных условиях. Получены формулы для параметров распределения вероятностей в таблице 1. Несмотря на то, что система рассматривается в предельном условии, метод асимптотического анализа, представленный в работе [1], позволяет построить аппроксимацию допредельного распределения числа заявок на орбите сохранив зависимость от параметров σ и α путем дискретизации гауссовского распределения с параметрами из таблицы 1. Точность таких аппроксимаций будет расти если σ будет уменьшаться, а α увеличиваться, соответственно предельному условию.

Таблица 1 – Параметры асимптотических распределений вероятностей числа заявок на орбите

Предельное условие	Математическое ожидание	Дисперсия
Большой задержки $\sigma \rightarrow 0$	$\kappa_1 = \frac{\lambda^2 b_1 + \lambda v_1}{\sigma(1 - \lambda b_1)}$	$\kappa_2 = \frac{\kappa_1}{\sigma} + \frac{\lambda^2 \left((\lambda + \kappa_1) b_1^{(2)} + v_2 \right)}{2\sigma(1 - \lambda b_1)}$
Согласованно о высокой интенсивности вызывания $\alpha_n \rightarrow \infty$	$\kappa_1 = \frac{\lambda v_1}{\sigma(1 - \lambda b_1)}$	$\kappa_2 = \alpha \kappa_1 + \frac{\lambda^2 \left(\alpha \sigma \kappa_1 b_1^{(2)} + v_2 \right)}{2\sigma(1 - \lambda b_1)}$

Здесь

$$v_1 = \sum_{n=2}^N \alpha_n b_n, v_2 = \sum_{n=2}^N \alpha_n b_n^{(2)},$$

b_n – математические ожидания случайных величин, заданных функциями распределения вероятностей $B_n(x)$, а $b_n^{(2)}$ – их вторые начальные моменты.

RQ-система с произвольным распределением времени обслуживания заявок также рассматривалась в статье [2], где исследование проводилось с помощью метода диффузионного анализа.

1. Назаров А. А., Моисеева С. П. Метод асимптотического анализа в теории массового обслуживания. Томск: Издательство НТЛ, 2006. 109 с.
2. Nazarov A., Phung-Duc T., Paul S., Lizura O. Asymptotic-Diffusion Analysis for Retrial Queue with Batch Poisson Input and Multiple Types of Outgoing Calls. Lecture Notes in Computer Science. V. 11965. P. 207–222.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

А.В. Линявский

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

Для задачи принятия решений как одной из важнейших подзадач управления мобильными роботами могут быть использованы интеллектуальные планировщики (англ. AI planners) [1-5]. Планировщики принимают на вход набор возможных действий, начальное и конечное состояния, формируя на выходе последовательность действий, обеспечивающую достижение конечного состояния (рис. 1). Построенный план может не быть оптимальным, однако его выполнимость гарантирована. Для выбора оптимального плана планировщик позволяет применить различные алгоритмы оптимизации, такие как поиск кратчайшего пути на графе [5-7] или вычисление косинусного сходства векторов состояний [8].

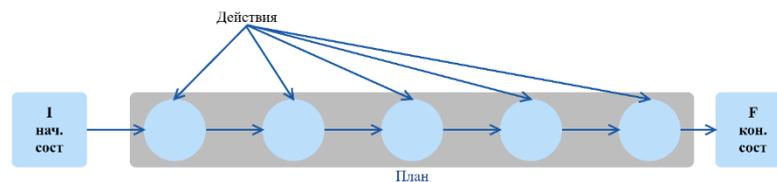


Рисунок 1. Схема построения плана в классических планировщиках

Планировщики можно классифицировать по способу построения плана: классические, по частям (англ. partial-order planners) и иерархические, а также по типу рассматриваемых факторов: классические, вероятностные, временные и иерархические [4, 5]. В докладе рассматривается классификация планировщиков только по способу построения плана, поскольку тип учитываемых факторов не влияет на подход к планированию.

1. *Классические планировщики.* Классический планировщик сводит задачу принятия решения к задаче поиска пути на графе [3, 6], узлами которого являются так называемые *действия*. Действия можно представить [3, 4, 5, 7] в виде структуры

требования → *процесс* → *результаты*.

- **Требования действия** (англ. conditions) описывают состояние (или набор состояний), которые нужны для запуска процесса действия.
- **Процесс действия** (англ. action) - непосредственно само действие, например, движение вправо, движение вперёд и т.д.
- **Результаты действия** (англ. effects) - состояние или набор состояний, достигаемое после выполнения процесса действия. Такая структура действий позволяет соединять результаты предыдущего действия с требованиями следующего, подобно косточкам домино, образуя тем самым переход (рис. 2). Возможно также ввести вес для действий, что позволит создать взвешенный граф для применения таких алгоритмов, как алгоритм Дейкстры или A^* [5-7]. Заметим, что результаты действия являются лишь предполагаемыми последствиями процесса действия, и не всегда совпадают с истинным результатом. Обработка отличий истинного и предполагаемого результата выносятся, как правило, в отдельную подсистему, поскольку факт их отличия можно получить уже после формирования плана и начала его исполнения.

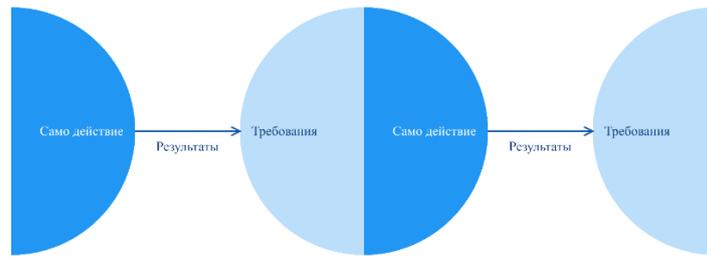


Рисунок 2. Схема последовательности действий

Классический планировщик обеспечивает автономии роботов, но не позволяет им построить сложные цепочки действий.

2. *Планировщик по частям* выделяет несколько основных состояний между начальным состоянием и конечным, и одновременно создаёт независимые планы между промежуточными состояниями, при этом каждый отдельный план создаётся как в классическом планировщике (рис. 3). Применение такого планировщика позволяет построить более сложные планы с повторяющимися действиями, что было невозможно при классическом планировщике, а уровень автономии роботов сравним с уровнем, обеспечиваемом классическим планировщиком.

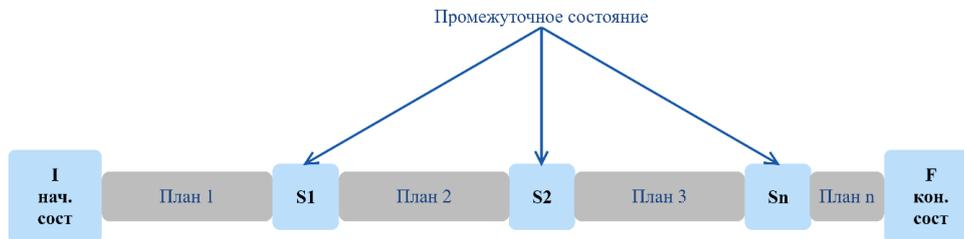


Рисунок 3. Схема плана, составленного планировщиком по частям. Каждый i -й план составляется независимо от других планов. Составление происходит между i -м и $i+1$ -м состояниями

3. В *иерархическом планировщике* [2] действия состоят из задач, разбивающихся на подзадачи, которые, в свою очередь, могут также разбиваться на подзадачи (рис. 4).

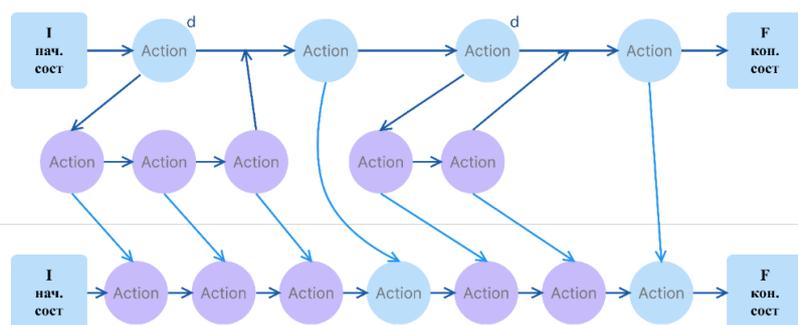


Рисунок 4. Схема плана, составленного иерархическим планировщиком. Действия, помеченные буквой d , могут быть декомпозированы. В итоговый план входят только действия, которые невозможно декомпонировать далее

Первая итерация планирования составляет общий план, состоящий из задач, приводящих начальное состояние к конечному. Вторая итерация уточняет каждую задачу внутри плана: производит декомпозицию задач до последовательности подзадач, приводящих требования задачи к её результатам. И так до тех пор, пока все

задачи станет невозможно далее декомпозировать. Последовательность действий (подзадач), состоящая только из действий, которые далее невозможно декомпозировать, является планом. Декомпозиция задачи может быть как определена заранее, так и составляться на ходу при помощи того же иерархического планировщика.

Иерархический планировщик позволяет создавать гораздо более сложные, комплексные планы в сравнении с классическим планировщиком. Кроме того, в случае ошибки выполнения плана можно заново генерировать не весь план целиком, а только его конкретную декомпозицию. Применение такого планировщика может привести к наибольшей автономии роботов среди рассмотренных планировщиков.

Планирование можно также классифицировать по его направлению: прямое и обратное [3-5]. В прямом планировании (англ. forward chaining) план составляется от начального состояния к конечному. Для исключения полного перебора всех доступных действий для выбора следующего применяют различные оптимизационные подходы, в том числе указанные выше. Прямое планирование позволяет приступить к выполнению плана, не дожидаясь окончания генерации всего плана.

В обратном планировании (англ. backward chaining) план составляется от конечного состояния к начальному. Подобный подход позволяет уменьшить количество перебираемых действий, но требует полного окончания планирования для того, чтобы приступить к исполнению заданных действий. Все оптимизации прямого планирования актуальны и для обратного. Однако, в случае обратного планирования, необходимо дождаться полной генерации плана, что может замедлить реакцию роботов на происходящие в окружающем мире события.

Проведенный анализ показывает, что для задач принятия решений автономными мобильными роботами следует использовать иерархический планировщик с обратным планированием, поскольку он обеспечивает наибольшую автономию роботов.

1. AAAI 2022 Tutorial on AI Planning: Theory and Practice, 2022 год. URL: <https://aiplanning-tutorial.github.io/>
2. Troy Humphreys. Exploring HTN Planners through Example. Game AI Pro: Collected Wisdom of Game AI Professionals: in 3 т. / ред. S. Rabin. Boca Raton, Fla.: A K Peters/CRC Press,
3. Leopotam, AI GOAP - планировщик целеориентированного ИИ, 7 июля 2023 года // URL: <https://leopotam.ru/33/>
4. GeeksForGeeks, Classical Planning in AI, 21 мая 2024 года // URL: <https://www.geeksforgeeks.org/classical-planning-in-ai/>
5. GeeksForGeeks, Automated Planning in AI, 27 мая 2024 года // URL: <https://www.geeksforgeeks.org/automated-planning-in-ai/>
6. Neufeld, S. Mostaghim, D. L. Sancho-Pradel and S. Brand. Building a Planner: A Survey of Planning Systems Used in Commercial Video Games. in IEEE Transactions on Games, vol. 11, no. 2, pp. 91-108, June 2019, doi: 10.1109/TG.2017.2782846
7. Uludağlı, M.Ç., Oğuz, K. Non-player character decision-making in computer games. Artif Intell Rev 56, 14159–14191 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10491-7>
8. Tan, P.-N. Introduction to Data Mining, (First Edition) / P.-N. Tan, M. Steinbach, V. Kumar – USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2005. с.– ISBN 978-0-321-32136-7.

О ВЕКТОРЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ФЕРМИОНОВ ВО ВНЕШНЕМ ПОЛЕ

В.П. Ломов

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

Для полного описания движения фермиона, будь то свободное или во внешнем поле, необходимо знать не только волновую функцию или пропагатор частицы, но и её поляризацию.

Основные свойства вектора поляризации z_μ в том, что (см., например, [1])

$$z_\mu z^\mu = -1, \quad z_\mu p^\mu = 0, \quad [\gamma^5 \hat{z}, \Lambda^\pm] = 0, \quad \Lambda^\pm = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{\hat{p}}{m}\right), \quad \hat{a} = a_\mu \gamma^\mu. \quad (1)$$

В работах [2, 3] было показано, как ввести вектор поляризации для фермиона во внешнем поле и для системы фермионов, взаимодействующих с нарушением чётности.

Трудность состоит в том, что при движении во внешнем поле или при рассмотрении системы взаимодействующих фермионов, оператор проекции на энергетическое состояние Λ^\pm претерпевает изменение [4], что отражается на выражении для вектора поляризации.

Так, в работе [2] для фермиона, движущего во внешнем постоянном магнитном поле вектор поляризации вводится как

$$z_\mu = b \epsilon_{\mu\nu\lambda\rho} F^{\nu\lambda} p^\rho, \quad (2)$$

где коэффициент b определяется из первого условия (1), а второе свойство следует непосредственно.

Для постоянного магнитного поля тензор напряжённостей $F_{\mu\nu}$ выражается только через магнитное поле и здесь не возникает никаких вопросов к построению вектора z_μ . Однако, такая ситуация лишь частный случай, в общем может получаться противоречивое выражение. Так, в некоторых работах рассматривают вариант наличия у нейтрино магнитного момента. Для его введения используется лагранжиан вида

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(1\hat{\partial} - m)\psi - \frac{\mu}{2} \bar{\psi} \sigma_{\mu\nu} \psi F^{\mu\nu}, \quad \sigma_{\mu\nu} = \frac{1}{2} [\gamma_\mu, \gamma_\nu],$$

где μ — магнитный момент. Если рассматривать магнитное поле с нетривиальной пространственной структурой (см., например, [5]) формула (2) даёт вектор поляризации z_μ с таким нормировочным множителем

$$b = \frac{1}{\sqrt{p_0^2 \mathbf{B}^2 + \mathbf{p}^2 \mathbf{E}^2 - (\mathbf{p}\mathbf{B})^2 - (\mathbf{p}\mathbf{E})^2}}. \quad (3)$$

Наличие здесь в векторе поляризации нейтральной частицы электрического поля кажется странным, но это следует из определений (1) и (2).

Мы считаем, что, несмотря на отчасти парадоксальный результат (3) для вектора поляризации нейтрино во внешнем поле, соотношения (1) являются ключевыми для вектора поляризации во всех случаях: для свободного движения частицы или во внешних полях. Необычные результаты для вектора поляризации требуют экспериментальной проверки.

1. Бьёркен Д. Д., Дрелл С. Д. Релятивистская квантовая механика. М. : Наука, 1978. Т. 1. С. 296. Пер. с англ.
2. Kaloshin A. E., Voronin D. M. Neutrino propagation in media and axis of complete polarization. *Eur. Phys. J. C.* 2019. Vol. 79, no. 2. P. 153. 1808.05514.
3. Dolzhikov D. A., Kaloshin A. E., Lomov V. P. Fermion propagator diagonalization and eigenvalue problem. *Mod. Phys. Lett. A.* 2022. Vol. 37, no. 14. P. 2250084. — 2109.06470.
4. Kaloshin A. E., Lomov V. P. Mixing of fermions and spectral representation of propagator. *Int. J. Mod. Phys.* 2016. Vol. A31. P. 1650031. 1501.06337.
5. Dvornikov M. Neutrino oscillations in matter and in electromagnetic fields. *J. Phys. G.* 2008. Vol. 35. P. 025003. 0708.2328.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АКВАТОРИИ ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ*

Е.А. Мамаш, И.А. Пестунов
Федеральный исследовательский центр
информационных и вычислительных технологий
pestunov@ict.nsc.ru

В последние годы для оценки состояния и изучения внутриконтинентальных водоемов в различных регионах земного шара стали все активнее применяться методы спутникового дистанционного зондирования [1-12]. Это обусловлено тем, что традиционные методы определения гидрологических, гидробиологических и температурных характеристик поверхностного слоя внутриконтинентальных водоемов, основанные на измерениях *in situ*, носят точечный характер и часто не обеспечивают получение репрезентативных данных для таких сложных и динамических экосистем, как, например, озера. Кроме того, эти методы имеют логистические ограничения и требуют существенных финансовых и временных ресурсов для применения.

Спутниковое дистанционное зондирование в настоящее время является практически незаменимым инструментом в изучении крупных внутренних водоемов, к которым относится и озеро Байкал с площадью акватории в 31,7 тыс. км² [1, 13]. Применение данных дистанционного зондирования дает возможность одновременно наблюдать за состоянием всего озера Байкал и оперативно получать пространственно-временную информацию о происходящих в нем процессах. Такие данные невозможно получить с использованием только судовых и станционных наблюдений.

Одна из наиболее сложных проблем, связанная с дистанционным зондированием водных объектов, обусловлена оптической сложностью и изменчивостью исследуемых водных масс, и поэтому достоверность значений параметров, полученных с помощью методов дистанционного зондирования, всегда вызывает сомнения. Для проведения таких исследований требуются большие объемы полевых наблюдений и подробные знания о био- и химико-оптических свойствах изучаемых акваторий, однако такая информация, как правило, доступна лишь в ограниченных объемах.

В настоящее время отсутствуют надежные и верифицированные методы и технологии оценки параметров поверхностного внутриконтинентальных водоемов по спутниковым данным разного пространственного разрешения. Поэтому разработка таких методов и создание соответствующих сервисов, позволяющих проводить комплексный пространственно-временной анализ параметров поверхностного слоя таких водоемов, является актуальной и востребованной задачей.

В докладе рассматриваются известные методы оценки параметров состояния внутриконтинентальных водоемов, основанные на использовании данных дистанционного зондирования. Приводятся результаты экспериментальных исследований по оценке пригодности спутниковых данных разного пространственного разрешения и методов их обработки для оценки температуры поверхностного слоя акватории озера Байкал и содержания в нем хлорофилла «а». Кроме этого, приводятся также результаты пространственно-временного анализа распределения температуры в поверхностном слое акватории оз. Байкал за 2000-2023 гг.

1. Dyba K., Ermida S., Ptak M. et al. Evaluation of methods for estimating lake surface water temperature using Landsat 8. Remote Sensing. 2022. Vol. 14. P. 3839. DOI:10.3390/rs14153839.

* Работа поддержана грантом Минобрнауки России № 075-15-2024-533

2. Fan C., Liu K., Luo S. et al. Detection of surface water temperature variations of Mongolian lakes benefiting from the spatially and temporally gap-filled MODIS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 114. DOI:10.1016/j.jag.2022.103073.
3. Kong X., Li Y., Wang L., Liu H. Lake Surface Temperature Retrieval Study Based on Landsat 8 Satellite Imagery – A Case Study of Poyang Lake. *Atmosphere*. 2024. Vol.15, № 4. P. 428. <https://doi.org/10.3390/atmos15040428>.
4. Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища. *Вестник ТвГУ. Серия «Химия»*. 2016. № 2. С. 230-244.
5. Болданова Е.В. Оценка трофности озера Байкал с использованием дистанционного зондирования. *Географический вестник*. 2022. Т. 61, № 2. С. 73-89.
6. Лагута А.А., Погорелов А.В. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла «а» в Краснодарском водохранилище по данным спутниковых снимков. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 4. С. 67-84.
7. Pang S., Zhu L., Liu C., Ju J. Causes and impacts of decreasing chlorophyll-a in Tibet Plateau lakes during 1986-2021 based on Landsat image inversion. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. P. 1503. DOI:10.3390/rs15061503.
8. Makwinja R., Inagaki Y., Sagawa T. et al. Monitoring trophic status using in situ data and Sentinel-2 MSI algorithm: lesson from Lake Malombe, Malawi. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 29755-29772. DOI:10.1007/s11356-022-24288-8.
9. Zhang S., Liu N., Luo M. et al. Downscaling Sentinel-3 chlorophyll-a concentration for inland lakes based on multivariate analysis and gradient boosting decision trees regression. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2023. P. 1-18. DOI:10.1109/JSTARS.2023.3301791.
10. Yang X., Jiang Y., Xuwei D. et al. Temporal and spatial variations of chlorophyll a concentration and eutrophication assessment (1987-2018) of Donghu Lake in Wuhan using Landsat images. *Water*. 2020. Vol. 12. P. 2192. DOI:10.3390/w12082192.
11. Gidudu A., Letaru L., Kulabako R. Empirical modeling of chlorophyll a from MODIS satellite imagery for trophic status monitoring of Lake Victoria in East Africa. *Journal of Great Lakes Research*. 2021. Vol. 47. N. 4. P. 1209-1218. DOI:10.1016/j.jglr.2021.05.005.
12. Yu Z., Yang K., Luo Y. et al. Research on the lake surface water temperature downscaling based on deep learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2021. Vol. 14. P. 5550-5558. DOI:10.1109/JSTARS.2021.3079357.
13. Pozdnyakov D.V., Korosov A.A., Petrova N.A., Grassle H. Multi-year satellite observations of Lake Ladoga's biogeochemical dynamics in relation to the lake's trophic status. *Journal of Great Lakes Research*. 2013. Vol. 39. P. 34-45. DOI:10.1016/j.jglr.2013.05.002.

ОДНОЛИНЕЙНАЯ СМО ВИДА $M/(M_1, M_2)/1(N_1, N_2)$ С АБСОЛЮТНЫМ ПРИОРИТЕТОМ И НЕТЕРПЕЛИВЫМИ ЗАЯВКАМИ

Е.А. Мануйлова, С.П. Моисеева
Томский государственный университет
katusham0912@gmail.com, smoiseeva@mail.ru

Системы массового обслуживания с абсолютным приоритетом и нетерпеливыми заявками представляют собой особый класс систем, где каждая заявка имеет свойство приоритета и может быть характеризована степенью нетерпимости к ожиданию обслуживания [1]. Абсолютный приоритет означает, что заявки с более высоким приоритетом имеют преимущество перед заявками с более низким приоритетом и должны быть обработаны в первую очередь. Одноканальные системы массового обслуживания с абсолютным приоритетом и нетерпеливыми заявками имеют высокую актуальность в различных областях, где важно управление потоками запросов или обслуживание клиентов [2]. Изучение таких систем позволяет разрабатывать оптимальные стратегии управления обслуживанием, минимизировать время ожидания для всех категорий заявок и обеспечивать высокий уровень обслуживания даже в условиях повышенной загрузки или изменяющихся условий.

В работе рассматривается математическая модель однолинейной системы массового обслуживания с двумя потоками разноприоритетной информации.

На вход системы поступает два простейших потока заявок, при этом каждый тип заявок имеет свою собственную интенсивность: λ_1 для приоритетных заявок и λ_2 для неприоритетных. Время обслуживания заявок является случайной величиной с экспоненциальным распределением вероятностей, где μ_1 и μ_2 представляют параметры соответствующих экспоненциальных распределений вероятностей.

Время ожидания в очереди также представляет собой случайную величину с экспоненциальным распределением вероятностей с параметрами α_1 и α_2 , соответственно.

Система обладает ограниченными по объему бункерами, каждый из которых предназначен для определенного типа заявок, где N_1 – емкость первого бункера, а N_2 – емкость второго бункера. Увеличение объема бункера снижает вероятность утраты заявок. Если прибор свободный, то любая поступающая заявка будет принята к обслуживанию. Если прибор занят обслуживанием приоритетной заявки, а в соответствующем бункере есть свободное место, то поступившая заявка занимает его и ждет обслуживания. Если прибор занят обслуживанием неприоритетной заявки, а новая поступившая заявка является приоритетной, то приоритетная заявка вытесняет текущую обработку неприоритетной заявки, и встает на прибор. Если места в бункере заполнены, то любая поступившая заявка теряется. Однако, как только прибор закончит обслуживание – в очереди освободится место.

Кроме того, в настоящей системе вводится ограничение на время ожидания, следовательно, добавляется и параметр, отвечающий за это условие, а именно α_1 – интенсивность выхода заявок первого типа из бункера при потере актуальности передаваемых ими сообщений, α_2 – интенсивность выхода заявок второго типа из бункера. Очевидно, что величина $1/\alpha_i$ имеет смысл среднего срока жизни информации, которую «несут» поступающие заявки.

Пусть $i_1(t)$ – число приоритетных заявок в бункере в момент времени t , $i_2(t)$ – число неприоритетных заявок в бункере в момент времени t .

Состояние прибора в момент времени t обозначим как $k(t)$, где:

$$k(t) = \begin{cases} 0, & \text{прибор свободен,} \\ 1, & \text{прибор занят обслуживанием приоритетной заявки,} \\ 2, & \text{прибор занят обслуживанием неприоритетной заявки} \end{cases}$$

Таким образом, получим трехмерный марковский случайный процесс $\{i_1(t), i_2(t), k(t)\}$, для стационарного распределение вероятностей которого составлены уравнения Колмогорова:

для $i_1 = 0, i_2 = 0$

$$\begin{aligned} -(\lambda_1 + \lambda_2)\pi_0(0,0) + \mu_1\pi_1(0,0) + \mu_2\pi_2(0,0) &= 0, \\ -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)\pi_1(0,0) + \lambda_1\pi_0(0,0) + (\mu_1 + \alpha_1)\pi_1(1,0) + \alpha_2\pi_1(0,1) &= 0, \\ -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)\pi_2(0,0) + \lambda_2\pi_0(0,0) + (\mu_2 + \alpha_2)\pi_2(0,1) + \mu_1\pi_1(0,1) &= 0, \end{aligned}$$

для $i_1 = S, i_2 = 0, 0 < S < N_1$

$$-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + S\alpha_1)\pi_1(S,0) + \lambda_1\pi_1(S-1,0) + \alpha_2\pi_1(S,1) + (\mu_1 + (S+1)\alpha_1)\pi_1(S+1,0) = 0,$$

для $i_1 = 0, i_2 = S, 0 < S < N_2$

$$\begin{aligned} -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \alpha_2)\pi_1(0,S) + \lambda_2\pi_1(0,S-1) + (\mu_1 + \alpha_1)\pi_1(1,S) + \lambda_1\pi_2(0,S-1) + (S+1)\alpha_2\pi_1(0,S+1) &= 0, \\ -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + S\alpha_2)\pi_2(0,S) + \lambda_2\pi_2(0,S-1) + \mu_1\pi_1(0,S+1) + (\mu_2 + (S+1)\alpha_2)\pi_2(0,S+1) &= 0, \end{aligned}$$

для $i_1 = N_1, i_2 = 0$

$$-(\lambda_2 + \mu_1 + N\alpha_1)\pi_1(N,0) + \lambda_1\pi_1(N-1,0) + \alpha_2\pi_1(N,1) = 0,$$

для $i_1 = i, i_2 = j, 0 < i < N_1, 0 < j < N_2$,

$$-(\lambda_1 + \lambda_2 + i\alpha_1 + j\alpha_2 + \mu_1)\pi_1(i,j) + \lambda_2\pi_1(i,j-1) + \lambda_1\pi_1(i-1,j) + (\mu_1 + (i+1)\alpha_1)\pi_1(i+1,j) + (j+1)\alpha_2\pi_1(i,j+1) = 0,$$

для $i_1 = 0, i_2 = N_2$

$$\begin{aligned} -(\lambda_1 + \mu_1 + N_2\alpha_2)\pi_1(0,N_2) + \lambda_2\pi_1(0,N_2-1) + (\mu_1 + \alpha_1)\pi_1(1,N_2) + \lambda_1\pi_2(0,N_2-1) + \lambda_1\pi_2(0,N_2) &= 0, \\ -(\lambda_1 + \mu_2 + N_2\alpha_2)\pi_2(0,N_2) + \lambda_2\pi_2(0,N_2-1) &= 0, \end{aligned}$$

для $i_1 = N_1, i_2 = j$

$$-(\lambda_2 + j\alpha_2 + N_1\alpha_1 + \mu_1)\pi_1(N_1,j) + \lambda_2\pi_1(N_1,j-1) + \lambda_1\pi_1(N_1-1,j) + (j+1)\alpha_2\pi_1(N_1,j+1) = 0.$$

Очевидно, что для искоемых вероятностей должно выполняться условие нормировки

$$\sum_{k=0}^2 \sum_{i_1=0}^{N_1} \sum_{i_2=0}^{N_2} \pi_k(i_1, i_2) = 1.$$

Размерность этой системы нелинейно возрастает при увеличении числа мест в бункере. Именно данный этап является наиболее трудоемким при исследовании системы вручную, ведь при увеличении количества мест в одном или другом бункере всего на единицу наблюдается резкое увеличение числа уравнений и, как следствие, размерности матрицы коэффициентов, что затрудняет рассмотрение системы с достаточно большим объемом бункеров вручную. Поэтому для нахождения распределения вероятностей системы трехмерного процесса для системы с произвольным объемом бункеров разработан и реализован на языке Python алгоритм автоматического построения матриц коэффициентов системы линейных уравнений. Результатом работы алгоритма является вывод распределения вероятностей $\pi_k(i_1, i_2)$ по всем возможным состояниям системы.

1. Джейсуол Н.К. Очереди с приоритетами/ Пер. с англ./Пер. И.С. Нефедовой и В.С. Манусевича; Под ред. В.В. Калашникова. М.: Мир, 1973. 279 с.
2. Бронштейн О.И. Модели приоритетного обслуживания в информационно-вычислительных системах/ О.И. Бронштейн, И.М. Духовный. М.: Наука, 1976. 220 с.

ГАМИЛЬТОНОВ ФОРМАЛИЗМ ДЛЯ МЯГКИХ И ЖЕСТКИХ ВОЗБУЖДЕНИЙ НЕАБЕЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ. ПАРАФЕРМИ-СТАТИСТИКА ПОРЯДКА 2

Ю.А. Марков, М.А. Маркова

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

В докладе представлены результаты по построению (псевдо)классического гамильтонова формализма для самосогласованного описания нелинейных процессов рассеяния, трансформации мягких коллективных возбуждений как бозонного, так и фермионного типов в высокотемпературной кварк-глюонной плазме (КГП) с последующим обобщением на процессы рассеяния мягких мод колебаний на жестких частицах КГП [3,5, 7-11]. Статья [3] посвящена рассмотрению чисто бозонного сектора мягких коллективных возбуждений КГП, построению соответствующего кинетического уравнения, описывающего процесс упругого рассеяния плазмонов друг на друге. В работах [5,7] дано обобщение на фермионный сектор коллективных мод колебаний неабелевой плазмы, с использованием функций, принимающих значения в алгебре Грассмана. В статьях [8-11] представлено дальнейшее развитие гамильтонова подхода на случай учета прямого взаимодействия мягких бозе-возбуждений КГП с жесткими цветозаряженными частицами – термальными или внешними кварками, антикварками и глюонами. Получен явный вид эффективного гамильтониана четвертого порядка, описывающего процесс упругого рассеяния плазмона на высокоэнергичной цветозаряженной частице, и найдена самосогласованная система кинетических уравнений больцмановского типа, учитывающая временную эволюцию среднего значения цветного заряда жесткой частицы. На основе этих уравнений рассмотрена модельная задача взаимодействия двух бесконечно узких волновых пакетов.

В работах [1, 2] установлена связь между деформированной алгеброй Дэффина-Кеммера-Петье и расширенной системой парафермионных трилинейных коммутационных соотношений для операторов рождения и уничтожения и некоторого дополнительного оператора, подчиняющихся парастатистике порядка 2, основанной на алгебре Ли $so(2M + 2)$. Введена соответствующая система парафермионных когерентных состояний как функция парagrассмановых чисел. Получено представление для дополнительного оператора в терминах генераторов ортогональной группы $SO(2M)$, правильно воспроизводящее действие этого оператора на векторы состояний конечномерного пространства Фока. В алгебре парagrассмановых чисел введено некоммутативное ассоциативное произведение звездочка (произведение Мойла) как прямое обобщение произведения звездочка в алгебре Грассмана. Показано, что при вычислении матричных элементов различных операторных выражений необходимо принимать во внимание, что вместо стандартного пространства состояний (пространство Фока) мы работаем в так называемом обобщенном пространстве состояний Ohnuki и Kametuchi, векторы состояний которого включают в свое определение парagrассмановы числа.

В статье [4] рассмотрена алгебра парagrассмановых чисел, имеющая порядок $p = 2$ и находящаяся в инволюции. В данной алгебре на основе парафермионных когерентных состояний введено некоммутативное, ассоциативное произведение звёздочка. Рассмотрена также алгебра операторов рождения и уничтожения, подчиняющихся параферми-статистике порядка $p = 2$. Эти операторы удовлетворяют системе трилинейных соотношений параферми-алгебра. В частном случае, когда число образующих N равно двум, доказано следующее

Утверждение. Алгебра операторов рождения и уничтожения, подчиняющихся параферми-статистике порядка $p = 2$, и алгебра параграссмановых чисел того же порядка, снабжённая произведением Мойла, являются изоморфными. Проанализирована возможность обобщения полученного результата на случай, когда N , число образующих алгебру, равно 3 и/или когда параграссманова и параферми алгебры имеют порядок $p = 3$.

В статье [6] в рамках формализма Баба-Мадхаварао предложен самосогласованный подход к получению системы волновых уравнений четвертого порядка для описания массивных частиц со спином $3/2$. Для этой цели введен в рассмотрение новый набор матриц вместо исходных матриц алгебры Баба-Мадхаварао. Проведено соответствующее обобщение полученных результатов на случай взаимодействия с внешним электромагнитным полем, введенным посредством минимальной подстановки. Рассмотрено соответствующее приложение полученных результатов к задаче построения представления интеграла по траекториям в парасуперпространстве для пропагатора массивной частицы со спином $3/2$ во внешнем калибровочном поле.

1. Markov Yu.A., Markova M.A., Bondarenko A.I. Path integral representation for inverse third order wave operator within the Duffin-Kemmer-Petiau formalism. I. Journal of High Energy Physics. 2020. Vol. 7. P. 094(33).
2. Markov Yu.A., Markova M.A. Generalization of Geyer's commutation relations with respect to the orthogonal group in even dimensions. The European Physical Journal C. 2020. Vol. 80. P. 1153.
3. Марков Ю.А., Маркова М.А., Марков Н.Ю., Гитман Д.М. Гамильтонов формализм для бозе-возбуждений в плазме с неабелевым типом взаимодействия. Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Т. 157. Вып. 2. С. 327-341.
4. Markov Yu.A., Markova M.A. Star product for para-Grassmann algebra of order two. Advances in Applied Clifford Algebras. 2021. Vol. 31. P. 27(18).
5. Марков Ю. А., Маркова М.А., Марков Н.Ю. Гамильтонов формализм для коллективных фермионных волн в кварк-глюонной плазме. Известия ВУЗов. Физика. 2021. Т. 64, № 12. С. 68–78.
6. Марков Ю.А., Маркова М.А., Бондаренко А.И. Алгебраический подход к построению волнового уравнения для частиц со спином $3/2$. Итоги науки и техники. Сер. Современ. Мат. и ее прил. Темат. Обз. ВИНТИ РАН. 2021. Т. 196. С. 50–65.
7. Markov Yu.A., Markova M.A., Markov N.Yu. Hamiltonian formalism for Fermi excitations in a plasma with a non-Abelian interaction. Int. J. Mod. Phys. A. 2023. V. 38. P. 2350015(77).
8. Марков Ю.А., Маркова М.А., Марков Н.Ю. Гамильтонов формализм для коллективных бозонных волн в кварк-глюонной плазме: рассеяние плазмонов на жесткой цветной частице. Известия ВУЗов. Физика. 2023. Т. 66, № 12. С. 151-165.
9. Марков Ю.А., Маркова М.А., Марков Н.Ю. Гамильтонов формализм для жестких и мягких возбуждений в плазме с неабелевым взаимодействием. Итоги науки и техники. Сер. Современ. Мат. и ее прил. Темат. Обз. ВИНТИ РАН. 2024. Т. 234. С. 143–158.
10. Марков Ю.А., Маркова М.А., Марков Н.Ю. О точном решении уравнений эволюции для двух взаимодействующих узких волновых пакетов, распространяющихся в неабелевой плазме. Итоги науки и техники. Сер. Современ. Мат. и ее прил. Темат. Обз. ВИНТИ РАН. 2024. Т. 234. С. 159–169.
11. Markov Yu.A., Markova M.A., Markov N.Yu. Hamiltonian formalism for Bose excitations in a plasma with a non-Abelian interaction I: Plasmon - hard particle scattering. Nuclear Physics A. 2024. Vol. 1048. P. 122903.

КЛАССИЧЕСКАЯ МАТРИЦА РАССЕЙНИЯ ДЛЯ ЖЕСТКИХ И МЯГКИХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КВАРК-ГЛЮОННОЙ ПЛАЗМЕ

Ю.А. Марков¹, М.А. Маркова^{1,2}, Н.Ю. Марков^{1,2}

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

²Иркутский государственный университет

markov@icc.ru, markova@icc.ru, NYumarkov@gmail.com

В работе получен явный вид классической матрицы рассеяния для плазмы с неабелевым типом взаимодействия. Данная матрица для систем с распределенными параметрами впервые была предложена в работах В.Е. Захарова и Е.И. Шульмана [1,2].

В качестве исходной системы рассматривается следующая система уравнений Гамильтона, предложенная в [3,4]:

$$\frac{\partial c_k^a}{\partial t} = -i(\omega_k^l - \mathbf{v} \cdot \mathbf{k}) c_k^a - i \frac{\delta \mathcal{H}_{int}}{\delta c_k^{*a}}, \quad \frac{dQ^a}{dt} = \frac{\partial \mathcal{H}_{int}}{\partial Q^b} f^{abc} Q^c. \quad (1)$$

Здесь \mathcal{H} – некоторый гамильтониан взаимодействия, f^{abc} – антисимметричные структурные константы алгебры Ли $su(N_c)$. Следуя рассуждениям [1,2], в перейдем к рассмотрению системы с взаимодействием, которая адиабатически “выключается” при $t \rightarrow \pm\infty$, т.е.

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_{int} e^{-\epsilon|t|}, \quad \epsilon > 0.$$

Решение системы уравнений (1) при этом асимптотически переходит в решение уравнений свободного поля:

$$c_k^a(t) \rightarrow c_k^{\pm a}(t) \equiv c_k^{\pm a} e^{-i(\omega_k^l - \mathbf{v} \cdot \mathbf{k})t}, \quad Q^a(t) \rightarrow Q^{\pm a},$$

где в правой части величины $c_k^{\pm a}$ и $Q^{\pm a}$ не зависят от времени. Для дальнейшего анализа перейдем к так называемому “представлению взаимодействия”

$$c_k^a(t) = \tilde{c}_k^a(t) e^{-i(\omega_k^l - \mathbf{v} \cdot \mathbf{k})t}, \quad c_k^{*a}(t) = \tilde{c}_k^{*a}(t) e^{-i(\omega_k^l - \mathbf{v} \cdot \mathbf{k})t}.$$

В новых переменных уравнения (1) эквивалентны интегральным уравнениям, определяющим эволюцию во времени рассматриваемой системы

$$\begin{aligned} \tilde{c}_k^a(t) &= c_k^{-a} - \frac{i}{2} \int_{-\infty}^t d\tau \frac{\delta \tilde{\mathcal{H}}_{int}}{\delta \tilde{c}_k^{*a}(\tau)} e^{-\epsilon|\tau|}, \\ Q^a(t) &= Q^{-a} + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^t d\tau \frac{\delta \tilde{\mathcal{H}}_{int}}{\delta Q^b(\tau)} f^{abc} Q^c(\tau) e^{-\epsilon|\tau|}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\tilde{\mathcal{H}}_{int}$ – гамильтониан взаимодействия, выраженный в новых переменных \tilde{c}_k^a и \tilde{c}_k^{*a} . Решения данных интегральных уравнений можно формально представить в следующем виде:

$$\tilde{c}_k^a(t) = S_\epsilon(-\infty, t) [c_k^{-a}, (c_k^{-a})^*, Q^{-a}], \quad Q^a(t) = S_\epsilon(-\infty, t) [c_k^{-a}, (c_k^{-a})^*, Q^{-a}]. \quad (3)$$

При конечном параметре ϵ и достаточно малых амплитудах c_k^{-a} и Q^{-a} интегральный оператор $S_\epsilon(-\infty, t)$ может быть получен в виде сходящегося ряда путем итерации приведенных выше интегральных уравнений.

Далее, переходя к пределу при $t \rightarrow +\infty$, находим из (3)

$$c_k^{+a} = S_\epsilon [c_k^{-a}, (c_k^{-a})^*, Q^{-a}], \quad Q^{+a} = S_\epsilon [c_k^{-a}, (c_k^{-a})^*, Q^{-a}], \quad (4)$$

где $S_\epsilon \equiv S_\epsilon(-\infty, +\infty)$. Соответствующий предел при $\epsilon \rightarrow +0$

$$S = \lim_{\epsilon \rightarrow +0} S_\epsilon(-\infty, +\infty)$$

получил название *классической матрицы рассеяния*.

Определим в явном виде структуру классической матрицы рассеяния в простейшем случае квадратичного по полевым переменным \tilde{c}_k^a и \tilde{c}_k^{*a} и линейного по

цветному заряду Q^a гамильтониана взаимодействия \mathcal{H}_{int} , как он определяется выражением [3, 4]:

$$\mathcal{H}_{int} = if^{a_1 a_2 a_3} \int d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 \mathcal{T}_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(2,A)}(\mathbf{v}) c_{\mathbf{k}_1}^{*a_1} c_{\mathbf{k}_2}^{a_2} Q^{a_3}.$$

В представлении взаимодействия интегральные уравнения (2) принимают вид

$$\tilde{c}_{\mathbf{k}}^a(t) = c_{\mathbf{k}}^{-a} + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^t d\tau \int d\mathbf{k}_1 \mathcal{T}_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}^{(2)baa_1} \tilde{c}_{\mathbf{k}_1}^{a_1}(\tau) Q^b(\tau) e^{i\Delta\omega_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1} \tau - \epsilon|\tau|}, \quad (5)$$

$$Q^a(t) = Q^{-a} + \frac{i}{2} f^{abc} \int_{-\infty}^t d\tau \int d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 \mathcal{T}_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(2)ba_1 a_2} \tilde{c}_{\mathbf{k}_1}^{*a_1}(\tau) \tilde{c}_{\mathbf{k}_2}^{a_2}(\tau) Q^c(\tau) e^{i\Delta\omega_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2} \tau - \epsilon|\tau|}, \quad (6)$$

где “резонансная разность частот” $\Delta\omega_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}$ в показателе экспоненты определена как

$$\Delta\omega_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1} \equiv \omega_{\mathbf{k}}^l - \omega_{\mathbf{k}_1}^l - \mathbf{v} \cdot (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2).$$

Для наших целей достаточно найти итерацию первого порядка для уравнений (5) и (6), т.е. в правой части просто сделать замену: $\tilde{c}_{\mathbf{k}}^a(\tau) \rightarrow c_{\mathbf{k}}^{-a}$ и $Q^a(\tau) \rightarrow Q^{-a}$. В частности, для уравнения (5) получаем

$$\tilde{c}_{\mathbf{k}}^{(1)a}(t) = c_{\mathbf{k}}^{-a} + \frac{1}{2} \int d\mathbf{k}_1 \left(\int_{-\infty}^t d\tau e^{i\Delta\omega_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1} \tau - \epsilon|\tau|} \right) \mathcal{T}_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}^{(2)baa_1} c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1} Q^{-b}. \quad (7)$$

Предельное выражение для интеграла в круглых скобках имеет следующий вид:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \lim_{\epsilon \rightarrow +0} \int_{-\infty}^t d\tau e^{i\Delta\omega_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1} \tau - \epsilon|\tau|} = 2\pi\delta(\Delta\omega_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}).$$

Таким образом, в пределе при $\epsilon \rightarrow +0$ и $t \rightarrow +\infty$, находим из (7)

$$c_{\mathbf{k}}^{+a} = c_{\mathbf{k}}^{-a} + \frac{1}{2} \int d\mathbf{k}_1 \mathcal{T}_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}^{(2)baa_1} c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1} Q^{-b} 2\pi\delta(\Delta\omega_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}) \equiv S[c_{\mathbf{k}}^{-a}, (c_{\mathbf{k}}^{-a})^*, Q^{-a}]. \quad (8)$$

Данное выражение определяет классическую матрицу рассеяния в форме интегрального оператора в первом нетривиальном приближении.

Будем искать классическую \mathcal{S} -матрицу в виде экспоненциальной функции

$$\mathcal{S} = e^{i\mathcal{T}},$$

где \mathcal{T} – некоторая вещественная фазовая функция. Правую часть первого соотношения в (4) в пределе при $\epsilon \rightarrow +0$ можно формально представить как

$$c_{\mathbf{k}}^{+a} = c_{\mathbf{k}}^{-a} + \frac{i}{1!} \{c_{\mathbf{k}}^{-a}, \mathcal{T}\} + \frac{i^2}{2!} \{\{c_{\mathbf{k}}^{-a}, \mathcal{T}\}, \mathcal{T}\} + \frac{i^3}{3!} \{\{\{c_{\mathbf{k}}^{-a}, \mathcal{T}\}, \mathcal{T}\}, \mathcal{T}\} + \dots, \quad (9)$$

где фигурные скобки обозначают скобку Ли-Пуассона, как она была определена в [3, 4]. Выпишем её в новых асимптотических переменных $c_{\mathbf{k}}^{-a}$, $(c_{\mathbf{k}}^{-a})^*$ и Q^{-a} :

$$\{F, G\} = \int d\mathbf{k}' \left\{ \frac{\delta F}{\delta c_{\mathbf{k}'}^{-c}} \frac{\delta G}{\delta (c_{\mathbf{k}'}^{-c})^*} - \frac{\delta F}{\delta (c_{\mathbf{k}'}^{-c})^*} \frac{\delta G}{\delta c_{\mathbf{k}'}^{-c}} \right\} + \frac{\delta F}{\delta Q^{-a}} \frac{\delta G}{\delta Q^{-b}} f^{abc} Q^{-c}.$$

Будем искать неизвестную функцию \mathcal{T} в виде наиболее общего разложения по степеням нормальных полевых переменных $c_{\mathbf{k}}^{-a}$, $(c_{\mathbf{k}}^{-a})^*$ и асимптотического цветного заряда Q^{-a} :

$$\begin{aligned} \mathcal{T} = & F^a Q^{-a} + \int d\mathbf{k}_1 \left[g_{\mathbf{k}_1}^{a_1} c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1} + g_{\mathbf{k}_1}^{*a_1} (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^* \right] + \int d\mathbf{k}_1 \left[f_{\mathbf{k}_1}^{a_1 b} c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1} + f_{\mathbf{k}_1}^{*a_1 b} (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^* \right] Q^{-b} + \\ & \int d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 \left[g_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(1)a_1 a_2} c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1} c_{\mathbf{k}_2}^{-a_2} + g_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(2)a_1 a_2} (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^* c_{\mathbf{k}_2}^{-a_2} + g_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{*(1)a_1 a_2} (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^* (c_{\mathbf{k}_2}^{-a_2})^* \right] + \quad (10) \\ & \int d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 \left[G_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(1)a_1 a_2 b} c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1} c_{\mathbf{k}_2}^{-a_2} + G_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(2)a_1 a_2 b} (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^* c_{\mathbf{k}_2}^{-a_2} + G_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{*(1)a_1 a_2 b} (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^* (c_{\mathbf{k}_2}^{-a_2})^* \right] Q^{-b} + \dots \end{aligned}$$

В рамках нашего приближения достаточно рассмотреть только второй член в правой части (9)

$$\{c_k^{-a}, \mathcal{T}\} = \frac{\delta \mathcal{T}}{\delta (c_k^{-a})^*} = g_k^{*a} + f_k^{*ab} Q^{-b} + \int d\mathbf{k}_1 \left[g_{k,k_1}^{(2)aa_1} c_{k_1}^{-a_1} + 2g_{k,k_1}^{*(1)aa_1} (c_{k_1}^{-a_1})^* \right] + \int d\mathbf{k}_1 \left[G_{k,k_1}^{(2)aa_1b} c_{k_1}^{-a_1} + 2G_{k,k_1}^{*(1)aa_1b} (c_{k_1}^{-a_1})^* \right] Q^{-b} + \dots$$

Полученное выражение необходимо подставить в (9) и сравнить его с асимптотическим соотношением (8). В итоге определим первую отличную от нуля коэффициентную функцию в представлении (10)

$$G_{k,k_1}^{(2)aa_1b} = \frac{1}{2} \mathcal{T}_{k_1,k_2}^{(2)ba_1a_2} 2\pi \delta(\Delta\omega_{k_1,k_2})$$

и поэтому вместо (10) мы можем записать

$$\mathcal{T} = \int d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 G_{k_1,k_2}^{a_1a_2b} (c_{k_1}^{-a_1})^* c_{k_2}^{-a_2} Q^{-b} + \dots$$

1. Захаров В.Е., Шульман Е.И. О матрице рассеяния и интегрируемости волновых систем, обладающих дополнительным интегралом движения. Доклады Академии наук СССР. 1985. Т. 283, № 6. С. 1325-1328.
2. Zakharov V.E., Schulman E.I. On additional motion invariants of classical Hamiltonian wave systems. Physica D. 1988. V. 29. P. 283-320.
3. Марков Ю.А., Маркова М.А., Марков Н.Ю. Гамильтонов формализм для жестких и мягких возбуждений в плазме с неабелевым взаимодействием. Итоги науки и техн. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз. 2024. Т. 234. С. 143-158.
4. Markov Yu.A., Markova M.A., Markov N.Yu. Hamiltonian formalism for Bose excitations in a plasma with a non-Abelian interaction I: Plasmon - hard particle scattering. Nuclear Physics A. 2024. V. 1048. P. 122903(38).

