

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА**

---

**Факультет вычислительной математики и кибернетики**

**СБОРНИК ТЕЗИСОВ  
ЛУЧШИХ ВЫПУСКНЫХ  
КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ  
ФАКУЛЬТЕТА ВМК МГУ 2023  
ГОДА**

**МОСКВА**

---

**2023**

## Разработка информационной системы по алфавитным справочникам студентов Московского университета

*Агафонов Александр Николаевич*

*Лаборатория вычислительного практикума и информационных систем  
e-mail: aan0983@mail.ru*

*Научный руководитель — доц. Леонов Михаил Васильевич*

*Научный консультант — доц. Леонов Михаил Васильевич*

**Введение.** Одной из актуальных задач, имеющих комплексный характер, является оцифровывание информации, накопленной предыдущими поколениями. Это позволяет не только удобно использовать и более эффективно распространять информацию, в том числе в научных исследованиях и других областях, но и обеспечить сохранность на долгие годы без риска утраты или повреждения.

В течение нескольких десятилетий XIX и XX века Московский Университет выпускал «Алфавитные списки студентов». На факультете ВМК в лаборатории вычислительного практикума и информационных систем осуществляется проект поэтапной разработки и заполнения данными баз данных (далее по тексту - БД) по дореволюционным студентам Московского Университета. Представленная работа выполнена в рамках этого проекта.

**Задачи.** В рамках работы требовалось решить следующие задачи:

- разработать программный инструмент (Информационную систему), облегчающий создание БД студентов определенного года на основе оцифрованной скан-копии дореволюционного справочника;
- применить этот инструмент для создания БД по 4-5 учебным годам;
- реализовать в программном инструменте возможность управления данными посредством фильтрации и их в редактируемом формате, редактирования данных непосредственно в системе либо посредством загрузки файла с откорректированными данными;
- реализовать возможность просмотра исходной фотографии страницы справочника при работе в Информационной системе