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ БЫСТРОЙ ЦВЕТНОЙ ЧАСТИЦЫ В КВАРК-ГЛЮОННОЙ ПЛАЗМЕ

Ю.А. Марков¹, М.А. Маркова^{1,2}, Н.Ю. Марков^{1,2}

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

²Иркутский государственный университет

markov@icc.ru, markova@icc.ru, NYumarkov@gmail.com

В качестве приложения общей теории построения классической матрицы рассеяния для волновых систем с распределенными параметрами [1], в рамках гамильтонова подхода рассмотрена задача вычисления потерь энергии высокоэнергетической цветозаряженной частицы, проходящей через горячую кварк-глюонную плазму. При решении данной задачи используется классическое выражение для потерь энергии частиц на единицу длины в обычной плазме [2] с минимальным обобщением на цветовую степень свободы:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{1}{|\mathbf{v}|} \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{(2\pi)^4}{\tau} \int d\mathbf{k} d\omega \int dQ_0 \langle \mathbf{J}_Q^{*a}(\mathbf{k}, \omega) \cdot \mathbf{E}_Q^a(\mathbf{k}, \omega) \rangle. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{v} – скорость энергичной частицы; $\mathbf{E}_Q^a(\mathbf{k}, \omega)$ и $\mathbf{J}_Q^a(\mathbf{k}, \omega)$ – Фурье-образ хромоелектрического поля и эффективного тока, соответственно. К процедуре усреднения по ансамблю в уравнении (1) мы добавили интегрирование по начальному значению цветного заряда Q_0^a с мерой [3]

$$dQ_0 = \prod_{a=1}^{d_A} dQ_0^a \delta(Q_0^a Q_0^a - q_2) \delta(d^{abc} Q_0^a Q_0^b Q_0^c - q_3), \quad d_A = N_c^2 - 1,$$

где постоянные q_2 и q_3 фиксируют значения инвариантов Казимира алгебры Ли $su(N_c)$.

Для определения потерь энергии необходимо знание некоторого эффективного тока жесткой цветозаряженной частицы, обусловленного ее взаимодействием с окружающей средой. По аналогии с квантовой теорией поля [4] определим связь между классической матрицей рассеяния \mathcal{S} и эффективным током жесткой цветозаряженной частицы с помощью следующего выражения:

$$\mathcal{J}_Q^{a\mu}(x, t) = -i\mathcal{S}^\dagger \frac{\delta \mathcal{S}}{\delta \mathcal{A}_\mu^{-a}(x)}. \quad (2)$$

Классическую -матрицу в свою очередь можно представить в виде экспоненциальной функции

$$\mathcal{S} = e^{i\mathcal{J}}. \quad (3)$$

Поскольку асимптотические (при $t \rightarrow \pm\infty$) калибровочные поля $\mathcal{A}_\mu^{-a}(x)$ и $\mathcal{A}_\mu^{+a}(x)$ удовлетворяют уравнениям свободного поля, они могут быть разложены на положительную и отрицательную частотные части инвариантным образом. Таким образом, можно написать, например,

$$\mathcal{A}_\mu^{-a}(x) = \int d\mathbf{k} \left(\frac{Z_l(\mathbf{k})}{2\omega_k^l} \right)^{1/2} \left\{ \epsilon_\mu^l(\mathbf{k}) c_k^{-a} e^{-i\omega_k^l t + i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} + \epsilon_\mu^{*l}(\mathbf{k}) (c_k^{-a})^* e^{i\omega_k^l t - i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} \right\}, \quad (4)$$

где c_k^{-a} и $(c_k^{-a})^*$ – асимптотические in-амплитуды, а $\epsilon_\mu^l(\mathbf{k}) = (\epsilon_0^l(\mathbf{k}), \epsilon^l(\mathbf{k}))$ – вектор поляризации продольной моды в A_0 -калибровке. В системе покоя плазмы $\epsilon_0^l(\mathbf{k}) = 0$ и $(\epsilon^l(\mathbf{k}))^2 = 1$.

Обращая (4), можно выразить c_k^{-a} и $(c_k^{-a})^*$ в терминах функции поля в координатном представлении $\mathcal{A}_i^{-a}(x)$ и ее производной $\dot{\mathcal{A}}_i^{-a}(x)$. В результате получим

$$c_k^{-a} = \frac{1}{2} \left(\frac{2\omega_k^l}{Z_l(\mathbf{k})} \right)^{1/2} \int \frac{d\mathbf{y}}{(2\pi)^3} e^{i\omega_k^l t - i\mathbf{k} \cdot \mathbf{y}} \epsilon_i^l(\mathbf{k}) \left[\mathcal{A}_i^{-a}(\mathbf{y}, t) - \frac{i}{\omega_k} \dot{\mathcal{A}}_i^{-a}(\mathbf{y}, t) \right]. \quad (5)$$

Следующим шагом, с учетом представления (3), перепишем правую часть исходного выражения для эффективного тока (2) в виде:

$$\mathcal{J}_Q^{ai}(\mathbf{x}, t) = \frac{\delta \mathcal{J}}{\delta \mathcal{A}_i^{-a}(\mathbf{x})} = \int d\mathbf{k}_1 \left\{ \frac{\delta \mathcal{J}}{\delta c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1}} \frac{\delta c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1}}{\delta \mathcal{A}_i^{-a}(\mathbf{x})} + \frac{\delta \mathcal{J}}{\delta (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^*} \frac{\delta (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^*}{\delta \mathcal{A}_i^{-a}(\mathbf{x})} \right\}. \quad (6)$$

С учетом представления (5) со значением $t = 0$ в правой части, легко находим вариационную производную

$$\frac{\delta c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1}}{\delta \mathcal{A}_i^{-a}(\mathbf{x})} = \delta^{aa_1} \frac{1}{2(2\pi)^3} \left(\frac{2\omega_{\mathbf{k}_1}^l}{Z_l(\mathbf{k}_1)} \right)^{1/2} e^{-i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x}} \epsilon_i^l(\mathbf{k}_1) \delta(t). \quad (7)$$

Используя явный вид для фазовой функции в первом неисчезающем приближении: $\mathcal{J} = \int d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 G_{\mathbf{k}_1}^{(2)a_1 a_2 b} (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^* c_{\mathbf{k}_2}^{-a_2} Q^{-b}$ и вариационную производную (7), находим из (6) искомый эффективный ток в координатном представлении:

$$\mathcal{J}_Q^a(\mathbf{x}, t) = \int d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 \left\{ G_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(2)a_1 ab} F_{\mathbf{k}_2} \epsilon^l(\mathbf{k}_2) e^{-i\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{x}} (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^* + G_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(2)aa_2 b} F_{\mathbf{k}_1} \epsilon^l(\mathbf{k}_1) e^{-i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x}} c_{\mathbf{k}_2}^{-a_2} \right\} \delta(t) Q^{-b}.$$

Здесь для краткости обозначений полагаем

$$F_{\mathbf{k}} = \frac{1}{2(2\pi)^3} \left(\frac{2\omega_{\mathbf{k}}^l}{Z_l(\mathbf{k})} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Соответствующий ток в Фурье-представлении имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_Q^a(\mathbf{k}, \omega) &= \int dt d\mathbf{x} \mathcal{J}_Q^a(\mathbf{x}, t) e^{i\omega t - i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}} \\ &= (2\pi)^3 \int d\mathbf{k}_1 G_{\mathbf{k}_1, -\mathbf{k}}^{(2)a_1 ab} F_{-\mathbf{k}} \epsilon^l(-\mathbf{k}) (c_{\mathbf{k}_1}^{-a_1})^* Q^{-b} + (2\pi)^3 \int d\mathbf{k}_2 G_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_2}^{(2)aa_2 b} F_{\mathbf{k}} \epsilon^l(\mathbf{k}) (c_{\mathbf{k}_2}^{-a_2})^* Q^{-b}. \end{aligned} \quad (9)$$

Вернемся теперь к выражению для потерь энергии (1). Хромозлектрическое поле в (1), порождаемое эффективным током (9), определяется уравнением поля во временной калибровке

$$E_Q^{ai}(\mathbf{k}, \omega) = -i\omega {}^* \tilde{D}^{ij}(k) \mathcal{J}_Q^{aj}(\mathbf{k}, \omega),$$

где “одетый” тепловыми поправками глюонный пропагатор в данной калибровке имеет следующую трехмерную структуру:

$${}^* \tilde{D}^{ij}(k) = \left(\frac{k^2}{\omega^2} \right) \left(\frac{k^i k^j}{k^2} \right) {}^* \Delta^l(k) + \left(\delta^{ij} - \frac{k^i k^j}{k^2} \right) {}^* \Delta^t(k). \quad (10)$$

Нас интересует здесь лишь первый член в правой части, связанный с продольными возбуждениями (плазмонами) кварк-глюонной плазмы. Подставляя выражение для продольной части хромозлектрического поля $E_Q^{ai}(\mathbf{k})$ в уравнение (1), с учетом соответствующей структуры пропагатора (10), вместо (1) получаем формулу для потерь энергии

$$-\frac{dE}{dx} = -\frac{1}{|\mathbf{v}|} \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{(2\pi)^4}{\tau} \int d\mathbf{k} d\omega \int dQ^- \frac{k^2}{\omega k^2} \langle |(\mathbf{k} \cdot \mathcal{J}_Q^a(\mathbf{k}, \omega))|^2 \rangle \text{Im}({}^* \Delta^l(k)), \quad (11)$$

где мера интегрирования по цвету dQ^- определена для асимптотического значения цветного заряда Q^{-a} . Используя явное выражение для Фурье-образа эффективного тока $\mathcal{J}_Q^a(\mathbf{k}, \omega)$ (9), корреляционную функцию в подинтегральном выражении (11) приводим к следующему виду:

$$\begin{aligned}
& \langle |(\mathbf{k} \cdot \mathcal{J}_Q^a(\mathbf{k}, \omega))|^2 \rangle = \\
& = (2\pi)^6 \left\{ F_{-\mathbf{k}}^2 \mathbf{k}^2 \int d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}'_1 G_{\mathbf{k}_1, -\mathbf{k}}^{(2)a_1 ab} G_{\mathbf{k}'_1, -\mathbf{k}}^{*(2)a'_1 ab'} \mathcal{N}_{\mathbf{k}_1}^{-a_1 a'_1} \delta(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}'_1) \right. \\
& \left. + F_{\mathbf{k}}^2 \mathbf{k}^2 \int d\mathbf{k}_2 d\mathbf{k}'_2 G_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_2}^{(2)aa_2 b} G_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'_2}^{*(2)aa'_2 b'} \mathcal{N}_{\mathbf{k}'_2}^{-a'_2 a_2} \delta(\mathbf{k}'_2 - \mathbf{k}_2) \right\} Q^{-b} Q^{-b'}.
\end{aligned} \tag{12}$$

Здесь в правой части оставлены только члены с нетривиальными корреляционными функциями, а для матрицы плотности числа плазмонов используем следующую цветовую декомпозицию [5]

$$\mathcal{N}_{\mathbf{k}}^{-aa'} = \delta^{aa'} N_{\mathbf{k}}^{-l} + (T^c)^{aa'} Q^{-c} W_{\mathbf{k}}^{-l}. \tag{13}$$

Проанализируем сначала вклад от бесцветной части асимптотической плотности числа плазмонов, т.е. вклад, пропорциональный скалярной плотности $N_{\mathbf{k}}^{-l}$. С этой целью выполним интегрирование по асимптотическому заряду Q^{-a} в выражении (12). Таким образом, вместо (12) можно записать

$$\begin{aligned}
& \int dQ^- \langle |(\mathbf{k} \cdot \mathcal{J}_Q^a(\mathbf{k}, \omega))|^2 \rangle = \\
& = (2\pi)^6 \frac{C_a}{d_a} \left\{ F_{-\mathbf{k}}^2 \mathbf{k}^2 \int d\mathbf{k}_1 G_{\mathbf{k}_1, -\mathbf{k}}^{(2)a_1 ab} G_{\mathbf{k}_1, -\mathbf{k}}^{*(2)a_1 ab} N_{\mathbf{k}_1}^{-l} + F_{\mathbf{k}}^2 \mathbf{k}^2 \int d\mathbf{k}_1 G_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}^{aa_1 b} G_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}^{*(2)aa_1 b} N_{\mathbf{k}_1}^{-l} \right\}.
\end{aligned}$$

Подставляя в это выражение явный вид коэффициентной функции $G_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(2)a_1 a_2 b} = \frac{1}{2} \mathcal{T}_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(2)ba_1 a_2} 2\pi \delta(\Delta\omega_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1})$, где $\mathcal{T}_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2}^{(2)ba_1 a_2}$ – полная эффективная амплитуда [5], а затем в (11), приходим к

$$-\frac{dE}{dx} = -\frac{1}{|\mathbf{v}|} \frac{(2\pi)^{10}}{2} N_c^2 \int d\mathbf{k} d\mathbf{k}_1 d\omega \left(\frac{k^2}{\omega} \right) F_{\mathbf{k}}^2 |\mathcal{T}_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}^{(2)}|^2 N_{\mathbf{k}_1}^{-l} (2\pi) \delta(\Delta\omega_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}) \text{Im}(*\Delta^l(k)). \tag{14}$$

Последним шагом в подинтегральном выражении в правой части уравнения (14) полагаем

$$\begin{aligned}
& \text{Im}(*\Delta^l(k)) \cong -\pi \text{sign}(\omega) \delta(\text{Re} * \Delta^{-1l}(k)) = \\
& = -\pi \text{sign}(\omega) \left(\frac{Z_l(\mathbf{k})}{2\omega_{\mathbf{k}}^l} \right) [\delta(\omega - \omega_{\mathbf{k}}^l) + \delta(\omega + \omega_{\mathbf{k}}^l)].
\end{aligned}$$

Подставим последнее представление в (14) и выполним интегрирование по частоте ω . Вспоминая определение функции $F_{\mathbf{k}}$ (8), находим искомое выражение для потерь энергии, связанное с бесцветной частью плотностью числа плазмонов (13)

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{1}{|\mathbf{v}|} \frac{(2\pi)^6}{8} N_c^2 \int d\mathbf{k} d\mathbf{k}_1 \left(\frac{k^2}{\omega_{\mathbf{k}}^l} \right) |\mathcal{T}_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1}^{(2)}|^2 N_{\mathbf{k}_1}^{-l} \delta(\omega_{\mathbf{k}}^l - \omega_{\mathbf{k}_1}^l - \mathbf{v} \cdot (\mathbf{k} - \mathbf{k}_1)).$$

Вклад от цветной части плотности числа плазмонов (13), пропорциональный скалярной плотности $W_{\mathbf{k}}^{-l}$, равен нулю в силу того, что здесь цветовой фактор $\text{tr}(T^a T^c T^a D^c)$, где T^a и D^a – матрицы в присоединённом представлении, в точности обращается в ноль.

1. Захаров В.Е., Шульман Е.И. О матрице рассеяния и интегрируемости волновых систем, обладающих дополнительным интегралом движения. ДАН СССР. 1985. Т. 283. С. 1325-1328.
2. Ахиезер А.И., Ахиезер И.А., Половин Р.В. и др. Электродинамика плазмы. М: Наука, 1974.
3. Kelly P., Liu Q., Lucchesi C., Manuel C. Classical transport theory and hard thermal loops in the quark-gluon plasma. Physical Review D. 1994. Т. 50. С. 4209-4218.
4. Боголюбов Н. Н., Логунов А.А., Тодоров И.Т. Основы аксиоматического подхода в квантовой теории поля. М: Наука, 1969.
5. Markov Yu.A., Markova M.A., Markov N.Yu. Hamiltonian formalism for Bose excitations in a plasma with a non-Abelian interaction I: Plasmon - hard particle scattering. Nuclear Physics A. 2024. V. 1048. С. 122903(38).

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ СОНИФИКАЦИИ ДАННЫХ

Е.В. Межова, А.Г. Балахчи
Иркутский государственный университет
ekmezhova@gmail.com

Сонификация данных — это процесс преобразования данных в звук, позволяющий осуществлять звуковое представление и анализ информации. Этот инновационный подход получил широкое распространение в различных областях, в частности для повышения доступности для людей с нарушениями зрения и получения новых идей в научных исследованиях и анализе данных. Сонификация данных устраняет разрыв между слуховым восприятием и визуализацией данных, что делает её важным инструментом для понимания сложных закономерностей и тенденций, которые могут быть не сразу заметны в традиционных графических форматах.

Основные модели и методы обработки данных звуком можно разделить пять основных типов: аудификация, звуковые иконки, звуковые маркеры, сонификация с сопоставлением параметров и сонификация на основе моделей.

Аудификация — это наиболее простая форма обработки звука. Она включает в себя прямое преобразование потоков данных в звук путем манипулирования значениями данных для получения слышимых частот. Этот метод часто используется в научных областях, таких как сейсмология, где исследователи могут прослушивать сейсмические данные, чтобы получить представление о землетрясениях. Например, НАСА использовало аудификацию для преобразования астрономических данных в звук, что позволяет ученым «слышать» небесные явления.

Звуковые иконки — это метод, разработанный для навигации и ориентации пользователей в структурах данных, таких как деревья каталогов. Они состоят из простых тональных комбинаций или акустических паттернов, значения которых пользователь должен усвоить. Хотя звуковые иконки могут эффективно передавать сложные невербальные сообщения, они требуют определённого уровня знакомства с ними, что может ограничивать их применение в некоторых контекстах.

В отличие от звуковых иконок, звуковые маркеры используют звуки, которые вызывают метафорические ассоциации, что делает их более понятными для пользователей. Это простые тональные комбинации или произвольные акустические модели, значение которых должно быть изучено пользователем, и которые могут быть объединены, чтобы создавать невербальные сообщения более высокого уровня. Например, звук наливающейся в бутылку воды может обозначать процесс наполнения, что помогает пользователям легко понять представляемые данные без длительного обучения. Этот метод сокращает время обучения, необходимое для интерпретации слуховой информации, и улучшает взаимодействие с пользователем. Однако маркеры должны быть хорошо спроектированы, а пользователи должны быть обучены их использованию, по крайней мере, в некоторой степени.

Сонификация с сопоставлением параметров служит промежуточным звеном между аудификацией и подходами, основанными на моделях. В этом методе определенным параметрам звука, таким как высота звука, громкость, длительность или тембр, присваиваются различные значения в наборе данных. Этот подход хорошо подходит для отображения многомерных данных, но усложняется из-за присущей ему запутанности параметров синтеза и обработки звука.

Сонификация на основе моделей — это более сложный метод, который использует математические модели для генерации звука на основе характеристик данных. В этом подходе данные преобразуются в динамические модели (или процессы), а не непосредственно в звук. Пользователю остается активировать эти

модели, чтобы исследовать структуры данных с помощью акустической обратной связи, уделяя особое внимание взаимодействию. Этот метод самый трудоёмкий, но он обеспечивает более насыщенный слуховой опыт и может передавать более подробную информацию о многомерных наборах данных без чрезмерного их упрощения.

Конкретный дизайн или экземпляр, полученный с помощью метода сонификации на основе модели, называется моделью сонификации. Процедура для проектирования моделей сонификации заключается в пошаговом определении шести компонентов: настройки, динамика, возбуждения, начального состояния, переменных связей и характеристик слушателя.

Были выделены ключевые этапы, которые могут помочь специалистам эффективно преобразовывать данные в звук: выбор данных, сопоставление параметров, нормализация данных и вывод звука.

На основе этих этапов была получена, в качестве примера, запись ударов астероидов, которые образовали кратеры на поверхности Луны. Возраст кратеров сопоставлялся со временем прямым способом. Чтобы регулировать высоту ноты, использовались данные диаметров. Они также применялись, чтобы регулировать скорость звучания ноты.

Выявлены общие закономерности и критические проблемы, с которыми сталкиваются исследователи, что в конечном итоге будет способствовать разработке надёжных рекомендаций по проектированию для будущих работ по сонификации.

1. Hermann T. The sonification handbook / T. Hermann, A. Hunt, J. G. Neuhoff. Berlin : Logos Verlag, 2011. Т. 1.
2. New NASA Black Hole Sonifications with a Remix // NASA: [сайт]. 2022. URL: <https://www.nasa.gov/universe/new-nasa-black-hole-sonifications-with-a-remix/> (дата обращения: 20.11.2024).
3. Cooke J. Exploring data sonification to enable, enhance, and accelerate the analysis of big, noisy, and multi-dimensional data / J. Cooke, W. Diaz-Merced, G. Foran, J. Hannam, B. Garcia. Proceedings of the International Astronomical Union. 2019. Т. 14. №. S339. С. 251-256.
4. Kramer G. Sonification report: Status of the field and research agenda / G. Kramer, B. Walker, T. Bonebright, P. Cook [и др.]. International Community for Auditory Display. 1999.
5. Mazrouei S. Earth and Moon impact flux increased at the end of the Paleozoic / S. Mazrouei., R. R. Ghent, W. F. Bottke, A. H. Parker, T. M. Gernon // Science. 2019. Т. 363. №. 6424. С. 253-257.

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕСКОЛЬКИХ СТРАН НА РЫНКЕ УГЛЯ КАК ЗАДАЧА ПОИСКА ОБОБЩЁННОГО РАВНОВЕСИЯ ПО НЭШУ*

И.М. Минарченко¹, С. Батбилэг²

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

²Монгольский государственный университет
minar@isem.irk.ru, batbileg@seas.num.edu.mn

Китай является крупным потребителем угольной продукции, в связи с чем исследуется возможность ввоза угля в Китай из других стран. В качестве основных стран-экспортёров рассматриваются Монголия и Россия. При этом остальные страны-экспортёры рассматриваются в агрегированном виде.

Сформулируем теоретико-игровую модель экспорта угля в Китай следующим образом. Каждый игрок в модели является страной-экспортёром. Пусть $I = \{1, 2, 3\}$ обозначает множество игроков, где 1 – Монголия, 2 – Россия, 3 – остальные страны. Для каждого $i \in I$ введём следующие обозначения: x_i – экспорт угольной продукции страны i в Китай; $\pi_i(\cdot)$ – функция прибыли страны i ; $c_i(\cdot)$ – функция издержек производства угля страны i ; $p_i(\cdot)$ – функция цены, по которой Китай покупает уголь в стране i ; x_i^{min} и x_i^{max} – соответственно минимальный и максимальный экспорт угля страны i в Китай. Естественно полагать, что $x_i^{min} \geq 0$, $i \in I$. Наконец, Q обозначает необходимый суммарный импорт угля Китаем, при этом

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq Q.$$

Будем полагать, что $x_1^{max} + x_2^{max} + x_3^{max} > Q$. Множество допустимых ситуаций в модели примет следующий вид:

$$X = \{x \in R^3: x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}, i \in I, x_1 + x_2 + x_3 \leq Q\}.$$

Предполагается, что функции цен и функции издержек зависят только от собственного объёма поставок угля в Китай. Прибыль каждого игрока складывается из дохода, полученного от продажи угля Китаю, за вычетом издержек на его производство:

$$\pi_i(x_i) = p_i(x_i)x_i - c_i(x_i), \quad i \in I.$$

Таким образом, имеем следующую игровую постановку, состоящую из оптимизационных задач трёх игроков:

$$\pi_i(x_i) \rightarrow \max_{x_i} x_i \in X_i(x_{-i}), \quad i \in I, \quad (1)$$

где

$$X_i(x_{-i}) = \left\{ x_i \in R: x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}, x_i \leq Q - \sum_{j \in I \setminus \{i\}} x_j \right\}, i \in I.$$

В игре (1) множество стратегий каждого игрока зависит от значений переменных других участников [1]. В такой игре ситуация $x^* \in X$ называется обобщённым равновесием по Нэшу в игре (1), если

$$\pi_i(x_i^*) \geq \pi_i(x_i), x_i \in X_i(x_{-i}^*), i \in I.$$

Ситуация $\hat{x} \in X$ называется оптимальной по Парето [2, 3] в игре (1), если не существует такой ситуации $x \in X$, что

$$\pi_i(x_i) \geq \pi_i(\hat{x}_i), i \in I,$$

при этом хотя бы одно неравенство выполняется как строгое.

Предложение 1. Любая ситуация, оптимальная по Парето в игре (1), является обобщённым равновесием по Нэшу в игре (1).

Также может быть показано, что игра (1) является обобщённой потенциальной игрой [4, 5], при этом потенциальная функция имеет следующий вид:

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-41-03004.

$$P(x) = \pi_1(x) + \pi_2(x) + \pi_3(x).$$

Предложение 2. Любое решение задачи

$$P(x) \rightarrow \max_x, x \in X,$$

является обобщённым равновесием по Нэшу в игре (1).

Таким образом, равновесие в (1) может быть найдено путём решения задачи максимизации потенциальной функции P на множестве X . При этом данная задача в зависимости от выбора вида функций цен и издержек может оказаться невыпуклой.

1. Facchinei F., Kanzow C. Generalized Nash Equilibrium Problems. Ann. Oper. Res. 2010. Vol. 175. P. 177–211.
2. Стрекаловский А. С. Введение в теорию игр: учебное пособие. Иркутск: Иркут. ун-т, 2005.
3. Гермейер Ю. Б. Введение в теорию исследования операций. М.: Наука, 1971.
4. Monderer D., Shapley L. S. Potential Games. Games and Economic Behavior. 1996. Vol. 14. P. 124–143.
5. Facchinei F., Piccialli V., Sciandrone M. Decomposition algorithms for generalized potential games. Comput. Optim. Appl. 2011. Vol. 50. P. 237–262.

МОДЕЛИ МНОГОМОДАЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ*

С.П. Моисеева

Томский государственный университет

smoiseeva@mail.ru

Одним из решений обеспечения качества передачи многомодальных данных является распределение данных приложений пользователя на несколько субпоточков передачи данных, организовав мультипоточковую передачу данных с использованием нескольких доступных интерфейсов связи [1]. В большинстве своем работы, посвященные проблематике мультипоточковой передачи данных, построены на анализе параметров качества передачи данных на имитационных моделях и не всегда учитывают случайный характер моментов поступления запросов.

В работе предлагается модель многомодальной передачи информации в виде многопоточной бесконечнолинейной системы массового обслуживания с каналами различной интенсивности. Интенсивность поступающих потоков зависит от состояния случайной среды, которая определяется цепью Маркова с непрерывным временем с конечным числом состояний $k(t)=1,2,\dots,K$, заданной матрицей инфинитезимальных характеристик $\mathbf{Q} = [q_{ij}]$ ($i,j = 1,\dots,K$). Таким образом, можно говорить о том, что входящие потоки являются марковски модулированными пуассоновскими потоками (Markov Modulated Poisson Process) [2], которые имеют общий управляемый процесс $k(t)$ и определяются и диагональными матрицами условных интенсивностей Λ^l ($l = 1,\dots,M$) с элементами λ_k^l на главной диагонали. Поступающее требование всегда застаёт свободный прибор и моментально занимает его для обслуживания в течение случайного времени, распределенного по экспоненциальному закону с параметрами μ_l ($l = 1,\dots,M$), соответственно. Изменение состояния среды не меняет закона продолжительности обслуживания.

Таким образом, в системе находятся требования разного типа и разных параметров обслуживания. Ставится задача исследования N -мерного немарковского случайного процесса $\{i_1(t), i_2(t), \dots, i_N(t)\}$, описывающего число заявок каждого типа в соответствующем блоке обслуживания. Для нахождения числовых характеристик (математическое ожидание, матрица ковариаций) используются свойства характеристических функций. Доказано, что компоненты многомерного процесса являются линейно зависимыми и исследовано влияние параметров системы на значение коэффициента корреляции.

Исследование многомерного процесса в различных предельных условиях показало, что при условии высокой интенсивности входящих потоков и часто изменяющейся случайной среде многомерное распределение вероятностей числа заявок различного типа можно аппроксимировать многомерным гауссовским. Аналогичные результаты получены для условия эквивалентно растущего времени обслуживания на приборах.

Интересный результат получен для условия предельно редких изменений состояний случайной среды [3]. Показано, что асимптотическая многомерная характеристическая функция совместного распределения вероятностей числа занятых приборов каждого типа имеет вид

$$h(u_1, \dots, u_N) = M \left\{ e^{ju_1 i_1} \dots e^{ju_N i_N} \right\} \approx \sum_{k=0}^K r(k) \exp \left\{ \sum_{l=1}^N \frac{\lambda_k^{(l)}}{\mu_l} (e^{ju_l} - 1) \right\}.$$

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00454, <https://rscf.ru/project/24-21-00454/>

Следовательно, маргинальные распределения вероятностей числа занятых приборов каждого типа являются взвешенной суммой пуассоновских распределений:

$$P(i_s) = \sum_{k=1}^K r(k) \frac{(\rho_k^{(s)})^{i_s}}{i_s!} e^{-\rho_k^{(s)}}, \text{ где } \rho_k^{(s)} = \lambda_k^{(s)} / \mu_s$$

На практике обычно предоставляемые для использования резервы ресурсов ограничены, поэтому допущение, что количество каналов неограниченное, достаточно сильное, так как в этом случае в рассматриваемой системе нет потерь. Но полученные результаты, а именно, асимптотическое распределение вероятностей, позволяют оценить оптимально необходимое количество ресурсов каждого блока для системы с ограниченным ресурсом, обеспечивающую заданную вероятность потерь.

1. Басов, О. О. Методы передачи полимодальной информации / О. О. Басов, И. А. Саитов. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 2. С. 293-299.
2. Назаров А. А., Моисеева С. П. Методы асимптотического анализа в теории массового обслуживания. Томск: Изд-во НТЛ. 2006. 112 с.
3. Невенченко, Е. А. Асимптотический анализ многопоточной неоднородной смо в условии предельно редких изменений состояний случайной марковской среды / Е. А. Невенченко, С. С. Шепилов, С. П. Моисеева. Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2024): материалы XXIII Международной конференции имени А.Ф. Терпугова, Томск, 20–26 октября 2024 года. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2024. С. 126-132.

ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ N ТЕЛ С СОХРАНЕНИЕМ ЭНЕРГИИ И УГЛОВОГО МОМЕНТА

Н.В. Морозов, О.А. Золотов
Институт математики и фундаментальной информатики СФУ
tappmeist.718@gmail.com, ozolot_@mail.ru

Гравитационная задача двух тел является простейшей задачей небесной механики и астрофизики. В относительной системе отсчета в ней существует семь сохраняемых величин: полная энергия E , три компоненты (L_x, L_y, L_z) вектора углового момента L , и три компоненты (P_x, P_y, P_z) вектора Лапласа P . Перечисленные величины тесно связаны с элементами орбиты. Так, энергия определяет большую полуось, модуль вектора Лапласа – эксцентриситет, а компоненты вектора углового момента позволяют найти аргумент перицентра и долготу восходящего узла. Таким образом, соблюдение законов сохранения на протяжении всего процесса численного интегрирования задачи позволяет существенно улучшить точность результата.

Однако наиболее распространенной задачей в области вычислительной астрофизики является гравитационная задача N тел. Встречаются случаи, когда приходится интегрировать большие звездные скопления ($N = 200,000$). В такой задаче соблюдение законов сохранения является необходимым условием, иначе решение может оказаться недостоверным.

Классические методы интегрирования не сохраняют инварианты движения. Так, например, при интегрировании консервативной системы тел явной схемой Рунге-Кутты происходит нефизическое монотонное возрастание полной энергии. По этой причине при решении задач небесной механики распространено использование симплектических методов численного интегрирования, сохраняющих структуру фазового пространства системы. Алгоритмы данного класса являются устойчивыми и заставляют энергию осциллировать, тем самым ограничивая ошибку вычисления. Однако, стоит заметить, что данное поведение не означает строгое сохранение интеграла энергии с теоретической точки зрения, и в некоторых задачах может привести к неверным результатам. Поэтому имеет смысл говорить о введении поправок к уже существующим методам численного интегрирования, которые позволят строго сохранять инварианты движения.

Численное интегрирование задачи предполагает дискретизацию по времени. Обозначим E_0, L_0 соответственно полную энергию и угловой момент системы в начальный момент времени. Для заданных (r^{k-1}, p^{k-1}) шаг интегрирования дает (r^k, p^k) . Полная энергия $E(r^k, p^k)$ и угловой момент $L(r^k, p^k)$ при этом не сохраняются, т.е. $E(r^k, p^k) \neq E_0$ и $L(r^k, p^k) \neq L_0$. К каждому шагу интегрирования будем искать масштабирующие поправки вида $(r^{k'}, p^{k'}) \rightarrow (\beta r^k, \alpha p^k)$, которые удовлетворяют условию

$$\frac{(\sum_i \frac{\bar{p}_i^2}{2m_i} - \sum_{i<j} G \frac{m_i m_j}{|\bar{r}_i - \bar{r}_j|} - E_0)^2}{E_0^2} + \frac{(\sum_i \bar{r}_i \times \bar{p}_i - \bar{L}_0)^2}{\bar{L}_0^2} = \min$$

С помощью метода множителей Лагранжа введем функционал

$$\frac{(\sum_i \frac{\vec{p}_i'^2}{2m_i} - \sum_{i<j} G \frac{m_i m_j}{|\vec{r}_i' - \vec{r}_j'|} - E_0)^2}{E_0^2} + \frac{(\sum_i \vec{r}_i' \times \vec{p}_i' - \vec{L}_0)^2}{\vec{L}_0^2} + \vec{\lambda}_p \sum_i \vec{p}_i' + \vec{\lambda}_r \sum_i m_i \vec{r}_i' - extr$$

и сведем задачу к решению следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} (2\alpha^2 \frac{K}{E_0} + \frac{1}{\beta} \frac{U}{E_0})(\alpha^2 \frac{K}{E_0} + \frac{1}{\beta} \frac{U}{E_0} - 1) = 0 \\ (2\alpha^2 \frac{K}{E_0} + \frac{1}{\beta} \frac{U}{E_0})(\alpha\beta \frac{\vec{L}^2}{\vec{L}_0^2} - \frac{\vec{L}\vec{L}_0}{\vec{L}_0^2}) = 0 \end{cases} ,$$

которую можно разделить на два случая (1) и (2):

$$\begin{cases} \alpha^2 \frac{K}{E_0} + \frac{1}{\beta} \frac{U}{E_0} - 1 = 0 \\ \alpha\beta \frac{\vec{L}^2}{\vec{L}_0^2} - \frac{\vec{L}\vec{L}_0}{\vec{L}_0^2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \beta = \frac{U}{-2\alpha^2 K} \end{cases} \quad (2)$$

В первом случае получим пару решений, не позволяющих системе выйти за пределы ограниченного законами сохранения фазового объема:

$$\alpha = \frac{\vec{L}^2}{\vec{L}\vec{L}_0} \frac{U}{2K} (-1 \pm \sqrt{1 + 4(\frac{\vec{L}\vec{L}_0}{\vec{L}^2})^2 \frac{KE_0}{U^2}}), \quad \beta = -\frac{U}{2E_0} (-1 \mp \sqrt{1 + 4(\frac{\vec{L}\vec{L}_0}{\vec{L}^2})^2 \frac{KE_0}{U^2}}).$$

Из пары поправок выберем те, которые оказывают минимальное влияние на траекторию и скорость тела, т. е.

$$(\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2 - \min .$$

В случае, когда $(\frac{\vec{L}\vec{L}_0}{\vec{L}^2})^2 \frac{KE_0}{U^2} \leq -\frac{1}{4}$, у системы (1) решения нет, поэтому нужно решать систему (2). Из нее получим уравнение шестой степени на α , численное решение которого требует значительных вычислительных затрат. Поэтому было принято решение допустить аппроксимацию $\beta \approx \frac{1}{\beta}$, с учетом которой из системы (2) получим выражение для α :

$$\alpha^3 + \frac{U}{2K} (1 + \frac{1}{2} \frac{U}{2K}) \alpha - \frac{1}{2} (\frac{U}{2K})^2 = 0, \quad \frac{1}{\beta} = -2\alpha^2 \frac{K}{U}.$$

Заметим, что у данного уравнения будет три решения, по крайней мере одно из которых всегда является вещественным. На практике нам не встречалось случаев, когда

вещественны все три. В случае возникновения проблемы выбора подходящего решения будем использовать условие из предыдущего случая, но с учетом аппроксимации:

$$(\alpha - 1)^2 + \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)^2 = \min .$$

Обратим внимание на то, что поправки второго типа допускают кратковременный выход значений радиус-векторов и импульсов системы за пределы фазового объема, как следствие применения приближения $\beta \approx \frac{1}{\beta}$. Проведенные нами численные эксперименты показали, однако, что в подавляющем большинстве случаев этот выход занимает не более, чем несколько шагов.

Таким образом, предложенный метод численного интегрирования гравитационной задачи N тел позволяет сохранить полную энергию и угловой момент на временных интервалах любой длины, при любом шаге по времени.

1. Aarseth S. J., Aarseth S. J. Gravitational N-body simulations: tools and algorithms. Cambridge University Press, 2003.
2. Press W. H. et al. Numerical recipes. Cambridge University Press, London, England, 1988.
3. Zolotov O. A., Zalizniak V. E. Accurate energy conservation in molecular dynamics simulation //Наносистемы: физика, химия, математика. 2013. Т. 4. № 5. С. 657-669.
4. Авдюшев В. А. и др. Численное моделирование орбит небесных тел. 2015.
5. Baumgardt H. N-body modeling of globular clusters //Memorie della Societa Astronomica Italiana. 2016. Т. 87. С. 622.

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ВЫБОРА ТУРИСТИЧЕСКИХ УСЛУГ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ*

О.А. Николайчук¹, Ю.В. Пестова¹, Д.Е. Косогоров²

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

²ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»
nikoly@icc.ru, yupest@icc.ru, dmitriy.kosogorov@yandex.ru

При выборе места отдыха туристы зачастую сталкиваются с проблемой поиска адекватной информации о местах размещения, достопримечательностях, точках питания, услугах и сервисах. Информацию приходится искать по различным открытым веб-ресурсам, что затрудняет сравнение и анализ при выборе места отдыха. В результате повышается риск того, что туристы могут упустить новые интересные направления, а регионы могут потерять потенциальных посетителей.

В настоящее время разрабатываются различные рекомендательные системы для туристов, например, рекомендации мест для посещения в Барселоне на основе анализа отзывов в социальной сети Twitter [1], или персонализированные рекомендации по туризму в Китае на основе графа знаний [2].

В данной работе представляется проект создания сервиса по сбору информации о туристическом профиле территории, обеспечивающего анализ и визуализацию собранной информации, а также поддержку принятия решений при выборе места отдыха. В качестве территории выбран Ольхонский район Иркутской области.

Первым этапом был сбор данных из ряда открытых источников, таких как OpenTripMap, OpenStreetMap, Ostrovok.ru, 101 Hotels. Были собраны как данные об объектах (расположение, средняя стоимость, категория места и другие), так и цифровые следы пользователей: оценки и комментарии.

Точки на карте разбиваются на три класса: средства размещения, предприятия общественного питания, достопримечательности. Каждый класс обладает своим набором характеристик, позволяющим осуществлять многомерный выбор и оценивать объекты с разных сторон.

Поиск подходящих объектов производится путем поиска ближайшего аналога по введенным данным. Используются методы ближайшего соседа, дерева решений и др. Сервис оценивает близость каждого объекта в пространстве характеристик к введенным пользователем значениям и сортирует результаты по убыванию нормализованного расстояния с помощью дополненной метрики Журавлева [3]. Географическое расстояние до точек оценивается через k-мерное дерево на первом этапе и через длину маршрута на втором. Близость отзывов и пожеланий туристов оцениваются на основе семантической близости и тональности высказываний с использованием многоязыковой модели на основе нейросети BERT.

1. Orama, J.A.; Borràs, J.; Moreno, A. Combining Cluster-Based Profiling Based on Social Media Features and Association Rule Mining for Personalised Recommendations of Touristic Activities. *Appl. Sci.* 2021, V. 11, 6512
2. Su, X.; He, J.; Ren, J.; Peng, J. Personalized Chinese Tourism Recommendation Algorithm Based on Knowledge Graph. *Appl. Sci.* 2022, V. 12, 10226
3. Журавлев, Ю.И. Распознавание, классификация, прогноз. Математические методы и их применение. Наука: Москва, 1989; с. 302

* Работа выполняется при поддержке проекта Российского научного фонда №23-28-00844 «Мониторинг сферы регионального туризма на основе анализа данных из открытых источников».

СЕРВИС МОНИТОРИНГА СФЕРЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ТУРИЗМА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ ИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ*

О.А. Николайчук¹, Ю.В. Пестова¹, Д.Е. Косогоров^{1, 2}, А.И. Павлов¹,
И.А. Поддубный¹

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

²Иркутский государственный университет

nikoly@icc.ru

Развитие устойчивого туризма территории требует осуществления мониторинга всех разнородных аспектов сферы туризма и создание информационных технологий, обеспечивающих сбор, анализ, обработку и визуализацию соответствующей информации. Целью работы является создание прототипа сервиса мониторинга и поддержки принятия решений в сфере регионального туризма на примере Иркутской области.

Создание сервиса [1] включает разработку и программную реализацию методов сбора, обработки, визуализации данных, поддержки принятия решений, а также обеспечение использования функциональных возможностей основных процессов обработки информации существующих облачных платформ. Методы сбора данных основаны на технологиях использования API и Web-scraping, методы обработки включают статистические методы и методы искусственного интеллекта (большие языковые модели, Sentiment analysis, Aspect based Sentiment Analysis, Prompt-engineering и др.), поддержка принятия решений основана на прецедентном подходе (Case-based reasoning), визуализация – на технологии BI-систем. Система мониторинга включает разделы, описывающие популярность мест отдыха, комфортность посещения, достопримечательности, средства размещения, объекты питания, туристические маршруты, анализ мнений туристов, результаты районирования территории, а также методы поддержки принятия решений. Для реализации поддержки принятия решений определены модели прецедентов, алгоритм их поиска и извлечения. Модели прецедентов включают описание свойств достопримечательностей, средств размещения, объектов питания и услуг. Результаты районирования позволяют определить преобладающие виды туризма в муниципальных образованиях, рейтинг муниципальных образований по заданному виду туризма, плотность расположения достопримечательностей заданного вида, их популярность и др.

Основными результатами работы являются описание информационной технологии анализа и визуализации данных, районирования территории, поддержки принятия решений, реализация прототипа сервиса и демонстрация результатов, полученных в ходе исследования. Новизну исследования обуславливает обеспечение возможности анализа информации о территории на основе открытых источников данных. В исследовании использованы открытые источники информации о Байкальской природной территории.

1. Николайчук О.А., Пестова Ю.В., Павлов А.И., Косогоров Д.Е. Концепция сервиса мониторинга сферы туризма территории на основе анализа веб-ресурсов. Вычислительные технологии. 2023. Т. 28. № 6. С. 118-134.

* Работа поддержана РНФ, проект 23-28-00844.

REGTAB ONLINE: ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДАННЫХ ИЗ МАШИНОЧИТАЕМЫХ ТАБЛИЦ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ RTL-ПАТТЕРНОВ*

И.П. Огорь, И.С. Ясеновский, А.О. Шигаров

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
ivanogor23@gmail.com, ilyasenovskiy0@mail.ru, shigarov@icc.ru

В работе рассматривается разработанное авторами веб-приложение «RegTab Online»² для демонстрации возможностей извлечения реляционных данных из машиночитаемых таблиц с произвольной структурой посредством RTL-паттернов. Извлечение выполняется с помощью инструментального средства «RegTab API»³, разработанного в ИДСТУ СО РАН. Данное инструментальное средство предоставляет «Интерпретируемую Модель Таблицы» (ИМТ), обеспечивающую автоматический вывод наборов записей из таблиц с произвольной структурой, а также проблемно-ориентированный язык паттернов «Regular Table Language» (RTL), позволяющий формально описывать закономерности размещения компонентов записей и схем внутри таблиц с произвольной структурой. Исходная таблица, представленная в виде экземпляра ИМТ, может быть сопоставлена с подходящим RTL-паттерном. В результате такого сопоставления экземпляр ИМТ дополняется семантикой, отсутствующей в исходном представлении, а именно взаимосвязанными компонентами записей и схем. Данная семантика делает экземпляр ИМТ доступным для вывода соответствующего ему набора записей в форме плоской таблицы файловой базы данных.

Веб-приложение «RegTab Online» предоставляет интерактивный пользовательский интерфейс, обеспечивающий следующую функциональность: загрузку и визуализацию исходных таблиц; редактирование RTL-паттернов, включая автоматическое дополнение, подсветку синтаксиса, а также вывод ошибок компиляции; запуск сопоставления исходных таблиц с RTL-паттернами; выгрузку и визуализацию наборов записей, извлекаемых в результате сопоставления загруженных таблиц с пользовательскими RTL-паттернами; доступ к истории пользовательских запусков извлечения данных из таблиц. Разработанное веб-приложение имеет клиент-серверную архитектуру. Клиентская часть предоставляет пользовательский веб-интерфейс (реализован с помощью фреймворка Vue.js). Серверная часть включает три взаимосвязанных веб-сервиса: сервис управления запусками извлечения данных из таблиц с помощью «RegTab API» (реализован с помощью фреймворка веб-приложений «Spring Boot»); сервис управления доступом пользователей (реализован с помощью системы управления идентификацией «Keycloak»); сервис хранения пользовательских данных (реализован с помощью системы управления базами данных «PostgreSQL»).

«RegTab Online» планируется использовать для извлечения реляционных данных из таблиц, представленных в различных открытых ресурсах по экологическому мониторингу Байкальской природной территории (БПТ) и озера Байкал, в том числе, государственных докладах, отчетах научно-исследовательских работ и др. Следует

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

² <https://regtab.icc.ru>

³ <https://github.com/regtab/regtab>

отметить, что такие таблицы обычно имеют произвольную структуру, поэтому автоматизация интеграции представленных в них данных нуждается в применении специализированного программного обеспечения, такого как «RegTab Online». Ожидается, что в результате его применения будет сформирована единая база открытых данных по экологическому мониторингу БПТ и озера Байкал.

О РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ДВУХУРОВНЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕТИ
С СИСТЕМНЫМ ОПЕРАТОРОМ НА ВЕРХНЕМ УРОВНЕ*

А.В. Орлов, И.М. Минарченко, Т.В. Груздева
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
anor@icc.ru, minar@isem.irk.ru, gruzdeva@icc.ru

В работе исследуется задача двухуровневой оптимизации на электроэнергетической сети, описывающая взаимодействие системного оператора (верхний уровень) с компаниями, осуществляющими генерацию электроэнергии (на нижнем уровне) [1, 2]. Электроэнергетическая сеть состоит из узлов, в каждом из которых расположена одна или несколько электростанций, осуществляющих генерацию, и/или агрегированный потребитель, а также линий электропередач, каждая из которых соединяет два узла. Предполагается, что электростанции в одном узле принадлежат, вообще говоря, разным генерирующим компаниям и не существует более одной линии на каждую пару узлов. Целью системного оператора является распределение электроэнергии (для удовлетворения спроса в каждом узле) и минимизация издержек системы. Переменными верхнего уровня являются узловые цены (p) и потоки электроэнергии (y) между узлами сети. На нижнем уровне каждая генерирующая компания максимизирует свою прибыль, варьируя производство электроэнергии (x – переменная нижнего уровня).

Пусть заданы множество генерирующих компаний $I = \{1, 2, \dots, M\}$, множество узлов $J = \{1, 2, \dots, N\}$, множество рассматриваемых периодов времени (например, часов или месяцев) $\Omega = \{1, \dots, T\}$. Параметрами верхнего уровня являются:

\bar{y}_{jl} – пропускная способность линии электропередачи, $j \in J, l \in J$;

a_{jl} – элемент матрицы смежности ($a_{jl} = 1$, если связь существует, $a_{jl} = 0$ в противном случае), $j \in J, l \in J$;

δ_{jl} – коэффициент потерь на линиях электропередач, $0 \leq \delta < 1$;

d_{jt} – спрос на электроэнергию, $j \in J, t \in T$.

Параметры нижнего уровня: c_{ij}, q_{ij} – коэффициенты квадратичных функций ($q_{ij} > 0$), задающих издержки на производство электроэнергии, \bar{x}_{ij} – максимальная мощность генерации, $i \in I, j \in J$.

С учетом введенных обозначений, получаем следующую двухуровневую задачу оптимизации в оптимистической постановке:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T p_{jt} x_{ijt} \downarrow \min_{(p,y),x}, \quad (1)$$

$$p_{jt} \geq 0 \quad \forall j \in J, t \in \Omega, \quad (2)$$

$$0 \leq y_{jlt} \leq \bar{y}_{jl} \quad \forall j \in J, l \in J, t \in \Omega, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ijt} + \sum_{l=1}^N a_{jl} [(1 - \delta_{lj}) y_{ljt} - y_{jlt}] = d_{jt} \quad \forall j \in J, t \in \Omega, \quad (4)$$

$$x \in \Psi(p), \quad (5)$$

где $\Psi(p)$ задает множество решений задачи оптимизации нижнего уровня:

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-41-03004.

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T [(p_{jt} - c_{ij})x_{ijt} - q_{ij}x_{ijt}^2] \uparrow \max_x, \quad (6)$$

$$0 \leq x_{ijt} \leq \bar{x}_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in \Omega. \quad (7)$$

С помощью известного подхода к решению двухуровневых задач [3, 4] путем замены задачи нижнего уровня (6)-(7) ее условиями оптимальности и дополнительной редукции задачи с помощью теории точного штрафа, получаем следующую параметрическую задачу математической оптимизации с билинейной целевой функцией и выпуклым допустимым множеством, эквивалентную исходной двухуровневой (1)-(5) с точки зрения отыскания глобального решения [3, 4]:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T [p_{jt} x_{ijt} + \sigma(v_{ijt}^1(x_{ijt} - \bar{x}_{ij}) - v_{ijt}^0 x_{ijt})] \downarrow \min_{(p,y),(x,v)}, (p, y, x) \in S, \quad (8)$$

$$v_{ijt}^1 \geq 0, v_{ijt}^0 \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in \Omega, \quad (9)$$

$$c_{ij} - p_{jt} + 2q_{ij}x_{ijt} + v_{ijt}^1 - v_{ijt}^0 = 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in \Omega, \quad (10)$$

где $\sigma > 0$ – штрафной параметр, множество S задано ограничениями (2)-(4), (7), v^0 и v^1 – множители Лагранжа, соответствующие ограничениям (7).

Благодаря возможности представления любой билинейной функции в виде разности выпуклых функций, задача (8)-(10) оказывается задачей DC минимизации. Для ее решения разработан подход, основанный на Теории глобального поиска А.С. Стрекаловского [5] и состоящий из двух основных этапов: специализированного локального поиска и процедуры выхода из критических точек, полученных локальным поиском, которая базируется на условиях глобальной оптимальности.

Для нахождения критических точек в задаче (8)-(10) строится специальный метод, который заключается в поочередном решении вспомогательных задач линейного программирования по двум группам переменных. Этот метод уже демонстрировал свою эффективность в задачах с билинейной структурой [3, 4].

В алгоритме глобального поиска наряду со стандартными модулями (построение аппроксимации поверхности уровня выпуклой функции и решение линейаризованной по базовой невыпуклости задачи) производится варьирование штрафного параметра для получения допустимой точки в исследуемой задаче.

1. Подковальников, С.В., Хамисов, О.В. Несовершенные электроэнергетические рынки: моделирование и исследование развития генерирующих мощностей. Известия Академии наук. Энергетика. 2011. Т. 2, С. 57-76.
2. Gabriel S. A., Conejo A. J., Fuller J. D., Hobbs B. F., Ruiz C. Complementarity Modeling in Energy Markets. New York: Springer-Verlag, 2013.
3. Стрекаловский А.С., Орлов А.В. Линейные и квадратично-линейные задачи двухуровневой оптимизации. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2019.
4. Orlov A.V. The Global Search Theory Approach to the Bilevel Pricing Problem in Telecommunication Networks Computational Aspects and Applications in Large Scale Networks. NET 2016 / Ed. by V.A. Kalyagin et. al. Cham: Springer, 2018. P. 57-73.
5. Стрекаловский А.С. Минимизирующие последовательности в задаче DC оптимизации с ограничениями. Труды Института математики и механики УрО РАН. 2023. Т. 29, № 3. С. 185-209.

СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ И ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАГОЛОВКОВ ТАБЛИЦ

И.И. Охотин

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

На сегодняшний день таблицы широко используются в исследованиях и бизнесе. Однако трудности, которые неизбежно возникают при извлечении и интеграции табличных данных, часто затрудняют их интенсивное использование, особенно когда таблицы присутствуют в электронных документах в виде изображений. Одной из основных проблем извлечения табличных данных из изображений является точное распознавание структур таблиц, особенно для сложных таблиц с перекрестными строками и столбцами [1].

В данной работе представлено решение для автоматического выявления заголовков таблиц, являющееся частью задачи по распознаванию структуры таблиц. Автоматическое распознавание заголовков таблиц является сложной задачей, поскольку таблицы могут быть сложными по структуре и оформлению, содержать вложенные заголовки, строки и столбцы с разными уровнями иерархии [2]. Они также могут включать пустые ячейки, объединённые строки или столбцы. Предлагаемое решение основано на классических методах машинного обучения и представляет собой совокупность моделей в виде случайного леса (Random Forest), градиентного бустинга (XGBoost) и метода опорных векторов (Support Vector Machine). В качестве исходных табличных данных рассматриваются вертикальные, горизонтальные и матричные таблицы в формате CSV (Comma-Separated Values). Для исходных данных используется вручную составленная разметка, представленная в формате CSV, который позволяет упростить обработку и легко преобразовать любые таблицы. Для каждой строки и первого столбца документа создается набор признаков (`num_cells` — количество ячеек в строке; `avg_cell_length` — средняя длина содержимого ячеек; `num_chars` — общее количество символов (без учета пробелов); `pct_numeric` — доля числовых символов от общего числа символов и другие [3]), записываемый в отдельный CSV-файл, к которому добавляется заранее подготовленная разметка. Обучение моделей проводится на этом наборе признаков с учетом разметки. Для использования обученных моделей разработано специальное программное средство, которое осуществляет предобработку входных CSV-таблиц и передает данные в модель. В результате работы программы формируется CSV-файл с метками предсказаний модели, где «1» обозначает заголовок, а «0» — не заголовок. Тестирование на данных аналогичного формата, размеченных вручную, показало эффективность подхода для решения практических задач. В дальнейшем планируется вести исследования в области распознавания структуры таблицы (table structure recognition). Начать разработку программного продукта на основе больших языковых моделей (LLM).

1. Chen L., Jin L., Sun J., Wang W., Yan C., Zhang S., Xu L. TableVLM: Multi-modal Pre-training for Table Structure Recognition. Proceedings of the Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2023.
2. Fang J., Karagyris A., Lange T. Table Header Detection and Classification. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2012.
3. Hulsebos M., Baart F., van den Bosch A., Thomee M., Milewski J. Sherlock: A Deep Learning Approach to Semantic Data Type Detection. Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. 2019.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОМОДАЛЬНОГО ПОТОКА ПОСТУПЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ*

С.В. Пауль

Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ)
paulsv82@mail.ru

В работе представлен результат анализа модели коррелированного потока поступления многомодальной информации в виде двумерного маркированного ММРР [1, 2]. Решается задача нахождения распределения вероятностей числа событий, наступивших в потоке за определенное время.

Рассмотрим математическую модель маркированного ММРР с двумя типами состояний, который задан матрицей $\mathbf{Q} = [q_{vm}]$, определяющей интенсивности вероятностей переходов управляющей потоком цепи Маркова $m(t) = 0, 1, \dots, M$ с непрерывным временем; диагональными матрицами $\Lambda^{(1)}$ и $\Lambda^{(2)}$ интенсивностей $\lambda_m^{(1)}$ и $\lambda_m^{(2)}$ наступления событий в m -ом состоянии двумерного маркированного ММРР для первого и второго типа сообщений потока соответственно. Пусть процессы $n_1(t)$ и $n_2(t)$ – число событий первого и второго типов, наступивших в маркированном ММРР за время t . Обозначим распределение вероятностей

$$P_m(n_1, n_2, t) = P\{n_1(t) = n_1, n_2(t) = n_2, m(t) = m\}, \quad m = \overline{0, M}. \quad (1)$$

Трехмерный случайный процесс $\{n_1(t), n_2(t), m(t)\}$ является марковским, что позволяет для распределения вероятностей (1) записать систему дифференциальных уравнений Колмогорова

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_m(n_1, n_2, t)}{\partial t} = & -(\lambda_m^{(1)} + \lambda_m^{(2)})P_m(n_1, n_2, t) + \\ & + \lambda_m^{(1)}P_m(n_1 - 1, n_2, t) + \lambda_m^{(2)}P_m(n_1, n_2 - 1, t) + \sum_{v=0}^M P_v(n_1, n_2, t)q_{vm}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для решения системы (1) введем частичные характеристические функции

$$H_m(u_1, u_2, t) = \sum_{n_1=0}^{\infty} e^{ju_1 n_1} \sum_{n_2=0}^{\infty} e^{ju_2 n_2} P_m(n_1, n_2, t), \quad j = \sqrt{-1}, \quad m = \overline{0, M}.$$

Систему (2) перепишем в виде

$$\frac{\partial H_m(u_1, u_2, t)}{\partial t} = \left[\lambda_m^{(1)}(e^{ju_1} - 1) + \lambda_m^{(2)}(e^{ju_2} - 1) \right] H_m(u_1, u_2, t) + \sum_{v=0}^M H_v(u_1, u_2, t)q_{vm}. \quad (3)$$

Обозначим вектор-строки

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(u_1, u_2, t) &= \{H_1(u_1, u_2, t), H_2(u_1, u_2, t), \dots, H_M(u_1, u_2, t)\}, \\ \frac{\partial \mathbf{H}(u_1, u_2, t)}{\partial t} &= \left\{ \frac{\partial H_1(u_1, u_2, t)}{\partial t}, \frac{\partial H_2(u_1, u_2, t)}{\partial t}, \dots, \frac{\partial H_M(u_1, u_2, t)}{\partial t} \right\}, \end{aligned}$$

тогда систему уравнений (3) перепишем в матричном виде

$$\frac{\partial \mathbf{H}(u_1, u_2, t)}{\partial t} = \mathbf{H}(u_1, u_2, t) \left\{ \mathbf{Q} + (e^{ju_1} - 1)\Lambda^{(1)} + (e^{ju_2} - 1)\Lambda^{(2)} \right\}. \quad (4)$$

Обозначив

$$\mathbf{H}(0, 0, t) = \mathbf{r}, \quad (5)$$

где \mathbf{r} – вектор-строка стационарного распределения вероятностей значений цепи Маркова $m(t)$, из (4) при $u_1 = 0$ и $u_2 = 0$ получим систему уравнений, которая совместно с условием нормировки однозначно определяет вектор \mathbf{r}

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00454, <https://rscf.ru/project/24-21-00454/>

$$\mathbf{r}\mathbf{Q} = 0, \quad \mathbf{r}\mathbf{e} = 1. \quad (6)$$

Здесь \mathbf{e} – единичный вектор-столбец. Запишем задачу Коши в виде

$$\frac{\partial \mathbf{H}(u_1, u_2, t)}{\partial t} = \mathbf{H}(u_1, u_2, t) \left\{ \mathbf{Q} + (e^{ju_1} - 1) \Lambda^{(1)} + (e^{ju_2} - 1) \Lambda^{(2)} \right\},$$

$$\mathbf{H}(0, 0, t) = \mathbf{r}. \quad (7)$$

Данная система будет основной в дальнейших исследованиях. Докажем следующую теорему.

Теорема. Маргинальные распределения вероятностей $P(n_1, t)$ и $P(n_2, t)$ числа событий первого и второго типов соответственно запишем в виде

$$P(n_1, 0, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-j\alpha t} \mathbf{r} \left((\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I})^{-1} \Lambda^{(1)} \right)^{n_1} (\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{e} d\alpha, \quad (8)$$

$$P(0, n_2, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-j\alpha t} \mathbf{r} \left((\Lambda^{(2)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I})^{-1} \Lambda^{(2)} \right)^{n_2} (\Lambda^{(2)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{e} d\alpha. \quad (9)$$

Доказательство. Запишем преобразование Фурье

$$\Phi(u_1, u_2, \alpha) = \int_0^{\infty} e^{j\alpha t} \mathbf{H}(u_1, u_2, t) dt$$

вектор-функции $\mathbf{H}(u_1, u_2, t)$. Оно удовлетворяет уравнению

$$\int_0^{\infty} e^{j\alpha t} \frac{\partial \mathbf{H}(u_1, u_2, t)}{\partial t} dt = \int_0^{\infty} e^{j\alpha t} \mathbf{H}(u_1, u_2, t) dt \left(\mathbf{Q} + (e^{ju_1} - 1) \Lambda^{(1)} + (e^{ju_2} - 1) \Lambda^{(2)} \right).$$

Левую часть последнего уравнения проинтегрируем по частям, получим равенство

$$-\mathbf{H}(u_1, u_2, 0) - j\alpha \Phi(u_1, u_2, \alpha) = \Phi(u_1, u_2, \alpha) \left(\mathbf{Q} + (e^{ju_1} - 1) \Lambda^{(1)} + (e^{ju_2} - 1) \Lambda^{(2)} \right).$$

Окончательно запишем

$$\Phi(u_1, u_2, \alpha) \left((1 - e^{ju_1}) \Lambda^{(1)} + (1 - e^{ju_2}) \Lambda^{(2)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I} \right) = \mathbf{r}. \quad (10)$$

здесь \mathbf{I} – единичная матрица. Из равенства (10) выразим функцию $\Phi(u_1, u_2, \alpha)$

$$\Phi(u_1, u_2, \alpha) = \mathbf{r} \left((1 - e^{ju_1}) \Lambda^{(1)} + (1 - e^{ju_2}) \Lambda^{(2)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Для получения маргинального распределения числа событий первого типа, наступивших в маркированном ММРР за время t положим в последнем равенстве (11) сначала $u_2 = 0$, запишем

$$\Phi(u_1, 0, \alpha) = \mathbf{r} \left((1 - e^{ju_1}) \Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I} \right)^{-1}.$$

В силу несложных преобразований, получим

$$\Phi(u_1, 0, \alpha) = \mathbf{r} \sum_{m=0}^{\infty} \left(e^{ju_1 m} \left((\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I})^{-1} \Lambda^{(1)} \right)^m \right) (\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I})^{-1}.$$

Обратное преобразование Фурье от скалярной функции $\Phi(u_1, 0, \alpha)$ по аргументу u_1 имеет вид

$$\phi(n_1, 0, \alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-ju_1 n_1} \Phi(u_1, 0, \alpha) \mathbf{e} du_1.$$

Тогда имеем

$$\begin{aligned} \phi(n_1, 0, \alpha) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-ju_1 n_1} \mathbf{r} \sum_{m=0}^{\infty} \left(e^{ju_1 m} \left((\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I})^{-1} \Lambda^{(1)} \right)^m \right) (\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{e} du_1 = \\ &= \mathbf{r} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{ju_1(m-n_1)} du_1 \left((\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I})^{-1} \Lambda^{(1)} \right)^m (\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{e}. \end{aligned}$$

Так как

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{ju_1(m-n_1)} du_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } m = n_1 \\ 0, & \text{если } m \neq n_1 \end{cases}$$

запишем

$$\phi(n_1, 0, \alpha) = \mathbf{r} \left(\left(\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I} \right)^{-1} \Lambda^{(1)} \right)^{n_1} \left(\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{e}.$$

Распределение вероятностей числа событий первого типа, наступивших в маркированном двумерном ММРР за время t , имеет вид обратного преобразования Фурье по переменной α

$$\begin{aligned} P(n_1, 0, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-j\alpha t} \phi(n_1, 0, \alpha) d\alpha = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-j\alpha t} \mathbf{r} \left(\left(\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I} \right)^{-1} \Lambda^{(1)} \right)^{n_1} \left(\Lambda^{(1)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{e} d\alpha, \end{aligned}$$

что совпадает с (8). Проведя аналогичные действия, положив в равенстве (11) переменную $u_1 = 0$, получим маргинальное распределение вероятностей числа событий второго типа, наступивших в маркированном двумерном ММРР за время t в виде

$$P(0, n_2, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-j\alpha t} \mathbf{r} \left(\left(\Lambda^{(2)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I} \right)^{-1} \Lambda^{(2)} \right)^{n_2} \left(\Lambda^{(2)} - \mathbf{Q} - j\alpha \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{e} d\alpha,$$

что совпадает с (9).

Таким образом, для того, чтобы найти маргинальные распределения вероятностей $P(n_1, 0, t)$ и $P(0, n_2, t)$, достаточно задать матрицу инфинитезимальных характеристик \mathbf{Q} , диагональные матрицы $\Lambda^{(1)}$ и $\Lambda^{(2)}$ условных интенсивностей $\lambda_m^{(1)}$ и $\lambda_m^{(2)}$ наступления событий в m -ом состоянии двумерного маркированного ММРР, единичную матрицу \mathbf{I} , вектор-строку стационарного распределения состояний цепи Маркова \mathbf{r} , единичный вектор-столбец \mathbf{e} ; и применить формулы (8) и (9) для заданного значения времени t и набора значений $n = 0, 1, 2, \dots$. Теорема доказана.

1. Dudin A.N.; Dudin S.A.; Dudina O.S. Randomized Threshold Strategy for Providing Flexible Priority in Multi-Server Queueing System with a Marked Markov Arrival Process and Phase-Type Distribution of Service Time. *Mathematics*. 2023. № 11. P. 2669.
2. He Q.M. Queues with marked customers. *Adv. Appl. Probab.* 1996. № 28. P. 567–587.
3. Пауль С.В., Назаров А.А., Лапатин И.Л., Ву Х.А. Область применимости асимптотических результатов при исследовании маркированного ММРР. Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2024): материалы XXIII Международной конференции имени А. Ф. Терпугова. Карши, 20 октября – 26 октября 2024 г. Томск, 2024. С. 171–177.

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДВОИЧНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА БУЛЕВЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

А.А. Пашинин, Г.А. Опарин, В.Г. Богданова

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
apcrol@gmail.com, prn51@icc.ru, bvg@icc.ru

Метод булевых ограничений [1] является достаточно общим методом качественного анализа и структурно-параметрического синтеза разнообразных классов двоичных динамических систем (ДДС): ДДС автоматного типа с функцией переходов, заданной в явном виде, что позволяет однозначно определить следующее состояние для любого текущего состояния; сингулярных ДДС, математическая модель которых наряду с уравнениями динамики автоматного типа включает уравнения статики, ограничивающие множество состояний и переходов между ними; неявных ДДС с функцией переходов, определенной неявным булевым уравнением относительно вектора переменных текущего состояния и векторов переменных последующих состояний; асинхронных ДДС с управлением схемой обновления переменных вектора состояния; двудольных и перестановочных ДДС. Суть этого метода состоит в сведении задач качественного исследования ДДС, функционирующих на конечном промежутке времени, к решению SAT или QSAT задач путем построения булевой модели динамического свойства с последующей проверкой ее выполнимости с помощью SAT и QSAT решателей.

Программная реализация метода включает средства построения булевых моделей динамических свойств, проверки их выполнимости и постобработки полученных результатов. В рамках предложенной технологии эти программные средства реализованы в виде пакета прикладных микросервисов [2], запуском которых управляют вычислительные агенты. В локальных базах знаний этих агентов хранятся фрагменты отношений, отражающие взаимосвязь микросервисов с параметрами по входу и выходу. Агенты создаются на основе инструментальной платформы HPCSOMAS-MSC [2] и устанавливаются на узлах микросервисной вычислительной инфраструктуры. Процесс вычислений управляется агентами-менеджерами, в базах знаний которых хранятся словарь параметров предметной области, информация о вычислительных агентах, микросервисах, композициях микросервисов, постановках задач и результатах решения. Постановка задачи выполняется в интерфейсе агента пользователя. В докладе приводится технология формирования такой вычислительной инфраструктуры. Основными этапами этой технологии являются создание микросервисов и агентов, подготовка вычислительных узлов, развертывание микросервисов и агентов на вычислительную сеть, заполнение баз знаний и конфигурирование агентов. Рассматриваются дополнительные компоненты платформы HPCSOMAS-MSC, автоматизирующие эти этапы. Практическая значимость разработанного инструментария обусловлена широким применением ДДС в качестве двоичных моделей объектов в разнообразных предметных областях и состоит в повышении эффективности исследования этих моделей путем автоматизации всех этапов его проведения.

1. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Qualitative analysis of autonomous binary dynamic systems. *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*, 2019. V. 10(3). P. 407–419.
2. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A., Gorsky S.A. Microservice-oriented Approach to Automation of Distributed Scientific Computations. *IEEE: Proc. 42nd Intern. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. Opatija, Croatia, 2019. P. 236-241.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА УСВОЕНИЯ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА И ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИМЕСЕЙ*

А.В. Пененко¹, А.В. Гочаков^{2,1}, П.Н. Антохин³, В.В. Пененко¹

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

²Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт

³Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН

aleks@ommgp.sssc.ru

В работе изучается эффективность алгоритма усвоения данных измерений для трехмерной модели переноса и трансформации примесей в атмосфере с неизвестными источниками выбросов. Задача усвоения данных рассматривается как последовательность связанных обратных задач на последовательности непересекающихся временных интервалов, называемых окнами усвоения с соответствующими искомыми величинами (функциями неопределённости) и наборами данных измерений [1]. Для решения задач идентификации источников в окнах усвоения используется подход на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений, реализованный в системе обратного моделирования IMDAF для вычислительных комплексов с распределённой памятью [2, 3].

Алгоритм тестируется на сценариях оценки источников выбросов и функции состояния для Байкальского региона. Изучается эффективность алгоритма при различном объеме априорной информации о неизвестном источнике, при использовании различных типов данных измерений, включая точечные контактные измерения и интегральные измерения по вертикали, моделирующие данные дистанционного зондирования. Так как реальные данные измерений обычно содержат погрешности измерений, то проводятся исследования по оценке чувствительности алгоритмов усвоения к возмущениям измерений. Алгоритм идентификации источников разработан с использованием методов регуляризации решения квазилинейных операторных уравнений. На рис.1 показан пример качественного исследования точности идентификации источника в режиме усвоения данных в зависимости от уровня шума в данных интегральных концентрациях примесей по вертикали. С уменьшением уровня шума точность восстановления источника увеличивается. Для алгоритма идентификации источников важно адекватно указать уровень шума в данных. На рис.2 приводится пример исследования, когда для разных уровней шума сравнивается относительная ошибка восстановления динамики полей концентраций в случае, когда информация об уровне шума в данных учитывается и игнорируется (ns). В последнем случае ошибка оценки полей концентраций существенно возрастает.

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

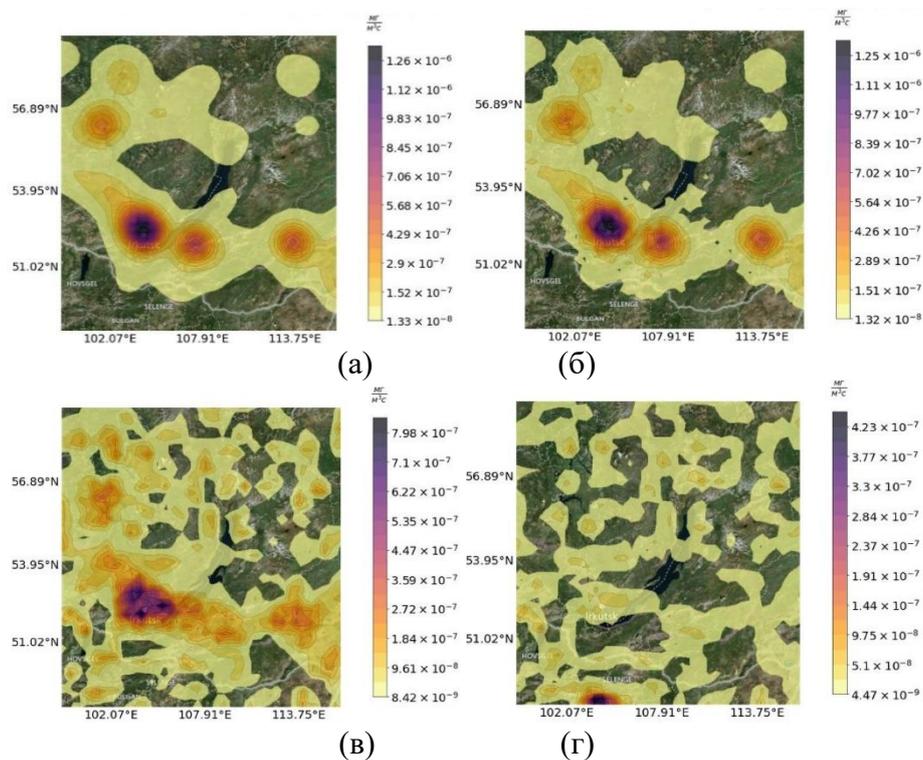


Рис.1. «Истинная» функция распределения источников (а), результат её восстановления по данным интегральных по вертикали измерений концентраций в финальном окне усвоения для различных уровней шума в данных $\delta = 0$ (б), $\delta = 0.001$, (в) $\delta = 0.01$ (г.)

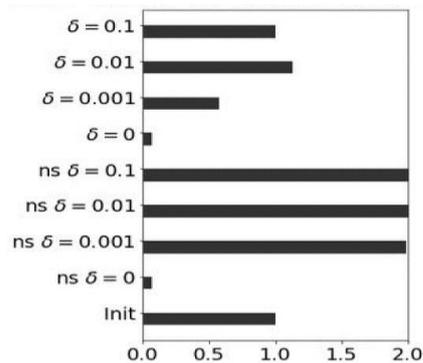


Рис.2. Относительная ошибка оценки концентраций для различных уровней шума δ , когда они учитываются в алгоритме, и когда игнорируются (ns)

1. Пененко А. В., Гочаков А. В., Антохин П. Н. Алгоритм усвоения данных на основе оператора чувствительности для трехмерной модели переноса и трансформации примесей в атмосфере. *Оптика атмосферы и океана*. 2024. № 09 (37). С. 719–728.
2. Penenko A. et al. Sensitivity Operator Framework for Analyzing Heterogeneous Air Quality Monitoring Systems. *Atmosphere*. MDPI AG, 2021. vol. 12, № 12. p. 16971 p. doi: 10.3390/atmos12121697
3. Penenko A., Rusin E. Parallel Implementation of a Sensitivity Operator-Based Source Identification Algorithm for Distributed Memory Computers. *Mathematics*. MDPI AG, 2022. vol. 10, № 23. p. 45221 p. doi: 10.3390/math10234522.

АНАЛИЗ ГАРЕЙ И ДИНАМИКИ ПОСТПИРОГЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Ю.В. Пестова, О.А. Николайчук, А.Ю. Юрин, Н.О. Дородных
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
yupest@icc.ru

Лесные пожары оказывают значительное воздействие на экосистемы, особенно в регионах с плотным лесным покровом, таких как Иркутская область. За последние годы на территории региона наблюдаются устойчивые экологические и экономические потери, связанные с интенсивным горением лесов [1]. Анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет определять границы гарей, оценивать ущерб и отслеживать восстановление растительности, что важно для разработки стратегий по смягчению последствий пожаров и восстановлению экосистем [2].

На основе методов анализа данных ДЗЗ был разработан подход идентификации границ гарей и оценки динамики постпирогенного восстановления растительности для территорий отдельных лесничеств Иркутской области.

С использованием платформы Google Earth Engine были рассчитаны спектральные индексы состояния растительности (NDVI) и ландшафта (NBR), что позволило выявить изменения растительного покрова после пожаров. Оценка последствий пожаров выражается в количественных характеристиках: площади выжженной территории, распределении площадей по состоянию растительного покрова и временных рядах с изменением среднего значения NDVI.

На основе полученных данных и размеченной обучающей выборки разработана модель классификации на основе методов машинного обучения для определения границ гарей для лесной территории. Территория лесов была получена на основе карты покрова Земли, созданной в ИДСТУ СО РАН [3], в частности, выделены зоны: смешанный лес, редколесье, вырубki, хвойный лес, кустарники и лиственный лес.

Итогом работы стало создание прототипа веб-приложения с интерактивным интерфейсом, которое предоставляет пользователям результаты анализа в виде карт и графиков. В качестве стека технологий используется фреймворк Dash для создания веб-приложений с поддержкой создания информационных панелей визуализации данных и фреймворк Google Earth Engine для обработки данных ДЗЗ. Прототип позволяет пользователю выбрать исследуемую территорию лесничества, диапазон дат и получить карту из 3 слоев: значения индекса NDVI, NBR, границы гарей на основе модели классификации, а также графики для оценки ущерба территории и динамики восстановления растительности до настоящего времени.

Точность предложенной модели оценивается сравнением с глобальными данными о горях GlobFire [4]. Результаты работы помогут получить актуальные данные о масштабах последствий пожаров и могут быть использованы для мониторинга состояния экосистем и принятия решений по их восстановлению.

1. Дроздова Т.И., Сороковикова Е.В. Анализ лесных пожаров в Иркутской области за 2010–2019 гг. XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6, № 1. С. 29–41.
2. Шогелова Н., Сартин С. Применение дистанционного зондирования земли для определения площади лесных пожаров, степени горения и восстановления после пожара. Engineering Journal of Satbayev University. 2023. Т. 145, № 3. С. 31–39.
3. Bychkov I. V. et al. On classification of Sentinel-2 satellite images by a neural network ResNet-50. Computer Optics. 2023. V. 47, № 3. P. 474–481.
4. Artés, T., Oom, D., de Rigo, D. et al. A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behavior. Sci Data. 2019. V. 6, № 296.

О РОБАСТНОЙ УПРАВЛЯЕМОСТИ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ
С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ

П.С. Петренко

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

Рассматривается нестационарная система обыкновенных дифференциальных уравнений

$$A(t)x'(t) + B(t)x(t) + U(t)u(t) = 0, t \in T = [0, +\infty), \quad (1)$$

где $A(t), B(t), U(t)$ – заданные вещественные матрицы соответствующих размеров, при этом $\det A = 0$; $x(t) \in C^1(T)$ – n -мерная искомая функция состояния системы, $u(t)$ – l -мерная функция управляющего воздействия. Такие системы принято называть дифференциально-алгебраическими уравнениями (ДАУ). Важнейшей характеристикой ДАУ является индекс неразрешенности, отражающий сложность внутренней структуры системы. Чем выше индекс, тем сложнее поддается исследованию рассматриваемая система ДАУ.

Рассмотрим возмущенное уравнение

$$A(t)x'(t) + (B(t) + \sum_{i=1}^q \alpha_i B_i + \tilde{B})x(t) + (U(t) + \sum_{i=1}^q \alpha_i U_i + \tilde{U})u(t) = 0, \quad (2)$$

где α_i – неопределенные параметры, B_i и U_i – заданные вещественные матрицы, обозначающие линейно зависимую информацию о неопределенных параметрах α_i ; \tilde{B} и \tilde{U} – неопределенные матрицы, т.ч. $\|\tilde{B}\| \leq \beta_1, \|\tilde{U}\| \leq \beta_2$.

Пусть ДАУ (1) обладают свойством управляемости (полной, R -управляемости и др.) на некотором интервале. Задача робастной управляемости ДАУ (1) заключается в нахождении условий, при которых возмущенная система (2), (3) останется по-прежнему управляемой на этом интервале [1].

Анализ основывается на преобразовании уравнения (2) к структурной форме с разделенными дифференциальной и алгебраической подсистемами [2]

$$\begin{pmatrix} O & O \\ E_{n-d} & O \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1'(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tilde{J}_1 & E_d \\ \tilde{J}_2 & O \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \bar{u}(t) = 0, \quad (3)$$

где $\tilde{J}_1, \tilde{J}_2, U_1, U_2$ – некоторые матрицы соответствующих размеров, $(x_1(t), x_2(t)) = Q^{-1}x(t)$, $\bar{u}(t) = (u(t), u'(t), \dots, u^{(r)}(t))$, Q – матрица перестановок, r – индекс неразрешенности. При этом множества решений систем (2) и (3) совпадают.

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

1. Петренко П.С. Робастная управляемость линейных дифференциально-алгебраических уравнений с неструктурированной неопределенностью. Сибирский журнал индустриальной математики. 2018. Т. 21, № 3. С. 104-115.
2. Щеглова А.А. К вопросу о сверхустойчивости интервального семейства дифференциально-алгебраических уравнений. Автоматика и телемеханика. 2021. № 2. С. 55-70.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СОЗДАНИЯ И РЕДАКТИРОВАНИЯ ВИДЕОКОНТЕНТА

Н.С. Пилипчук, А.Г. Балахчи
Иркутский государственный университет

С учетом стремительного увеличения объемов видеоданных, возникающих в результате повсеместного распространения цифровых устройств и платформ для обмена информацией, возникает необходимость в разработке эффективных методов анализа и обработки видеоконтента. Применение нейросетевых технологий обладает потенциалом для улучшения процесса создания видеоконтента за счет использования методов нейросетевых технологий, поскольку традиционные методы создания и редактирования видеоконтента требуют значительных временных затрат, человеческих ресурсов и профессиональных навыков [1]. Нейросетевые технологии открывают новые горизонты для автоматизации задач, связанных с распознаванием объектов, анализом сцен, сегментацией изображений и многими другими аспектами работы с видео. Эти технологии позволяют значительно повысить точность и скорость обработки данных, что делает их незаменимыми. Особенно актуальны такие технологии для индустрий маркетинга, рекламы, киноиндустрии и социальных сетей [2]. Автоматизация этих процессов позволяет не только сократить издержки на производство контента, но и улучшить его качество за счет использования алгоритмов машинного обучения для более точного анализа данных.

Работа посвящена разработке приложения для автоматизированного создания и редактирования видеоконтента с применением нейросетей для социальных сетей и видеохостингов. Приложение обладает следующими функциями:

- сегментация одного длинного видеоролика на несколько коротких для клипов/shorts видео с изменением разрешения из горизонтального на вертикальное для мобильных устройств, с добавлением автоматической генерации субтитров, наложением текстового заголовка поверх видео и заставки в начале/конце;

- генерацию видеоконтента на основе изображений с озвучкой текста;

В ходе работы были проанализированы и опробованы различные типы программных средств с использованием нейросетевых технологий, подходящие для автоматизированного создания и редактирования видеоконтента. Исходя из этого был выбран вариант разработки с использованием языка программирования Python, библиотек и моделей с открытым исходным кодом. Данный вариант разработки позволяет полностью контролировать приложение на всех этапах, не рискуя потерять доступ по решению правообладателя, как это может быть при использовании готовых web-приложений, или сервисов, которые предоставляют API разработки.

Python библиотеки и модели, использованные при разработке:

- Open AI Whisper с моделью «Medium» - преобразование голоса в текст, генерация субтитров;

- G4F с моделью «GPT-4o» - сегментация субтитров на фрагменты по смыслу;

- Open CV с моделью «Haarcascade Frontalface» - поиск лиц на видео;

- Edge TTS – синтез речи;

- MoviePy – монтаж, добавление эффектов и рендер.

Разберем одну из возможностей приложения — это сегментацию по смыслу из одного горизонтального видео в несколько вертикальных с добавлением субтитров, заголовка и заставки. Схема, описывающая работу представлена на рис. 1.

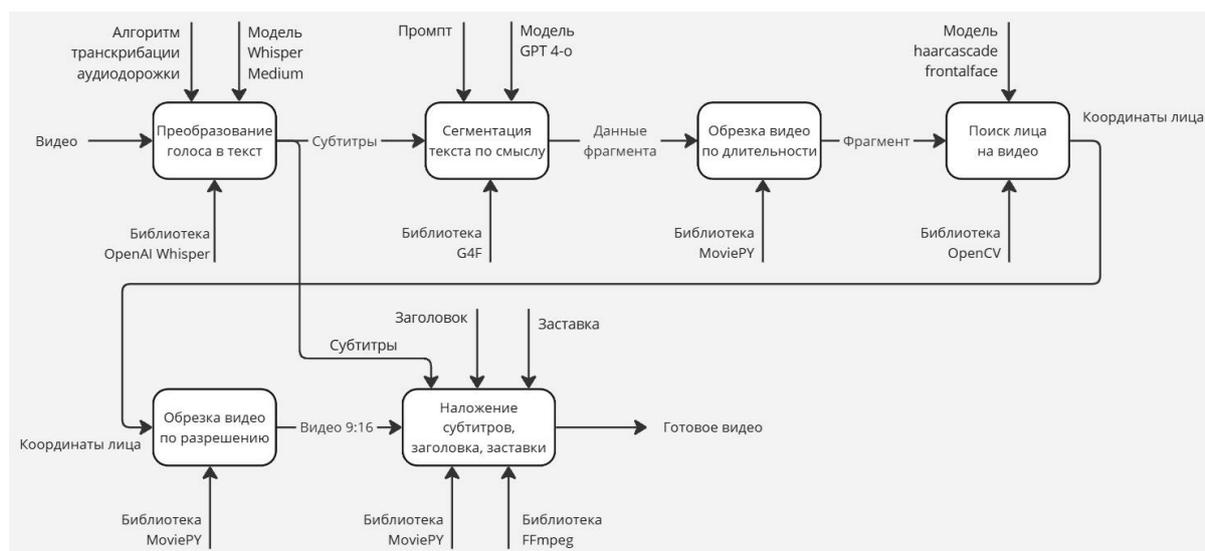


Рис. 1. Схема работы функции приложения

На вход поступает видео, из которого извлекается аудиодорожка и передаётся в модель «Medium» библиотеки Whisper, где генерируется файл с субтитрами, который передаётся в другую модель «GPT-4o», которая при помощи промта, в котором указывается «разделить субтитры на фрагменты по смыслу», возвращает массив, где каждый элемент содержит данные по конкретному фрагменту. Далее в цикле для каждого элемента массива происходит обрезка по длительности, основываясь на данных фрагмента, поиск лица на видео при помощи библиотеки компьютерного зрения Open CV, и обрезка видео по разрешению так, чтоб координаты найденного лица были в центре. Когда фрагмент отформатирован в нужное разрешение, поверх него накладывается заголовок, который также взят из данных о фрагменте, субтитры и заставка.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью использовать готовое приложение в работе «Лаборатории Мультимедиа» ФБКИ ИГИ и самого Университета.

1. Кабанова, В. В. Применение искусственного интеллекта при работе с мультимедийной информацией / В. В. Кабанова, О. С. Логунова. Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 6(111). С. 23-41.
2. Сидоренкова, С. А. Внедрение системы искусственного интеллекта в сфере кино, музыки и видео / С. А. Сидоренкова. Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2023. Т. 1, № S2. С. 143-148.

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА НАВЫКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АНКЕТИРОВАНИЯ НА ПЛАТФОРМЕ «ЯНДЕКС-ДИАЛОГИ»

К.А. Пинчук¹, В.В. Пашкова¹, А.Б. Столбов^{1,2}

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
zoom.kirill.relax@gmail.com, valeriapashkova13@gmail.com, stolboff@icc.ru

Актуальность разработки виртуальных ассистентов в настоящее время обусловлена их широким применением в различных сферах, таких как обслуживание клиентов, образование, здравоохранение и бизнес. Виртуальные ассистенты значительно повышают эффективность взаимодействия с пользователями, обеспечивая быстрый доступ к информации, автоматизацию процессов и улучшение качества обслуживания. С развитием технологий искусственного интеллекта и обработки естественного языка степень внедрения виртуальных ассистентов в повседневную практику за последние несколько лет значительно увеличилась. В связи с этим возросла потребность и в инструментальных средствах, которые могли бы поддерживать разработку таких систем, обеспечивая удобство и гибкость их создания.

В рамках этого актуального направления разрабатывается инструментальная платформа поддержки создания виртуальных ассистентов [1]. Эта платформа должна обеспечивать все основные этапы процесса проектирования виртуального ассистента и использовать для их реализации существующие прикладные платформы разработки диалогового пользовательского интерфейса (например, Google Dialogflow, Яндекс Диалоги или Just AI).

В данной работе рассматриваются результаты, связанные с разработкой прототипа модуля платформы для автоматизированной генерации анкет, который формирует спецификацию разговорного интерфейса, спецификацию для специализированного блока управления анкетированием и инструкцию по внесению изменений в навык. Это упрощает и ускоряет процесс создания голосовых помощников для анкетирования, минимизируя вероятность ошибок.

В ходе анализа различных платформ для создания голосовых помощников, таких как Сбер и Just AI, были выбраны Яндекс.Диалоги [2] как основа для прототипа. Этот выбор обусловлен широким охватом аудитории и возможностью интеграции с экосистемой Яндекса.

Создание голосового помощника для анкетирования на платформе Яндекс.Диалоги включает несколько этапов: проектирование, настройка активационных фраз, создание схемы диалогов, определение фреймов, написание кода для обработки запросов, настройка вебхуков, тестирование и модерация. Данный процесс требует значительных временных и трудовых затрат, а также подвержен ошибкам, что может затруднять разработку.

Для решения этой проблемы была разработана система «Янкета», которая автоматизирует создание голосовых помощников. Её применение позволяет разработчикам сосредоточиться на функциональной логике, снизить рутинные задачи и стандартизировать процесс создания помощников.

Целью исследования является:

1. Создание универсального средства для создания голосового помощника для анкетирования на платформе Яндекс.Диалоги, способного автоматически формировать вопросы на основе входящих структур.

2. Разработка архитектуры генератора, выполняющего следующие функции: получение структуры анкеты; генерация текста спецификации для Яндекс.Диалогов на

основе данной модели; формирование параметров для компонента управления диалогом по структуре анкеты и разговорной модели (алгоритм активации вопросов анкетирования, связь вопросов с намерениями, генерация ключей для каждого вопроса, выдача двух ключевых структур на выходе).

3. Разработка программного средства (блока управления анкетированием) для проведения анкетирования на платформе Яндекс.Диалоги с следующими характеристиками: обработка ответов пользователя и управление состояниями диалога; поддержка статических и условных переходов; обработка намерений, сохранение результатов опроса и передача их на сервер либо сохранение на Яндекс.Диск.

4. Тестирование на иллюстративном примере при реализации анкетирования для формирования профиля здоровья студентов.

Генератор системы «Янкета» обрабатывает входные данные в формате JSON, содержащие структуру анкеты и модель разговорного интерфейса. На их основе он создаёт две ключевые выходные структуры:

1. Разговорный интерфейс для Яндекс.Диалогов с текстами вопросов, фреймами и слотами.

2. Логику переходов между вопросами (статические и условные), условия отображения и обработки ответов.

Алгоритм работы генератора включает: загрузку JSON-файлов, сортировку вопросов по приоритету, создание записей для каждого вопроса (текста, типа, возможных ответов), обработку переходов, формирование конечных структур и возврат готовых данных. Это позволяет эффективно автоматизировать логику анкетирования.

Генератор состоит из пяти блоков:

1. Загрузка данных – чтение структуры анкеты и разговорного интерфейса.

2. Обработка вопросов – сортировка и анализ данных.

3. Обработка переходов – настройка переходов между состояниями.

4. Оптимизация данных – удаление лишней информации.

5. Генерация данных – формирование итоговых структур для диалогов и управления.

Блок управления анкетированием обеспечивает реализацию диалоговой логики и взаимодействие с пользователем. Его ключевые компоненты:

1. Загрузка данных – инициализация вопросов, состояний и фреймов.

2. Обработка сессий – управление сессиями и их состояниями.

3. Управление состояниями – определение следующего шага диалога на основе условий и ответов пользователя.

4. Обработка ответов – проверка корректности ответов, валидация и повторные запросы при необходимости.

5. Взаимодействие с пользователем – отправка вопросов, получение ответов и управление типами вопросов.

6. Сохранение данных – сохранение результатов анкетирования в формате JSON и передача их в хранилище.

Генератор вопросов для голосового помощника обрабатывает различные категории вопросов:

1. Простые вопросы с фиксированными вариантами ответов.

2. Проверочные вопросы.

3. Условные вопросы.

Методика размещения на платформе. Для использования системы «Янкета» разработчику необходимо:

1. Зарегистрироваться в Яндекс.Диалогах.

2. Подготовить структуру анкеты в формате JSON.

3. Запустить генератор и получить спецификации для голосового помощника.

4. Настроить облачную функцию на платформе Яндекса и интегрировать данные.
5. Настроить параметры интерфейса (голос, хранилище данных, вебхук).
6. Заполнить данные в полях платформы и развернуть помощника.

Система «Янкета» значительно упрощает процесс создания голосового помощника, позволяя эффективно автоматизировать анкетирование и снизить временные затраты на разработку.

Практическая реализация системы проиллюстрирована на примере разработки голосового помощника «Цифровой медицинский помощник» (ЦМП), предназначенного для сбора данных о состоянии здоровья студентов. Экспертом из «Иркутской государственной медицинской академии последипломного образования» была представлена анкета. В ходе работы данная анкета была успешно преобразована в формат JSON, загружена в систему «Янкета» и использована для генерации разговорного интерфейса и логики диалога. Разработанный навык был протестирован студентами Иркутского национального исследовательского технического университета, что подтвердило работоспособность и эффективность предложенного подхода.

Таким образом, была достигнута поставленная цель: разработано универсальное средство для автоматизированного создания голосовых помощников для анкетирования. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования автоматизации в области создания голосовых интерфейсов.

1. Dorodnykh, N.O., Nikolaychuk, O.A., Yurin, A.Y., Stolbov, A.B.: Towards knowledge-based virtual assistant development with the aid of ontology transformations. In: Proceedings of the 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), pp. 830–834 (2022). <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.1001691>
2. Яндекс.Диалоги [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/dialogs> (Дата обращения: 13.11.2024)

МЕТОД ПОГРУЖЕНИЯ И «СУПЕР-ДВОЙСТВЕННОСТЬ» В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ*

Н.И. Погодаев, М.В. Старицын

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
nickpogo@gmail.com; starmax@icc.ru

Доклад посвящен обсуждению одного подхода к исследованию задач оптимального управления классическими и распределенными динамическими системами. Подход состоит в погружении нелинейной динамической системы (действующей, вообще говоря, на метрическом пространстве) в класс линейных систем “в распределениях” (определенных уже на линейном – сопряженном банаховом – пространстве) с помощью канонического дираковского вложения. В результате, нелинейная задача управления преобразуется к некоторой “супер-задаче”, линейной по состоянию.

Этот шаг воспроизводит ту же идею «линеаризации», что лежит в основе хронологического исчисления [1] и теории операторов Купмана [2], однако отличается от них по реализации. Именно такая реализация позволяет использовать аппарат теории двойственности: линейной «супер-системе» отвечает (линейное же) *двойственное* уравнение на *пред-сопряженном* банаховом пространстве, решения которого содержат информацию о *ко-траекториях* исходной системы всех порядков.

Обсуждаемый подход оказывается особенно полезным в контексте оптимизации: линейная по состоянию структура погруженной задачи позволяет получать точные формулы приращения целевого функционала и, как следствие, необходимые условия оптимальности, — которые затем транслируются в термины исходной нелинейной постановки.

1. A. Agrachev and Y. L. Sachkov. Control Theory from the Geometric Viewpoint. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
2. Mauroy, I. Mezic, and Y. Susuki. The Koopman Operator in Systems and Control: Concepts, Methodologies, and Applications. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer, 2020.

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 23-21-00161, <https://rscf.ru/project/23-21-00161/>

ВОПРОСНО-ОТВЕТНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТАБЛИЦ: ОБЗОР ОБЛАСТИ И КОНЦЕПЦИЯ РЕШЕНИЯ*

И.А. Поддубный

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

Виртуальные помощники активно внедряются в бизнес и повседневную жизнь, используя текстовую информацию из баз знаний и документов для ответов пользователям. Однако значительные объемы информации хранятся в структурированном табличном виде. Возможность работы с этими данными значительно улучшила бы виртуальных помощников.

Таблицы существенно отличаются от обычного текста, и обработка вопросов по ним (Table Question Answering, TQA) стала отдельной областью в NLP. Несмотря на важность работы с таблицами, область TQA активно развивалась лишь после появления архитектур трансформеров. В настоящее время производительность современных решений по вопросам, не ограниченных узкой темой, не превышает 70% на данных из Википедии [1]. Существующие методы можно разделить на две категории: дообучение моделей и промпт инжиниринг [1]. В данной работе предлагается концепция решения на основе двух успешных работ по дообучению: Partial Exec [1] и OmniTab [2]. Работы выбраны за их высокую эффективность и использование одной и той же базовой модели Tarax [3]. OmniTab формирует дополнительный синтетический набор данных, улучшая понимания естественного языка, а Partial Exec использует вычислительный граф для более точных ответов. Предполагается, что их комбинация позволит достичь лучшей производительности.

1. Mouravieff R., Piwowarski B., Lamprier S. Learning Relational Decomposition of Queries for Question Answering from Tables. Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers). – Association for Computational Linguistics, 2024. P. 10471-10485.
2. Liu Q., Chen B., Guo J., Ziyadi M., Lin Z., Chen W., Lou J.-G. TAPEX: Table Pre-training via Learning a Neural SQL Executor. International Conference on Learning Representations, 2022. URL: <https://openreview.net/forum?id=O50443AsCP>.
3. Jiang Z., Mao Y., He P., Neubig G., Chen W. OmniTab: Pretraining with Natural and Synthetic Data for Few-shot Table-based Question Answering. Proceedings of the 2022 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. Seattle, United States: Association for Computational Linguistics, 2022. P. 932–942. DOI: 10.18653/v1/2022.naacl-main.68. URL: <https://aclanthology.org/2022.naacl-main.68>.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9).

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ТОЧНОСТЬ СПУТНИКОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЛЕСОВ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А.К. Попова

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

Устойчивое управление лесными ресурсами требует точной информации о распределении и составе деревьев, с указанием их породы, возраста, состояния. Мониторинг лесов, необходимый для решения задач оценки пожарной опасности, инвентаризации и оценки запасов углерода, часто осложняется нехваткой актуальных данных. Одним из современных источников данных о составе лесов являются спутниковые снимки, которые обрабатывают различными алгоритмами, включая методы машинного обучения, для составления классификации земной поверхности.

Однако только оптических данных не всегда достаточно для получения классификации нужной степени точности, поскольку разные древесные породы могут иметь сходные спектральные характеристики. Поэтому для повышения точности используют дополнительные данные, включая вегетационные индексы, топографические характеристики, данные о почвах и климате.

В качестве базовых данных в работе использовались снимки спутника Sentinel-2. Набор вспомогательных данных был составлен из наиболее распространенных вегетационных индексов, почвенных, климатических и топографических переменных, высоты полога леса. Список вегетационных индексов содержит 13 переменных – NDVI, RVI, NDWI, RI, EVI, GNDVI, IRECI, BI, GCVI, MNDWI, NDVI2, SAVI, VARI. Топографические признаки – уклон в градусах, ориентация склона, высота, затенение рельефа. Климатические – средняя максимальная и минимальная температуры воздуха, сумма осадков, биоклиматические параметры температуры и осадков (среднегодовая, среднесуточный диапазон, стандартное отклонение), параметры вегетационного периода (первый и последний день, продолжительность), солнечная радиация, длительность снежного покрова). Почвенные – насыпная плотность, емкость катионного обмена, объемная доля крупных фракций, содержание азота, pH, доли глинистых, песчаных и иловых частиц, причем значение каждого параметра задано для шести интервалов глубины почвы от 0 до 200 см. Всего собрано 90 дополнительных признаков, вместе с 11 оптическими каналами полный набор составил 101 признак.

Классификация проводилась методом машинного обучения Random forests. Снимки Sentinel-2 сначала были обработаны алгоритмом Sen2Cor для атмосферной коррекции и удаления облаков. Дополнительные данные представлены в растровом формате, все они приведены к одному разрешению, выровнены по ячейкам. Значения всех массивов нормализованы к диапазону (0, 1). Во время обучения модели использовалась кросс-валидация методом K-fold на 10 шагов. На каждом шаге высчитывалась важность всех переменных, в качестве результата были взяты средние значения за все итерации. Для оценки производительности модели использовали показатели общей точности, полноты, f1-меры, причем тестовая выборка была отдельно размечена на снимке, что дало ее пространственную независимость от обучающих данных и честные оценки модели.

Для примера проведена классификация территории Слюдянского лесничества по пяти породам – сосна, кедр, лиственница, пихта и береза. Общая точность классификации только по спектральным каналам составила 42,67% с полнотой 0,42 и f1-мерой 0,46. Добавление всех дополнительных данных повысило общую точность до 65,56% с полнотой 0,66 и f1-мерой 0,67. Наиболее важными в наборе из 101 признака оказались: объемная доля крупных фракций на глубинах 100-200 и 15-30 см, каналы

B8, B5 и B11, годовое количество осадков, ориентация склонов, емкость катионного обмена на 0-5 и 60-100 см, первый день вегетационного периода. Наименьшую важность получили все интервалы насыпной плотности, содержание органического углерода на 0-5 и 100-200 см, среднегодовая температура воздуха, продолжительность вегетационного периода.

Проведенное исследование показало значительное влияние дополнительных данных на точность классификации спутниковых снимков. Полученный результат позволяет определить размеры и распределение деревьев разных пород на территории лесничества. Для улучшения требуется расширять обучающую выборку, что поможет повысить точность модель.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВ В ЗОНЕ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Д.И. Пыжьянов, Г.И. Сарапулова

Иркутский национальный исследовательский технический университет
dan555inx@gmail.com

Технологические процессы, связанные с добычей углеводородов, приводят к значительным изменениям в экосистемах на территориях, где осуществляется эта деятельность. Однако исследования экологических аспектов на газовых месторождениях в северных регионах с чувствительными экосистемами остаются недостаточно разработанными и требуют дальнейшего изучения. Важным объектом анализа являются почвы, которые выступают в роли накопителей загрязняющих веществ, поступающих от объектов добычи и подготовки газа. Несмотря на наличие природоохранных мероприятий при обустройстве месторождений, полностью исключить негативное воздействие на почвы невозможно.

В работе представлены результаты геоэкологической оценки природно-техногенной системы в зоне газоконденсатного месторождения с использованием геохимических параметров почв и 3D моделирования с использованием программного обеспечения STATISTICA 10. Получены зависимости Cu, As, Ni, Mn, которые выявили их разную чувствительность к содержанию органической компоненты почвы Сорг и рН. Анализ полученных зависимостей выявил образование геохимических кластеров относительно валовых содержаний тяжелых металлов и мышьяка в почве. Так, например, для мышьяка обнаружено аномальное распределение его содержания в зависимости от основных буферных компонент почвы (рис. 1 и рис. 2).

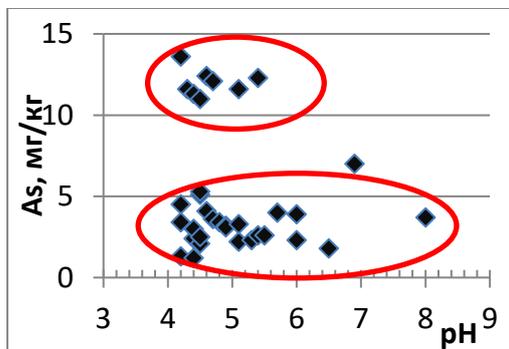


Рис. 1. Зависимость валового содержания As от рН

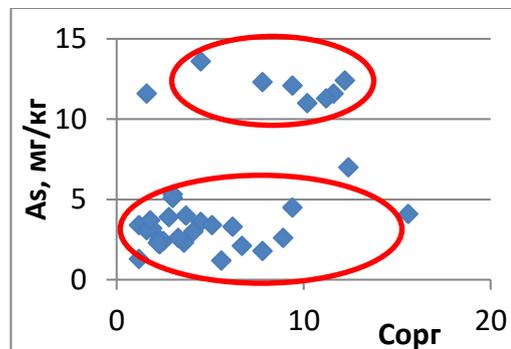


Рис. 2. Зависимость валового содержания As от Сорг

Это может объясняться трансформацией валовых форм с повышением выделения подвижных форм элементов в почвах. Это необходимо учитывать при геоэкологической оценке территории, а также при проведении экологического контроля почв и при принятии природоохранных мер по обеспечению экологической безопасности территории в зоне газового месторождения.

1. Эдер Л.В., Филимонова И. В., Немов В. Ю., Проворная И. В. Особенности современного развития газовой промышленности. Ж. Газовая промышленность. 2014. № 4. С.8-14.
2. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A. Model representation of anthropogenically modified subsoil as a new object in lithosphere. 2020. Eurasian mining. № 1. С. 30–36.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОПАГАТОРА КВАРКА С КОНФАЙНМЕНТОМ*

А.Е. Раджабов

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

Одной из проблем построения эффективных моделей сильных взаимодействий применимых в области низких энергий является то, что Лагранжиан Квантовой хромодинамики содержит поля кварков и глюонов, в то время как в эксперименте наблюдаются только их бесцветные комбинации – адроны. Такое явление называется конфайнментом: то есть «удержанием» кварков и глюонов «внутри» адронов ввиду сильного взаимодействия. Во внешней ядерной среде, такой, какая возникает в столкновениях тяжелых ионов или нейтронных звездах возможно явление деконфайнмента – появление свободных кварков.

Для моделирования конфайнмента требуется, чтобы вычисленные наблюдаемые величины, связанные с адронами, не имели каких-либо кинематических эффектов, соответствующих появлению кварков в свободном состоянии. Если знаменатель пропагатора кварка $k^2 + m^2(k^2) = 0$, имеет решения для вещественных $k^2 = -M^2$, это приведет к появлению мнимой части у поляризационных операторов адронов. Для мезонов мнимая часть возникнет при $P^2 = -4M^2$. В случае только комплексных полюсов в пропагаторе кварка возможно построение поляризационных операторов без мнимой части [1]. Однако реальная часть поляризационного оператора мезона будет иметь излом, который можно интерпретировать как проявление свободных кварков.

В литературе предлагались пропагаторы кварков в виде целых функций, которые не имеют особенностей на комплексной плоскости, за исключением бесконечно удаленной точки [2,3]. Недостатком подобного рода подхода является то, что такие функции подбираются исходя из каких-то соображений, а не следуют из модели [3]. Другим недостатком подобного подхода является невозможность моделирования фазового перехода конфайнмент—деконфайнмент [2].

Для моделирования пропагатора кварка с конфайнментом предлагается модифицировать оригинал кваркового пропагатора в преобразовании Лапласа следующим образом $D_R(\alpha) = D(\alpha)\theta\left(\frac{1}{\Lambda^2} - \alpha\right)$. Похожая методика может быть применена для моделирования фазового перехода конфайнмент-деконфайнмент, при этом требуется явно выделить из пропагатора кварка полюс соответствующий свободным кваркам и модифицировать оставшуюся часть [4].

1. M. Bhagwat, M. A. Pichowsky, and P. C. Tandy// Phys. Rev. D. 2003. V.67. P.054019.
2. G. V. Efimov and M. A. Ivanov, The Quark confinement model of hadrons // IOP. Bristol, UK 1993. P.177.
3. C. J. Burden, C. D. Roberts, and M. J. Thomson// Phys. Lett. B 1996. V. 371 P.163.
4. A. E. Radzhabov, X. L. Shang, Confining modeling of quark propagator // arXiv:2407.21718

* Результаты получены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту "Аналитические и численные методы математической физики в задачах томографии, квантовой теории поля и механики жидкости и газа" (№ гос регистрации: 121041300058-1).

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ FORM*

А.Е. Раджабов

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

При проведении вычислений в рамках кварковых моделей оказывается, что выражения для некоторых диаграмм Фейнмана могут быть достаточно громоздки. Так для вычисления поправки в магнитный момент мюона за счёт сильных взаимодействий требуется выполнить численное интегрирование выражения, где подынтегральная функция представляет собой полином по степеням импульса и углам и общее число членов в полиноме может быть очень большим.

Представляется крайне важным аналитически упростить выражения для полинома, поскольку даже если компилятор с языка высокого уровня, например, языка Fortran, выполняет оптимизацию вычислений для численных расчетов, его возможности оптимизации выражений достаточно ограничены. С другой стороны, время компиляции тоже может быть значительным, как и необходимый при этом объем оперативной памяти. Программы символьных вычислений Mathematica и Maple плохо справляются с данной задачей: требуется дополнительное разбиение полинома на части и упрощение каждой из них по отдельности.

Оказывается, что радикальное улучшение численных расчётов может быть достигнуто с помощью программы символьных вычислений Form [1]. Помимо исходных файлов предоставляются бинарные файлы для macOS и Linux, а в среде Windows программа может работать через WSL. Form не имеет графического интерфейса и интерактивного режима, работает из командной строки и выдает результаты расчётов на основе исходного файла. С другой стороны, программа символьных вычислений Form способна обрабатывать достаточно большие математические выражения за приемлемое время. Так при практических вычислениях одной из диаграмм Фейнмана требовалось упростить для дальнейших численных расчетов полином с 47 переменными и общим числом членов порядка 200 тысяч. Общее количество математических операций для вычисления данного полинома оценивалось в 2.5 млн. В случае наибольшей оптимизации Form (O4) количество необходимых математических операций для вычисления полинома сократилось до 52 тысяч и время счёта программы Form при этом составляло 750 секунд. В последующем время компиляции программы на языке Fortran также значительно уменьшилось.

1. <https://github.com/vermaseren/form>

* Результаты получены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту "Аналитические и численные методы математической физики в задачах томографии, квантовой теории поля и механики жидкости и газа" (№ гос регистрации: 121041300058-1).

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДОКУМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБКОГО ШАБЛОНА

А.К. Разманов, А.А. Михайлов

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

Искусственный интеллект документов, также известный как Document AI, представляет собой новую область исследований, занимающуюся разработкой методов для автоматического чтения, интерпретации и анализа деловой документации. Документы могут быть как цифровыми, так и бумажными, могут включать в себя важную информацию о деятельности компаний. Примеры таких документов включают в себя счета-фактуры, финансовые отчеты, электронные письма, контракты и многие другие, которые являются ключевыми для эффективности бизнеса. Форматы этих документов могут сильно различаться, от простого текста до сложных многословных макетов с таблицами и графиками. Из-за этого разнообразия, а также из-за низкого качества сканирования и сложности шаблонов, понимание деловых документов становится сложной задачей. Современные подходы к созданию ИИ документов обычно строятся на основе глубокие нейронные сети с точки зрения компьютерного зрения, обработки естественного языка или их комбинации.

В рамках данной работы мы используем LayoutLM [1] — метод предварительного обучения, основанный на архитектуре Transformer, который объединяет текст и макет для улучшения понимания документов с изображениями. Модель LayoutLM предварительно обучена на коллекции ИТ-CDIP [2]. Для того чтобы использовать информацию о макете каждого документа, мы обрабатываем отсканированные изображения документов и получаем необходимую информацию о расположении, применяя OCR (Optical Character Recognition). Основываясь на принципах модели BERT [3], LayoutLM вносит новшества, добавляя два типа вложений: двумерное позиционное вложение, которое отражает положение слова в документе, и вложение изображения для визуальных характеристик сканированных документов. Эти вложения помогают модели улавливать взаимосвязи между элементами документа и визуальные особенности, такие как ориентация текста, шрифт и цвет. Также применяется многозадачное обучение, включая маскирование визуального языка и классификацию документов по меткам, что усиливает совместное обучение текста и макета.

В рамках данной работы в дальнейшем планируется дообучить модель на большем количестве данных, благодаря чему эта модель предложит еще более эффективный метод преобразования данных из изображений в цифровой формат, который, в свою очередь, найдет применение в различных отраслях.

1. Xu Y. et al. Layoutlm: Pre-training of text and layout for document image understanding. Proceedings of the 26th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery & data mining. 2020. С. 1192-1200.
2. D. Lewis, G. Agam, S. Argamon, O. Frieder, D. Grossman, and J. Heard. 2006. Building a Test Collection for Complex Document Information Processing. In Proceedings of the 29th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (Seattle, Washington, USA) (SIGIR '06). ACM, New York, NY, USA, 665–666. <https://doi.org/10.1145/1148170.1148307>
3. Devlin J. et al. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding //arXiv preprint arXiv:1810.04805. 2018.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ДЛИТЕЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ГОРОДОВ*

В.Ф. Рапута, А.А. Леженин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
raputa@sscc.ru

При организации сети мониторинга в городах рекомендовано устанавливать в равнинной местности один пост наблюдения на 10 – 20 км², а в пересечённой местности – один пост на 5 – 10 км² [1], что требует существенных материальных и трудовых затрат и реализация такого подхода весьма затруднительна. Одним из выходов в сложившейся ситуации является осреднение концентраций за большие периоды времени. Чем больше период осреднения, тем более однородно поле концентрации примеси. Следует также отметить, что для многих городов характерно наличие большого количества мелких источников, распределенных по их территории, что позволяет использовать общие закономерности атмосферной диффузии примеси и произвести существенные упрощения в описании распределения полей концентрации.

Для случая N источников, расположенных в области D , суммарная концентрация в силу принципа суперпозиции описывается выражением

$$\bar{c}(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \int_0^T dt \int_G q_i(t, x, y, z) P(\omega) d\omega, \quad (1)$$

где $P(\omega)$ – совместная плотность распределения комплекса метеорологических параметров $\omega \in G$, относящаяся к промежутку времени T . Концентрация примеси $q_i(t, x, y, z)$, $i = 1, \dots, N$ находится из решения уравнения переноса и диффузии [2].

Исходя из двойственности представления функционалов от концентраций, соотношение (1) представляется через решение сопряжённой задачи в виде [2]

$$\bar{c}(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \int_0^T dt \int_G M_i \cdot q^*(t, x_i, y_i, h_i) P(\omega) d\omega, \quad (2)$$

где $(x_i, y_i, h_i) \in D, i = 1, \dots, N$ – положения источников примеси, M_i – их эмиссия.

Соотношение (2) позволяет проводить экономичные расчёты значений концентраций в определённых точках области D . При малых высотах выброса примесей в силу формулы Тейлора имеет место приближённое соотношение для приземной концентрации

$$\bar{c}(x_0, y_0) \approx \int_G P(\omega) d\omega \cdot \sum_{i=1}^N \int_0^T M_i \cdot q^*(t, x_i, y_i, 0) dt, \quad (3)$$

которое указывает, что в этом случае её зависимость от метеопараметров является слабой и концентрация определяется лишь эмиссией и расположением источников. В условиях квазистационарности источников из (3) следует также возможность появления устойчивых корреляционных связей между концентрациями в различных точках города. Исходя из этого, проведён поиск закономерностей формирования полей длительного загрязнения территорий крупных городов Сибири. Обсуждаются результаты исследования влияния метеорологических факторов на возникновение высоких концентраций вредных примесей.

1. Безуглая Э.Ю. Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986.
2. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № 075-15-2024-533.

НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ

О.Н. Самсонок

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

olga.samsonyuk@icc.ru

Рассматриваются необходимые условия оптимальности первого порядка в форме вариационного принципа максимума (ВПМ) для задачи оптимального импульсного управления с траекториями ограниченной вариации. Управляемая система в задаче описывается дифференциальным уравнением с мерой

$$dx(t) = f(t, x(t), u(t))dt + G(t, x(t))\mu(dt), \quad x(t_0-) = x_0 \quad (1)$$

при ограничениях на управления

$$u(t) \in U \quad t \in T, \quad dw(E) \in K \quad \forall E \in B_T.$$

Здесь $T = [t_0, t_1]$ – фиксированный отрезок времени, $u(\cdot) \in L^\infty(T, R^r)$ – обычное управление, $x(\cdot) \in BV(T, R^n)$, dw – мера Лебега-Стилтьеса (импульсное управление), порожденная непрерывной справа на $(t_0, t_1]$ функцией $w(\cdot) \in BV(T, R^m)$ ($w(t_0-) = 0$), U – компактное множество в R^r , K – выпуклый замкнутый конус в R^m . Понятие решение системы (1), соответствующее заданным управлениям и начальному условию, описано в работе [3].

Необходимые условия оптимальности импульсных процессов в форме вариационного принципа максимума впервые были получены в [1, 2] для задач оптимального импульсного управления с траекториями из $L^\infty(T, R^n)$. Рассматривались задачи, в которых: а) отсутствуют ограничения на импульсное управление, $K = R^m$; б) выполняются условия Фробениуса для матрицы коэффициентов при импульсном управлении:

$$G_{kx}(t, x)G_i(t, x) - G_{ix}(t, x)G_k(t, x) = 0,$$

где G_i, G_k — столбцы матрицы G , $i, k = \overline{1, m}$; в) импульсное управление представимо в виде распределения первого порядка сингулярности. Для таких задач было замечено, что расшифровка принципа максимума в редуцированной задаче, полученной при помощи нелинейного преобразования Гоха, приводит к более сильным необходимым условиям оптимальности первого порядка, чем обобщенный принцип максимума (ПМ). Эти условия были названы вариационным принципом максимума, они содержат дополнительное вариационное условие – экстремальное условие на множестве вспомогательных функций, выполняющееся почти всюду по t . Соответствующий ВПМ тип локального минимума был назван импульсно-понтрягинским. Для задачи оптимального импульсного управления с ограничением на образ управляющей меры вариант ВПМ был получен в [4].

В докладе будут представлены необходимые условия оптимальности первого порядка в форме вариационного принципа максимума для задачи оптимального импульсного управления с траекториями ограниченной вариации. ВПМ соответствует импульсно-понтрягинскому типу локального минимума. Заметим, что задачам оптимального импульсного управления с траекториями ограниченной вариации можно сопоставить эквивалентную вспомогательную задачу с измеримыми ограниченными управлениями. Импульсно-понтрягинский минимум расширяет понятие обобщенного понтрягинского минимума (аналога понтрягинского минимума во вспомогательной

задаче) путем замены слабых вариаций дискретной составляющей импульсного управления на сильные.

Для формулировки ВПМ стандартным образом вводится функция Понтрягина

$$H(t, x, \psi, u, v) = \langle \psi, f(t, x, u) + G(t, x)v \rangle = H_0(t, x, \psi, u) + \langle H_v(t, x, \psi), v \rangle$$

и сопряженные функции $\psi(\cdot)$, $\psi_t(\cdot)$ – решения соответствующих сопряженных импульсных систем для исследуемого процесса $\bar{e} = (\bar{x}(\cdot), \bar{u}(\cdot), \bar{\mu})$. ВПМ включает все условия обобщенного ПМ [3] и, дополнительно, экстремальное условие, имеющее вариационный характер:

Для почти всех $t \in (t_0, t_1)$

$$\max_{u \in U, c \in R_+^m} (H_0(t, z(1; c), q(1; c), u) + q_t(1; c)) = H_0(t, \bar{x}(t), \psi(t), \bar{u}(t)) + \psi_t(t) = const,$$

где функции $\tau \rightarrow z(\tau; c)$, $\tau \rightarrow q(\tau; c)$, $\tau \rightarrow q_t(\tau; c)$ являются решениями дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dz(\tau; c)}{d\tau} &= G(t, z(\tau; c))c, \quad z(0; c) = \bar{x}(t), \\ \frac{dq(\tau; c)}{d\tau} &= -H_{xv}(t, z(\tau; c), q(\tau; c))c, \quad q(0; c) = \psi(t), \\ \frac{dq_t(\tau; c)}{d\tau} &= -H_{tv}(t, z(\tau; c), q(\tau; c))c, \quad q(0; c) = \psi_t(t), \quad \tau \in [0, 1]. \end{aligned}$$

В условиях оптимальности присутствует специального вида функционал, параметрически зависящий от времени t и заданный на множестве функций z, q, q_t , характеризующих допустимые скачки траектории. Вариационное условие состоит в том, что почти всюду данный функционал должен достигать своего максимума на функциях, порожденных оптимальным процессом.

Результаты получены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с приложениями» (номер гос. регистрации 121041300060-4).

1. Дыхта В.А. Вариационный принцип максимума и квадратичные условия оптимальности импульсных и особых режимов. Ирк. ВЦ СО АН СССР. Препринт 7, 1991.
2. Дыхта В.А. Вариационный принцип максимума и квадратичные условия оптимальности импульсных процессов. Иркутск: изд-во ИГЭА, 1994.
3. Дыхта В.А., Самсонюк О.Н. Оптимальное импульсное управление с приложениями. 2-е изд. М.: Физматлит, 2003.
4. Самсонюк О.Н. Вариационный принцип максимума в задаче оптимального импульсного управления с ограничением на образ управляющей меры // Обобщенные постановки и решения задач управления: сборник трудов международного симпозиума. М.: АНО «Издательство физико-математической литературы». 2014. С. 148–152.

КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ НЕЛОКАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ БИОГЕОГРАФИИ И L-BFGS*

П.С. Сороковиков

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
pavel@sorokovikov.ru

Задача поиска глобального экстремума мультимодальной целевой функции является одной из самых сложных и актуальных проблем в вычислительной оптимизации. Эффективные методы нелокального поиска часто основаны на балансе между глобальным сканированием поискового пространства и локальным уточнением найденных приближений («эксплуатацией»). Таким образом, при конструировании алгоритмов нелокальной оптимизации следует на каждой итерации выполнять как глобальное исследование в допустимом множестве, так и «эксплуатацию» с помощью градиентных методов локального поиска.

Предложенный в работе подход к решению задач поиска глобального экстремума многоэкстремальных целевых функций объединяет глобализированный метод биогеографии (Biogeography-Based Optimization, BBO) [1] и квазиньютоновский метод локальной оптимизации с ограниченной памятью L-BFGS (Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno) [2]. Метод биогеографии был предложен в 2008 году Д. Саймоном и основан на эволюционных принципах островной биогеографии. Метод BBO используется для глобального сканирования пространства поиска, а L-BFGS применяется для локального уточнения найденных приближений. На основе указанных методов предложен и реализован на языке C (GCC \ MinGW) комбинированный алгоритм нелокальной оптимизации BBO (v.2). Проведено численное исследование эффективности разработанного алгоритма в сравнении как с базовыми методами биогеографии BBO (v.1), дифференциальной эволюции DE (v.1), роя частиц PSO (v.1), так и с модифицированными вариантами DE (v.2), PSO (v.2) на основе гибридизации с L-BFGS.

Рассматривается следующая задача непрерывной нелокальной оптимизации:

$$f(x) \rightarrow \min, x \in B, B = \{x \mid x = (x_1, x_2, \dots, x_n), \alpha_i \leq x_i \leq \beta_i, i = \overline{1, n}\}.$$

Вычислительные эксперименты производились на разнообразных многоэкстремальных тестовых задачах, часть из которых представлена ниже.

1. Функция Растригина (Rastrigin):

$$f(x) = 10 \cdot n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cdot \cos(2\pi x_i)), B = [-5.12, 5.12]^n, x_i^* = 0, f^* = 0.$$

2. Функция Salomon:

$$f(x) = 1 - \cos\left(2\pi \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) + 0.1 \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}, B = [-100, 100]^n, x_i^* = 0, f^* = 0.$$

3. Функция Schwefel:

$$f(x) = 418.9829 \cdot n + \sum_{i=1}^n (-x_i \cdot \sin(\sqrt{|x_i|})), B = [-\pi, \pi]^n, x_i^* = 420.9687, f^* = 0.$$

4. Функция Stretched V Sine Wave (SVSW):

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1}^2 + x_i^2)^{0.25} \left[\sin^2 \left\{ 50(x_{i+1}^2 + x_i^2)^{0.1} \right\} + 0.1 \right], B = [-10, 10]^n, x_i^* = 0, f^* = 0.$$

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№° гос. регистрации: 121041300060-4).

Размерность тестовых задач составляла 100 переменных. Алгоритмы BBO (v.1), DE (v.1), PSO (v.1), BBO (v.2), DE (v.2), PSO (v.2) запускались 50 раз из одних и тех же стартовых популяций, равномерно распределенных в области определения функции. Размер популяции равен 10. Условием прекращения работы алгоритмов являлось превышение 10^4 вызовов оракула нулевого порядка. На рис. 1 приведены результаты численного сравнения алгоритмов в виде коробчатых диаграмм. По оси ординат отложены усредненные значения функции по всей популяции. В табл. 1 представлена статистика по запускам: среднее значение целевой функции и стандартное отклонение.

Таблица 1. Обобщенные результаты численного сравнения алгоритмов

Алгоритм	Rastrigin		Salomon		Schwefel		SVSW	
	Ср.	Откл.	Ср.	Откл.	Ср.	Откл.	Ср.	Откл.
BBO (v.1)	937.15	76.528	14.7048	0.98941	20091.3	1201.3	50.3957	4.50981
BBO (v.2)	215.03	8.9858	0.44356	0.11878	3341.13	200.06	11.2597	1.71784
DE (v.1)	191.98	18.622	17.0430	1.26023	5126.49	544.45	29.1522	1.79104
DE (v.2)	0.0089	0.0055	1.93540	0.49481	808.215	91.187	9.77455	1.66707
PSO (v.1)	937.38	53.785	19.0111	1.44150	35812.4	1218.7	78.5637	5.73470
PSO (v.2)	269.85	6.2304	4.95799	0.50153	8948.39	304.70	24.5470	1.91425

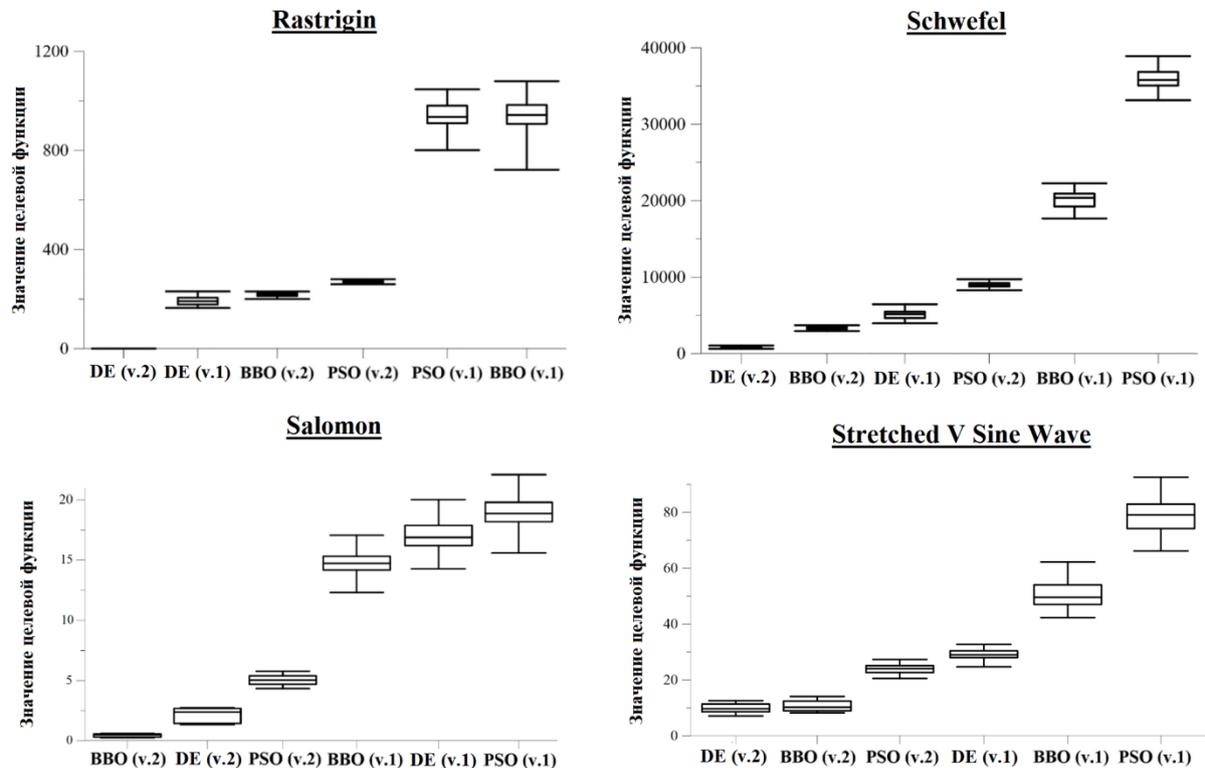


Рис. 1. Диаграммы численного сравнения алгоритмов

Разработанный алгоритм BBO (v.2), скомбинированный с методом локального поиска L-BFGS, показал значительные улучшения по сравнению с базовым алгоритмом биогеографии BBO (v.1). Результаты проведенного тестирования подтверждают работоспособность реализованного алгоритма для задач нелокальной оптимизации.

1. Simon D. Evolutionary optimization algorithms. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 742 p.
2. Mokhtari A., Ribeiro A. Global convergence of online limited memory BFGS. The Journal of Machine Learning Research. 2015. Vol. 16, No. 1. P. 3151–3181.

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ГИБРИДИЗАЦИИ МЕТОДОВ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РОЯ ЧАСТИЦ*

П.С. Сороковиков

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
pavel@sorokovikov.ru

В работе предложен гибридный алгоритм невыпуклой оптимизации на основе методов генетического поиска и роя частиц. Разработанный метод представляет собой модификацию генетического алгоритма (Genetic Algorithm, GA [1]) с добавлением в него нового оператора, идея которого позаимствована у метода роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO [2]). В гибридном алгоритме (GA-PSO), как и в методе роя частиц, каждый агент хранит координаты лучшего из найденных им приближений и наилучшее из решений, полученных всеми агентами, имеет свой вектор скорости перемещения. Рассматривается следующая задача нелокального поиска:

$$f(x) \rightarrow \min, x \in X, X = \{x \mid x = (x_1, x_2, \dots, x_n), \alpha_i \leq x_i \leq \beta_i, i = \overline{1, n}\}.$$

Предложенный алгоритм GA-PSO реализован на языке C (GCC \ MinGW) и исследован на наборе тестовых задач при $n=100$. Тестирование алгоритма GA-PSO выполнялось в сравнении с алгоритмами GA, PSO и с методом дифференциальной эволюции (Differential Evolution, DE). В силу стохастичности алгоритмов, они запускались 100 раз из равномерно распределенных популяций из 10 особей. Критерий остановки алгоритмов – превышение 10^4 вызовов целевой функции. В табл. 1 приведены описание тестовых функций и обобщенные результаты тестирования алгоритмов в виде статистик по запускам (минимальное, максимальное, среднее значения, стандартное отклонение). На рис. 1 в виде графиков сходимости представлены усредненные результаты запусков алгоритмов. По оси абсцисс отложено число вызовов оракула, по оси ординат – усредненное по популяции значение функции. На указанных тестовых задачах алгоритм GA-PSO продемонстрировал более высокую эффективность в сравнении с GA, PSO и DE. Проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о перспективности разработанного алгоритма для решения задач невыпуклой оптимизации.

Таблица 1. Обобщенные результаты численного сравнения алгоритмов

Тестовая задача ($n = 100$)	Метод	Мин.	Макс.	Ср.	Откл.
1. Функция Растригина (Rastrigin) $f(x) = 10 \cdot n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cdot \cos(2\pi x_i))$, $X = [-5.12, 5.12]^n, x_i^* = 0.0, f^* = 0.0$	GA-PSO	127.352	205.7386	162.8864	16.11248
	GA	157.962	234.456	198.2812	16.7402
	PSO	827.0293	1147.472	965.9948	62.71931
	DE	205.869	355.641	290.9179	28.55039
2. Функция Саломона (Salomon) $f(x) = 1 - \cos\left(2\pi \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) + 0.1 \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$, $X = [-100, 100]^n, x_i^* = 0.0, f^* = 0.0$	GA-PSO	9.822386	15.0883	11.9566	1.049965
	GA	14.29995	20.70039	17.34569	1.292973
	PSO	21.20047	29.92195	25.23108	1.821383
	DE	11.01763	16.84062	12.92484	1.08163
3. Функция Гриванка (Griewank)	GA-PSO	5.334219	17.47176	8.82176	1.884436
	GA	24.0112	54.3471	39.2072	6.010382

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№^о гос. регистрации: 121041300060-4).

Тестовая задача ($n = 100$)	Метод	Мин.	Макс.	Ср.	Откл.
$f(x) = 1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i^2}{4000} \right) - \prod_{i=1}^n \cos \left(\frac{x_i}{\sqrt{i}} \right)$ $X = [-600, 600]^n, x_i^* = 0.0, f^* = 0.0$	PSO	356.0443	795.485	523.8285	75.13192
	DE	8.29377	85.9536	25.27138	12.65583
4. Функция Розенброка (Rosenbrock) $f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} (100 \cdot (x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2)$ $X = [-2.048, 2.048]^n, x_i^* = 1.0, f^* = 0.0$	GA-PSO	254.8842	705.5444	453.4915	90.69995
	GA	511.555	1024.33	731.9892	96.86319
	PSO	2539.426	7275.745	4334.306	978.9711
	DE	320.519	885.369	575.2177	102.3638

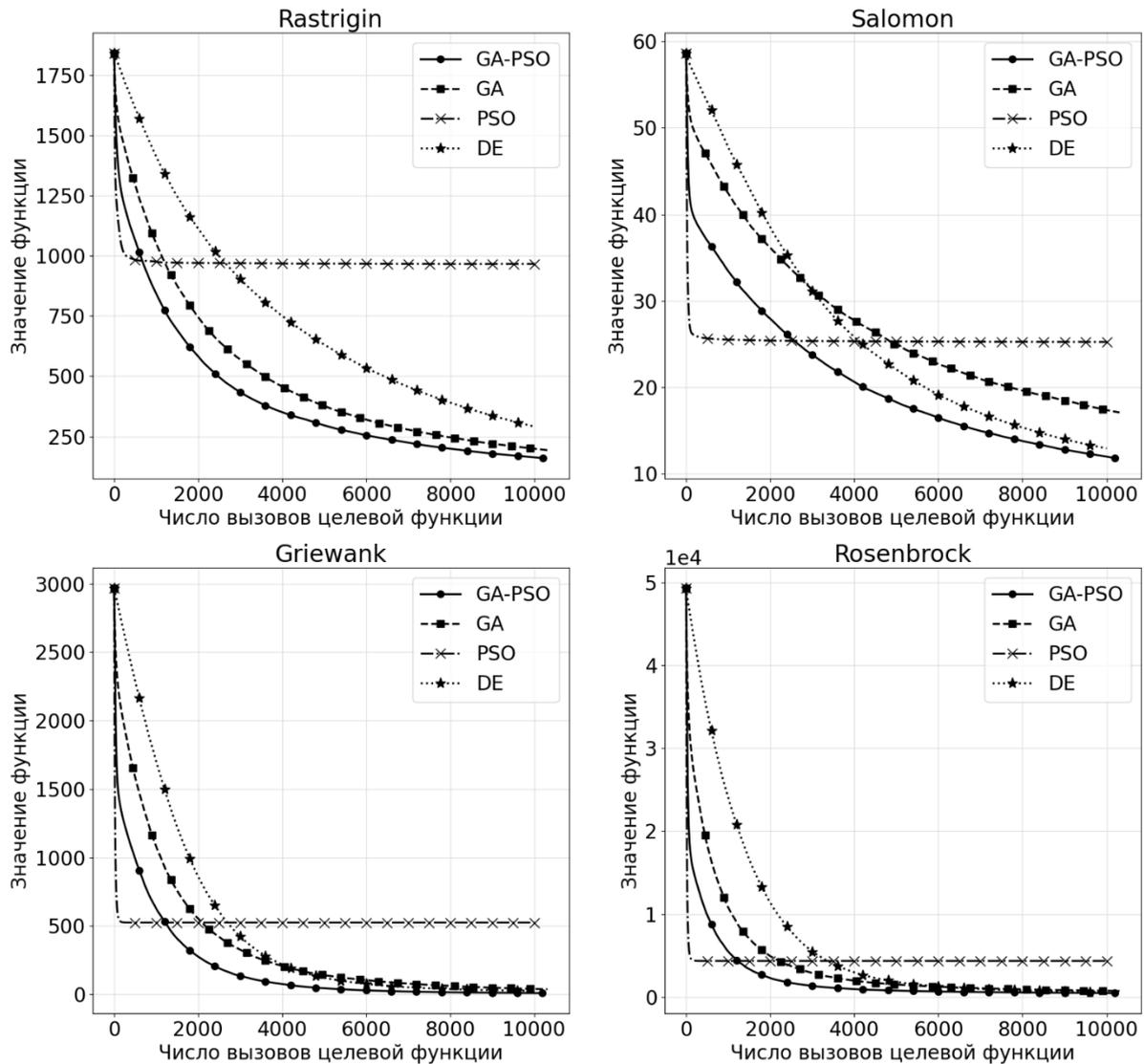


Рис. 1. Усредненные результаты запусков алгоритмов

1. Dey N. Applied genetic algorithm and its variants. Berlin: Springer Nature, 2023. 256 p.
2. Fang J. et al. A survey of algorithms, applications and trends for particle swarm optimization. International Journal of Network Dynamics and Intelligence. 2023. P. 24–50.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АЛГОРИТМА
ЦВЕТОЧНОГО ОПЫЛЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ*

П.С. Сороковиков

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
pavel@sorokovikov.ru

Проблема поиска глобального оптимума невыпуклой многоэкстремальной функции продолжает оставаться одной из самых трудных в теории оптимизации и в практических приложениях. Исследования по созданию численных методов нелокальной оптимизации ведутся достаточно активно в последние годы. В наши дни специалистами предложено существенное количество поисковых алгоритмов различного типа [1], каждый из которых имеет свои вычислительные характеристики. Одними из таких алгоритмов являются метаэвристики, «инспирированные природой» (см., напр., [2–4]), рост популярности которых связан с увеличением мощностей вычислительной техники и необходимостью решения оптимизационных проблем большой размерности.

Алгоритм цветочного опыления (Flower Pollination Algorithm, FPA) для решения задач нелокальной оптимизации предложен X.S. Yang в 2012 г. [5] в Кембриджском университете (Великобритания), представляет собой алгоритм, «инспирированный живой природой» и оперирующий множеством поисковых агентов. Работа посвящена численному исследованию свойств алгоритма FPA путем проведения многовариантных вычислительных экспериментов на наборе тестовых мультимодальных задач.

Рассматривается проблема поиска глобального минимума невыпуклой функции с параллелепипедными ограничениями:

$$f(x) \rightarrow \min, x \in B, B = \{x \mid x = (x_1, x_2, \dots, x_n), \alpha_i \leq x_i \leq \beta_i, i = \overline{1, n}\}.$$

В качестве тестовых примеров рассмотрены многоэкстремальные задачи, часто используемые при численном исследовании свойств алгоритмов глобальной оптимизации. Некоторые из тестовых оптимизационных задач приведены ниже.

1. Функция Ackley:

$$f(x) = 20 + e - 20 \cdot e^{-0.2 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}} - e^{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)}, B = [-30, 30]^n, n = 100, x_i^* = 0, f^* = 0.$$

2. Функция Salomon:

$$f(x) = 1 - \cos\left(2\pi \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) + 0.1 \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}, B = [-100, 100]^n, n = 100, x_i^* = 0, f^* = 0.$$

3. Функция Wavy:

$$f(x) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(10x_i) e^{-\frac{x_i^2}{2}}, B = [-\pi, \pi]^n, n = 100, x_i^* = 0, f^* = 0.$$

Численное исследование алгоритма FPA производилось в сравнении с метаэвристическими алгоритмами роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) [6], гармонического поиска (Harmony Search, HS) [7], оптимизации по принципу «учитель–ученик» (Teaching–Learning–Based Optimization, TLBO) [8]. Указанные алгоритмы были реализованы на языке C (GCC \ MinGW) с применением единых программных стандартов.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№° гос. регистрации: 121041300060-4).

Идентичные условия тестирования были обеспечены для алгоритмов, каждый из которых запускался 50 раз из одних и тех же начальных популяций, равномерно распределенных в области определения функции. Размерность тестовых задач составляла 100 переменных. Число поисковых агентов равнялось 10. Единым критерием остановки алгоритмов являлось превышение 10^4 обращений к оракулу нулевого порядка.

На рис. 1 приведены результаты численного сравнения алгоритмов в виде диаграмм размаха. По вертикальной оси отложены усредненные значения функции по всей популяции. В табл. 1 представлена статистика по запускам: минимальное, максимальное и среднее значения, стандартное отклонение.

Выполненные вычислительные эксперименты продемонстрировали конкурентоспособность алгоритма FPA, по крайней мере, для вышеописанных условий.

Таблица 1. Обобщенные результаты тестирования алгоритмов

Алгоритм	Минимальное значение			Максимальное значение		
	Ackley	Salomon	Wavy	Ackley	Salomon	Wavy
FPA	5.1269	15.7101	0.7253	16.1793	23.9032	0.8643
PSO	14.0553	15.5999	0.7402	16.2889	22.0999	0.8935
HS	14.8396	17.9706	0.3767	15.8857	23.3859	0.4718
TLBO	19.5214	15.5558	0.8552	20.0787	23.9375	0.9034
Алгоритм	Среднее значение			Стандартное отклонение		
	Ackley	Salomon	Wavy	Ackley	Salomon	Wavy
FPA	12.9104	18.8252	0.8214	2.4243	1.6271	0.0302
PSO	15.2011	19.0001	0.8328	0.5299	1.4415	0.0291
HS	15.4964	21.1284	0.4256	0.2507	1.1287	0.0176
TLBO	19.9383	20.4398	0.8886	0.0814	1.6732	0.0081

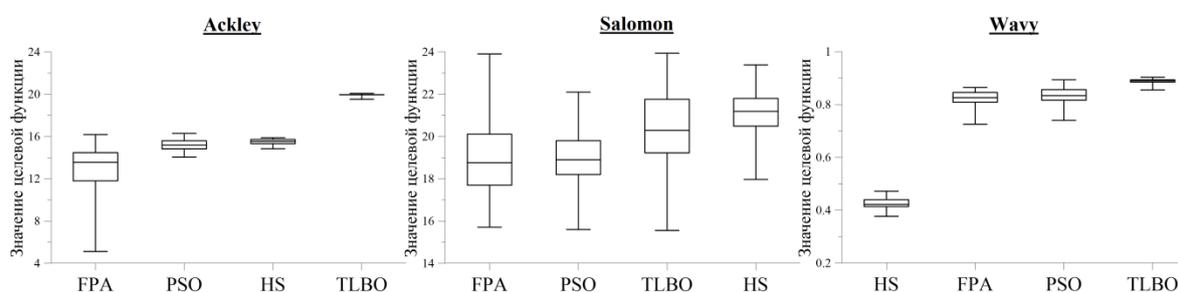


Рис. 1. Диаграммы численного сравнения алгоритмов

1. Floudas C.A., Pardalos P.M. Encyclopedia of optimization. New York: Springer Science & Business Media, 2009. 4626 p.
2. Xing B., Gao W.J. Innovative computational intelligence: a rough guide to 134 clever algorithms. Cham: Springer, 2014. 451 p.
3. Devika G., Karegowda A.G. Bio-inspired optimization: algorithm, analysis and scope of application. Swarm Intelligence-Recent Advances and Current Applications. 2023. P. 1–37.
4. Yang X.S. Nature-inspired metaheuristic algorithms. Frome: Luniver Press, 2010. 148 p.
5. Yang X.S. Flower pollination algorithm for global optimization. International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation. 2012. P. 240–249.
6. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. 1995. Vol. 4. P. 1942–1948.
7. Geem Z.W., Kim J.H., Loganathan G.V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. Simulation. 2001. Vol. 76, No. 2. P. 60–68.
8. Rao R.V., Savsani V.J., Vakharia D.P. Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. Computer-Aided Design. 2011. Vol. 43, No. 3. P. 303–315.

О ПРОЕКТИРОВАНИИ СЦЕНАРИЕВ ДЛЯ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДХОДА КОМПОНЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Столбов А.Б.

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

Компонентный подход к построению математических моделей сложных объектов предполагает декомпозицию исходной задачи и формирование соответствующего множества моделей-компонентов, создаваемых распределёнными группами разработчиков в контексте общепринятых стандартов, которые необходимы для обеспечения совместимости моделей друг с другом. Такой подход в последнее время обретает всё большую популярность и требует развития соответствующих методов и программных средств для поддержки процесса проектирования и реализации комплексных моделей сложных объектов.

Под моделью-компонентом понимается программный модуль алгоритма вычислений по модели, реализованный в определенном каркасе моделирования. При этом важной отличительной особенностью использования компонентно-ориентированного подхода является возможность осуществить интеграцию не только по данным (результатам вычислений отдельных моделей-компонентов), но и непосредственно в процессе вычислений. Таким образом, каждый компонент должен предоставить не только методы, связанные с настройкой и запуском вычислительного эксперимента, но также средства, реализующие возможность подключения внешних моделей-компонентов на этапе выполнения. С учётом этого особую значимость приобретает проблемы семантически значимых описаний моделей-компонентов и их корректного связывания [1].

Задачу связывания можно рассматривать на трёх последовательных уровнях. На первом анализируется принципиальная возможность организовать вычисления: способ обмен данными между моделями и варианты исполнения моделей на разных вычислительных устройствах. На следующих уровнях план вычислений по комплексной модели изучается с содержательной точки зрения.

На втором уровне связывания рассматриваются соединения между моделями – согласованность входов и выходов относительно единого понятийного пространства. На этом уровне необходимо, чтобы модели-компоненты были описаны в терминах некоторой концептуальной модели, с использованием элементов которой формируется база знаний, обеспечивающая поиск несоответствий в типах и единицах измерения. На третьем уровне понятийно правильно скомпонованная цепочка моделей анализируется с учётом особенностей методов моделирования. На этом уровне рассматриваются проблемы пространственного, временного и организационного масштабирования. Здесь также для автоматического анализа необходимо использовать специальные базы знаний.

Решение задачи связывания на всех уровнях основывается на авторской концептуальной модели компонентно-ориентированного сценарного моделирования (КМ КОСМ), которая описывает знания о моделях-компонентах с точки зрения: поддерживаемых программных интерфейсов; используемого математического аппарата; предметной интерпретации уравнений, переменных, параметров. КМ КОСМ также содержит информацию о разработчиках и аналогичных проектах; ссылки на описания, руководства и примеры. Фактически КМ КОСМ – это многослойная расширяемая онтология, интегрирующая данные и знания из различных источников, в т. ч. и других онтологий.

В качестве основной формы для представления связей элементов проектируемой комплексной модели используется поток работ (workflow), где узлами являются методы модели компонента, а связями – направления потоков данных и управления [2].

Предлагается следующий принципиальный алгоритм проектировании сценариев для анализа сложных объектов с использованием подхода компонентно-ориентированного моделирования:

1. Описание ситуации в терминах КМ КОСМ через создание экземпляров существующих предметных понятий и, при необходимости, создание новых дополнительных производных понятий.
2. Формирование целей исследования в терминах КМ КОСМ.
3. Регистрация и семантическое аннотирование элементов модели-компонента в терминах КМ КОСМ, с учетом особенностей работы с открытыми стандартами моделирования.
4. Регистрация и семантическое аннотирование источников данных. При этом источники данных рассматриваются как специальный вид компонента.
5. Формирование базы знаний анализа плана вычислений по модели. Исходная база знаний, с которой начинает работать пользователь, разрабатывается совместными усилиями специалистов из разных областей: системный анализ, математическое моделирование, предметные дисциплины, разработка программного обеспечения, DevOps, инженерия знаний. Задачей пользователя является:
 - a. Выбор правил из множества.
 - b. При необходимости, создание новых или замена существующих правил.
6. Формирование спецификации плана вычислений в терминах потока работ в специализированном веб-редакторе.
7. Анализ спецификации плана вычислений с использованием базы знаний, формирование рекомендаций
8. Повторение шагов 6-7 до получения комплексной модели, согласованной с базой знаний.
9. Формирование множество сценариев в соответствии с базой шаблонов.
10. Проведение вычислительных экспериментов с моделью.

Рассматриваемые иллюстративные примеры связаны с задачей сценарного моделирования на основе моделей-компонентов, описывающих эколого-экономические процессы, изучаемых в рамках научно-практического направления – комплексного моделирования окружающей среды (Integrated Environmental Modeling). В настоящее время в рамках этого направления автором разрабатывается информационная система комплексного моделирования окружающей среды для Байкальской природной территории (ИС КМОС БПР) на основе открытых стандартов для организации связывания [3].

1. Столбов А.Б., Лемперт А.А., Павлов А.И. Реализация компонентно-ориентированного моделирования в платформе создания систем, основанных на знаниях. Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 4. С. 21-30.
2. Столбов А.Б., Павлов А.И., Лемперт А.А. О проектировании потока работ в платформе создания систем, основанных на знаниях. Материалы V Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2023), 3-7 июля, 2023, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2023. С.82-87.
3. Столбов А.Б. Разработка информационной системы о математических моделях окружающей среды, поддерживающих открытые стандарты моделирования. Материалы VI Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2024), 1-5 июля, 2024, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024. С.34-38.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ «ВЕЛОСИПЕДНОЙ» МОДЕЛИ АВТОМОБИЛЯ

А.Н. Стрельников¹, А.Ю. Горнов²

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
strelnikov077@rambler.ru, gornov@icc.ru

Задача создания систем управления автомобилем, способных функционировать практически без участия человека, в настоящее время, бесспорно, является одной из самых актуальных технических проблем. В качестве основного математического аппарата для расчетов траекторий движения практикующими инженерами определены «задачи управления с прогнозирующими моделями». Среди большого множества предложенных в различных работах моделей динамики автомобиля особое место занимают, на наш взгляд, модели Дубинса, Ридса–Шеппа и так называемая (исторически) «велосипедная» модель (см., напр., [1, 2]). Простые модели первых двух типов мы исследовали ранее (см., напр., [3]). В докладе обсуждаются результаты исследования «велосипедной» модели на предмет оценки ее предельных возможностей.

В основе «велосипедной» модели лежат три ключевых предположения: а) вся динамика укладывается в одну плоскость без возможности изменить высоту машины; б) передние и задние колеса соединены жесткой балкой; в) оба передних колеса движутся синхронно, что позволяет охватить их одним модельным компонентом. При таких предположениях динамика автомобиля становится во многом похожей на динамику велосипеда, что и порождает несколько иронично-лингвистическое название всего этого подхода. Считается (см., напр., [4, 5]), что такая модель неплохо работает в случаях, когда можно пренебречь пробуксовыванием – характеристики сцепления правых и левых колес одной оси заметно не различаются.

Входами модели являются мгновенная скорость – линейная и угловая; мгновенное ускорение; пространственное положение в одной из систем координат (карта или глобальная); угловое положение в одной из систем координат (карта или глобальная); угол поворота передних колёс. Выходы модели: желаемое ускорение автомобиля, которое будет отрабатываться встроенным в автомобиль контуром управления; желаемый угол поворота колёс либо рулевого колеса.

Динамика системы задается уравнениями

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cdot \cos \theta, \dot{y} = v \cdot \sin \theta, \dot{\theta} = \frac{v}{b} \cdot \operatorname{tg} \gamma, \\ \dot{v} &= a, \dot{\gamma} = k_1(u_1(t) - \gamma), \dot{a} = k_2(u_2(t) - a).\end{aligned}$$

Ограничения на управления

$$-0.5 \leq u_1(t) \leq 0.5, -2.8 \leq u_2(t) \leq 2.8, t \in [t_0, t_1]$$

Начальный вектор будем выбирать следующим – (7.0, –220.0, –1.5, 0.8, –0.025, 0.0); значения коэффициентов модели – $b = 2.0$, $k_1 = 4.2$, $k_2 = 5.1$.

Принципиальная возможность оценить реалистичность какого-либо маневра автомобиля открывается при наличии адекватной модели и методик фазового оценивания. Задача аппроксимации множества достижимости, одна из ключевых задач теории фазового оценивания, может быть приближенно решена для нелинейных систем с линейным входением управляющих воздействий; к счастью, рассматриваемая нами система обладает этим свойством. Для построения аппроксимаций множества достижимости был использован алгоритм квазиравномерного заполнения, описанный в работе [6]. Построена серия множеств достижимости с увеличением времени, выдаваемого на маневр – t_1 от 1 до 3.5 с шагом 0.5 (рис. 1).

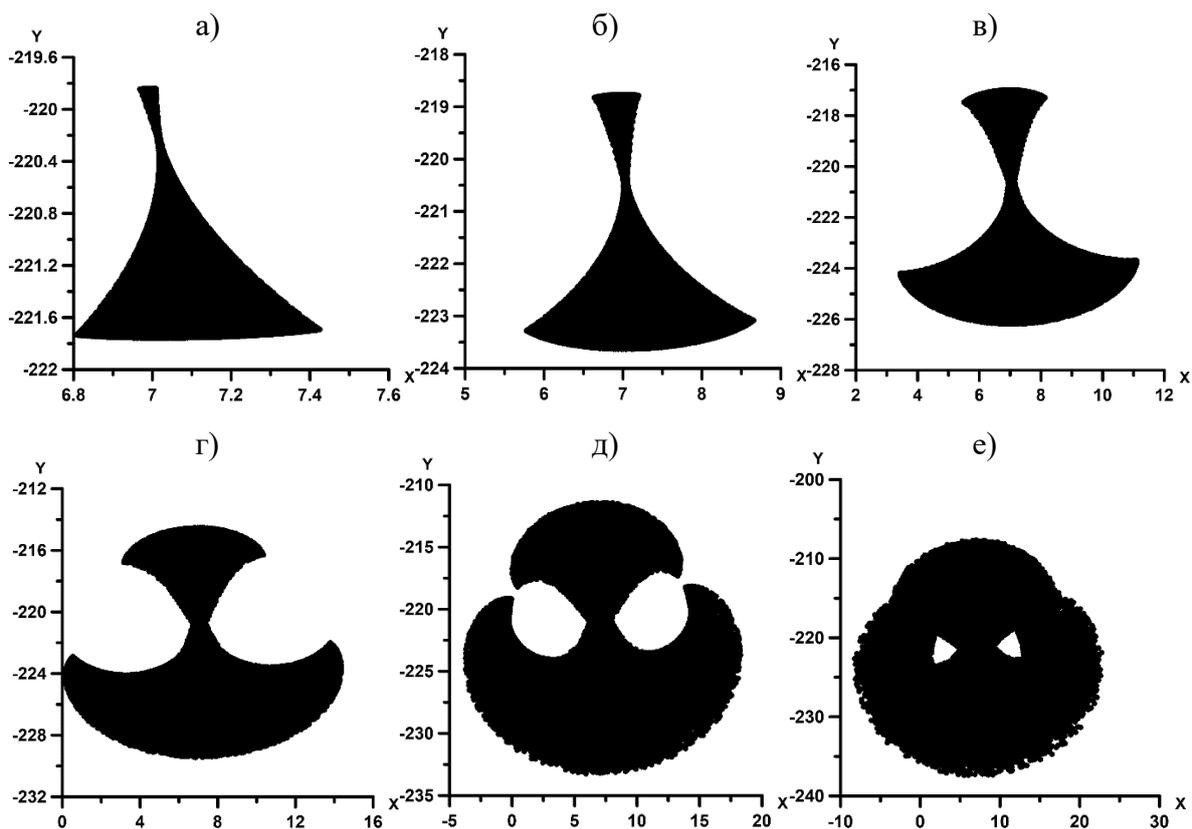


Рис. 1. Проекция множества достижимости на плоскость (x, y) с растущим интервалом времени: а) $t \in [t_0, t_1] = [0, 1.0]$, б) $[0, 1.5]$, в) $[0, 2.0]$, г) $[0, 2.5]$, д) $[0, 3.0]$, е) $[0, 3.5]$

На рисунке отражены проекции множества на плоскость (x, y) геометрических переменных при различном времени. Динамика множества достижимости хорошо отражает рост возможностей автомобиля с увеличением времени, выдаваемого на маневр. При недостатке времени многие точки в ближайшей окрестности текущего состояния недоступны. Но затем заполненность растёт, и, в конечном итоге, остаются только небольшие островки недоступности, которые тоже в конце концов исчезают. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили принципиальную работоспособность предложенного подхода.

1. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. Спб.: Наука, 2001. 227 с.
2. Meijaard J.P., Schwab A.L. Linearized equations for an extended bicycle model. Proc. of III European Conf. on Comp. Mechanics Problems in Engineering. Lisbon, 2006. 18 p.
3. Стрельников А.Н., Горнов А.Ю. Сравнительное исследование возможностей автомобильных моделей Дубинса и Ридса–Шеппа. Матер. 39-й междунар. конф. «Ляпуновские чтения 2023» (г. Иркутск, 4 – 8 декабря 2023 г.). 2023. С. 105.
4. Павлов И.С. Математическое моделирование пространственного движения автомобиля. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. М.: 1998. 188 с.
5. Смирнов И.А. Математическое моделирование заноса автомобиля. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. 167 с.
6. Финкельштейн Е.А., Горнов А.Ю. Алгоритм квазиравномерного заполнения множества достижимости нелинейной управляемой системы. Известия Иркутского гос. ун-та. Сер. Математика. 2017. Т. 19. С. 217–223.

АСИМПТОТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕТЕРОГЕННОЙ БЕСКОНЕЧНОЛИНЕЙНОЙ СМО С ПАРАМЕТРАМИ, ЗАВИСЯЩИМИ ОТ СОСТОЯНИЯ СЛУЧАЙНОЙ СРЕДЫ*

А.В. Тарасенко, С.П. Моисеева, Е.П. Полин
Томский государственный университет
Lsa328@yandex.ru, smoiseeva@mail.ru, polin_evgeny@mail.ru

Система массового обслуживания $M/M/\infty$ является одной из самых простых моделей в теории очередей, что обусловлено тем фактом, что простейший входящий поток обладает свойством отсутствия последействия, а неограниченное число серверов позволяют заявкам вести себя независимо друг от друга. Но, несмотря на свою простоту, система $M/M/\infty$ часто используется для моделирования систем с чистой задержкой, таких как автомагистрали, спутниковые линии связи или длинные кабели связи, или для аппроксимации поведения многосерверных систем. Когда такие типы систем подвергаются внешним воздействиям, которые влияют на скорость обслуживания и интенсивность входящих потоков, полезно рассмотреть более адекватные модели, такие как предложенная в этой работе, чтобы проанализировать или предсказать их поведение [1].

В 1981 г. M.F. Neuts предложил фундаментальный подход к проблеме анализа СМО в случайной марковской среде [2]. Он свел задачу расчета характеристик такой системы к решению матричного уравнения. Такой подход позволил исследовать характеристики систем массового обслуживания, параметры которых зависят от состояния некоторого случайного процесса, представляющего собой цепь Маркова с конечным множеством состояний. T. Takine и B. Sengupta рассмотрели бесконечнолинейную систему, когда только входящий поток был подвержен марковской модуляции [3, 4].

Настоящая работа продолжает исследования [5], где проводился асимптотический анализ гетерогенных бесконечнолинейных систем массового обслуживания с параметрами экспоненциального обслуживания, зависящими от состояния внешней среды, в условии эквивалентно растущего времени обслуживания на гетерогенных серверах. В данной работе в качестве предельного условия рассматривается высокая интенсивность входящего потока и предельно частое изменение состояний случайной среды.

Рассматривается гетерогенная система массового обслуживания с неограниченным числом приборов, функционирующая в случайной среде. Процесс изменения состояний внешней среды – непрерывный марковский процесс $s(t)$ с конечным числом состояний $s = 1, \dots, S$, который определяется матрицей инфинитезимальных характеристик $\mathbf{Q} = [q_{ij}]$, $i, j = 1, \dots, S$. Состояние среды определяет интенсивность входящего потока как $\lambda_s \geq 0$, $s = 1, \dots, S$, то есть входящий в систему поток является Марковским модулированным пуассоновским потоком – ММРР. Дисциплина обслуживания поступающих заявок определяется состоянием среды в момент поступления требования. Если среда находится в состоянии, $s(t) = n$, $n = 1, \dots, S$ то заявка обслуживается случайное время, распределенное по экспоненциальному закону $F_n(x) = 1 - e^{-\mu_n x}$, $x \geq 0$, не меняющееся при изменении состояния среды. Таким образом, в системе одновременно обслуживаются заявки с разными параметрами обслуживания, поэтому такие системы будем называть гетерогенными.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №.24-21-00454, <https://rscf.ru/project/24-21-00454/>

Для стационарного распределения вероятностей $P(\mathbf{i}, n, t) = P(i_1, i_2, \dots, i_S, n, t) = P\{i_1(t) = i_1, i_2(t) = i_2, \dots, i_S(t) = i_S, s(t) = n\}$ система уравнений Колмогорова для $n = 1, 2, \dots, S$ имеет вид

$$-\left(\lambda_n + \sum_{l=1}^S \mu_l i_l\right) P(\mathbf{i}, n) + \lambda_n P(\mathbf{i} - \mathbf{e}_n, n) + \sum_{l=1}^S \mu_l (i_l + 1) P(\mathbf{i} + \mathbf{e}_l, n) + \sum_v q_{vn} P(\mathbf{i}, v) = 0.$$

Здесь $\mathbf{e}_1 = [1, 0, \dots, 0]$, ... , $\mathbf{e}_n = [0, 0, \dots, 1]$ – вектор-строки размерности $1 \times S$. Тогда для частичных характеристических функций вида

$$H(u_1, u_2, \dots, u_S, n) = H(\mathbf{u}, n) = \sum_{i_1} e^{ju_1 i_1} \sum_{i_2} e^{ju_2 i_2} \dots \sum_{i_S} e^{ju_S i_S} P(\mathbf{i}, n),$$

и используем обозначения

$$\mathbf{h}(\mathbf{u}) = [H(\mathbf{u}, 1), H(\mathbf{u}, 2), \dots, H(\mathbf{u}, S)], \quad \boldsymbol{\mu}(\mathbf{u}) = [\mu_1(e^{-ju_1} - 1), \mu_2(e^{-ju_2} - 1), \dots, \mu_S(e^{-ju_S} - 1)],$$

$$\frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H(\mathbf{u}, 1)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial H(\mathbf{u}, S)}{\partial u_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial H(\mathbf{u}, 1)}{\partial u_S} & \dots & \frac{\partial H(\mathbf{u}, S)}{\partial u_S} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Lambda}(\mathbf{u}) = \text{diag}[\lambda_1(e^{ju_1} - 1), \dots, \lambda_S(e^{ju_S} - 1)].$$

имеем следующую систему уравнений в матричном виде

$$j\boldsymbol{\mu}(\mathbf{u}) \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{h}(\mathbf{u}) (\boldsymbol{\Lambda}(\mathbf{u}) + \mathbf{Q}).$$

Будем искать решения данной системы в условии высокоинтенсивного входящего потока и частой смены состояний среды, то есть $\boldsymbol{\Lambda} = N\boldsymbol{\Lambda}'$, $\mathbf{Q} = N\mathbf{Q}'$, $N \rightarrow \infty$. С использованием метода асимптотического анализа [6] в данной работе показано, что асимптотическое приближение первого порядка имеет вид

$$H(u_1, \dots, u_S) = \exp \left\{ j \left(r_1 u_1 \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \dots + r_S u_S \frac{\lambda_S}{\mu_S} \right) \right\}.$$

Таким образом, получено, что асимптотическое среднее число занятых приборов совпадает с точным [7]. Второй этап исследования состоит в нахождении асимптотической дисперсии, что позволит более точно оценить поведение исследуемого многомерного процесса.

1. D'Auria B. M/M/∞ queues in semi-Markovian random environment. *Queueing Syst.* 2008. № 58. pp. 221–237.
2. Neuts M.F. *Matrix-geometric solutions in stochastic models.* Baltimore and London: The John Hopkins University Press. 1981. 352 pp.
3. Takine N., Sengupta B. A Single Server Queue with Service Interruptions. *Queueing Syst.* 1997. №26. pp. 285–300.
4. Sengupta B. A Queue with Service Interruptions in an Alternating Random Environment. *Operations Research.* №38. pp. 308–318.
5. Полин Е.П., Моисеева С.П., Рожкова С.В. Асимптотический анализ неоднородной системы массового обслуживания M/M/∞ в марковской случайной среде. *Вестник Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика.* 2019. № 47. С. 75–83.
6. Назаров А.А., Моисеева С.П. *Методы асимптотического анализа в теории массового обслуживания.* Томск: Изд-во НТЛ. 2006. 112 с.
7. Полин Е.П., Моисеева С.П. Исследование системы MMPP(n)|M(n)|∞ методом моментов. *Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем: материалы VI Международной молодежной научной конференции.* Томск, 24–26 мая 2018 г. Томск, 2018. Т. 302. С. 306–311.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ ПОРАЖЕНИЯ ВЕРХНИХ ОТДЕЛОВ РЕСПИРАТОРНОГО ТРАКТА КАК ОСЛОЖНЕНИЙ ГАСТРОЭЗОФАГЕАЛЬНОЙ РЕФЛЮКСНОЙ БОЛЕЗНИ

И.В. Темникова¹, А.Ю. Горнов²

¹Клиническая больница «РЖД-Медицина», г. Иркутск

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Гастроэзофагеальная рефлюксная болезнь (ГЭРБ) доминирует среди заболеваний органов пищеварения. Распространенность ГЭРБ в странах Западной Европы и Северной Америки уже достигает 25,9–27,8 %, Восточной Азии – 7,8 %; в недавних крупных популяционных исследованиях обнаружен ее рост в Западной Европе и Северной Америке на 4 % в год; в Азии за десятилетний период частота эрозивной формы рефлюксной болезни увеличилась в несколько раз [1]. Помимо прогрессивно растущих распространенности и тяжести патологии, актуальность проблемы ГЭРБ обусловлена внепищеводными клиническими проявлениями, которые для диагностики требуют применения широкого спектра лабораторных, инструментальных методов обследования и совместной работы врачей разных специальностей, а при необходимости верификации диагноза – влияют на продолжительность и структуру лечения [2].

В докладе обсуждаются проблемы оценки рисков утраты качества жизни пациентов, страдающих хроническими заболеваниями дыхательного тракта, ассоциированными последствиями рефлюксной болезни (см., напр., [3]).

Обучающая выборка для моделирования составлена из 132 последовательных стационарных пациентов гастроэнтерологического и оториноларингологического отделений Дорожной клинической больницы РЖД, подписавших информированное согласие на исследование. Для каждого пациента имеются данные по основным 60 клиническим и лабораторным показателям. Экспертным путем были сформированы 3 группы: 1-я группа – пациенты с внепищеводными синдромами ГЭРБ (41 чел., медиана возраста 43,8 лет); 2-я – пациенты с пищеводными синдромами ГЭРБ с отсутствием любых внепищеводных проявлений (50 чел., медиана 41,5 лет); 3-я – пациенты с поражением верхних отделов респираторного тракта в отсутствие ГЭРБ (41 чел., 40 лет). Для каждой из групп с использованием регрессионных методов было выполнено моделирование риска обнаружения ГЭРБ-ассоциированной патологии верхнего отдела респираторного тракта. Расчеты выполнялись с применением нелокальных безградиентных методов, реализованных в составе библиотеки алгоритмов программного комплекса OPTCON, вариант 2024 г.

Полученные результаты сравнительных расчетов получили содержательную трактовку специалистов-медиков.

1. Onuchina E., Subbotina M., Temnikova I., Vasyutin A.V., Tsukanov V.V. The microflora spectrum of the nasal cavity associated with GERD in patients with chronic rhinosinuitis. *Gastroenterology*. 2016. Vol. 150, N. 4, Suppl. 1. P. 266–267.
2. Темникова И.В., Субботина М.В., Онучина Е. В. Клинико-лабораторные особенности хронического риносинусита, ассоциированного с гастроэзофагеальной рефлюксной болезнью. *Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии*. 2015. Т. 25, № 5, приложение. С.13.
3. Темникова И.В., Субботина М.В., Онучина Е. В. Качество жизни пациентов с хроническим риносинуситом, ассоциированным с гастроэзофагеальной рефлюксной болезнью. *Сибирский медицинский журнал*. Иркутск, 2015. № 8. С. 33–36.

НАПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРИБОРА, ПОЛУЧАЮЩЕГО И ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО СВЕТОВОЙ СПЕКТР

Е.М. Тимофеев
Иркутский государственный университет
geka.timof@mail.ru

В Иркутском институте биологии занимаются мониторингом состояния животных в байкале, в частности, Байкальского гаммаруса. Гаммарусам вживляют биологический маркер, который в зависимости от состояния организма меняет излучаемый спектр, получив который, можно понять, в каком состоянии находится организм.

Для получения необходимых для исследования данных нужны данные спектрометра, подключённого к микроскопу. Тут и возникает проблема.

Проблема: В распоряжении института есть и микроскоп, и спектрометр, однако у этих устройств есть несколько проблем — нет ПО к спектрометру, только демо скрипт, позволяющий разово выгрузить данные в командную строку, такое ПО невозможно использовать в исследовании. Также нет обработки и визуализации данных спектрометра, нет возможности тонкой настройки микроскопа, учёные должны руками на глаз настраивать оборудование, что не позволяет достичь необходимой для исследования точности, а это крайне важно для получения действительных результатов. И, наконец, отсутствует оборудование для получения и визуализации изображения с микроскопа.

В текущих условиях институт не может использовать это оборудование, что пагубно влияет на проведение исследований. Поэтому в своей работе я решил, объединив имеющееся оборудование, собрать прибор подходящий для задач учёных, а также написать практичное ПО, дающее необходимый функционал и обладающее понятным интерфейсом.

Для реализации своего проекта, мной была сформулирована тема и выявлено несколько ключевых этапов реализации (задач).

Цель работы: Собрать полноценный прибор и реализовать нативно понятное программное обеспечение с удобным визуальным интерфейсом, для его использования учёными в рамках исследовательского института.

Задачи.

1. Подключение Спектрометра и создание блока программного кода для выгрузки и визуализации данных.
2. Подключение шагового двигателя к микроскопу и создание блока программного кода для точной настройки высоты и фокуса изображения.
3. Подключение камеры к микроскопу и создание блока программного кода для получения изображения.
4. Создание блока программного кода для стэкинга изображений (улучшения качества изображения путём объединения нескольких снимков с разным фокусом).
5. Создание пользовательского интерфейса на основе необходимого для учёных функционала.

Также мной было проведено исследование потребностей учёных и их желаний касательно будущего интерфейса продукта путём опроса, а также анализа текущих инструментов, находящихся в распоряжении института.

Свой проект я реализовываю на языке Python, так как он довольно хорошо умеет работать с графиками, динамическими графиками, фото, а также довольно прост в обращении. Помимо Python, мной был использован демо скрипт на языке C, для выгрузки данных со спектрометра.

1. Официальная документация по библиотекам для языка python. URL: <https://docs.python.org/3/library/> (дата обращения: 29.10.2024).
2. Официальная документация по языку C. <https://metanit.com/c/tutorial/> (дата обращения: 03.11.2024).
3. Официальная сайт компании, производящей спектрометры. <https://optosky.com/> (дата обращения: 20.10.2024).

МЕТОДЫ КОНТРАСТНОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СЕМАНТИЧЕСКОГО АННОТИРОВАНИЯ ТАБЛИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ*

К.В. Тобола

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

В данной работе рассмотрена проблема существующих решений семантического аннотирования табличной информации, связанная с дисбалансом классов в наборах данных, используемых для обучения систем, решающих поставленную задачу [1]. Также существующие системы нуждаются в большом количестве размеченных данных, что в свою очередь требует большого количества ресурсов. Эти проблемы могут быть решены при помощи техник контрастного обучения. В работе приведен обзор существующего решения [2], использующего данную технику для обучения кодировщика на табличных данных. Кодировщик используется для получения векторных представлений столбцов таблиц, которые в свою очередь далее применяются в целом ряде задач семантической интерпретации таблиц. Это решение основано на работе из области компьютерного зрения [3] и достигает лучших значений по нескольким оценкам в сравнении с передовыми подходами. В данной работе были учтены исследования о модификациях подходов контрастного обучения [4], а также предложен новый метод контрастного обучения на табличных данных. Предложенный метод может быть использован в ряде задач семантической интерпретации табличных данных.

1. Kirill V. Tobola and Nikita O. Dorodnykh. “Semantic Annotation of Russian-Language Tables Based on a Pre-Trained Language Model”. In: 2024 Ivannikov Memorial Workshop (IVMEM). 2024, pp. 62–68. doi: 10.1109/IVMEM63006.2024.10659709.
2. Zhengjie Miao and Jin Wang. “Watchog: A Light-weight Contrastive Learning based Framework for Column Annotation”. In: Proc. ACM Manag. Data 1.4 (Dec. 2023). doi: 10.1145/3626766. url: <https://doi.org/10.1145/3626766>.
3. Ting Chen et al. A simple framework for contrastive learning of visual representations. In: Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. ICML’20. JMLR.org, 2020.
4. Ashish Jaiswal et al. “A survey on contrastive self-supervised learning”. In: Technologies 9.1. 2020, p. 2.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9)

ОРГАНИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

А.А. Толстихин

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

Метод искусственных потенциальных функций (ИПФ) [1] в настоящее время широко используется для организации как индивидуальных, так и групповых стратегий управления мобильными роботами. Его суть, в классической формулировке, заключается в решении уравнения движения, зависящего от двух «сил»: силы притяжения к цели и силы отталкивания от препятствий. Однако при решении практических задач может возникнуть необходимость добавления ряда дополнительных «сил», описывающих взаимодействия роботов внутри группы, параллельно решаемые подзадачи или внешние воздействия среды. Такое развитие идей метода ИПФ часто называют методом поведенческой структуры [2].

Данная работа посвящена внедрению механизма обхода препятствий в сегрегированную стратегию управления [3] при параллельном решении задач поиска аномалий поля концентрации и восстановления заданных линий уровня.

Предложенная сила обхода препятствий имеет следующий вид:

$$F_i^o = \sum_{j \in \mathcal{N}} \gamma q_{ij} \left(\ln(\|q_{ij}\| - d_{ij}^{min}) + \frac{k}{\|q_{ij}\| - d_{ij}^{min}} \right)^2 \sqrt{d_{ij}^{max} - \|q_{ij}\|},$$

где \mathcal{N} – множество точек на границе препятствий, видимых роботу; γ , k – усиливающие коэффициенты; d_{ij}^{min} – дистанция гарантированного обхода; d_{ij}^{max} – дистанция реакции на препятствие. Данная функция обладает следующими свойствами:

- 1) стремится по модулю к бесконечности при приближении робота к препятствию на дистанцию гарантированного обхода и обращается в ноль при дистанции большей либо равной d_{ij}^{max} ;
- 2) естественным образом реализует маневры «обход препятствия справа» и «обход препятствия слева»;
- 3) управление параметром γ , обеспечивает выбор маневра обхода в условиях равновесия альтернатив;
- 4) при использовании панорамного лидара сила не противодействует прохождению роботов через препятствия коридорного типа.

В ходе тестирования подхода в рамках специальной программной среды была продемонстрирована его применимость в решении поставленной задачи при незначительном падении скорости и точности ее решения. Проведена классификация возможных взаимных расположений аномалий поля концентрации и границ препятствий, а также выявлены те классы, для которых решение задач поиска аномалий, оконтуривания линии уровня или их совокупности не гарантируется из-за попадания роботов в потенциальные ловушки. В настоящее время ведется разработка способа идентификации подобных ситуаций, а также способов выхода из них, включающие как применение дополнительных «сил» в методе поведенческой структуры, так и использование дискретно-событийной системы для переключения стратегий управления. В частности, использование стратегий гарантированного обхода препятствия с последующим возвратом к решению основной задачи.

1. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*. 1985. P. 500–505.
2. Bautista J. Behavioral-based circular formation control for robot swarms. *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Yokohama, Japan, 2024. P. 8989–8995
3. Tolstikhin A. Bio-inspired multi-purpose approach to the sampling problem. *MDPI Computation*. 2023. V. 11(12), 254.

КЛАССИФИКАЦИЯ БЛОКОВ ДОКУМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ*

Р.И. Трифонов

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
tr1fonov.roman@yandex.ru

В работе предложен метод классификации блоков документов на графе с использованием графовых нейронных сетей (GNN) [1]. Цель классификации – автоматическое определение классов блока (заголовок, текст, таблица, список или изображение), что облегчает последующую обработку, поиск и анализ документов. Помимо GNN, для классификации могут использоваться сверточные нейронные сети (CNN), классификация вектора графового представления [2] или какие-либо эвристические подходы.

Для обучения модели использовался датасет PubLayNet [3], содержащий изображения страниц и аннотации текстовых блоков. Предварительно проводилась предобработка данных, которая заключалась в применении OCR Tesseract для выделения bounding boxes (bbox) каждого слова на изображении. Центры этих bbox использовались для построения графа документа, где узлы соответствуют словам, а ребра соединяют ближайшие по расположению слова (по четыре в каждом направлении).

На основе извлеченных данных составляются матрицы смежности и векторы признаков. Признаки узлов выбираются так, чтобы отражать структуру и взаимосвязь текстовых элементов. Из-за большого объема данных используется разреженное представление матриц. Граф документа сегментируется на подграфы, где каждый подграф соответствует отдельному блоку. На вход модель классификации получает эти подграфы.

Для классификации блоков используется GNN, которая учитывает взаимосвязи между узлами и их характеристики. Это особенно важно для анализа структуры текста, так как позволяет обобщать информацию, учитывая не только признаки узлов, но и их связи.

В качестве архитектуры GNN была выбрана сверточная графовая сеть (GCN), которая агрегирует признаки узлов и их соседей, обучаясь на связях между ними. Сверточный слой GCN описывается следующим уравнением:

$$H^{(l+1)} = \sigma(\tilde{D}^{(-1/2)}(A + I)\tilde{D}^{(-1/2)}H^{(l)}W^{(l)}),$$

где $H^{(l)}$ – матрица признаков узлов на (l) -том слое, A – разреженная матрица смежности графа, I – единичная матрица, \tilde{D} – диагональная матрица (каждый элемент — это сумма соответствующей строки матрицы A), $W^{(l)}$ – обучаемая матрица весов, σ – функция активации (ReLU).

Архитектура сети включает два слоя GCN. Такое построение эффективно для задач классификации, поскольку увеличение количества слоев может привести к переобучению модели [4]. После прохождения слоев сеть усредняет признаки узлов, формируя представление блока в виде одного вектора, что упрощает задачу классификации.

В будущем развитие системы предполагает решение нескольких ключевых задач, направленных на улучшение точности и универсальности модели. Одной из них станет интеграция парсера PDF-документов для обработки данных. Этот подход позволит работать не только с изображениями, но и извлекать из PDF-документов текстовую

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9)

информацию вместе с характеристиками шрифтов (их название, размер и начертание). Это даст возможность рассчитывать характеристики текста с большей точностью, что обеспечит надежное построение графа документа и, в конечном итоге, улучшит качество классификации блоков.

Важной задачей с точки зрения работы с изображениями станет внедрение распознавания шрифтов. Если научиться извлекать информацию о шрифтах из изображений документа (их наклон, жирность и стиль), то это позволит использовать дополнительные признаки, что приведет к более качественным результатам при классификации.

Наряду с расширением функциональности системы будет продолжена работа над самой моделью. Несмотря на выбранную архитектуру графовых нейронных сетей, важной задачей остается её настройка и оптимизация. Планируется серия экспериментов с подбором гиперпараметров, в частности, будет уделено внимание выходному слою модели, так как выбор его конфигурации влияет на интерпретацию итоговых признаков и, следовательно, на качество классификации блоков.

1. Zhou J. , Cui G., Hu S., Zhang Z., Yang C., Liu Z., Wang L., Li C., Sun M. Graph neural networks: A review of methods and applications. *AI Open.* – 2020. – Vol. 29. – P. 57-81. – DOI: 10.1016/j.aiopen.2021.01.001.
2. Kopylov D., Mikhaylov A. How To Classify Document Segments Using Graph Based Representation and Neural Networks. *IVMEM.* 2024. P. 36-41. DOI: 10.1109/IVMEM63006.2024.10659393.
3. Zhong X., Tang J., Yepes A. PubLayNet: largest dataset ever for document layout analysis. *ICDAR.* 2019. P. 1015-1022. DOI: 10.1109/ICDAR.2019.00166.
4. Wang J., Krumdick M., Tong B., Halim H., Sokolov M., Barda V., Vendryes D., Tanner C. A Graphical Approach to Document Layout Analysis. *ICDAR.* 2023. P. 53–69. DOI: 10.1007/978-3-031-41734-4_4.

ЦИФРОВЫЕ ПОРТРЕТЫ: ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МНОГОФАКТОРНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПОМОЩИ ПИКТОГРАФИКОВ

Е.А. Турусина, А.Г. Балахчи
Иркутский государственный университет
turusinak@gmail.com

Пиктографики — это метод визуализации данных, в котором каждое наблюдение представляется в виде графического объекта, параметры или характеристики которого соответствуют значениям переменных. Изменение конфигурации значений переменных отражается в изменении внешнего вида объекта, что позволяет визуально выявлять уникальные особенности, зависимости и взаимосвязи между переменными. Главная идея такого метода анализа основана на человеческой способности «автоматически» фиксировать сложные связи между многими переменными, если они проявляются в последовательности элементов. Пиктографики находят применение в маркетинге для анализа целевой аудитории, в образовании для визуализации характеристик студентов, в журналистике для создания данных-иллюстраций, в HR для анализа профилей сотрудников, и в медицине для представления индивидуальных данных пациентов. В экологическом аспекте цифровые портреты используются для мониторинга погоды, анализа уровня загрязнения, представления данных об энергопотреблении или водных ресурсах. Например, в проектах, связанных с устойчивым развитием, можно визуализировать изменения климата, потребление энергии или выбросы углекислого газа, делая эти данные доступными и понятными для широкой аудитории.

Цифровые портреты, выполненные с использованием пиктографиков, становятся креативным способом визуализации. Для создания таких портретов используются символы или значки, которые олицетворяют различные факторы. Например, цвет может представлять пол или возрастную категорию, форма может отображать профессию или род занятий, а размер — важность или интенсивность параметра (например, доход или количество лет опыта).

Цифровые портреты находят разнообразное применение в самых разных областях. Проект *Capturing People Through Data* (<https://clck.ru/3Eiwhq>) представляет собой портреты участников хакатона, где закодированы их имена, интересы в различных сферах и поведенческие данные. В рамках *Flowers and Numbers* (<https://clck.ru/3EiwmW>) были созданы портреты, отражающие уровень навыков членов сообщества. В проекте *TED Data Portraits* (<https://clck.ru/3EiwpC>) визуализированы портреты участников конференции на основе их поведенческих данных. Интересный подход демонстрирует *Self Portrait: My Life in 99 Songs* (<https://clck.ru/3Eiww4>), где портреты создаются на основе 99 песен, каждая из которых отражает жанр, эмоции, мысли и действия автора. Проект *Weather Portraits 2014 US Cities* (<https://clck.ru/3Eix4B>) визуализирует погодные данные крупнейших городов США, создавая уникальные портреты для каждого города. В *A Good Life for All* (<https://clck.ru/3Eix7w>) представлены портреты стран, которые показывают, как национальные социальные цели влияют на использование природных ресурсов планеты. Наконец, *Drinking Water Quality* (<https://clck.ru/3EixDW>) иллюстрирует качество питьевой воды, сравнивая допустимые нормы содержания различных элементов с реальными данными, что позволяет создать наглядный портрет воды в каждом случае. Такие проекты демонстрируют, как можно эффективно использовать данные для создания визуализаций, которые не только информируют, но и вовлекают зрителя. Также одним из примеров пиктографиков являются «Лица Чернова», которые нашли применение в медицинской сфере. Каждое медицинское наблюдение рисуется в виде отдельного лица, где данные сопоставляются с частями этого лица. Этот подход

использовался для отслеживания изменений физиологических параметров в ответ на психофизиологическое воздействие с учетом психологических особенностей пациентов, страдающих бронхиальной астмой.

Инструментами для создания цифровых портретов могут являться различные языки программирования (Python, Java Script, R), графические редакторы (Adobe Photoshop, Adobe Illustrator, Figma), BI-системы (Tableau, Power BI), а также специализированное ПО (NodeBox3). В рамках научно-исследовательской работы были созданы цифровые портреты участников летней школы по визуализации данных, что позволило систематизировать и наглядно представить их компетенции, интересы и предпочтения. Исходные данные для создания портретов включали оценки навыков участников в таких ключевых областях, как анализ данных, визуализация информации, программирование, математика, искусственный интеллект, а также степень их вовлеченности в проекты, связанные с озером Байкал. Анкета дополнительно содержала вопросы о предпочтительных направлениях проектной работы в командах, что позволило глубже понять цели и ожидания участников.

Для создания индивидуальных цифровых портретов использовался язык программирования Python, обеспечивающий гибкость в обработке данных и визуализации. Общий портрет сообщества был визуализирован с помощью графического инструмента NodeBox, что позволило отразить взаимосвязи и общие тенденции среди участников школы. Разработанные цифровые портреты представлены в нескольких формах: радиальные диаграммы, лица Чернова, цифровые изображения на основе генеративной графики, а также пользовательские формы визуализации. Одной из ключевых пользовательских форм стало изображение цветка с шестью лепестками, где каждый лепесток характеризовал одну из исследуемых областей (например, математику или программирование), а графические элементы внутри лепестков (дуги, окружности, точки) отражали уровень навыков и заинтересованности участника в данной области. Кроме того, в цифровом портрете использовалось изображение насекомого, которое кодировало дополнительные сведения об участнике. Например, цвет крыльев указывал на пол. Благодаря такому подходу были созданы не только индивидуальные портреты участников, но и полноценная визуализация общего портрета сообщества. Эти данные могут быть использованы для анализа сильных и слабых сторон участников, подбора эффективных команд для работы над проектами, а также для долгосрочного планирования образовательных программ. Такой формат представления информации стал не только эффективным инструментом анализа, но и уникальным примером

Цифровые портреты на основе пиктографиков — это мощный инструмент визуализации данных, который позволяет объединить креативность и аналитику. Их использование помогает не только представлять данные наглядно, но и делать их доступными для широкой аудитории. В эпоху информации такие графики становятся важным компонентом аналитики и коммуникации.

1. Осадчая И.А., Берестнева О.Г., Немеров Е.В. Анализ многомерных медицинских данных с помощью пиктографиков «Лица Чернова» // Бюллетень сибирской медицины. 2014. № 4. [электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-mnogomernyh-meditsinskih-dannyh-s-pomoschyu-piktografikov-litsa-chernova> (дата обращения 03.07.2024)
2. Яу Н. Искусство визуализации в бизнесе. Как представить сложную информацию простыми образами. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2004.

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕСКОНЕЧНОЛИНЕЙНОЙ СМО С ДВУМЯ БЛОКАМИ ОБСЛУЖИВАНИЯ*

Я.А. Тюленина, Е.А. Фёдорова

Национальный исследовательский Томский государственный университет

y.a.tyulenina@stud.tsu.ru

В современном мире важным аспектом функционирования любой системы является ее энергоэффективность. Так, например, в вычислительных кластерах затраты на электроэнергию составляют основную часть расходов провайдеров. Оптимизировать затраты можно путем использования альтернативных источников энергии. Однако, низкая энергоэффективность большинства альтернативных технологий пока не позволяет полностью отказаться от традиционной энергетики. Поэтому необходимы гибридные энергосистемы, сочетающие несколько источников энергии [1,2].

В работе предлагается математическая модель гибридной энергетической системы с разделением источников энергии, представленная в виде бесконечнолинейной системы массового обслуживания с двумя блоками приборов. На вход системы поступает простейший поток заявок (запросов на электроэнергию) с интенсивностью λ . Предполагаем, что первый блок питается альтернативным источником энергии (например, солнечными панелями), а второй – использует городскую электрическую сеть. Очевидно, что мощность первого блока ограничена, т. е. в терминах ТМО будем говорить, что имеется K приборов, а мощность второго блока не ограничена – имеется бесконечное число приборов. Обслуживающие блоки могут работать одновременно. При этом второй блок работает всегда, а первый включается с некоторой периодичностью в зависимости от погодных условий. Пусть время его работы распределено по экспоненциальному закону с параметром γ_1 , а в выключенном состоянии – с параметром γ_0 . Функционирует система в терминах ТМО следующим образом: при поступлении заявки в систему, она начинает обслуживание на первом блоке, (если он включен и не переполнен). Если первый блок занят или выключен, заявка начинает обслуживание на втором блоке. Время обслуживания заявки в блоках распределено по экспоненциальному закону с параметром μ_1 на первом блоке и μ_2 на втором. В рамках данной работы предполагается, что при выключении первого блока, заявки не переходят с одного блока на другой, а остаются ожидать его включения.

Для описанной модели была записана система уравнений Колмогорова в стационарном режиме и с помощью метода моментов получены формулы для средних значений и дисперсий числа заявок на каждом блоке.

Вычисления основных характеристик функционирования системы были реализованы в виде алгоритма в среде MathCad. Чтобы оценить эффективность использования альтернативной энергии при конкретных значениях параметров, был предложен вид функции затрат, учитывающий энергопотребление, время работы первого блока, стоимость городской электроэнергии и затраты на покупку и обслуживание оборудования альтернативной энергетики, выполнено численное сравнение расходов с традиционной системой.

1. S. Varshney, C. Shekhar et al. Optimal management strategies of renewable energy systems with hyperexponential service provisioning: an economic investigation. *Frontiers. Energy Research*. 2023. No. 11. С. 1–22.
2. Митрофанов С.В., Перепелкин К.А. Математическое моделирование гибридной ветро-солнечной станции для электроснабжения собственных нужд. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2022. Т. 22(3). С. 18–26.

*«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-71-00022, <https://rscf.ru/project/24-71-00022/>»

ПЕРВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОГРУЖНОГО СПЕКТРОФЛУОРИМЕТРА PHUSORPVE ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ*

И.Н. Тюрнев¹, Г.Ц. Цыбекмитова², И.А. Асламов¹

¹ЛИН СО РАН, г. Иркутск,

²ИПРЭК СО РАН, г. Чита

tyurnev@lin.irk.ru, gazhit@bk.ru, ilya_aslamov@bk.ru

Исследование фитопланктона имеет фундаментальное значение для понимания экологических процессов в любой акватории, так как фитопланктон находится в основании пищевой сети водоёма, и, соответственно, отражает его продуктивность [1]. При этом фитопланктон чувствительно реагирует на изменения гидродинамических, гидрохимических и гидрооптических условий обитания, формируя как вертикальные, так и горизонтальные неоднородности пространственного распределения. В связи с этим выявление корреляционных связей и закономерностей между гидрофизическими факторами среды и структурой планктонных сообществ является актуальной экологической задачей.

По устоявшейся в ЛИН СО РАН методике пробы на фитопланктон отбирают батометрами с горизонтов 0, 5, 10, 15, 20 и 25 м, с последующим их объединением в одну «интегральную пробу» [2]. Затем пробы фиксируются формалином и после экспедиции в лаборатории под световым микроскопом подсчитывается численность клеток фитопланктона и рассчитывается их биомасса. Такой анализ дает подробную информацию о таксономическом разнообразии и количественном составе сообществ, но является одним из самых трудоемких количественных методов исследования альгоценозов [3]. Альтернативой этой методике может служить оценка биомассы фитопланктона на основе основного пигмента зеленых растений – хлорофилла *a*. Хлорофилл содержится практически во всех цианобактериях и одноклеточных водорослях, поэтому его концентрацию можно с определенными допущениями считать критерием количественной оценки общей биомассы фитопланктона. Для выделения хлорофилла отобранную пробу воды предварительно фильтруют, затем гомогенизируют и экстрагируют пигменты водным ацетоном с последующим центрифугированием из экстракта светорассеивающей взвеси. После этого количество хлорофилла определяется спектрофотометрированием экстракта пигментов до и после его подкисления раствором соляной кислоты [4].

Существенными недостатками вышеописанных методик являются их трудоемкость, времязатратность и грубое разрешение по вертикали, что не позволяет их использовать для экспресс оценок биомассы или подробного исследования вертикального распределения фитопланктона. В настоящее время разработаны и производятся погружные спектрофлуориметры, которые имеют возможность измерять флуоресценцию хлорофилла в режиме реального времени с борта судна. Один из таких приборов был нами протестирован на Байкале в рамках экспедиции на НИС «Г.Ю. Верещагин» в сентябре 2024 г. Для этого были проведены подробные измерения в 100-метровом слое глубин на разрезе «Маритуй-Солзан» в Южной котловине озера. Разрез общей протяженностью 30 км был разбит на 11 станций (рис. 1).

* Работа выполнена в рамках государственного задания ЛИН СО РАН №0279-2021-0004.

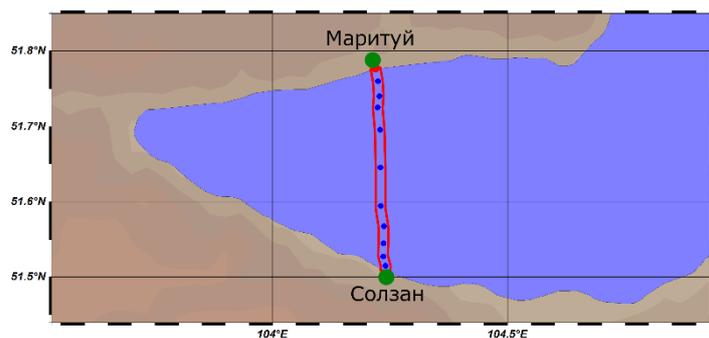


Рис.1. Разрез «Маритуй-Солзан» в Южной котловине оз. Байкал

Для исследования пространственного распределения фитопланктона использовался многоканальный погружной спектрофлуориметр PhycosProbe (bbe Moldaenke GmbH, Германия) с функцией разделения микроводорослей на группы согласно спектрам их флюоресценции. Максимальная глубина погружения прибора составляет 100 м. В работе были использованы заводские калибровки. Общая концентрация хлорофилла *a* и эквивалентные его концентрации для основных представителей каждой группы фитопланктона (цианобактерии, диатомовые, криптофитовые и зеленые водоросли) учитывалась с поправкой на «желтое вещество» и рассчитывалась с помощью программного обеспечения PhycosProbe.

Для определения гидрофизических характеристик на разрезе использовался зонд качества воды Rinko AAQ177 (JFE Advantech, Япония), который измеряет следующие физико-химические параметры воды: температуру, электропроводность, растворенный кислород (мг/л), водородный показатель, окислительно-восстановительный потенциал (мВ), фотосинтетически активную радиацию (PAR, мкмоль м⁻² с⁻¹), мутность (FTU), а также флюоресценцию хлорофилла.

Так как измерение хлорофилла в погружных зондах происходит путем регистрации его флюоресценции, то светлое время суток может оказывать влияние на показания в верхних, облученных слоях воды, вследствие того, что приходящая солнечная радиация насыщает фотореакционные центры микроводорослей, занижая измеряемую флюоресценцию. Поэтому, для учета влияния приходящей солнечной радиации использовалась следующая зависимость [5]:

$$F_{real}(z) = F_{meas}(z) * (2 - e^{-0.0025*PAR(z)}),$$

где $F_{real}(z)$ – скомпенсированная флюоресценция, $F_{meas}(z)$ – измеренная флюоресценция, $PAR(z)$ – величина проходящей фотосинтетически активной радиации на глубине z .

В результате с помощью PhycosProbe были получены данные о пространственном распределении основных групп фитопланктона на разрезе «Маритуй-Солзан» на вторую половину сентября 2024 г. (рис. 2) и проведено их сопоставление с основными гидрофизическими характеристиками, измеренными зондом Rinko AAQ177 (рис. 3).

Полученные данные выявили как горизонтальную, так и вертикальную неоднородность распределения хлорофилла по разрезу со следующими особенностями:

- Большая часть хлорофилла исследованного 100-метрового слоя воды концентрируется от поверхности до нижней границы термоклина (рис. 3г). Последний зарегистрирован на глубинах 15-20 метров в центре озера и у Маритуя, и достигал 35 метров в зоне интенсификации кругобайкальского течения на расстоянии 5-7 км от берегов (рис. 3а).

- Основными представителями фитопланктона выше термоклина являются диатомовые водоросли с наибольшими концентрациями хлорофилла в центре озера и у Маритуя, и с небольшим снижением к Солзану (рис. 2а).

- Вторыми по концентрации хлорофилла идут зеленые водоросли, распространенные в основном ниже границы термоклина с наивысшими концентрациями в областях его заглужения (рис. 2б).

- В гораздо меньших концентрациях представлены криптофитовые (*Cryptophyta*) и цианобактерии (*Cyanobacteria*), сосредоточенные в основном в зоне непосредственно термоклина, как правило ближе к центру озера (рис. 2в,г).

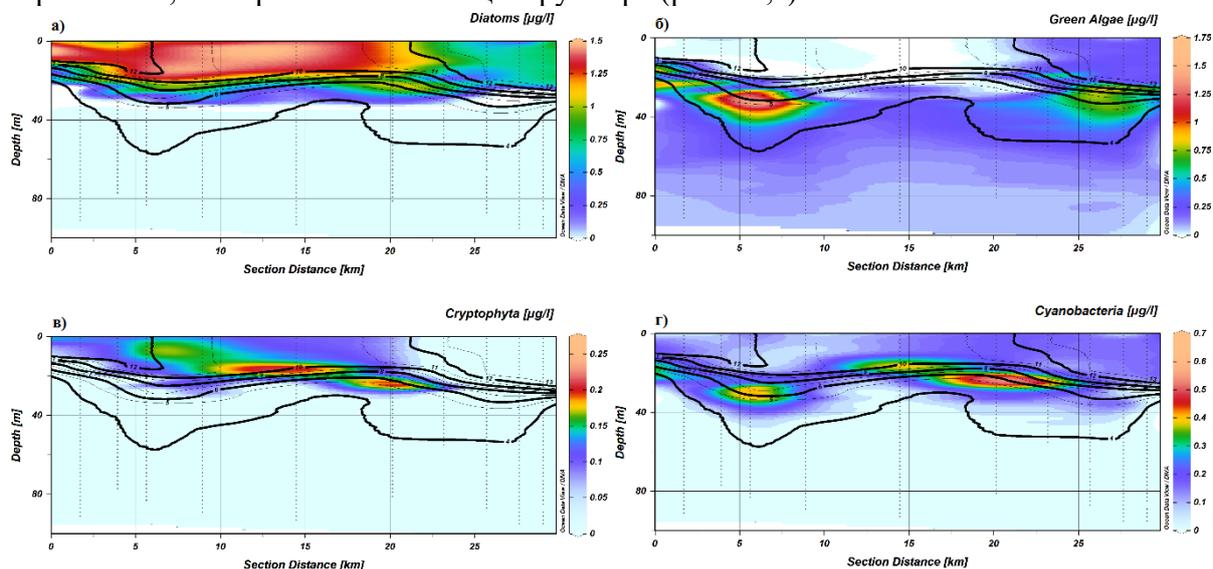


Рис.2. Пространственное распределение концентрации хлорофилла разных групп фитопланктона на разрезе «Маритуй-Солзан» (расстояние в км с севера на юг от станции Маритуй, черными линиями приведены изотермы, вертикальными пунктирными линиями показаны станции)

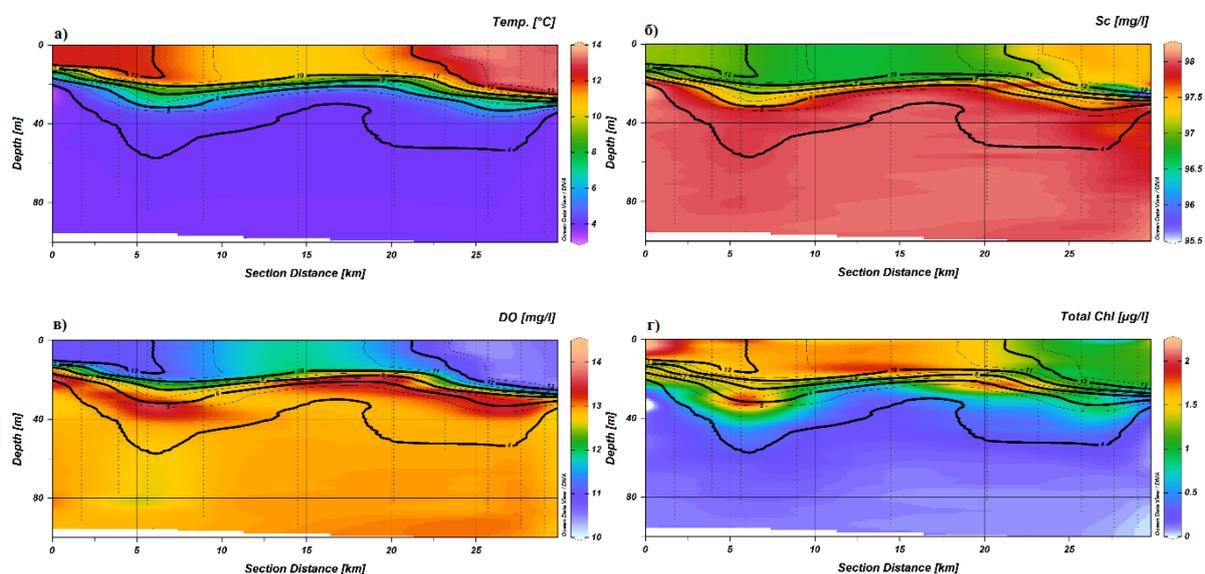


Рис.3. Распределение основных гидрофизических характеристик на разрезе: а - температура, б - минерализация, в - растворенный кислород, г - общий хлорофилл (расстояние в км с севера на юг от станции Маритуй, черными линиями приведены изотермы, вертикальными пунктирными линиями показаны станции)

Имея данные о вертикальном распределении хлорофилла *a* в верхнем 100-метровом слое, можно оценить насколько представителен интегральный пробоотбор,

использующийся в ЛИН СО РАН. Мы рассчитали, какую долю хлорофилла может содержать слой воды 25-100 метров по сравнению с более насыщенным поверхностным слоем 0-25 метров. Было показано, что для сентября это отношение может варьироваться от 30% в центре озера до 95% в зонах заглужения термоклина, что свидетельствует о возможной значительной недооценки биомассы фитопланктона при отборе и анализе интегральных проб лишь в верхних 25 метрах от поверхности. Кроме того, при глубоком залегании термоклина в пробы могут не попасть представители фитопланктона, обитающие на больших глубинах, в условиях недостаточного освещения.

Таким образом, первое использование флуориметра Phycoprobe на озере Байкал показало хорошую перспективу его применения для организации экспресс мониторинга динамики фитопланктона в уникальной экосистеме озера. Внедрение флуориметра позволит проводить анализ пространственного распределения основных групп микроводорослей в режиме реального времени, что даст возможность оперативно отслеживать сложную динамику фитопланктонных сообществ и оценивать экологическое состояние разных районов озера. Одна из ближайших задач состоит в проведении интеркалибровки Phycoprobe в лабораторных (на чистых культурах) и натуральных условиях с ручным подсчетом клеток водорослей на микроскопе. Отдельного внимания заслуживает вопрос о содержании хлорофилла в единице биомассы фитопланктона в зависимости от видового и размерного состава альгоценозов озера Байкал, состояния и возраста популяций, а также температурного, светового и биогенного режимов.

1. Ленько О.А., Тихонова И.В., Белых О.И., Спицына Т.П. Тринадцатое сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу. Томск, 2019, С. 202-203.
2. Firsova, A.; Galachyants, Y.; Bessudova, A.; Titova, L.; Sakirko, M.; Marchenkov, A.; Hilkanova, D.; Nalimova, M.; Buzevich, V.; Mikhailov, I.; et al. Environmental Factors Affecting Distribution and Diversity of Phytoplankton in the Irkutsk Reservoir Ecosystem in June. *Diversity*. 2023, T. 15, №1070, <https://doi.org/10.3390/d15101070>
3. Минеева Н.М., Щур Л.А. Содержание хлорофилла *a* в единице биомассы фитопланктона (обзор) // *Альгология*. 2012, Т.22, №4, С. 423-437.
4. ГОСТ 17.1.4.02–90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a* / ИО АН СССР. М., 1990. 12 с.
5. Moiseeva N.A., Efimova T.V., Churilova T.Ya., Makarov M.M., Gnatovsky R.Yu. Influence of solar radiation on chlorophyll *a* concentration assessment using fluorescence measured by the submersible sensor in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*. 2019, 4, pp. 281-285.

АЛГОРИТМЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

А.И. Тятюшкин

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

В докладе рассматриваются алгоритмы второго порядка для оптимизации управляемых динамических систем с параметрами. В задачах без ограничений для оптимизации управляющих параметров применяется метод сопряженных градиентов [1]. Для достижения более точного численного решения в этих задачах на основе формулы приращения функционала второго порядка [2] строится метод Ньютона. Для получения численного решения краевой задачи с достаточно высокой точностью конструируется алгоритм, состоящий из итераций градиентного метода и итераций метода квазилинеаризации [3].

Многометодная схема в данном случае состоит из итераций двух методов: итераций градиентного метода, которые приводят процесс в окрестность сходимости метода квазилинеаризации, и непосредственно итераций метода квазилинеаризации, которые обеспечивают вычисление оптимального решения с заданной точностью. Заметим, что ни одним из этих методов при его автономном использовании от начала и до конца невозможно было получить решение краевой задачи с удовлетворительным для практики качеством. Метод Ньютона может быть использован дополнительно для «доводки решения» в случае высоких требований к точности результата.

Программное обеспечение, разработанное на основе данного подхода и реализующее многометодную технологию расчета оптимального управления и оптимальных параметров, успешно используется для решения сложных прикладных задач оптимального управления из различных областей науки и техники. Применение эффективной технологии расчета управления особенно актуально в управляемых системах реального времени, например, в системах управления летательными аппаратами, обладающими высокой маневренностью [4, 5].

Эффективность предложенных многометодных алгоритмов показана на решении прикладных задач: об оптимальном развороте самолета [6] и об оптимальном управлении положением асимметричного космического аппарата [7]. Полученные решения совпали с расчетами из указанных работ с высокой точностью.

1. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985.
2. Габасов Р., Кириллова Ф.М. Качественная теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1971.
3. Беллман Р., Калаба Р. Квазилинеаризация и нелинейные краевые задачи. М.: Мир, 1968.
4. Тятюшкин А.И., Федунев Б.Е. Численное исследование свойств оптимального управления в одной задаче преследования. Изв. РАН, ТиСУ. 2005. № 3. С. 104–113.
5. Тятюшкин А.И., Федунев Б.Е. Возможности защиты от атакующей ракеты задней полусферы самолета вертикальным маневром. Изв. РАН, ТиСУ. 2006. № 1. С. 111–125.
6. Евтушенко Ю.Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. М.: Наука, 1982.
7. Junkins J.I., Turner J.D. Optimal continuous torque attitude maneuvers. AIAA / AAS Astrodynamics conference. Palo Alto, Calif., 1978.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№ гос. регистрации: 121041300060-4).

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АССИСТЕНТЫ В ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Я.А. Угорская^{1,2}, А.Г. Балахчи², П.П. Паткина²

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

²Иркутский Государственный Университет
z_942011@mail.ru

Интеллектуальная дополненная реальность — интеграция технологии дополненной реальности (AR) и искусственного интеллекта (AI). Соединение AR и AI делает процесс обмена информацией между виртуальной средой и объективной реальностью более естественным. Ожидается, что улучшенный пользовательский опыт за счёт адаптивного взаимодействия, а также внимания к проектированию, ориентированному на пользователя, станут движущей силой следующей волны инноваций, которые изменят ландшафт иммерсивных технологий и их применение в повседневной жизни [1].

Внедрение искусственного интеллекта в AR-проекты позволит создавать более сложные сценарии, за счет которых возможно улучшение качества AR не только со стороны потребляемого пользователем контента, но и распознавания реальности, позиционирования оверлея.

Новым перспективным направлением в данной отрасли становится разработка коммуникационных AI-агентов, которые могут адаптироваться к широкому спектру требований, начиная от профессиональной сферы и заканчивая индивидуальными предпочтениями пользователя. Современные технологии искусственного интеллекта позволяют таким агентам не только эффективно обрабатывать информацию, но и глубже понимать контекст беседы, уточнения и нюансы естественного языка. Это делает взаимодействие с пользователем более точным, содержательным и удобным.

Одним из ключевых преимуществ адаптивных AI-агентов является их способность анализировать большие массивы данных и преобразовывать их в конкретные и полезные ответы. Это обеспечивает высокую информативность и снижает вероятность ошибок. Кроме того, такие агенты могут распознавать и передавать эмоциональный оттенок речи, что создает эффект «очеловечивания» общения. Важной частью их развития стала интеграция технологий дополненной реальности. Благодаря этим технологиям AI-агенты могут иметь визуальный облик, голос и реалистичную мимику, способную передавать эмоции и сделать взаимодействие более выразительным. Дополнительно они могут использовать жесты и движения, чтобы подчеркнуть ключевые моменты беседы или добавить индивидуальности. Использование адаптивных и реалистичных AI-ассистентов открывает новые горизонты в создании высоко эмпатичных виртуальных помощников. Такие агенты не только эффективно решают задачи пользователей, но и способны вызывать у них доверие, сопереживание и повышать удовлетворенность взаимодействием за счет естественного и качественного отклика на запросы.

Целью работы является исследование возможности создания виртуального ассистента в дополненной реальности на основе коммуникационного AI-агента. Для реализации проекта была выбрана тематика образовательного материала по анатомии. Виртуальный ассистент предоставляет визуализацию систем жизнеобеспечения человеческого организма и информацию об отдельных органах. Пользователь может задавать вопросы ассистенту, которые воспринимаются как промпты, и получать на них развернутые ответы. При этом ассистент выделяет в AR-аватаре человека органы, о которых идет речь, и предлагает как общую информацию, так и краткие данные, отвечающие на уточняющие вопросы.

В процессе работы были определены основные требования как к AI-ассистенту, так и к интерфейсу дополненной реальности. Разработана архитектура проекта, описаны технические характеристики, а также выбраны инструменты для реализации.

Для создания виртуального ассистента использовались следующие технологии:

- Botpress — платформа для создания и развертывания приложений на основе разговорного искусственного интеллекта, таких как чат-боты и виртуальные ассистенты.

- AR.js — это легковесная библиотека на JavaScript, предназначенная для интеграции дополненной реальности в веб-приложения.

- A-Frame — это фреймворк для создания виртуальной реальности и дополненной реальности на основе HTML, который позволяет создавать 3D-сцены и взаимодействия в веб-приложениях. Он построен на основе WebGL и Three.js, что обеспечивает высокую производительность и кросс-браузерную совместимость.

- Blender — инструмент для 3D-моделирования, который использовался для создания высококачественных моделей органов и систем человеческого тела. Эти модели интегрировались в AR-аватар, что позволило достичь реалистичной визуализации и высокой степени детализации. Blender сыграл ключевую роль в создании визуального контента, необходимого для взаимодействия в дополненной реальности. Разработанные в нем модели обеспечили точное отображение органов и систем, что делает образовательный процесс более наглядным и понятным.

На этапе создания прототипа и проверки его работоспособности список систем жизнеобеспечения человека был ограничен до пяти органов: легкие, сердце, мозг, печень, желудок, кишечник.

В результате реализации проекта были рассмотрены: возможности ограничения базы знаний AI-ассистента, для избежания выдачи ложной информации и отвлечения от тематики разговора; методы размещения AI-ассистента в дополненной реальности; разработан UI-интерфейс для взаимодействия пользователя с ботом несколькими способами: голосовым или текстовым; реализована выдача различного типа ответа от бота: голосовое сообщение, изображение, 3д-модель и текст.

Возможности придания AR-аватару человечности в условиях выбранного технологического стека и прямой зависимости от скорости интернета и отклика сервера на запросы веб-приложения были реализованы лишь частично, а именно: условная реализация липсинга (синхронизация речи с мимикой рта): воспроизведение анимации рта, которая не всегда соответствует голосовому ответу бота; в качестве передачи характера для аватара был создан набор предзаданных движений и поз сменяющих друг друга в определенном порядке по истечению промежутка времени и получению запросов от пользователя.

Внедрение ИИ в дополненную реальность улучшает взаимодействие с реальным миром, добавляя интеллектуальные функции, которые позволяют системам дополненной реальности лучше понимать окружающую среду и реагировать на неё [2]. Эта возможность позволяет создавать более интуитивно понятные и адаптивные пользовательские интерфейсы, поскольку ИИ может анализировать поведение и предпочтения пользователей в режиме реального времени, что приводит к более персонализированному взаимодействию

1. Tiple, B. ., Bulchandani, C. ., Paliwal, I. ., et al. AI based Augmented Reality Assistant. *Intell Syst Appl Eng* Vol. 12 No. 13s, 2024. P. 505-516
2. Zahraa Bassyouni, Imad H. Elhajj Imad. Augmented Reality Meets Artificial Intelligence in Robotics: A Systematic Review. *SYSTEMATIC REVIEW* article *Front. Robot. AI*, Vol. 8 No. 22 , 2021 *Sec. Human-Robot Interaction*

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СЛОЖНОСТИ ПУЗЫРЬКОВОГО АЛГОРИТМА СОРТИРОВКИ

З. Узаков

Каршинский филиал Ташкентского университета информационных технологий
имени Мухаммада аль-Хоразмий
zair90uzakov@gmail.com

В статье рассматривается вопрос об оценке сложности алгоритма пузырькового метода упорядочения элементов одномерного массива по возрастанию. В этом алгоритме процесс упорядочения элементов выполняется путём последовательного сравнения двух соседних элементов массива, начиная с первого элемента, слева направо, или снизу-вверх (пузырьковый метод), и обмена мест расположения этих элементов, если они расположены не по возрастанию [1-6]. Выведена формула, выражающая зависимость количества действий, которые необходимо выполнить на компьютере для упорядочения элементов одномерного массива, от количества элементов массива. Выведенная формула подтверждает квадратичную зависимость в алгоритме пузырькового метода количества действий от количества элементов массива.

Рассмотрим вопрос о степени сложности алгоритма метода пузырька упорядочения элементов одномерного массива по возрастанию применительно к массиву

$$\text{int } A[n] = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, \dots, a_{n-1}, a_n\}, \quad (1)$$

в котором $a_1 > a_2 > a_3 > \dots > a_i > \dots > a_{n-1} > a_n$, то есть исходное расположение элементов массива, является наихудшим относительно поставленной задачи упорядочения элементов массива по возрастанию. Степень сложности алгоритма решения поставленной задачи принято оценивать на основе наихудшего варианта входных данных задачи, так как определённые ресурсы, необходимые для выполнения алгоритма при этом варианте данных, будут достаточны для выполнения алгоритма в любом другом варианте данных [1-6]. Первый проход по элементам массива (1) с целью их упорядочения по возрастанию начинается с операции сравнения элементов $A[0]$ и $A[1]$. Так как они расположены не по возрастанию, над ними будут выполнены три операции присваивания: $AV=A[0]$; $A[0]=A[1]$; $A[1]=AV$ для обмена мест их расположения, где AV – вспомогательная переменная. Всего будут выполнены 4 операции, 1 операция сравнения и 3 операции присваивания. Далее первый проход по элементам массива продолжается с операции сравнения нового элемента $A[1]$ и прежнего элемента $A[2]$. Эти элементы тоже расположены не по возрастанию, над ними будут выполнены три операции присваивания $AV=A[1]$; $A[1]=A[2]$; $A[2]=AV$ для обмена мест их расположения. И так далее. Первый проход по элементам массива продолжается с операции сравнения нового элемента $A[2]$ и прежнего элемента $A[3]$. При первом проходе по элементам массива будет выполнено всего $ОКО=4*(n-1)$ ($ОКО=4*(n-1)+0$) операций ($ОКО$ – общее количество операций). После первого прохода массив (1) принимает вид

$$\text{int } A[n]=\{a_2, a_3, a_4, \dots, a_i, \dots, a_{n-1}, a_n, a_1\}; \quad (2).$$

Второй проход по элементам массива, проход по элементам массива (2), начинается с операции сравнения элементов $A[0]=\{a_2\}$ и $A[1]=\{a_3\}$. Так как они расположены не по возрастанию, над ними будут выполнены три операции присваивания: $AV=A[0]$; $A[0]=A[1]$; $A[1]=AV$ для обмена мест их расположения. Далее второй проход по элементам массива продолжается с операции сравнения нового элемента $A[1]$ и прежнего элемента $A[2]$. И так далее. Всего при втором проходе по элементам массива будут выполнены $ОКО=4*(n-2)+1$ операций, где второе слагаемое 1 означает одну операцию сравнения предпоследнего $A[n-2]=\{a_n\}$ и последнего элементов $A[n-1]=\{a_1\}$ массива (2) в конце второго прохода. Эти элементы

расположены по возрастанию в результате первого прохода, над ними не выполняются операции присваивания для обмена мест их расположения. После второго прохода массив (2) принимает вид

$$\text{int } A[n]=\{a_3, a_4, \dots, a_i, \dots, a_{n-1}, a_n, a_2, a_1\}. \quad (3)$$

При третьем проходе, проходе над элементами массива (3), будут выполнены $\text{ОКО}=4*(n-3)+2$ операций, где второе слагаемое 2 выражает количество операций сравнения элементов $A[n-3]=\{a_n\}$ и $A[n-2]=\{a_2\}$, $A[n-2]=\{a_2\}$ и $A[n-1]=\{a_1\}$ массива (3) в конце третьего прохода.

Массив принимает вид

$$\text{int } A[n]=\{a_4, \dots, a_i, \dots, a_{n-1}, a_n, a_3, a_2, a_1\}. \quad (4)$$

И так далее. При $(n-1)$ -проходе будет выполнено $\text{ОКО}=4*[n-(n-1)]+(n-2)$ операций и массив принимает вид

$$\text{int } A[n]=\{a_n, a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_i, \dots, a_5, a_4, a_3, a_2, a_1\}. \quad (5)$$

При n -проходе, проходе над элементами массива (5), будут выполнены только $\text{ОКО}=(n-1)$ операций сравнения над $(n-1)$ парой соседних элементов. Этот проход будет заключительным, так как к этому проходу элементы массива будут упорядочены, и этот n -проход подтверждает упорядоченность элементов массива (5), то есть в результате описанных выше n проходов элементы массива (1) расположились в упорядоченном по возрастанию порядке.

Общее количество действий $N(n)$, выполняемых над элементами массива (1) при их упорядочении по возрастанию пузырьковым алгоритмом, как сумма действий при n проходах над элементами массива, равно $N(n)=[4*(n-1)+0]$ (первый проход) + $[4*(n-2)+1]$ (второй проход) + $[4*(n-3)+2]$ (третий проход) + ... + $\{4*[n-(n-1)]+(n-2)\}$ [($n-1$)-проход] + $(n-1)$ (n -проход) =

$$= \{4*(n-1) + 4*(n-2) + 4*(n-3) + \dots + 4*1\} + \{1+2+\dots+(n-2)+ (n-1)\} = 4*\{(n-1) + (n-2) + (n-3) + \dots + 1\} + \{1+2+\dots+(n-2)+ (n-1)\} =$$

$$= 5*\{1+2+\dots+(n-2)+ (n-1)\} = [\text{Воспользуемся формулой вычисления суммы первых } (n-1) \text{ натуральных чисел}] = 5*(n-1)*n/2 = 5/2 * (n^2 - n). \text{ Таким образом,}$$

$$N(n) = 5*(n-1)*n/2 = 5/2 * (n^2 - n). \quad (6)$$

Это формула для определения общего количества действий $N(n)$, выполняемых над элементами массива (1) при их упорядочении по возрастанию пузырьковым алгоритмом, n – количество элементов массива.

Заметим, что при любом натуральном $n>1$ произведение $n*(n-1)$ в формуле (6) даёт четное число, так как один из множителей произведения есть чётное число. Следовательно, $N(n) = 5/2 * n*(n-1)$ всегда является соответствующим натуральным числом, определяющим общее количество операций, которые необходимо выполнить для упорядочения элементов одномерного массива, содержащего n элементов, при использовании алгоритма метода пузырька. Нетрудно показать, что практически для упорядочения элементов, например, массива $D[3]=\{19,8,5\}$; $n=3$, по возрастанию необходимо выполнить всего 15 операций. 8 операций при 1-проходе (после него $D[3]=\{8,5,19\}$); 5 операций при 2-проходе (после него $D[3]=\{5,8,19\}$); 2 операции сравнения при 3-проходе. При $n=3$ из формулы (6) получается такой же результат $N(3)=15$.

Формула (6), которую с точки зрения оценки асимптотической сложности алгоритма можно представить в виде $N(n)=n^2 - n$, показывает, что асимптотическая сложность алгоритма пузырькового метода имеет вид $O(n^2)$. Это оценка говорит о том, что при возрастании количества элементов одномерного массива в m раз количество операций, необходимых для упорядочения элементов, возрастает в около m^2 раз.

1. Балаева М.О., Кальгин Ю.А., Погорелов Д.А. Исследование сложности и сравнение скорости алгоритмов сортировки методами пузырька, простого выбора, простых вставок. Журнал Научные междисциплинарные исследования. 2021. №1. С. 8-12.
2. Левитин, Ананий В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 576 с.: ил. Парал. тит. англ. ISBN 5-8459-0987-2 (рус). (Москва. Санкт-Петербург. Киев.).
3. Лойко В.И. Структура и алгоритмы обработки данных: учебное пособие для вузов. Краснодар: Куб. ГАУ, 2004. 261 с.
4. Назаренко П.А. Алгоритмы и структуры данных: учебное пособие. Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 2015. 196 с.
5. Томас Кормен, Чарльз Лейзерсон, Рональд Ривест, Клиффорд Штайн. Алгоритмы: построение и анализ, 3-е изд.: Пер. с англ. - М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2013. 1328 с. Парал. тит. англ. ISBN 978-5-8459-1794-2 (рус).
6. <https://uchet-jkh.ru/i/kak-otsortirovat-massiv-po-vozhrastaniyu-s/>

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО АССИСТЕНТА ДЛЯ ЗАДАЧ МОНГОЛЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Баяр-Эрдэнэ Улзийхутаг
Иркутский государственный институт путей сообщения.
happymaliw@gmail.com

Цифровой ассистент (ЦА) – система автоматизации взаимодействия с пользователем (клиентом или сотрудником компании), реализованная на основе методов и технологий искусственного интеллекта (ИИ). Часто ЦА разрабатываются для работы в диалоговом формате. Например, чат-боты, навыки для голосовых помощников. Такие ЦА осуществляют текстовые и голосовые консультации, обработку заявок и поддержку по направлениям деятельности компании. Пользователь отправляет запрос в чате в свободной текстовой или голосовой форме, а система предоставляет быстрый подходящий ответ. Современные технологии ИИ и ЦА находят все более широкое применение в различных сферах человеческой деятельности [1, 2], включая транспортную отрасль [3, 4]. Одним из ключевых направлений их использования является железнодорожный транспорт, где высокие требования к безопасности и эффективности делают внедрение таких технологий особенно актуальным.

Работа машиниста железнодорожного транспорта связана с высокой ответственностью, требующей постоянного внимания и быстрого принятия решений в различных ситуациях. Усталость, человеческий фактор и сложные внешние условия могут оказывать негативное влияние на выполнение обязанностей, что делает использование цифровых помощников важным шагом для минимизации рисков. Цифровые ассистенты для машинистов позволяют автоматизировать часть рутинных задач, предоставлять рекомендации в реальном времени, предупреждать о потенциальных неисправностях и поддерживать высокий уровень безопасности движения. Такие системы используют технологии обработки больших данных, машинного обучения и интеграции с современными системами управления подвижным составом.

Целью данной работы является изучение технологий цифровых ассистентов, их функциональных возможностей, перспектив внедрения и влияния на работу машинистов железнодорожного транспорта. В рамках работы также проанализированы основные вызовы, связанные с адаптацией этих технологий, и их потенциал для повышения эффективности и безопасности железнодорожной отрасли Монголии.

В работе разработаны требования и выполнено проектирование цифрового ассистента для автоматизации проверки локомотивов. Внедрение ЦА для решения данной задачи может значительно повысить эффективность, безопасность и точность проверок. Такой ассистент должен использовать современные технологии, такие как интернет вещей (IoT), машинное обучение (ML), обработку изображений и голосовые интерфейсы для выполнения задач проверки локомотивов с минимальным вмешательством человека.

На первом этапе проектирования ЦА для автоматизации проверки локомотивов были определены следующие функции, которые должен выполнять ЦА:

- Проверка технического состояния локомотива.
- Контроль за исправностью ключевых систем (тормоза, двигатель, электрическое оборудование).
- Сбор данных о состоянии локомотива в режиме реального времени.
- Выявление аномалий и отправка отчетов.

Для того чтобы ассистент мог эффективно выполнять свою работу, необходимо интегрировать системы сбора данных с локомотива. Эти системы должны включать:

- Датчики состояния: температуры, давления, вибрации, состояния тормозной системы и других ключевых компонентов.
- Камеры и сенсоры: для визуальной проверки внешнего состояния локомотива, выявления повреждений на корпусе, колесах и других частях.
- Диагностические системы: сбора информации о состоянии двигателей и других систем через CAN-шины или другие интерфейсы.

Использование машинного обучения позволит ассистенту не только собирать данные, но и анализировать их. Необходимо предусмотреть анализ аномальных события – система должна учиться на исторических данных, чтобы выявлять потенциальные поломки или износы компонентов. ЦА должен предсказывать поломки – анализировать тенденции и предсказывать, когда и какие компоненты нуждаются в обслуживании или замене, в том числе на основе регламентов ТО. Система должна выдавать рекомендации по техническому обслуживанию – на основе анализа данных ассистент может предложить машинисту или техническому персоналу необходимые шаги.

Для проверки состояния локомотива с использованием камер и датчиков должны быть использованы системы обработки изображений. Данные системы позволят решать следующие задачи:

- Распознавание повреждений. Алгоритмы компьютерного зрения могут обнаружить трещины, коррозию или другие механические повреждения на корпусе локомотива.
- Оценка износа колес. Камеры и датчики могут оценить степень износа колесных пар, что помогает предотвратить аварии или повреждения.
- Оптический контроль состояния рельсов и контактной сети. Система может анализировать состояние путей и контактной сети для предотвращения аварий.

Для улучшения взаимодействия с машинистами и обслуживающим персоналом в ЦА должен быть интегрирован голосовой интерфейс, который должен выполнять:

- Речевые команды. Машинист может давать команды ассистенту голосом, например, «Проверь тормоза» или «Оцени состояние двигателя».
- Голосовые уведомления: ассистент должен сообщать о найденных неисправностях или важных моментах, таких как необходимость в техническом обслуживании.

По завершении проверки цифровой ассистент должен создавать отчеты:

- Отчет о состоянии локомотива – документ, включающий информацию о текущем техническом состоянии, предупреждения о потенциальных неисправностях и рекомендации по техническому обслуживанию.
- Аналитика и тренды – анализ состояния локомотива за определенный период, чтобы увидеть, какие системы требуют повышенного внимания.
- Уведомления для службы поддержки: в случае серьезных неисправностей ассистент может уведомлять технический персонал о необходимости вмешательства.

Интерфейс системы для операторов и технического персонала должен включать:

- Экран локомотива, на котором отображаются данные о текущем состоянии всех систем.
- Мобильное приложение или планшет для персонала, обеспечивающие удаленный мониторинг и формирование отчетов.
- Интерактивные уведомления о состоянии локомотива, с возможностью быстрого реагирования.

Технические компоненты системы.

1. Аппаратное обеспечение:
 - 1.1. Датчики температуры, давления, вибрации, камеры высокого разрешения.
 - 1.2. Модемы и другие устройства для передачи данных в центральную систему.
 - 1.3. Платформа для сбора и обработки данных в реальном времени.
2. Программное обеспечение:
 - 2.1. Система машинного обучения и аналитики: для анализа данных и предсказания неисправностей.
 - 2.2. Алгоритмы обработки изображений: для распознавания и анализа визуальных данных с камер.
 - 2.3. Голосовой ассистент: интеграция с голосовыми системами для взаимодействия с машинистом.
 - 2.4. Программные интерфейсы для взаимодействия с различными системами локомотива (CAN-шины, системы диагностики).
 - 2.5. Хранение и анализ данных в облаке, что позволяет обеспечивать доступ к отчетам и рекомендациям в любой точке.

Выводы. Цифровой ассистент для автоматизации проверки локомотивов может значительно повысить безопасность и эффективность работы железнодорожного транспорта, сокращая время на проверку состояния локомотивов, улучшая качество обслуживания и предотвращая поломки. В работе предложены основные требования к ЦА проверки локомотивов перед выходом из депо. Внедрение таких систем – это шаг в сторону цифровизации и модернизации железнодорожной отрасли, который приведет к значительному улучшению обслуживания подвижного состава.

1. Романов С.Ф. Анализ необходимых функций программы - цифрового ассистента для арктических морских буровых платформ // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № S2. С. 66-69.
2. Романов С.Ф. Анализ инструментов программы - цифрового ассистента для морских буровых платформ, способной повысить производственную эффективность // В сборнике: Наука и образование - 2020. материалы всероссийской научно-практической конференции. Мурманск, 2021. С. 39-42.
3. Киселев Г.Г. Эффективность применения мобильного цифрового терминала с голосовым ассистентом в эксплуатационном вагонном депо // Наука и образование транспорту. 2023. № 1. С. 48-50.
4. Шешель А.В., Шмаль В.Н. Разработка цифрового интеллектуального ассистента определения порядка расформирования составов с сортировочной горки // В сборнике: Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы. материалы III Международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 97-101.

ПОДСИСТЕМА ВЫПОЛНЕНИЯ WPS СЕРВИСОВ*

Р.К. Фёдоров

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

Композиция сервисов [1] часто представлена сложным графом заданий. Задания могут быть зависимы по данным друг от друга и выполняться различное время на разных вычислительных узлах. Последовательное выполнение заданий композиций сервисов может привести к неэффективному использованию вычислительных ресурсов. Поэтому Сервис-ориентированная информационно-аналитическая среда композиции сервисов обработки пространственных данных должна обеспечить надежное и эффективное распределение вычислительных ресурсов при выполнении сервисов.

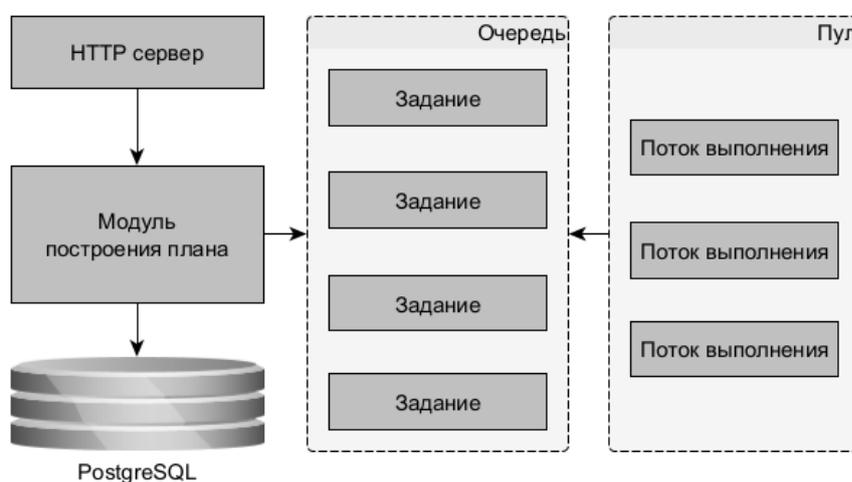


Рис. 1. Схема метода создания композиций сервисов

В рамках среды разработана подсистема выполнения WPS сервисов, которая производит планирование, непосредственный вызов и получение результатов выполнения сервисов. Структура подсистемы представлена на рис. 1. Взаимодействие с каталогами сервисов и JavaScript интерпретаторами производится с помощью модуля «HTTP сервер», который реализует REST интерфейс. Добавление через REST композиции сервисов в виде DAG приводит к добавлению заданий в очередь, общую для разных пользователей. При этом производится запрос к базе данных для получения характеристик вычислительных узлов, на которых данный сервис может выполняться, и времени работы задания.

Для нахождения плана, приближенного к оптимальному по времени выполнения, используется модификация спискового эвристического алгоритма составления расписания HEFT (Heterogeneous Earliest Finish Time) [3], реализующего метод поиска в глубину. Особенности алгоритма, служащими для ускорения нахождения приемлемого плана, являются сортировка вершин DAG, вычислительных узлов и отсеечение неперспективных ветвей графа поиска решения, использование информации

* Результаты получены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту "Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объемов разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искусственного интеллекта, модельно-управляемого подхода и машинного обучения" (номер гос. регистрации 121030500071-2).

о текущем состоянии вычислительной среды для более быстрого и точного нахождения плана.

При выполнении очереди учитывается изменение состояния вычислительной среды и добавление новых заданий. Перестроение плана производится при следующих событиях:

- включение или отключение вычислительного узла, поддерживающего выполнение хотя бы одного сервиса из DAG;
- добавление нового задания в DAG;
- отличие фактического времени выполнения одного из заданий DAG от ожидаемого;
- завершение выполнения задания с ошибкой.

Готовые к выполнению задания отмечаются. Выполнение отдельного задания может производиться достаточно длительное время из-за необходимости ожидания ответа сервера, реализующего сервис. Выполнение сервисов и получение результатов реализовано пулом (множеством) отдельных потоков выполнения. Поток выполнения запускает задания, проверяет их состояние, отправляя запрос на получение файла статуса выполнения. Потоки выполнения при завершении работы композиции сервисов отправляет результат вызывающей системе через REST интерфейс.

1. Edmond D., ter Hofstede A. Service composition for electronic commerce. Proceedings of the Pacific Asia Conference on Information Systems(PACIS-2000), Hong Kong, China, June 1-3, 2000, pages 20.
2. Kwok Y.-K., Ahmad I. Static scheduling algorithms for allocating directed task graphs to multiprocessors. ACM Computing Surveys. 1999. Vol. 31, № 4. P. 406-471.
3. Topcuoglu H., Hariri S., Wu M. Performance-effective and low-complexity task scheduling for heterogeneous computing. Parallel distributed systems. 2002. Vol. 13, № 3. P. 260-274.

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ С РАЗРЫВНОЙ ПРАВОЙ ЧАСТЬЮ: ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ*

И.А. Финогенко

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

Теория обыкновенных дифференциальных уравнений с разрывной правой частью в настоящее время хорошо разработана. Она находит применение в теории автоматического регулирования (например, для систем с релейными характеристиками), а также для систем, в которых разрывные нелинейности обусловлены физическими законами (например, для систем с сухим трением). В то же время во всех этих системах могут возникать возмущения, связанные с запаздыванием. Функциональная природа систем с запаздыванием хорошо известна и изучена для задач теории устойчивости с использованием функционалов Ляпунова-Красовского. В отличие от прямого метода Ляпунова для уравнений без запаздывания здесь возникают проблемы (по крайней мере формально) с вычислением производных функционалов Ляпунова-Красовского вдоль решений, т. к. для этого нужно знать сами решения. При описании скользящих режимов функционально-дифференциальных уравнений с разрывными правыми частями возникает такая же проблема.

В докладе предлагается подход, основанный на использовании специального класса инвариантно дифференцируемых функционалов и теории i -гладкого анализа из работы [1] для описания многообразий точек разрыва правых частей и уравнений скользящих режимов функционально-дифференциальных уравнений вида

$$\dot{x} = f(t, x_t(\cdot)), x_{t_0} = \varphi_0(\cdot),$$

где $f : R^1 \times C_\tau \rightarrow R^n$ — разрывная функция, R^n — n -мерное векторное пространство с нормой $\|\cdot\|$, C_τ — пространство всех непрерывных функций $\varphi(\cdot)$, определенных на отрезке $[-\tau, 0]$ со значениями в R_n с обычной \sup -нормой, $x_t(\cdot) \in C_\tau$.

Получены ответы на следующие вопросы.

1. Для систем без запаздывания наибольшим классом множеств точек разрыва являются множества с нулевой мерой Лебега в конечномерных пространствах. Какими свойствами в общем случае должно обладать множество M точек разрыва правой части уравнения (1) для того, чтобы для него стали возможными простейшее выпуклое доопределение и другие подходы, связанные с использованием предельных значений правых частей уравнений и теории функционально-дифференциальных включений?

2. Для того чтобы записать уравнение скользящего режима для конечномерного ОДУ без запаздывания, достаточно воспользоваться понятием градиента так, как это происходит в прямом методе Ляпунова при вычислении производных в силу исследуемой системы. Для каких множеств M и какими будут содержательные условия существования скользящих режимов для уравнения (1) с кусочно непрерывной правой частью? Как конструктивно записать уравнение такого скользящего режима?

3. Каким может быть аналог метода эквивалентных управлений для системы

$$\dot{x} = f(t, x_t(\cdot), u_1, \dots, u_k)$$

* Исследование выполнено в рамках госзадания Минобрнауки России (проект № 1210401300060-4).

и как получить уравнения для определения эквивалентных управлений для уравнения (2) с функциональным фазовым пространством C_T ?

В итоге по сути представлен способ перенесения теории ОДУ с разрывной правой частью на аналогичную и конструктивную теорию ФДУ. Такая методология ранее применялась к другим задачам. Так в [2] на неавтономные разрывные ФДУ был распространен метод предельных ОДУ.

Другие возможные области применения инвариантно дифференцируемых функционалов обсуждались в докладе [3].

1. Kim A.V. *i-Smooth Analysis*. A Wiley – Interscience Publication. Chichester. New York – Brisban, 2014. 279 p.
2. Finogenko I.A. Method of Limiting Differential Inclusions for Nonautonomous Discontinuous Systems with Delay. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. 2019. Vol. 305, No. 1. P. S65–S74.
3. Финогенко И.А. О скользящих режимах функционально-дифференциальных уравнений. *Материалы Междунар. конференции Динамические системы: устойчивость, управление, дифференциальные игры*. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, ООО Издательство УМЦ УПИ. 2024. С. 355–359.

ДВУХУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ УЧАСТНИКОВ НА РЫНКЕ УГЛЯ*

О.В. Хамисов¹, С. Батбилэг²

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

²Монгольский государственный университет
globopt@mail.ru, batbileg@seas.num.edu.mn

Моделируется поведение следующей двухуровневой системы. На первом уровне находится лидер, цель которого состоит в закрытии заданного спроса $Q > 0$, на уголь. Лидер может сам добывать уголь y в пределах своих производственных мощностей: $0 \leq y \leq \bar{y}$. Его издержки при этом определяются квадратичной функцией $c_L(y) = \alpha_L y^2 + \beta_L y + \gamma_L$, $\alpha_L > 0, \beta_L > 0, \gamma_L > 0$. Кроме того, лидер может дополнительно закупать продукцию у n участников второго уровня. Участники второго уровня могут поставлять лидеру уголь в объёмах x_i также с учётом ограничений на добычу $0 \leq x_i \leq \bar{x}_i$ и своих функций издержек $c_i(x_i) = \alpha_i x_i^2 + \beta_i x_i + \gamma_i, i = 1, \dots, n$. Анализируются две модели взаимодействия лидера с участниками второго уровня.

В первой модели лидер назначает закупочные цены p_i каждому участнику i второго уровня. Участник i определяет объём угля, поставляемого лидеру, исходя из максимума прибыли:

$$\begin{aligned} p_i x_i - c_i(x_i) &\rightarrow \max_{x_i}, \\ 0 \leq x_i &\leq \bar{x}_i. \end{aligned}$$

Поведение лидера в этом случае определяется из решения следующей задачи:

$$\begin{aligned} c_L(y) + \sum_{i=1}^n p_i x_i &\rightarrow \min_{(y, p_i)}, \\ y + \sum_{i=1}^n x_i &= Q, \\ 0 \leq y &\leq \bar{y}. \end{aligned}$$

Во второй модели лидер определяет единую закупочную цену в соответствии с линейной обратной функцией спроса. Поведение участников второго уровня в этом случае может быть представлено как следующий вариант модели Курно

$$\begin{aligned} p x_i - c_i(x_i) &\rightarrow \max_{(x_i, p)} \\ 0 \leq x_i &\leq \bar{x}_i, \\ p &= b - a \sum_{i=1}^n x_i. \end{aligned}$$

Лидер в данном случае решает следующую задачу

$$c_L(y) + p \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \min_{(y, p, a, b)},$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-41-03004.

$$y + \sum_{i=1}^n x_i = Q,$$

$$0 \leq y \leq \bar{y}.$$

Если в первой модели лидер определяет закупочные цены и, получая в соответствии с этими ценами поставки угля от участников второго уровня, минимизирует суммарные издержки на закрытие спроса, то во второй модели лидер определяет структуру спроса, т.е. параметры a и b , единая цена p определяется участниками второго уровня, лидер же по-прежнему минимизирует суммарные издержки.

Результатом исследований является сравнительный анализ обеих моделей, основанный на методологии решения задач двухуровневого программирования [1], представлены результаты вычислительных экспериментов, в которых в качестве лидера выступает Китай, а в качестве участников второго уровня – Монголия, Россия и ряд стран Азиатско-Тихоокеанского региона.

1. Dempe S. Foundations of Bilevel Programming. Nonconvex Optimization and Its Applications, Springer New York, NY, 2002.

ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИБРЕЖНОГО РЕЛЬЕФА ПО КОНТУРАМ БЕРЕГОВЫХ ЛИНИЙ СО СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ SENTINIEL-2

А.Е. Хмельнов

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

Для решения задач гидрологического моделирования водных объектов, оценки последствий наводнений и т. п. требуется получить совмещённую модель рельефа, объединяющую информацию о наземном и подводном рельефе. При этом сложнее всего найти качественную информацию о подводном рельефе, поэтому представляют интерес любые способы хотя бы частичного получения такой информации. В данной работе рассматривается подход, основанный на выделении контуров береговых линий на спутниковых снимках Sentinel 2, сделанных при разных уровнях воды, и комбинировании этой информации для получения модели прибрежного рельефа для всего диапазона наблюдаемых уровней. Заметим, что для многих практических задач именно этот диапазон высот представляет наибольший интерес.

Спутниковые данные являются ценным источником информации о состоянии территорий, непревзойдённым по уровню охвата. Из них снимки среднего разрешения (от 5 до 15 м/пиксель) и, в частности, снимки спутников Sentinel 2 являются наиболее востребованными, поскольку они имеют глобальный охват, съёмка выполняется регулярно (период повторения съёмки – несколько дней), накоплены многолетние архивы наблюдений и, что очень немаловажно, эти данные распространяются бесплатно. Всё это позволяет регулярно наблюдать положение береговых линий крупных водоёмов.

На первый взгляд может показаться, что при небольших колебаниях уровня воды в пределах единиц метров, точности снимков 10 м/пиксель не хватит для получения практически полезных результатов. На самом деле, выделение изолиний на растровых изображениях для нормализованного разностного водного индекса ($NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$) позволяет оценить положение береговой линии с субпиксельной точностью. После обнаружения этого факта сразу появилась идея, что из контуров береговых линий, как из изолиний рельефа, можно собрать ЦМР, но её долго не получалось реализовать, поскольку требовалось разработать технологии, позволяющие компенсировать ошибки определения контуров береговых линий.

В этом году удалось довести до рабочего состояния два недостающих алгоритма: алгоритм взаимной регистрации изображений с субпиксельной точностью и алгоритм построения триангуляции с ограничениями по контурам, которые могут содержать ошибки. В результате, в качестве демонстрации работоспособности предложенного метода, получилось построить модель прибрежного рельефа по снимкам Sentinel 2 с 2016 по 2024 г. для фрагментов Братского водохранилища, попадающих на территорию трапеции 48UUE.

После выделения с субпиксельной точностью первых контуров береговых линий и сопоставления таких контуров, полученных по разным спутниковым изображениям одной территории, стало заметно, что контура для разных изображений обычно смещены относительно друг друга, причём, эта погрешность является систематической, т. е. не зависит от координат точки. Для нахождения этого смещения по паре изображений разработан и реализован алгоритм взаимной регистрации растровых изображений с субпиксельной точностью, основанный на следующих принципах:

- используется билинейная интерполяция для сопоставления функции изображению;

- для 4-х возможных направлений вектора сдвига δ (4-х квадрантов с учётом знаков по δ_x и δ_y) в символьном виде могут быть найдены выражения для функции ошибок $E(\delta)$ - интеграла квадрата разности кусочно-билинейных функций;
- по этим выражениям в символьном виде вычисляются градиенты $\nabla E(\delta)$;
- метод градиентного спуска используется для поиска минимума $E(\delta)$;
- поиск прекращается при достижении $|\nabla E(\delta)| < \varepsilon$ или максимального числа шагов.

При пакетной обработке спутниковых изображений одной трапеции (тайла), сделанных в разное время, необходимо выбрать среди них базовое изображение – качественный снимок без облаков и других помех, найти вектора смещений для всех остальных снимков относительно базового изображения, и сдвинуть на этот вектор соответствующие контура береговых линий.

Кроме того, необходима информация об уровне воды на момент создания каждого изображения, которая добавляется к атрибутам объектов, описывающих выделенные контура береговых линий, в виде вычисляемого поля.

Даже после сдвига, компенсирующего ошибку привязки изображений Sentinel 2, контура для разных уровней могут пересекаться из-за погрешности измерений и влияния таких природных явлений, как волнение, облачность, и т. д. Поэтому возникла задача построения модели рельефа по контурам береговых линий, которые могли быть получены с ошибками. Алгоритм для решения этой задачи должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) при отсутствии ошибок результат должен совпадать с триангуляцией, построенной по контурам, как по изолиниям рельефа;
- 2) накопление информации (добавление новых контуров) должно постепенно повышать точность получаемой модели.

Такой алгоритм удалось разработать и реализовать в составе ПО для работы с триангуляциями, он основан на следующих принципах:

- используются площадные контура, представляющие зоны затопления при соответствующих уровнях воды;
- сначала по ним строится вспомогательная триангуляция Делоне с ограничениями, в которой линии контуров выступают в качестве жёстких рёбер;
- после включения контура в триангуляцию выполняется его заливка, которая состоит в том, что в каждый треугольник внутри контура добавляется информация о том, что он затапливается этим контуром; в результате для каждого треугольника триангуляции формируется список уровней, которые его затапливают;
- после завершения вспомогательной триангуляции каждому треугольнику сопоставляется истинный уровень его затопления - тот, который лучше всего согласуется с его списком затапливающих уровней (если и для этого уровня получается много ошибок, то считаем, что треугольник не затапливается);
- поскольку погрешности измерения контуров имеет случайную природу, и они вызывают отклонения в разные стороны от истинного положения контура, с добавлением новых контуров должна повышаться частота результатов, соответствующих истинному положению контура, что даёт соответствие алгоритма требованию 2;
- далее в основную триангуляцию из вспомогательной переносятся точки жёстких рёбер, разделяющих треугольники разных уровней, и сами эти рёбра;
- высота ребра равна минимальному из уровней разделяемых им треугольников – это обеспечивает соответствие алгоритма первому требованию (именно такие высоты должны получиться при отсутствии ошибок вложенности контуров).

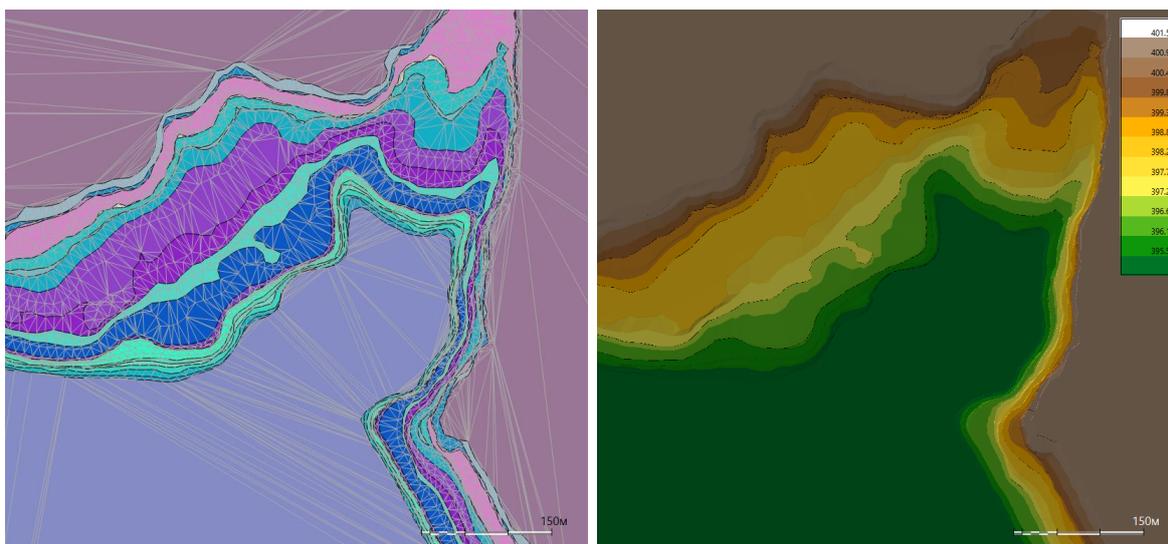


Рисунок 1 Сопоставление вспомогательной (слева) и результирующей триангуляций. На вспомогательной триангуляции одним цветом окрашены треугольники, имеющие одинаковый результирующий уровень затопления.

В результате была получена модель прибрежного рельефа фрагмента Братского водохранилища в пределах трапеции 48UUE. Полученная модель рельефа хорошо согласуется с глобальными ЦМР (например, Copernicus DEM) и спутниковыми снимками высокого разрешения, опубликованными сервисами Web-картографии. При этом она содержит информацию и о той части рельефа, которая была скрыта под водой на момент создания этих ЦМР и выполнения снимков.

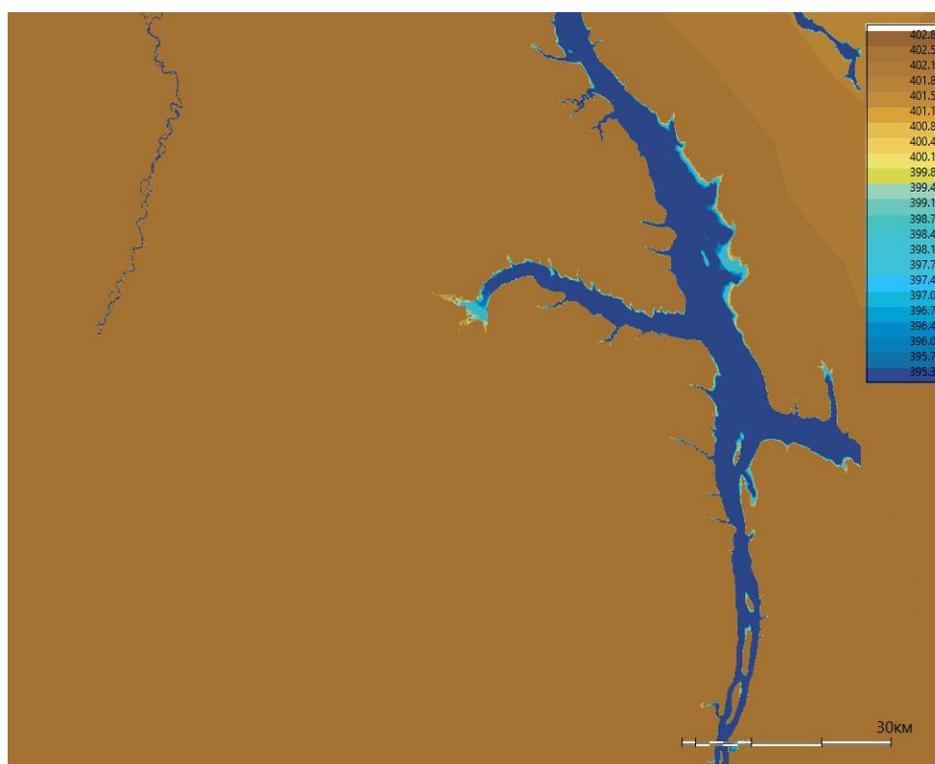


Рисунок 2 ЦМР прибрежного рельефа Братского водохранилища для трапеции 48UUE

УДАЛЕНИЕ РЕБЕР В ГРАФАХ ПЕРЕХОДНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ДЛЯ ОТКРЫТЫХ СЕТЕЙ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Г.Ш. Цициашвили, М.А. Осипова

Институт прикладной математики Дальневосточного отделения РАН
guram@iam.dvo.ru, mao1975@list.ru

В настоящей работе исследуются условия при которых изменение взвешенного орграфа переходных интенсивностей, определяющих функционирование открытой сети массового обслуживания, не меняет стационарного распределения в ней. Матрица переходных интенсивностей определяют систему дифференциальных уравнений динамики вероятностного распределения состояний в открытой сети массового обслуживания. В работе определение требуемых условий основано на декомпозиции в мультипликативной теореме для открытых сетей массового обслуживания. Эта декомпозиция вызвана тем, что граф переходных интенсивностей для открытой сети массового обслуживания, удовлетворяющий мультипликативной теореме, состоит из прямоугольных пирамид. Каждая пирамида определяется базовой вершиной, из которой под прямым выходят (в которую входят) ребра пирамиды. Это позволяет определить набор базовых вершин и соответствующих им пирамид, которые можно удалить, сохраняя множество вершин графа. В работе строятся примеры открытых сетей массового обслуживания с ограниченным числом заявок в каждом узле или с суммарным ограниченным числом заявок. Учитывая, что граф переходных интенсивностей определяет протокол работы открытой сети обслуживания, процедура удаления ребер из него приводит к уменьшению возможных переходов между состояниями сети.

Пусть открытая сеть Джексона G [1] имеет интенсивность входного пуассоновского потока λ и состоит из m одноканальных систем обслуживания с интенсивностями обслуживания $\mu_k, k=1, \dots, m$. Перемещения заявок по сети определяются неразложимой маршрутной матрицей $\Theta = \|\theta_{ij}\|_{i,j=0}^m$. Здесь элемент θ_{ij} матрицы Θ означает вероятность перехода заявки обслуженной в узле i попасть в очередь на обслуживание в узле j . Узел 0 является внешним и из него входят заявки входного потока и в него выходят из сети обслуженные заявки. Далее без ограничения общности полагаем, что $\theta_{ii} = 0, i=0, 1, \dots, m$. Если маршрутная матрица Θ неприводима, т. е. для любых i, j : существует цепочка индексов $0 \leq i(1), \dots, i(l) \leq m$ таких, что

$$\theta_{i(1)} > 0, \theta_{i(1)i(2)} > 0, \dots, \theta_{i(l-1)i(l)} > 0, \theta_{i(l)j} > 0$$

Тогда тогда при заданном λ существует единственное решение $\Lambda = (\lambda, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ системы балансовых уравнений $\Lambda = \Lambda\Theta$. Далее нам будет удобно это систему выписать в следующем виде:

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i \theta_{i0}, \lambda_k = \lambda \theta_{0k} + \sum_{1 \leq i \neq k \leq m} \lambda_i \theta_{ik}, k=1, \dots, m. \quad (1)$$

Функционирование сети G описывается марковским процессом $X(t)$ с множеством состояний $N = \{n = (n_1, \dots, n_m), n_i = 0, \dots; i=1, \dots, m\}$ (здесь e_i - m -мерный вектор, все компоненты которого равны нулю, кроме i -ой компоненты, равной единице) и переходными интенсивностями

$$\begin{aligned} \gamma(n, n + e_i) &= \lambda \theta_{0,i}, \gamma(n + e_i, n) = \mu_i (n + e_i) \theta_{i,0}, \\ \gamma(n + e_i, n + e_j) &= \mu_i (n + e_i) \theta_{ij},, 1 \leq i \neq j \leq m. \end{aligned} \quad (2)$$

Выберем в качестве функции $f(n)$ произведение

$$f(n) = \prod_{i=1}^m \rho_i^{n_i}, \rho_i = \lambda_i \mu_i. \quad (3)$$

Далее будем конструировать взвешенный связный орграф Γ_0 с помощью конечного множества вершин $N_0 \subset N$ и совокупности ребер

$$R_0 = (n, n+e_i), (n+e_i, n), (n+e_i, n+e_j), n \in N_0, 1 \leq i \neq j \leq m.$$

Иными словами, взвешенный орграф Γ_0 образуется объединением конечного числа пирамид $\Gamma_0(n), n \in N_0$ (треугольников при $m=2$) с ребрами $(n, n+e_i), (n+e_i, n), (n+e_i, n+e_j), 1 \leq i \neq j \leq m$.

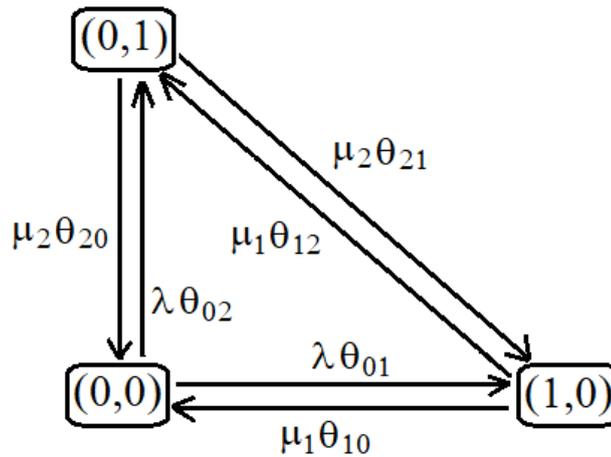


Рис. 1. Пример орграфа $\Gamma_0(n)$ при $n=0$

Теорема 1. Пусть $\lambda_i, i=1, \dots, m$ удовлетворяют балансовым соотношениям (1). Тогда марковский процесс $X(t)$, определяемый связным конечным орграфом Γ_0 и равенствами (2) является эргодическим и имеет предельное распределение $\pi(n)$, определяемое формулами (1), (3).

Определим множество вершин графе Γ_0 равенством

$$N(N_0) = N_0 \cup \{n+e_i : n \in N_0, i=1, \dots, m\}.$$

Следствие 1. Предположим, что выполняются строгое включение $N'_0 \subset N_0$ и равенство $N(N'_0) = N(N_0)$. Тогда из теоремы 1 следует, что стационарное распределение, определяемое множеством N'_0 , совпадает со стационарным распределением, определяемым множеством N_0 . Такая процедура изменения графа переходных интенсивностей означает изменение протокола работы сети массового обслуживания и сокращение переходных интенсивностей в ней.

Приведем примеры, когда выполняется строгое включение $N'_0 \subset N_0$ и, значит, стационарные распределения $\pi(n)$ при $N'_0 \subset N_0$ совпадают. Первый пример показывает возможность удаления треугольников, следующих один за другим вдоль оси n_1 , двух четверок треугольников, параллельных оси n_1 и пары треугольников, параллельных оси n_2 (рис. 2).

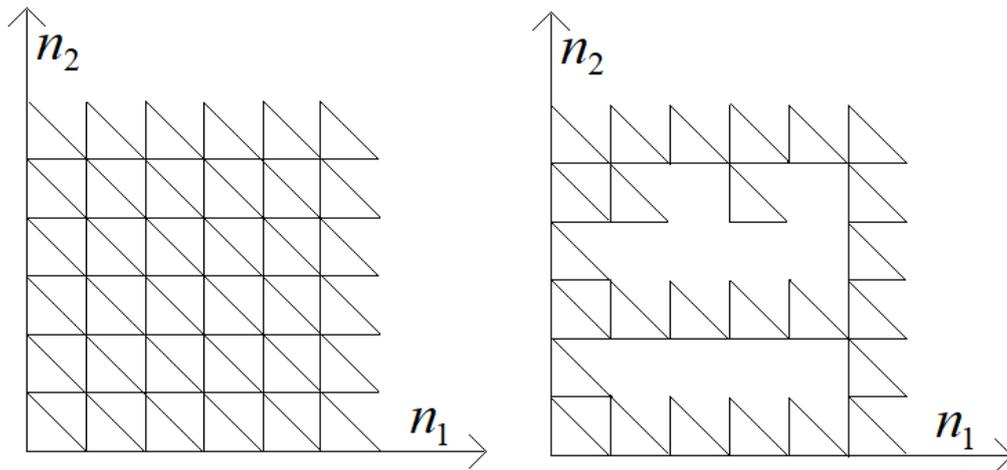


Рис. 2. Удаление из графа на рис. 2 двух параллельных четверок треугольников, параллельных оси n_1 и пары треугольников параллельных оси n_2

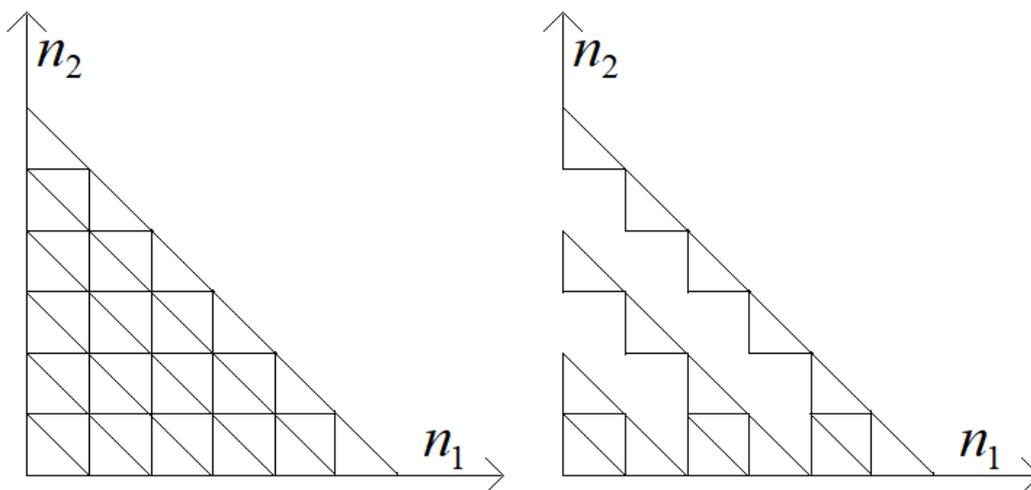


Рис. 3. Удаление из графа двух наборов треугольников, параллельных гипотенузе основного треугольника

1. Jackson J.R. Networks of Waiting Lines. Oper. Res., 1957. Vol. 5, No 4. P. 518-521.
2. Цицашвили Г.Ш., Осипова М.А. Новые мультипликативные теоремы для сетей массового обслуживания. Проблемы передачи информации. 2005. Вып. 41, ном. 2. С. 111-122.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЕРАРХИЧЕСКИХ МАШИН СОСТОЯНИЙ*

М.А. Чекан

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

Мультиагентные среды являются удобным и эффективным инструментом моделирования сложных распределённых процессов [1]. Это подтверждается их широким распространением в различных предметных областях, в частности, при проектировании и моделировании киберфизических систем.

Парадигма машин состояний позволяет естественно и наглядно описывать поведение систем, особенно автономных, в число которых входят и агенты. Расширенные иерархические машины состояний дополняют эту парадигму и обеспечивают ещё большую гибкость программируемой системы. Данный стандарт успешно применяется в программировании, в том числе разработке программ для микроконтроллеров [2]. Сочетание всех этих факторов обосновывает разработку инструментария, облегчающего создание мультиагентных сред с поведением агентов на основе иерархических машин состояний.

В качестве основы мультиагентной системы выбран фреймворк JADE [3] на языке Java. Он предоставляет инструменты для формирования агентной среды с помощью контейнеров и набор библиотек для конструирования агента, взаимодействующего со средой и другими агентами посредством универсального интерфейса и передачи сообщений на стандартизованном языке FIPA-ACL.

Предлагаемая программная надстройка состоит из нескольких компонентов. В первую очередь, это модуль HSMBehaviour, предоставляющий механизм для описания поведения агента в логике иерархических машин состояний. Интерфейс модуля совместим со встроенным FSMBehaviour, что позволяет применять надстройку в сценариях одноуровневых машин состояний. Модуль реализован с нуля, так как существующая реализация этой функциональности [4] отсутствует в открытом доступе.

Для более простого и эффективного составления графа состояний предлагается использовать визуальную среду разработки Lapki IDE [5]. Эта среда с открытым исходным кодом предоставляет редактор иерархических машин состояний с удобным интерфейсом и возможностью более гибкого описания логики. Приложение использует специально разработанный формат файла CyberiadaML, содержащий в основе язык описания графов GraphML, расширенный для описания поведения целевой системы.

Для интеграции двух вышеперечисленных компонентов предложены два решения. Первое – это модуль CyberiadaHSMBehaviour, наследующий HSMBehaviour и расширяющий его возможностью загружать CyberiadaML-файл, на основе которого настраивается граф состояний агента. Из текущих ограничений стоит отметить, что функциональность агента определяется только названием состояния, которое определяет класс-поведение, исполняемый в этом состоянии. Кроме этого, переходы определяются сигналами, которые либо формируются по завершении поведения (как в FSMBehaviour), либо передаются в класс вручную. Внутренние переходы и действия в текущий момент не учитываются.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределённых средах» (рег. № 121032400051-9).

Второе решение – генератор каркаса агента. На основе CyberiadaML-файла он формирует код на языке Java, реализующий класс с описанной структурой состояний и их переходов. Кроме того, генератор создаёт функции-ячейки для всех сегментов схемы, предусматривающих выполнение кода (с возможностью размещения содержимого как комментария или непосредственно текста программы). В данном решении предусмотрена реализация каркаса в режиме набора классов-поведений, аналогичном описанному ранее.

Разработанная надстройка используется в программном комплексе для моделирования микросетей, взаимодействующих с применением экономического механизма регулирования спроса и предложений [6]. Применение надстройки в сочетании с визуальным редактором призвано снизить нагрузку на предметного специалиста при описании логики агента.

В дальнейшем предполагается расширение числа поддерживаемых функций для создания более функционально насыщенных машин состояний. В частности, планируется реализация механизма условий и псевдосостояний перехода.

1. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Чекан М.А. Модель поведения агента микросети. Вычислительные технологии. 2023. Т. 28, № 6. С. 108–117.
2. Samek M. Practical UML statecharts in C/C++: event-driven programming for embedded systems. CRC Press. 2008.
3. Bellifemine, F. Jade – A Java Agent Development Framework. Multi-Agent Programming. 2005. Vol. 15. P. 125–147.
4. Griss M., Fonseca S., Cowan D., Kessler R. SmartAgent: Extending the JADE agent behavior model. Proceedings of SEMAS. 2002. P. 1-10.
5. Чекан М. Среда программирования киберфизических систем в парадигме машин состояний. Материалы VI Междунар. семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2024). Иркутск, 2024. С. 217–219.
6. Bychkov I.V., Feoktistov A.G., Chekan M.A. Modeling Agent Behavior in Interacting Microgrids./ Proceedings of the 10th International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT 2024). IEEE, 2024. P. 1–5.

О СВОЙСТВАХ ЛИНЕЙНЫХ ИНТЕГРО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ФРЕДГОЛЬМА И ВОЛЬТЕРРА И МЕТОДАХ ИХ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

В.Ф. Чистяков, Е.В. Чистякова

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

В докладе рассматриваются системы линейных интегральных уравнений вида

$$(\Lambda_0 + \lambda\Phi)\zeta := A(t)\zeta(t) + \lambda \int_{\alpha}^{\beta} K(t, s)\zeta(s)ds = f(t), \quad (1)$$

$$(\Lambda_0 + \lambda\mathcal{V})y := A(t)y(t) + \lambda \int_{\alpha}^{\beta} \mathcal{K}(t, s)y(s)ds = \phi(t), \quad (2)$$

где $t \in T = [\alpha, \beta]$, $A(t)$, $K(t, s)$, $\mathcal{K}(t, s)$ – $(m \times n)$ -матрицы определенные в областях T и $T \times T$, соответственно, λ – скалярный параметр, $\zeta \equiv \zeta(t)$, $y \equiv y(t)$ – искомые и $f(t)$, $\phi(t)$ – заданные вектор-функции. Предполагается, что выполнены условия

$$\begin{aligned} \text{rank}A(t) &< \min\{m, n\}, \forall t \in T, \\ A(t) &\in \mathbf{C}^A(T), \\ K(t, s), \mathcal{K}(t, s) &\in \mathbf{C}^A(T)(T \times T). \end{aligned} \quad (3)$$

Иначе говоря, все элементы указанных матриц являются вещественно-аналитическим функциями в своих областях определения. В случае замкнутых ИАУ $m = n$ условия (3) эквивалентны выполнению равенства

$$\det A(t) = 0 \quad \forall t \in T.$$

Системы уравнений (1) и (2), удовлетворяющие условиям (3), принято называть в настоящее время интегро-алгебраическими уравнениями (ИАУ) Фредгольма и Вольтерра, соответственно. В виде ИАУ (1) и (2), можно записать системы взаимосвязанных (хотя бы по части компонент искомых вектор-функций) интегральных уравнений Вольтерра и Фредгольма I и II рода, а также алгебраические уравнения.

В докладе вводится понятие индекса для ИАУ (2) и предлагается способ определения индекса для ИАУ (1), на основании чего можно провести качественные исследования рассматриваемых систем. Обсуждаются вопросы численного решения ИАУ Фредгольма и Вольтерра на основе метода наименьших квадратов. Для ИАУ (1) и (2) ставятся в соответствие задачи поиска минимума соответствующих функционалов и задается градиентный процесс их минимизации. Доказана теорема сходимости. Данные результаты являются продолжением исследований, начатых в работах [1], [2].

1. V. F. Chistyakov, E. V. Chistyakova. On some properties of the Fredholm-type integral algebraic equations. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2020.
2. В. Ф. Чистяков. О разрешимости линейных интегро-алгебраических уравнений и численных методах их решения. *Сиб. матем. журн.*, 54:4 (2013), 932–946.

REGTAB API: ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ СРЕДСТВО РАЗРАБОТКИ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕЛЯЦИОННЫХ ДАННЫХ ИЗ МАШИНОЧИТАЕМЫХ ТАБЛИЦ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ ПАТТЕРНОВ

А.О. Шигаров

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

Большой объем, доступность и реляционная природа данных, представленных в виде произвольных таблиц машиночитаемых форматов (рабочих книг, текстовых процессоров, гипертекстовой разметки и др.), делает их ценным источником в различных приложениях поиска, анализа и синтеза информации. Однако в общем случае такие таблицы не сопровождаются формальной моделью, позволяющей интерпретировать представленную в них информацию в соответствии со смыслом, заложенным автором. Задача извлечения реляционных данных из них полагает, что исходная таблица представляет произвольным образом один или несколько наборов однотипных записей, каждый со своей схемой; при этом необходимо извлечь эти наборы в виде плоских файловых баз данных. Сложность этой задачи определяется двумя факторами: большое разнообразие способов оформления таблиц и ограниченность форматов их представления. Тем не менее можно заметить, что различные подструктуры таблицы (ячейки, подстроки, строки, подтаблицы) могут повторяться, т. е. иметь общие свойства компоновки, форматирования и содержимого. Такая регулярность подструктур таблицы может быть представлена в виде паттернов.

В работе рассматривается инструментальное средство (ИС) «RegTab API»¹, предназначенное для разработки прикладного программного обеспечения извлечения реляционных данных из машиночитаемых таблиц с произвольной структурой (т.е. неизвестно то каким образом представленные там данные составляют записи и атрибуты). ИС предоставляет интерпретируемую модель таблицы (ИМТ) и проблемно-ориентированный язык паттернов «Regular Table Language»² (RTL). ИМТ расширяет возможности представления произвольных таблиц, обеспечиваемые популярными машиночитаемыми форматами, за счет добавления семантики, которая позволяет автоматически выводить из них наборы однотипных записей. RTL является способом формального выражения паттернов, позволяющих описывать закономерности размещения компонентов записей и схем внутри таблиц с произвольной структурой. Предполагается, что класс таблиц, разделяющих общие закономерности, может быть соответствовать одному RTL-паттерну. Произвольная таблица, представленная в виде экземпляра ИМТ, сопоставляется с RTL-паттерном, в результате чего экземпляр ИМТ дополняется семантикой, отсутствующей в исходном представлении, а именно взаимосвязанными компонентами записей и схем. Данная семантика делает экземпляр ИМТ доступным для автоматического вывода соответствующего ему набора однотипных записей.

Рассматриваемое ИС реализовано в виде библиотеки для платформы разработки программного обеспечения Java, что позволяет внедрять RTL-паттерны в исходный код программ, компилируемых в Java байт-код. В настоящее время ИС используется для извлечения реляционных данных из таблиц, представленных в различных открытых ресурсах по экологическому мониторингу Байкальской природной территории (БПТ) и озера Байкал в рамках крупного научного проекта по приоритетным направлениям

¹ <https://github.com/regtab/regtab>

² <https://github.com/regtab/regtab/blob/main/src/main/antlr4/RTL.g4>

научно-технологического развития — «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», выполняемого при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант № 075-15-2024-533).

О НЕКОТОРЫХ МЕТОДАХ АНАЛИЗА ИСХОДНОГО КОДА С ПОМОЩЬЮ АБСТРАКТНЫХ СИНТАКСИЧЕСКИХ ДЕРЕВЬЕВ

М.Н. Шипицын, Р.К. Фёдоров

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
1markus243@gmail.com, fedorov@icc.ru

На сегодняшний день разработка программного обеспечения сопровождается практически все сферы жизнедеятельности человека. С увеличением объемов создаваемого кода совершенствуются и инструменты для его анализа. Традиционные подходы к проверке кода, такие как статический анализ, динамический анализ и тестирование, дополняются новыми методами, основанными на машинном обучении и искусственном интеллекте. Эти технологии позволяют автоматизировать процесс поиска ошибок, выявления ключевых особенностей и часто повторяющихся функций.

Хотя исходный код представлен в виде текста, он имеет сложную внутреннюю структуру, которая определяет его поведение при выполнении. Абстрактное синтаксическое дерево (AST) исходного кода является одной из наиболее распространенных структур данных, позволяющей учитывать помимо синтаксиса также вложенность подпрограмм, порядок вызова функций, важную семантику применения операторов. Многие анализаторы также реализуют парсеры AST для реализации более точных правил или вычисления метрик качества исходного кода.

Методы анализа кода, основанные на использовании абстрактных синтаксических деревьев, включают в себя различные алгоритмы, такие как обход дерева, поиск доминатора, вычисление расстояния редактирования и преобразование AST в промежуточное представление. Последние исследования в области создания представлений AST, в частности, пути AST (AST paths) [1], описывают полную последовательность узлов между двумя листьями дерева AST. Полученные последовательности, благодаря существующим алгоритмам, извлекаются автоматически. Данные алгоритмы также имеют поддержку во многих популярных языках программирования, за счет универсальности представления кода в виде AST.

В работе рассматриваются основные ограничения и вопросы, возникающие при использовании путей AST, а также постановка задачи машинного обучения с использованием путей AST в качестве признаков (features). Решение полученной задачи в дальнейшем планируется использовать как часть реализовываемого программного комплекса анализа исходного кода обработки пространственных данных.

1. A General Path-Based Representation for Predicting Program Properties / U. Alon, M. Zilberstein, O. Levy, E. Yahav. arXiv. – 2018. – URL: <https://arxiv.org/abs/1803.09544>

ЕДИНСТВЕННОСТЬ И УСЛОВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ СЕРИИ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПО ВОЗРАСТУ ПОПУЛЯЦИЙ*

А.Ю. Щеглов^{1,2}, Шэнь Цин^{1,2}

¹ Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэне

² МГУ имени М.В. Ломоносова

shcheg@cs.msu.ru

Рассматривается серия моделей, описывающих с различной детализацией динамику развития популяции однородных организмов, структурированных по возрасту. Для каждой из моделей формируется однотипная обратная коэффициентная задача, связанная с восстановлением одного из коэффициентов модели по дополнительно заданной информации о решении основного уравнения задачи на отрезке из области определения решения уравнения.

Линейная задача близка по содержанию к известной по работе [1] «квазистабильной» модели популяции:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_t(x, t) + u_x(x, t) = -\mu(x)\eta(t)u(x, t), \quad x \in [0, l], t \in [0, T], \\ u(0, t) = 2 \int_0^l \rho(s)u(s, t) ds, \quad t \in [0, T], \\ u(x, 0) = \varphi(x), \quad x \in [0, l], \end{array} \right.$$

где $u(x, t)$ – число организмов возраста x в момент времени t , $\mu(x)\eta(t)$ – плотность смертности, $\varphi(x)$ – начальное распределение организмов по возрастам, $\rho(s)$ – распределение рождаемости, связанное с делением клетки.

Другая модель получила [2, р. 73] название «открытой» из-за учёта эмиграционного, с интенсивностью $e(x)$, и иммиграционного, с интенсивностью $m(x)$, потоков:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_t(x, t) + u_x(x, t) + \mu(x)u(x, t) = m(x)\eta(t) - e(x)u(x, t), \quad x \in [0, l], \quad t \in [0, T], \\ u(0, t) = \int_0^l \rho(s)u(s, t) ds, \quad t \in [0, T], \\ u(x, 0) = \varphi(x), \quad x \in [0, l]. \end{array} \right.$$

Ещё одна нелинейная модель [2, р.153-155], [3, р.160] развития популяции учитывает влияние перенаселения:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_t(x, t) + u_x(x, t) + \mu_0(x)\eta(t)u(x, t) = -\mu_1(x)\Psi(S(t))u(x, t), \quad x \in [0, l], \quad t \in [0, T], \\ u(0, t) = \Phi(S(t)) \int_0^l \rho(s)u(s, t) ds, \quad t \in [0, T], \\ u(x, 0) = \varphi(x), \quad x \in [0, l]; \quad S(t) = \int_0^l \gamma(s)u(s, t) ds, \quad t \in [0, T]. \end{array} \right.$$

Здесь функции $\mu_0(x)\eta(t)$ и $\mu_1(x)$ характеризуют интенсивность смертности организмов возраста x в момент времени t , естественной и от перенаселения,

* Работа выполнена при частичной поддержке National Natural Science Foundation of China (No. 12171036) и Beijing Natural Science Foundation (Key Project No. Z210001).

соответственно; функции $\rho(s)$ и $\gamma(s)$ – плотности рождаемости и активности в потреблении ресурсов популяции по возрасту s ; функции $\Phi(S(t))$ и $\Psi(S(t))$ характеризуют влияние численности всей популяции на рождаемость и смертность через интегральную характеристику $S(t)$ общей численности популяции.

В рамках решения обратных задач для представленных моделей две функции $\eta(t)$, $u(x, t)$ могут быть восстановлены в виде

$$\eta(t) \in C[0, T], \quad \eta(t) > 0 \quad \forall t \in [0, T], \quad u(x, t) \in C^1([0, l] \times [0, T]),$$

при заданных функциях $\rho(x)$, $\gamma(x)$, $\varphi(x)$, $\mu_0(x)$, $\mu_1(x)$, $\Phi(s)$, $\Psi(s)$, по дополнительно заданному значению $a \in (0, l]$ и функции $g(t)$ такой, что

$$g(t) = u(a, t), t \in [0, l].$$

Дифференциальные уравнения и интегральные краевые условия, входящие в обратные задачи, редуцируются к системам интегральных уравнений. Анализ получаемых систем интегральных уравнений позволяет сформировать (в форме доказываемых теорем) условия единственности решения обратных задач, построить оценки устойчивости решений обратных задач в зависимости от задаваемой дополнительно при формировании обратных задач функции $g(t)$, а также предложить итерационные алгоритмы численного решения обратных задач.

1. Coale A.J. The growth and structure of human populations. Princeton: Princeton University Press, 1972.
2. Iannelli M., Milner F. The basic approach to age-structured population dynamics. Berlin: Springer, 2017.
3. Inaba H. Age-structured population dynamics in demography and epidemiology. N-Y.: Springer, 2017.

СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ*

Е. Юмашев^{1,2}, Д.Н. Карамов^{1,3}, М.Л. Воскобойников¹,
А.Г. Феоктистов¹

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

² Иркутский государственный университет путей сообщения

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Байкальский институт БРИКС

yumashevgeny@mail.ru, dmitriy.karamov@mail.ru, mikev1988@mail.ru, agf65@yandex.ru

Введение. Метеорологические данные играют ключевую роль в различных научных исследованиях, прикладных проектах и принятии решений в таких областях, как сельское хозяйство, городское планирование, энергетика и многих других [1]. Правильное понимание климатических условий и их изменений позволяет более эффективно управлять ресурсами и минимизировать риски, связанные с экстремальными погодными явлениями [2, 3]. Метеорологические данные востребованы в задачах экологического мониторинга [4-6]. Особое значение имеют модели типового, оптимистичного и пессимистичного метеорологического года, построение которых базируется на использовании ретроспективных данных. Однако доступ к ретроспективным метеорологическим данным зачастую затруднен из-за больших временных затрат на их сбор и обработку. В этом случае возникает необходимость использования гибких и эффективных средств извлечения и обработки метеорологических ретроспективных данных из открытых источников. В данной работе представлено сервис-ориентированное приложение, предоставляющее средства получения, обработки и анализа метеорологических данных. Приложение поддерживает стандарт Web Processing Service (WPS) [7], что позволяет применять его сервисы и их композиции для работы с геоданными.

Архитектура приложения. Приложение разработано с использованием инструментального комплекса Framework for Development and Execution of Scientific WorkFlows (FDE-SWFs) [8]. По сравнению с аналогичными системами, FDE-SWFs позволяет разрабатывать и выполнять ресурсоемкие сервис-ориентированные рабочие процессы с длительным временем вычислений в гетерогенной распределенной вычислительной среде и эффективно обрабатывать и анализировать большие массивы пространственно-распределенных данных. Архитектура приложения представлена на рис. 1. Пользователь приложения с помощью веб-формы выбирает рабочий процесс, реализуемый композицией сервисов, вводит значения входных параметров и отправляет запрос на выполнение рабочего процесса веб-серверу. Далее в расчетной базе данных (БД) создается папка с уникальным идентификатором, в которую сохраняется спецификация входных параметров в виде JSON файла, а также файлы, переданные в качестве входных параметров. Затем веб-сервер формирует запрос к WPS-серверу, который содержит идентификатор вызываемого приложения и список входных параметров. WPS-сервер в ответ на запрос отправляет XML-файл, который содержит информацию о статусе принятого запроса и запускает композицию сервисов на выполнение. Эта информация записывается в БД веб-сервера. Затем веб-сервер периодически опрашивает WPS-сервер о статусе выполнения сервисов и отображает

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

статус в интерфейсе пользователя. В ходе выполнения рабочего процесса его сервисы передают данные между собой через расчетную БД и взаимодействуют с внешними системами. После завершения выполнения композиции сервисов пользователю доступны полученные выходные параметры.



Рис. 1. Архитектура приложения

Приложение включает следующие сервисы:

- WPS-сервис получения и обработки архивов ретроспективных метеорологических данных с открытого источника `gr5.ru` [9] для населенных пунктов, заданных по их названиям или географическим координатам (s_1);
- WPS-сервис анализа ретроспективных метеорологических данных и построения на его основе моделей метеорологического года (s_2);
- WPS-сервис прогнозирования выработки электроэнергии солнечной батареей заданной модели на основе моделей метеорологического года (s_3);
- WPS-сервис прогнозирования выработки электроэнергии ветрогенератором заданной модели на основе моделей метеорологического года (s_4);
- WPS-сервис формирования модельных временных рядов природно-климатических данных разной длительности в заданной географической локации, близких по статистическим свойствам к реальным данным (s_5).

Возможные композиции сервисов приведены на рис. 2.

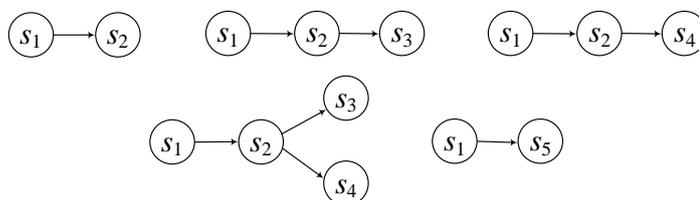


Рис. 2. Возможные композиции сервисов

Аспекты реализации. В настоящее время нет известных инструментов, решающих проблему автоматического получения архивов метеорологических данных в полной мере. Сервис s_1 ориентирован на решение данной проблемы. При его разработке использованы методы [10] получения данных с `gr5.ru`, а также обработки Excel-файлов (удаления ненужной информации и заполнения пропусков данных). Эти

методы разработаны с использованием библиотек Requests, BS4, Naversine, OpenPyxl, gzip и DateTime языка Python.

В текущей версии сервис s_2 строит модель типичного метеорологического года, которая включает показатели солнечной радиации (прямую, рассеянную и суммарную солнечную радиацию). Алгоритмы построения модели используют модифицированную модель Iqbal-Kasten/Czeplak [11]. Эти алгоритмы были изначально разработаны в программной среде MATLAB. Основные проблемы их использования заключались в неудобстве вывода результатов расчетов, длительном времени их выполнения (30-40 минут) и отсутствии привязки к массивам метеорологических данных конкретной локации. Сервис s_2 успешно справляется с решением перечисленных выше проблем. Модель типичного метеорологического года строится на основе архивов данных, получаемых от сервиса s_1 . Для проведения расчетов показателей солнечной радиации в нем используются библиотеки Numpy и SciPy языка Python.

Сервисы s_3 и s_4 реализован на языке программирования Python. Чтение и запись данных выполняются с помощью функций библиотеки Pandas. Входными параметрами сервиса s_3 являются модель типичного метеорологического года, а также географические координаты локации солнечной батареи и ее характеристики. Выработка электроэнергии солнечной батареей рассчитывается с помощью пакета Global Solar Energy Estimator [12]. Входными параметрами сервиса являются модель типичного метеорологического года, а также географические координаты локации ветрогенератора и его характеристики. Выработка электроэнергии ветрогенератором рассчитывается по запросу внешней системой моделирования выработки электроэнергии [12].

Ведется разработка сервиса s_5 для формирования модельных временных рядов природно-климатических данных в заданной географической локации, близких по статистическим свойствам к реальным данным. Разработка данного сервиса базируется на использовании стохастических «генераторов погоды» [13].

Примеры использования. На рис. 3 показаны результаты работы сервиса s_1 по получению архива метеорологических данных для города Иркутск за период с 2018 по 2023 годы в формате MS Excel. На рис. 4 показаны результаты моделирования солнечной радиации за 10-летний расчетный период для региона Западной Сибири с 2013 по 2023 год. Применение композиции сервисов s_1 и s_2 в процессе решения задачи обеспечило представление показателей солнечной радиации в удобном для пользователя формате и сокращение времени решения задачи до 2 минут.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q			
1	0	15.07.2018 02:00	15,8	712	Ветер, дуг	1	Облаков	0	0	0	0	0	0,125	0,125	3	0	78			
2	3	15.07.2018 05:00	13,4	711,8	Ветер, дуг	1	40%.	Слоисто-н	Облаков	+2500	или	Высококу	Перистые	0,125	0,125	3	3	85		
3	6	15.07.2018 08:00	17,1	712,3	Ветер, дуг	1	70 – 80%.	Слоисто-н	Облаков	+2500	или	Высококу	Перистые	0,125	0,125	3	6	71		
4	9	15.07.2018 11:00	22,9	712	Ветер, дуг	1	90	или	бс	Слоисто-н	Облаков	+2500	или	Высококу	Перистые	0,125	0,125	3	9	51
5	12	15.07.2018 14:00	26,2	711,2	Ветер, дуг	1	90	или	бс	Слоисто-н	Облаков	+2500	или	Высококу	Перистые	0,125	0,125	3	12	47
6	15	15.07.2018 17:00	26	710,8	Ветер, дуг	1	100%.	Слоисто-н	Облаков	+2500	или	Высококу	Перисто-с	0,125	0,125	3	15	52		
7	18	15.07.2018 20:00	20,8	711,4	Ветер, дуг	1	100%.	Слоисто-н	40%.	600-1000	Высококу	0	0,125	0,125	3	18	65			
8	21	15.07.2018 23:00	18,4	712,1	Ветер, дуг	2	90	или	бс	Слоисто-н	70 – 80%.	600-1000	Высококу	Перистые	0,125	0,125	3	21	70	
9	24	16.07.2018 02:00	16,7	712	Ветер, дуг	1	70 – 80%.	Слоисто-н	40%.	2500	или	Высококу	Перистые	0,125	0,125	3	24	73		
10	27	16.07.2018 05:00	15,4	711,4	Ветер, дуг	2	90	или	бс	Кучево-дс	40%.	600-1000	Высококу	Перистые	0,125	0,125	3	27	85	

Рис. 3. Фрагмент архива метеорологических данных по городу Иркутску

Заключение. В работе представлено сервис-ориентированное приложение для получения, обработки и анализа ретроспективных пространственно-временных данных в процессе работы с моделями метеорологического года в рамках проведения исследований, связанных с экологическим мониторингом. Приложение разработано с использованием инструментального комплекса FDE-SWFs. Оно успешно использовано при решении ряда задач, связанных с исследованием состояния и развития природно-технических систем, расположенных на Байкальской природной территории. В будущем планируется расширить модели метеорологического года такими

параметрами, как облачность, направление и скорость ветра, давление, влажность и другие важные атмосферные показатели. Это позволит расширить спектр научных и прикладных задач, которые могут быть решены с использованием данного приложения.

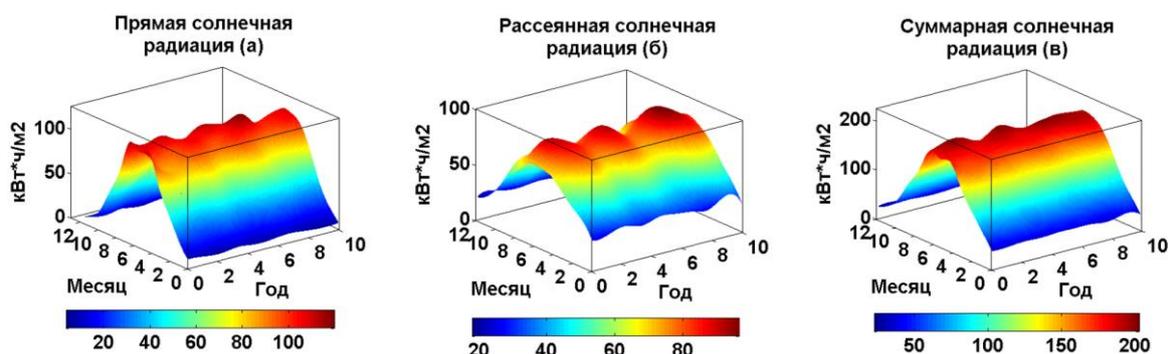


Рис. 4. Результаты моделирования солнечной радиации для Западной Сибири

1. Карамов Д.Н., Еделев А.В., Феоктистов А.Г. Моделирование энергоснабжения объектов охраняемой Байкальской природной территории на основе возобновляемых источников энергии. *Международный технико-экономический журнал*. 2020. № 5. С. 7–24.
2. Perera A.T.D., Nik V.M., Chen D., Scartezzini J.L., Hong T. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*. 2020. Vol. 5, no. 2. P. 150–159.
3. Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Сидоров И.А., Горский С.А. Башарина О.Ю. Цифровые двойники процессов работы природосберегающего оборудования инфраструктурного объекта. *Современные наукоемкие технологии*. 2021. № 1. С. 57–62.
4. Бычков И.В., Горский С.А., Еделев А.В., Костромин Р.О., Сидоров И.А., Феоктистов А.Г., Фереферов Е.С., Федоров Р.К. Поддержка управления живучестью систем энергетики на основе комбинаторного подхода. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2021. № 6. С. 122–135.
5. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Горский С.А., Костромин Р.О., Федоров Р.К. Автоматизация интеграции сервисов веб-обработки данных экологического мониторинга с распределенными научными приложениями. *Автометрия*. 2022. Т. 58, № 4. С. 67–75.
6. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Башарина О.Ю., Сидоров И.А. Моделирование работы природосберегающего оборудования инфраструктурных объектов в микросервисной среде. *Вычислительные технологии*. 2022. Т. 27, № 5. С.30–42.
7. Foerster T., Stoter J. Establishing an OGC Web Processing Service for generalization processes. *Proceedings of the ICA Workshop on Generalization and Multiple Representation*. Portland, US: ICA Press, 2006. P. 1–7.
8. Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г., Черных А.Н. Разработка и применение сервис-ориентированных научных приложений в инструментальном комплексе FDE-SWFs. *Труды ИСП РАН*. 2024. Т. 35, № 6. В печати.
9. rp5 – Расписание погоды, 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://rp5.ru/Weather_in_the_world.
10. GitHub Project rp5_weather, 2021 [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/KonstantenKomkov/rp5_weather.
11. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model // *Applied Energy*. 2001. Vol. 69. P. 191–224.
12. Renewables.ninja [Электронный ресурс]. URL: <https://www.renewables.ninja/>.
13. Еделев А.В., Карамов Д.Н., Огородников В.А., Каргаполова Н.А., Акентьева М.С. Использование стохастических генераторов погоды в структурно-параметрической оптимизации природно-технических систем. *Марчуковские научные чтения 2024: Тезисы Междунар. конф., 7–11 октября 2024 г.* Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2024. С. 148.

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕРВАЛЬНОЙ ГОТОВНОСТИ УЗЛОВ ГЕТЕРОГЕННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ*

Д.С. Яковлев, А.Г. Феоктистов

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
dm1try.y4kovlev@yandex.ru, agf65@yandex.ru

Надежное выполнение вычислений в распределенной среде является актуальной задачей [1]. В работе рассматривается подход к расчету коэффициента интервальной готовности (КИГ) узлов гетерогенной распределенной вычислительной среды (ГРВС) для модели [2] определения надежности процесса выполнения научного рабочего процесса диспетчером инструментального комплекса FDE-SWFs [3].

В рамках предложенного подхода используется программный комплекс [4], предназначенный для сбора, обработки и хранения информации об узлах ГРВС и выполняемых на них вычислительных процессах. Архитектура программного комплекса представлена на рис. 1.

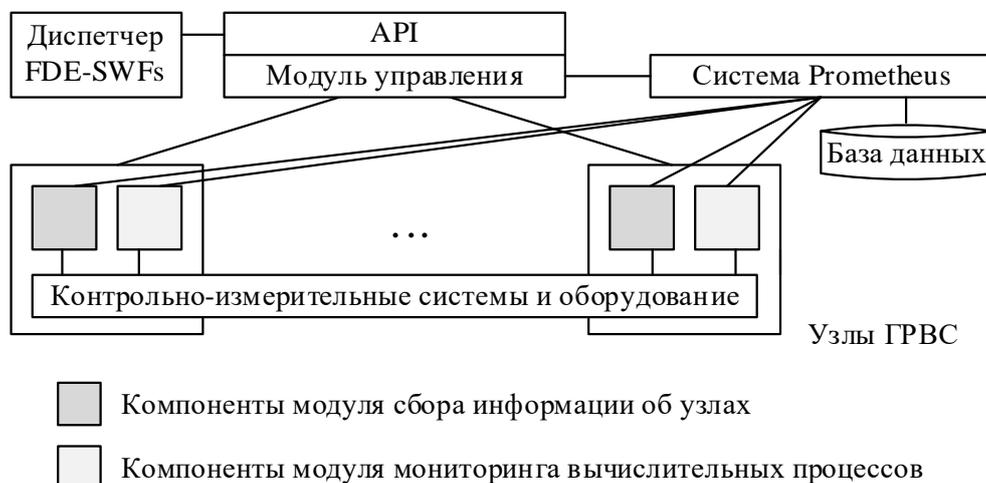


Рис. 1. Архитектура программного комплекса

Программный комплекс включает модуль управления, а также два модуля для сбора информации об узлах ГРВС и мониторинга вычислительных процессов. Взаимодействие диспетчера с данным программным комплексом осуществляется с помощью специализированного API для работы с контрольно-измерительным оборудованием ГРВС.

В рамках данного программного комплекса, разработаны новые функции на языке Python для определения вероятности того, что i -ый узел проработает безотказно в течении интервала времени длительностью t , а также расчета вероятности того, что данный узел окажется работоспособным в некоторый момент времени t_k и проработает безотказно в течение заданного периода t (расчет КИГ).

Кроме того, была введена новая метрика, отражающая работоспособность (неработоспособность) узла. API разработан с помощью фреймворка FastAPI [5]. Для сбора и хранения информации используется система Prometheus [6].

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научного-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

1. Черных А.Н., Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Горский С.А., Сидоров И.А., Костромин Р.О., Еделев А.В., Зоркальцев В.И., Аветисян А.И. Смягчение неопределенности при разработке и применении научных приложений в интегрированной среде. Труды ИСП РАН. 2021. Т. 33, № 1. С. 151–172.
2. Феоктистов А.Г. Логико-вероятностные аспекты алгоритма управления распределенными вычислениями. Вычислительные технологии. 2016. Т. 21, № 3. С. 91–102.
3. Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г., Черных А.Н. Разработка и применение сервис-ориентированных научных приложений в инструментальном комплексе FDE-SWFs. Труды ИСП РАН. 2024. Т. 35, № 6. В печати.
4. Яковлев Д., Воскобойников М., Костромин Р. Средство мониторинга узлов системы управления сервис-ориентированными научными приложениями. Материалы VI Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2024). 1-5 июля 2024 г., г. Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024. С. 220–222.
5. FastAPI framework [Электронный ресурс]. URL: <https://fastapi.tiangolo.com/>.
6. Promerheus [Электронный ресурс]. URL: <https://prometheus.io/>.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ С МЕТЕОСТАНЦИЙ И ПОСТОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА *

Т.А. Ярославцева^{1,2}, М.Ю. Глоба¹, А.С. Балева¹

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

²Новосибирский институт гигиены Роспотребнадзора
globamy@mer.ci.nsu.ru

При проведении исследований качества атмосферного воздуха в городах используются большие объемы данных мониторинга многокомпонентного загрязнения, информация о протекающих метеорологических процессах и особенностях расположения и функционирования источников эмиссии примесей. В докладе обсуждаются результаты разработки системы, позволяющей в автоматическом режиме получать и анализировать информацию с метеорологических станций и постов контроля качества воздуха, проводить статистический анализ данных измерений. Было создано три модуля системы: .dll библиотека для автоматизированного сбора архивных метеорологических данных, приложение для анализа метеоинформации и приложение для расчета корреляций между характеристиками ветра, температуры, влажности и значениями концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Информационная система реализована при помощи языка программирования C# и платформы .NET. В качестве тестовых данных использовались архивы метеоинформации ресурса «Погода и климат» и результаты мониторинга бенз(а)пирена в воздухе городов Байкальской природной территории за 2020-2024 годы, предоставленные НПО «Тайфун».

С помощью пакета HtmlAgilityPack библиотека .dll получает данные из архива «Погоды и климата». Парсинг возможен как для характеристик местоположения метеостанций по их индексу ВМО, так и для метеоданных при указании индекса требуемой станции и временного периода. Полученная информация сохраняется в базе данных, в таблицах Station и WeatherData соответственно. Библиотека поддерживает работу с базами данных на основе Microsoft SQL Server и SQLite. Также с помощью библиотеки осуществляются необходимые расчеты при проведении анализа в других приложениях.

Приложение анализа метеорологической информации является, в первую очередь, визуальным интерфейсом для работы с библиотекой. Помимо функционала получения данных, приложение позволяет проводить расчеты и получать результаты в графическом виде. Функционал приложения включает: построение таблицы по заданным параметрам, получение графиков средних значений метеопараметров, построение розы ветров и получение информации о штилях и слабых ветрах (до 2 м/с). Все вышеперечисленные расчеты могут осуществляться для любой метеостанции и для любого периода при условии наличия необходимой информации в базе данных. Также результаты всех расчетов, кроме получения информации о штилях, можно сохранить в виде книги Excel.

Приложение для анализа взаимосвязи между концентрациями бенз(а)пирена и метеорологическими данными, в частности, повторяемостью штилей, позволяет вычислять коэффициенты корреляции. Оно предоставляет возможность выбора различных временных интервалов (например, месяцы одного года или сезоны за несколько лет), что позволяет выявлять закономерности, как для краткосрочных, так и для долгосрочных периодов времени. На основе проведенных расчетов приложение

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № 075-15-2024-533.

формирует график корреляции, демонстрирующий связь между концентрациями бенз(а)пирена и повторяемостью штилей. Также приложение позволяет экспортировать результаты работы в изображения различных форматов (.png, .csv).

Разработанная система оптимизирует процесс получения и анализа данных метеорологических наблюдений. Она позволяет более эффективно осуществлять численный анализ качества атмосферного воздуха в городах.

Секция «Юные исследователи»

ОБЩЕСТВЕННЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РЕКИ КУЗЬМИХА

И.Д. Бакулин^{1,2}, Е.А.Зеленков²

¹ МАОУ Лицей ИГУ г. Иркутска,

² МАОУ ДО г. Иркутска «Дворец творчества»

Научные руководители: Зеленкова Н.А., педагог дополнительного образования МАОУ ДО г. Иркутска «Дворец творчества», nzelenkova@bk.ru, Яхненко А.С., педагог дополнительного образования МАОУ ДО г. Иркутска «Дворец творчества».

Научный консультант: Жученко Н. А., научный сотрудник ЛИИ СО РАН

В настоящее время состояние малых рек, в результате резко возросшей антропогенной нагрузки на них оценивается, как катастрофическое. Мониторинг за состоянием малых рек не производится. Река Кузьмиха сейчас находится в очень плачевном состоянии. В нашей работе мы постарались выявить основные ее проблемы и наметить пути их решения. Работа посвящена изучению экологических проблем, связанных с вопросом: «Почему в Иркутске строят прямо в руслах рек и даже над ними?».

Актуальность исследования заключается в необходимости получения текущей информации о реальном экологическом состоянии реки.

Главной целью работы является определение изменений, которые произошли с рекой Кузьмиха, оценка антропогенное воздействие на гидрохимический состав воды.

Задачи исследования:

- 1) По картам, литературным источникам, публикациям, материалам из интернета выявить перемены, которые произошли с рекой Кузьмиха.
- 2) Исследовать состояние реки на сегодняшний день.
- 3) Изучить антропогенное воздействие в водосборном бассейне реки Кузьмиха.
- 4) Выбрать контролируемые параметры антропогенного воздействия на гидрохимический состав речных вод.
- 5) Исследовать гидрохимию реки Кузьмиха по контролируемым показателям.
- 6) Разработать рекомендации по проведению мероприятий для оздоровления реки.
- 7) Привлечь внимание населения к проблеме загрязнения малых рек.

В результате полевых исследований были сделаны следующие заключения:

1. Заключение реки в коллекторы нарушает непрерывность и целостность водотока.
2. Обнаружены сбросы сточных вод с АЗС, отработанных вод с автомоек.

Для проведения гидрологических измерений нами на реке был разбит временный гидрологический пост.

При проведении рекогносцировочных работ установлены следующие виды антропогенного воздействия в водосборном бассейне:

1. Сельскохозяйственное воздействие от СНТ и ИЖЛ в черте города Иркутска и р.п. Маркова – водосборный бассейн рек Кочумиха и Большая Кузьмиха.
2. Автотранспорт, АЗС, автостоянки, автомойка, автосервис – водосборный бассейн реки Малая Кузьмиха, реки Кузьмиха.

Отбор проб производился в июне 2023 года и октябре 2023 года. Было выбрано точки на разных реках. Исследования проводились в лаборатории ЛИИ СО РАН.

Из Приложения № 6 к СанПиН 2.1.3684-21 нами выбраны *контролируемые параметры гидрохимического воздействия*

1. Нефтепродукты.
2. Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВы).

Из Таблицы № 3.3 к СанПиН 1.2.3685-21 выполнены измерения следующих *нормируемых показателей*:

1. Нефтепродукты.
2. Синтетические поверхностно-активные вещества (аСПАВы).
3. pH.
4. Химическое потребление кислорода (ХПК).
5. Удельная электропроводимость воды как косвенный показатель общей минерализации.

Проведя ряд исследований, мы можем сделать выводы:

1. Содержание аСПАВ, pH и ХПК в исследуемых пробах речных вод не превышает установленных нормативов.

2. Отмечается превышение ПДК по нефтепродуктам в районе АЗС БРК и автосервиса «Кузьмиха-Сервис». Было проведено комплексное исследование бассейна реки на нефтепродукты с определением количества взвешенного вещества.

Для оценки степени влияния загрязнения реки Ангары нефтепродуктами, содержащимися в реке Кузьмиха, был проведен ряд гидрологических измерений. Для оценки были использованы результаты гидрологических измерений на временном гидрологическом посту на реке Кузьмиха. При открытии гидрологического поста выполнены следующие работы: установка реперов, нивелирование берегов и промеры глубин, установлена водомерная рейка, проведено нивелирование поста (основного и контрольного реперов, водомерной линейки), разбит гидроствор.

Сопоставив данные о массовой концентрации нефтепродуктов в пробе, отобранной около гидрологического поста, с данными расхода воды, можно оценить сток нефтепродуктов в Ангару. По данным наших измерений, в точке 2 на реке Кузьмиха средняя концентрация НП составляет $0,080 \text{ мг/дм}^3$, или $0,080 \text{ г/м}^3$. В 2023 году расход воды составил $0,42 \text{ м}^3 / \text{с}$. В сутки это 36288 м^3 , а в год – 13245120 м^3 . Так, сток нефтепродуктов за сутки составляет 2903 г/сут. , а в год – $1\,059\,609 \text{ кг/год}$ или $1,06 \text{ т/год}$.

Проведя ряд исследований, мы можем сделать выводы:

1) Содержание аСПАВ, pH и ХПК в исследуемых пробах речных вод не превышает установленных нормативов.

2) Показатель ХПК отражает наличие органического вещества, вероятнее всего, связанного со взвесью.

3) Отмечается превышение ПДК по нефтепродуктам в районе АЗС, автостоянок, автосервисов и свалок бытового мусора.

4) Расход воды в реке Большая Кузьмиха за последние 50 лет уменьшился в 10 раз. 29

5) Сток нефтепродуктов в год в Ангару составляет $1,06 \text{ т/год}$.

6) Вода реки может использоваться только в рекреационных целях.

В ближайших планах дальнейшей работы:

1. Установить, есть ли загрязнение аСПАВАми в выходах грунтовых вод в долине реки Малая Кузьмиха.

2. Предоставить полученные данные исследований в контролирующие органы экологической безопасности.

УРНЫ, КОТОРЫЕ ПРЕДУПРЕЖДАЮТ О ПЕРЕПОЛНЕННОСТИ

А.Р. Дмитриев
МБОУ «Лицей №2», г. Братск
art.dmitriev.14@bk.ru

Идея о создании этой высокотехнологичной урны пришла из домашней бытовой ситуации. Так как я самый младший в моей семье, то одна из моих обязанностей – вынос бытовых отходов. В связи с невыполнением данной обязанности по причине забывчивости, а может, повышенной занятости, во избежание вечернего семейного конфликта со всеми вытекающими последствиями было принято решение изобрести контейнер под мусор с множественными функциями.

В процессе проектирования своего изобретения мной неосознанно было обращено внимание на переполненность мусорных контейнеров на улицах моего города и я понял, что в наше время эта проблема становится всё более актуальной. Недостаточное количество контейнеров и нерегулярный вывоз мусора приводят к тому, что улицы городов и поселков становятся засоренными, а мусорные контейнеры выглядят как бомба замедленного действия, готовая взорваться от переполнения в любой момент. Также данная проблема добавляет работу службе эпидемстанции по выведению различных грызунов и насекомых, появившихся в результате несвоевременного вывоза отходов.

Для решения этой проблемы необходимо внедрение инновационных технологий, таких как «умные» урны, которые могут предупреждать о своей переполненности. Это позволит оперативно реагировать на ситуацию и своевременно вывозить мусор, что в свою очередь способствует сохранению экологии, повышению уровня городской чистоты и общественного благополучия.

В данном проекте мной была поставлена цель - создание умной урны, которая оснащена сенсорами, определяющими уровень заполненности ее внутреннего объема. Благодаря специальному программному обеспечению, урна будет отправлять сигнал на специальную платформу, когда ее наполненность достигнет критического уровня, что позволит своевременно осуществлять вынос мусора во избежание переполнения.

Для создания урны, которая предупреждает о переполнении, мной были использованы сенсоры, которые определяют расстояние до мусора. При достижении определенного уровня сенсоры отправляют сигнал на микроконтроллер, который в свою очередь активирует световые индикаторы и отправляет уведомление на специальное мобильное приложение.

Мной также был установлен Bluetooth модуль, чтобы урна могла подключиться к мобильному устройству и передать информацию о своем состоянии. Это позволяет не только предупреждать о переполнении мусора, но и планировать его вывоз в нужное время.

Для корпуса урны мной был использован прочный и устойчивый к внешним воздействиям материал, который легко очищается и поддается переработке. Таким образом, моя урна не только функциональна, но и экологически безопасна.

В дальнейшем планируется изменение конструкции урны, а именно корпус (отсек) для Arduino будет спроектирован и напечатан на 3D-принтере. Также в будущем урна будет подключена к сети 220В через специальный адаптер.

Мой проект нацелен на улучшение экологической ситуации в городах и создание комфортной городской среды для жителей и туристов. Внедрение умных урн поможет сделать окружающую среду чище, и создаст более комфортные условия для проживания всех жителей и посетителей города.

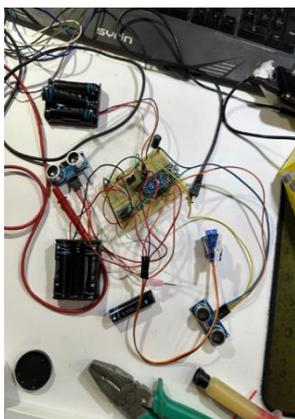


Рис. 1. Стадия проектирования и представления работоспособности урны



Рис. 2. Стадия внедрения электронных компонентов в корпус



Рис. 3. Готовый продукт



Рис. 4. Внутренности урны

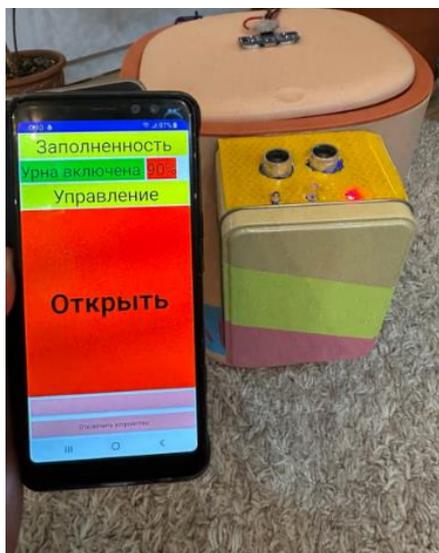


Рис. 5. Рабочее приложение, которое может получать данные о состоянии урны

1. Беляков А.А., Клименко М.В., Никулин П.С. Исследование развития и перспективы применения умных урн [электронный ресурс] / Умные урны. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44722426>
2. Григорьев А.В. Технологии и инновации в управлении отходами [электронный ресурс] / Управление отходами. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-i-innovatsii-v-upravlenii-othodami>
3. Гусев И.С. Умные города: технологии и возможности [электронный ресурс] / Возможности умных городов - Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37483669>
4. Корнилова Е.А. Современные методы управления отходами [электронный ресурс] / Транспортировка отходов. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35326789>
5. Перов А.П., Смирнова Е.И. Инновационные решения для экологической безопасности [электронный ресурс] / Переработка отходов. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-resheniya-dlya-ekologicheskoy-bezopasnosti>.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФЕКЦИОННОГО ЗАБОЛЕВАНИЯ

И.Е. Милочкина
МБОУ «Лицей №2», г. Братск
irina.bratsk78@mail.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения развития инфекционных заболеваний для дальнейшего их предотвращения. На данный момент существует множество математических моделей распространения конкретных инфекций, и все они рассматривают различные факторы, влияющие на прирост числа заражённых. Математические модели нужны для прогнозирования и анализа прогресса заболевания, а также для выявления вероятного исхода эпидемии и влияющих на него ключевых факторов. Социальная значимость исследования заключается в основном на полученных с помощью моделей сценариев дальнейшем информировании общественного здравоохранения для принятия необходимых мер по уменьшению смертности. Моделирование помогает решить, какие вмешательства необходимо провести, а каких следует избегать в зависимости от их эффективности.

Проблема исследования: необходимость выявления ключевых параметров, влияющих на прогнозирование распространения инфекционного заболевания с помощью математических моделей

Объект исследования: математическая модель не мутирующего заболевания, распространяющегося на ограниченной территории.

Предмет исследования: параметры модели, влияющие на прогнозирование распространения данного заболевания.

Цель исследования: используя математическую модель распространения инфекционного заболевания, выявить ключевые влияющие на него факторы и эффективность вмешательств.

Задачи исследования:

1. Изучить историю математического моделирования инфекционных заболеваний.
2. Проанализировать некоторые модели инфекционных заболеваний.
3. Изучить сценарии развития инфекционных заболеваний.
4. Сделать вывод о влиянии различных факторов на предполагаемый исход.

Методы исследования: анализ и синтез на базе математического моделирования, изучение и анализ литературы, изучение документов и результатов деятельности.

Гипотеза исследования: превентивные мероприятия, проводимые государством для сдерживания распространения заболевания, играют ключевую роль в его предотвращении.

В ходе работы поверхностно изучены классические модели, использующиеся для прогнозирования эпидемии, а также упрощённая динамическая модель. Выявлены ключевые параметры данных моделей, влияющие на результат: скорость передачи инфекции, скорость выздоровления и уровень смертности, задающиеся в виде констант.

Была изучена история развития математического моделирования в сфере эпидемиологии и влияние, оказанное им на эту область. Изучены параметры различных моделей и сделаны выводы о влиянии различных факторов на предполагаемый исход. Доказано, что плотность населения, скорость заражения и выздоровления подверженных индивидов, а также меры, которые государство предпринимает для борьбы с распространением инфекции, являются самыми важными параметрами.

Исследование, проведённое мной, доказывает, что математика имеет тесную связь со всеми сферами жизни, в том числе и с эпидемиологией, где различные жизненные

сценарии можно представить в виде функций, что имеет практическую пользу для учеников, стремящихся связать свою жизнь с математикой или медициной.

1. Администрация города Братска: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bratsk-city.ru/>
2. Введение в математическое моделирование [Текст] / В.Н. Ашихмин [и др.] под ред. П. В. Трусова. М., 2004. С. 36-50.
3. Каменков, К. А. Первый научный труд по санитарно-демографической статистике (К 300-летию выхода в свет статистической работы Граунта по бюллетеням смертности), 1963 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/pervyy-nauchnyy-trud-po-sanitarno-demograficheskoy-statistike-k-300-letiyu-vyhoda-v-svet-statisticheskoy-raboty-graunta-po/viewer>
4. Мартянова А.Е., Ажмухамедов И.М. SEIRD-модель динамики распространения вирусных инфекций с учётом возникновения новых штаммов, 2022 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/seird-model-dinamiki-rasprostraneniya-virusnyh-infektsiy-s-uchetom-vozniknoveniya-novyh-shtammov/viewer>
5. Васаёр Н., Вольперт В.А., Эдиев Д.М. Краткая история математической динамики населения, 2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://hal.science/hal-03328901/document>
6. Farm H.J., van der Vegt S. A., Lambert B. SEIRD model [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://como-dtc-collaboration.github.io/como-models/articles/SEIRD.html>
7. Kermack, W.O., McKendrick, A.G. A contribution to the Mathematical Theory of Epidemics [Текст] / O. W. Kermack, A. G. McKendrick – Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A. 1927. No. 115. p. 700-721.

БЕЗОПАСНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТОЛОВЫХ ПРИБОРОВ

А.М. Сливко
МАОУ «Ангарский лицей №1»
alyonaslivko@yandex.ru

В погоне за здоровым питанием мы не задумываемся, чем употребляем пищу. Материал, из которого изготавливаются столовые приборы, может быть вреден, а мы и не догадываемся об этом. Острое отравление вы вряд ли получите, но при длительном использовании некачественных столовых приборов болезней не избежать.

Актуальность: В современном мире люди редко задумываются над тем, откуда появляется та или иная вещь, обычно они просто используют их и всё. Но вот что интересно, так ли безопасно можно относиться к тому, что тебя окружает? Возьмём, например, стандартные столовые приборы, мы не знаем ни кто их сделал, ни из чего они, ни их срока годности.

Цель: узнать химический состав столовых приборов и сравнить их с нормами выпуска приборов, пригодных для использования.

Задачи исследовательского проекта:

1. Выяснить нормы и стандарты выпуска современных столовых приборов, пригодных для использования в быту. Изучить принцип работы электронного микроскопа.
2. Понять, что категорически запрещено при производстве столовых приборов.
3. Провести исследования, собрать и сравнить результаты, сделать выводы

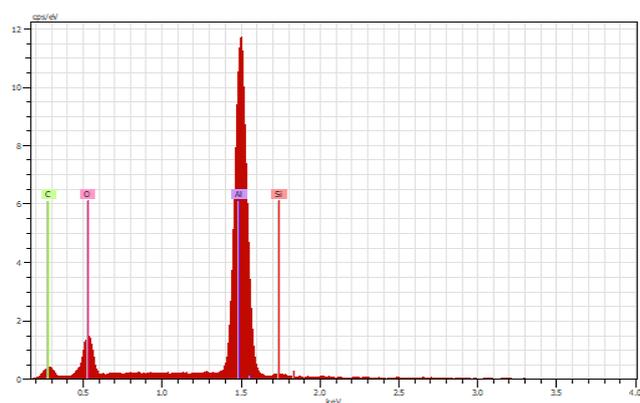
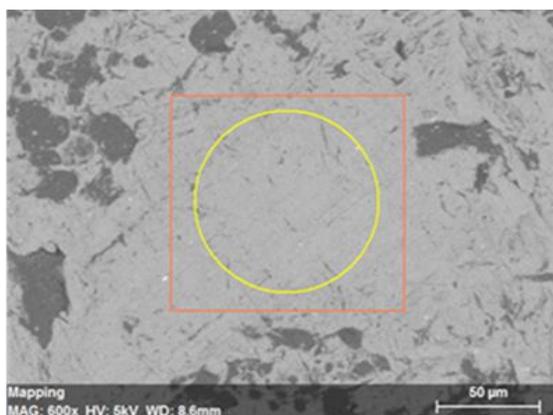
Объект исследования: столовые приборы

Предмет исследования: качество столовых приборов

В практической части мы использовали:

- 1) Электронный микроскоп фирмы Hitachi марки TM 3000.
- 2) Образцы (2 ложки и 2 вилки разных фирм и составов)

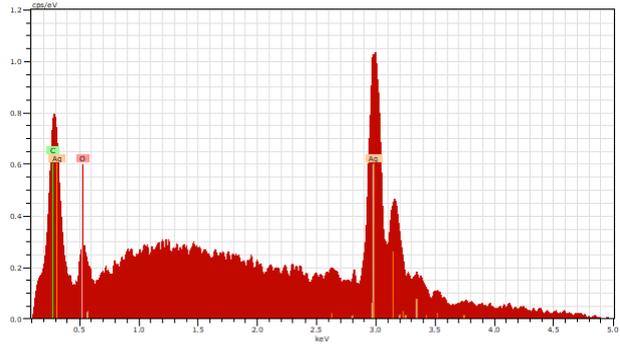
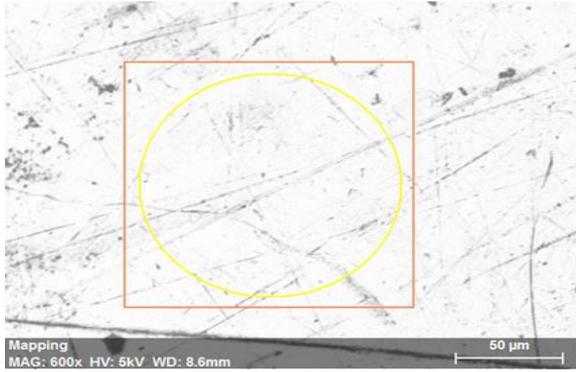
Результаты первого образца:



Element AN Series

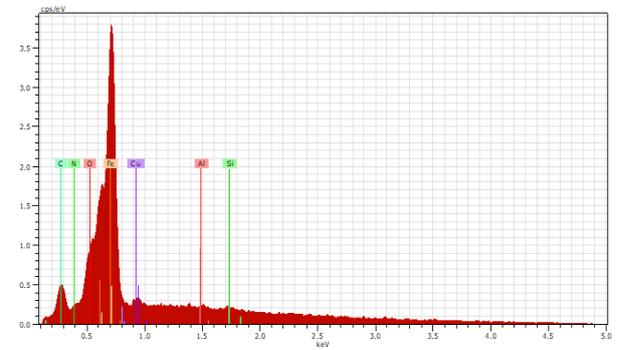
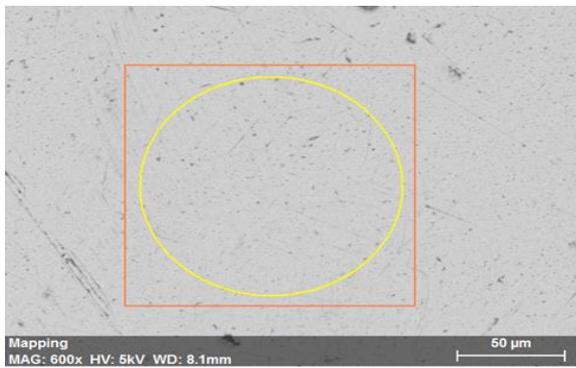
Aluminium 13 K-series 83.16 73.60
Oxygen 8 K-series 9.57 14.28 (кислород)
Carbon 6 K-series 5.22 10.38 (углерод)
Silicon 14 K-series 2.05 1.74 (кремний)

Результаты второго образца:



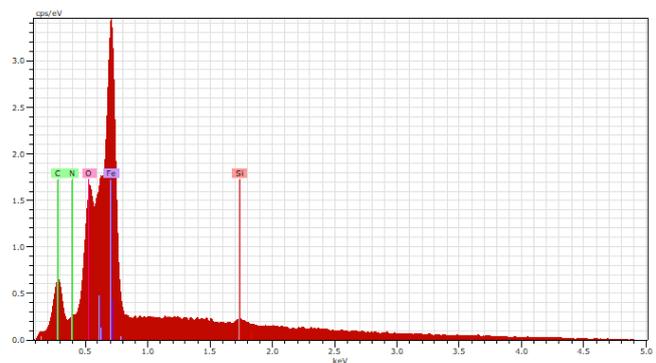
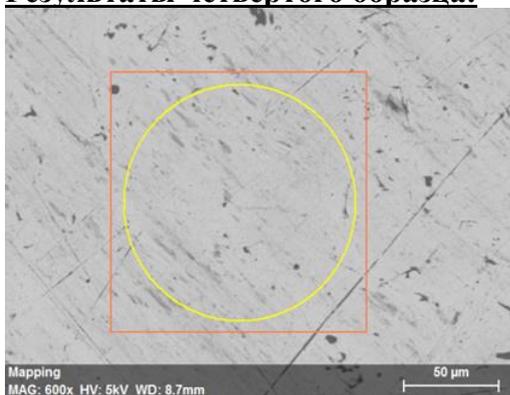
Silver 47 L-series 98.32 87.98 (серебро)
 Carbon 6 K-series 0.96 7.69 (углерод)
 Oxygen 8 K-series 0.72 4.33 (кислород)

Результаты третьего образца:



Iron 26 L-series 85.15 62.72 (железо)
 Oxygen 8 K-series 7.73 19.87(кислород)
 Carbon 6 K-series 3.68 12.62 (углерод)
 Copper 29 L-series 1.71 1.11 (медь)
 Nitrogen 7 K-series 0.78 2.29 (азот)
 Silicon 14 K-series 0.72 1.06 (кремний)
 Aluminium 13 K-series 0.22 0.34 (алюминий)

Результаты четвертого образца:



Iron 26 L-series 80.42 52.29 (железо)
Oxygen 8 K-series 13.16 29.88 (кислород)
Carbon 6 K-series 5.01 15.15 (углерод)
Silicon 14 K-series 0.75 0.97 (кремний)
Nitrogen 7 K-series 0.66 1.71 (азот)

Вывод:

1. Все образцы исследования действительно могут использоваться в быту, так как процент содержания химических элементов соответствует допустимым на основании сплавов металлов.
2. Категорически запрещено использовать сплавы, превышающие массовые доли.
3. Отсутствие запрещенных материалов в образцах свидетельствует о том, что они соответствуют стандартам безопасности.

1. О.С. Габрилян. Химия 9 класс; Сплавы металлов
2. Э.И. Денисова., В.В. Карташов, В.Р. Рычков. Прикладное материаловедение: металлы и сплавы. Учебное пособие, Издательство Уральского университета, 2018г.
3. <https://kedem.ru/tableware/stolovye-pribory/?ysclid=lty3ib34qe231011970>
4. <https://oopht.ru/nerzhaveyuschaya-stal-pishevaya/?ysclid=lty3krxjy4229857003>
5. <http://best-guide.ru/?p=22652>

СОДЕРЖАНИЕ

Абулов М.О. Краевая задача для одного уравнения эллиптического типа	3
Авраменко Ю.В., Фёдоров Р.К. Автоматическое построение карты глубины по стереопаре изображений	5
Алексеев А.Е. Обучение представлений электронных документов с использованием методов самообучения и инвариантной кластеризации	6
Аникин А.С., Горнов А.Ю. Аргументная и критериальная релаксация дискретных задач оптимизации	7
Аникин А.С., Зароднюк Т.С. Параллельная реализация метода криволинейного варьирования для невыпуклых экстремальных задач	8
Андреев А.В., Бугровский А.И. Применение эволюционных алгоритмов для максимизации влияния в булевых сетях	9
Аршинский Л.В., Лебедев В.С., Литвинова О.В. Логика с векторной семантикой в анализе данных и принятии управленческих решений	13
Асламов И.А., Макаров М.М., Кучер К.М. Проектирование гидрофизического полигона для исследования процессов тепло-массообмена в присклоновой зоне озера Байкал	17
Баркова М.В., Стрекаловский А.С. Глобальный поиск в невыпуклых задачах квадратичной оптимизации	19
Бернгардт О.И. Минимальное количество нейронов в полносвязных слоях данной нейронной сети (первое приближение)	20
Боднюк М.Е., Карамов Д.Н. Система мониторинга для поддержки исследования режимов функционирования энергетических комплексов с возобновляемой генерацией	24
Боровский А.В., Дорошенко С.С. Вывод выражения для ядра интегрального оператора в интегро-дифференциальной модели распространения эпидемии COVID-19	26
Боровский А.В., Раковская Е.Е. Применение вычислительных методов в лексикостатистических исследованиях топонимов Иркутской области	30
Боровский А.В., Юменчук А.А. Численное моделирование стохастической электрической нагрузки в жилом секторе с использованием распределения Вейбулла	33
Булах А.А. Подготовка набора данных для задачи семантического аннотирования русскоязычных таблиц	35
Васиченко А.П. Математическое моделирование беспилотника в среде MATLAB	36
Ведерников В.С., Новоселов И.Е. Развитие информационной системы учёта научной деятельности ИДСТУ СО РАН	37
Викулова Е.Р., Толстихин А.А. Разработка методов программной симуляции работы LIDAR	41
Воловиков Г.А., Берёзин К.Б., Степанов Я.О. Разработка веб-сервиса для анализа визуальных данных и планирования путешествий	43

Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г. Диспетчер научных рабочих процессов	45
Гасников А.В., Горнов А.Ю. Почему для задач оптимального управления плохо работают алгоритмы, основанные на теории конечномерной оптимизации	49
Гаченко А.С. Разработка подходов по сбору и обработке разноформатных данных для цифрового мониторинга байкальской природной территории и озера Байкал	51
Голушко С.К., Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С., Аникин А.С., Амелина А.В., Брындин Л.С., Беляев В.А., Горынин А.Г. Алгоритм решения краевой задачи для нелинейной динамической системы	53
Горнов А.Ю. Дисбаланс алгоритмических возможностей классических и игольчатых вариаций управления	54
Горнов А.Ю. Метод параболической интерполяции мюллера для задач безусловной минимизации	55
Горнов А.Ю. Модификация алгоритма одномерного поиска брента для методов градиентной оптимизации	56
Горнов А.Ю. Три правила успешного алгоритма для задачи оптимального управления	57
Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С. Методики численной оценки градиента в задаче оптимального управления	58
Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С., Аникин А.С. Методика численного решения начально-краевой задачи в системе с распределенным запаздыванием	59
Горнов А.Ю., Сороковиков П.С. Проблема исследования свойств генетического алгоритма непрерывной оптимизации	61
Горнов А.Ю., Тятюшкин А.И., Зароднюк Т.С., Аникин А.С., Сороковиков П.С. Вычислительная технология для задач аппроксимации управляемой системы с переменным запаздыванием	62
Груздева Т. В., Ушаков А.В. Двухуровневая модель поставок угольных ресурсов с запасами	63
Груздева Т. В., Ушаков А.В. Оптимизационный подход к задачам машинного обучения с дивергенциями брегмана и частичным привлечением учителя	64
Даренский П.А., Пауль С.В. Математическое моделирование сети передачи данных между центром управления полетами и группой БПЛА со стратегией развертывания без взаимодействия	66
Добрынина А.А., Саньков В.А., Король С.А., Кичигина Н.В., Рыбченко А.А. Сейсмические эффекты паводков на р. Кынгарга (Тункинская долина, Восточный Саян)	69
Допиро Н.В. Разработка генератора программного средства для проведения анкетирования в платформе JAICP на основе платформенно-зависимой модели	71
Доронин С.В., Рейзмунт Е.М. Расчетные нагрузочные диаграммы тросовых амортизаторов: построение на базе ограниченных экспериментальных данных и оценка погрешности	75

Душкина Н.А., Толстихин А.А. Методы построения матрицы перспективного преобразования для сшивки изображений	78
Дыхта В.А. Позиционные усиления метода Кротова	80
Еделев А.В., Карамов Д.Н., Башарина О.Ю., Огородников В.А., Каргаполова Н.А., Акентьева М.С. Применение стохастических «Генераторов погоды» в структурно-параметрической оптимизации энергетических комплексов локального уровня	86
Ефимова Н.В., Зароднюк Т.С., Горнов А.Ю., Сороковиков П.С. Методика оценки сверхсмертности в период пандемии на основе эволюционных моделей	87
Жарков М.Л., Казаков А.Л., Лемперт А.А. Сценарное моделирование развития Северобайкальского участка БАМа с учетом природоохранных требований	89
Жарков М.Л., Лемперт А.А., Супруновский А.В. О применении сетей массового обслуживания при моделировании угольного перегрузочного комплекса	91
Загородников М.В. Восстановление текстового слоя PDF-документов со сложным фоном	92
Зырянова К.М., Тимофеев Е.М., Ожигова П.А. Визуализация и анализ факторов снижения видового разнообразия в заповедниках Байкальского региона	93
Иванушкин Е.Д. Разработка приложения для автоматизации визуализации данных сейсмической активности на основе Python	94
Игнатъев И.Н. Создание гибкого фреймворка для организации научных мероприятий на базе LARAVEL	95
Pyutko V.P., Kamzolkin D.V., Ternovski V.V. Time-optimal control of a harmonic oscillator with variable frequency	96
Иртегов В.Д., Титоренко Т.Н. О некоторых результатах качественного анализа уравнений движения шара с многосвязной полостью, заполненной идеальной жидкостью	98
Казаков А.Л., Спевак Л.Ф. Теорема существования, точные и приближенные решения с нулевыми фронтами для вырождающейся параболической системы "Хищник-жертва"	99
Кедрина А.А., Сахарова М.И., Серебренникова П.О., Турусина Е.А. Процесс создания аналитических историй на основе визуализации данных о заповедных территориях	102
Кириллова Т.К., Нацагдорж Ж. Исследование технологического процесса ремонта деталей локомотива для построения обучающего чат-бота	103
Климонов М.С. Классификация пользователей на основе применения сервисов	106
Кондратьев В.С. Динамический подбор ограничений, ослабляющих трудные примеры задачи проверки эквивалентности булевых схем	107
Конова Е.С., Балахчи А.Г. Обучающая игра «Типы диаграмм» с использованием технологий дополненной реальности	111
Копылов Д.Е. Восстановление параметра составной системы гиперболических и обыкновенных дифференциальных уравнений методами оптимального управления	112

Копылов Д.Е., Карпенков М.А., Щурик М.В. Сравнение методов решения задач оптимального управления из библиотек языка Python с методом условного градиента	113
Копылов Д.Е., Михайлов А.А. Графовые нейронные сети в задаче восстановления макета документов	115
Косов А.А. Реконфигурация динамических регуляторов при неполном измерении вектора состояния и возможными отказами и восстановлениями датчиков	117
Косов А.А., Семенов Э.И. О точных решениях многомерного обобщенного уравнения Монжа-Ампера	118
Косьянов Н.О. Линейные эпидемические задачи на примере распространения малярии	119
Кузнецов А.А. Об одной краевой задаче с вырождением для параболической системы «Хищник-жертва»	121
Кузнецов А.А., Михайлов А.А. Защита от атак с использованием омоглифов на модели NLP	122
Кузьменко Е.Т., Горнов А.Ю., Кузьменко В.В. Создание математической модели для оценки клинической информативности цитологических методик цервикального скрининга	123
Кузьминых Р.А., Ярославцева Т.В., Рапуга В.Ф., Леженин А.А. Модели и методы интерполяции полей атмосферного загрязнения территорий города	125
Куклин С.Г., Аникин А.С., Горнов А.Ю. Графический пользовательский интерфейс для задачи анализа данных Холтеровского мониторинга	126
Кулакова И.М., Лебедева О.А., Ерофеев Е.В. Программное сопровождение оценки транспортного спроса с использованием языка программирования Python	127
Леженин А.А., Рапуга В.Ф., Кузьминых Р.А. Оценка параметров подъёма дымовых шлейфов ТЭЦ по спутниковой информации	129
Лемперт А.А., Мадаев И.А. О построении минимального остовного дерева в условиях динамической среды	130
Лемперт А.А., Мадаев И.А., Чан Т.В. О нахождении оптимального маршрута движения судов в акватории порта с учетом возможных препятствий	131
Лизюра О.Д. Асимптотический анализ RQ-системы с разнотипными вызываемыми заявками и произвольным распределением времени обслуживания	132
Линявский А.В. Автоматическое планирование в задачах принятия решений	134
Ломов В.П. О векторе поляризации фермионов во внешнем поле	137
Мамаш Е.А., Пестунов И.А. Оценка параметров состояния поверхностного слоя акватории озера Байкал по данным спутникового дистанционного зондирования	139
Мануйлова Е.А., Моисеева С.П. Однолинейная СМО вида $M/(M_1, M_2)/1(N_1, N_2)$ с абсолютным приоритетом и нетерпеливыми заявками	141
Марков Ю.А., Маркова М.А. Гамильтонов формализм для мягких и жестких возбуждений неабелевой плазмы. Параферми-статистика порядка 2	143

Марков Ю.А., Маркова М.А., Марков Н.Ю. Классическая матрица рассеяния для жестких и мягких возбуждений в высокотемпературной кварк-глюонной плазме	145
Марков Ю.А., Маркова М.А., Марков Н.Ю. Потери энергии быстрой цветной частицы в кварк-глюонной плазме	148
Межова Е.В., Балахчи А.Г. Модели и методы сонификации данных	151
Минарченко И.М., Батбилэг С. Модель взаимодействия нескольких стран на рынке угля как задача поиска обобщённого равновесия по Нэшу	153
Моисеева С.П. Модели многомодальной передачи информации	155
Морозов Н.В., Золотов О.А. Численное интегрирование гравитационной задачи N тел с сохранением энергии и углового момента	157
Николайчук О.А., Пестова Ю.В., Косогоров Д.Е. Система поддержки принятия решений выбора туристических услуг на основе открытых данных	160
Николайчук О.А., Пестова Ю.В., Косогоров Д.Е., Павлов А.И., Поддубный И.А. Сервис мониторинга сферы регионального туризма на основе анализа данных из открытых источников	161
Огорь И.П., Ясеновский И.С., Шигаров А.О. Regtab online: веб-приложение для извлечения данных из машиночитаемых таблиц с произвольной структурой на основе RTL-паттернов	162
Орлов А.В., Минарченко И.М., Груздева Т.В. О решении задачи двухуровневой оптимизации на электроэнергетической сети с системным оператором на верхнем уровне	164
Охотин И.И. Создание моделей и программного средства для автоматического обнаружения заголовков таблиц	166
Пауль С.В. Математическая модель многомодального потока поступления информации	167
Пашинин А.А., Опарин Г.А., Богданова В.Г. Технология формирования вычислительной инфраструктуры для качественного анализа двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений	170
Пененко А.В., Гочаков А.В., Антохин П.Н., Пененко В.В. Исследование алгоритма усвоения данных мониторинга на основе оператора чувствительности для трехмерной модели переноса и трансформации примесей	171
Пестова Ю.В., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Дородных Н.О. Анализ Гарей и динамики постпирогенного восстановления растительности на основе данных дистанционного зондирования земли	173
Петренко П.С. О робастной управляемости дифференциально-алгебраических уравнений с параметрической неопределенностью	174
Пилипчук Н.С., Балахчи А.Г. Применение нейросетевых технологий для автоматизированного создания и редактирования видеоконтента	175
Пинчук К.А., Пашкова В.В., Столбов А.Б. Разработка генератора навыка для проведения анкетирования на платформе «Яндекс-Диалоги»	177
Погодаев Н.И., Старицын М.В. Метод погружения и «супер-двойственность» в задачах оптимального управления	180

Поддубный И.А. Вопросно-ответные системы на основе таблиц: обзор области и концепция решения	181
Попова А.К. Влияние дополнительных данных на точность спутниковой классификации лесов методами машинного обучения	182
Пыжьянов Д.И., Сарапулова Г.И. Кластеризация геохимических параметров почв в зоне газоконденсатного месторождения	184
Раджабов А.Е. Моделирование пропегатора кварка с конфейнментом	185
Раджабов А.Е. Оптимизация численных расчётов при помощи программы символьных вычислений Form	186
Разманов А.К., Михайлов А.А. Защита извлечение информации из изображений документов с использованием гибкого шаблона	187
Рапута В.Ф., Леженин А.А. Численный анализ данных мониторинга длительного загрязнения атмосферы городов	188
Самсонюк О.Н. Необходимые условия оптимальности импульсных процессов	189
Сороковиков П.С. Комбинированный алгоритм нелокальной оптимизации на основе методов биогеографии и L-BFGS	191
Сороковиков П.С. Об одном способе гибридации методов генетического поиска и роя частиц	193
Сороковиков П.С. Численное исследование свойств алгоритма цветочного опыления для решения многоэкстремальных задач оптимизации	195
Столбов А.Б. О проектировании сценариев для анализа сложных объектов с использованием подхода компонентно-ориентированного моделирования	197
Стрельников А.Н., Горнов А.Ю. Численное исследование предельных возможностей «велосипедной» модели автомобиля	199
Тарасенко А.В. , Моисеева С.П., Полин Е.П. Асимптотический анализ гетерогенной бесконечнолинейной СМО с параметрами, зависящими от состояния случайной среды	201
Темникова И.В. , Горнов А.Ю. Моделирование рисков поражения верхних отделов респираторного тракта как осложнений Гастроэзофагеальной рефлюксной болезни	203
Тимофеев Е.М. Написание программного обеспечения для прибора, получающего и обрабатывающего световой спектр	204
Тобола К.В. Методы контрастного обучения в задачах семантического аннотирования табличной информации	206
Толстихин А.А. Организация движения мобильных роботов в среде с препятствиями на основе метода поведенческой структуры	207
Трифонов Р.И. Классификация блоков документов с использованием графовых нейронных сетей	209

Турусина Е.А., Балахчи А.Г. Цифровые портреты: визуализация многофакторных данных при помощи пиктографиков	211
Тюленина Я.А., Фёдорова Е.А. Расчёт параметров функционирования гибридной энергетической системы на основе математической модели бесконечнолинейной смо с двумя блоками обслуживания	213
Тюрнев И.Н., Цыбекмитова Г.Ц., Асламов И.А. Первое применение погружного спектрофлуориметра Phycorrobe для исследования фитопланктона в озере Байкал	214
Тятюшкин А.И. Алгоритмы второго порядка для параметрически управляемых динамических систем	218
Угорская Я.А., Балахчи А.Г., Паткина П.П. Интеллектуальные ассистенты в дополненной реальности	219
Узаков З. Оценка степени сложности пузырькового алгоритма сортировки	221
Улзийхутаг Баяр-Эрдэнэ. Проектирование цифрового ассистента для задач монгольской железной дороги	224
Фёдоров Р.К. Подсистема выполнения WPS сервисов	227
Финогенко И.А. Функционально-дифференциальные уравнения с разрывной правой частью: проблемы и методы исследований	229
Хамисов О.В., Батбилэг С. Двухуровневое моделирование поведения нескольких участников на рынке угля	231
Хмельнов А.Е. Построение цифровых моделей прибрежного рельефа по контурам береговых линий со спутниковых изображений SENTINEL-2	233
Цициашвили Г.Ш., Осипова М.А. Удаление ребер в графах переходных интенсивностей для открытых сетей массового обслуживания	236
Чекан М.А. Автоматизация разработки мультиагентных систем с использованием иерархических машин состояний	239
Чистяков В.Ф., Чистякова Е.В. О свойствах линейных интегро-алгебраических уравнений фредгольма и вольтерра и методах их численного решения	241
Шигаров А.О. REGTAB API: инструментальное средство разработки прикладного программного обеспечения для извлечения реляционных данных из машиночитаемых таблиц с произвольной структурой на основе паттернов	242
Шипицын М.Н., Фёдоров Р.К. О некоторых методах анализа исходного кода с помощью абстрактных синтаксических деревьев	244
Щеглов А.Ю., Шэнь Цин Единственность и условная устойчивость решений обратных задач для серии моделей динамики структурированных по возрасту популяций	245
Юмашев Е., Карамов Д.Н., Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г. Сервис-ориентированное приложение получения, обработки и анализа метеорологических данных	247
Яковлев Д.С., Феоктистов А.Г. Расчет коэффициента интервальной готовности узлов гетерогенной распределенной вычислительной среды	251

Ярославцева Т.А., Глоба М.Ю., Балева А.С. Разработка автоматизированной системы анализа данных с метеостанций и постов контроля качества воздуха 253

Секция «Юные исследователи»

Бакулин И.Д., Зеленков Е.А. Общественный экологический мониторинг реки Кузьмиха 255

Дмитриев А.Р. Урны, которые предупреждают о переполненности 257

Милочкина И.Е. Математическое моделирование процесса распространения инфекционного заболевания 259

Сливко А.М. Безопасность использования столовых приборов 261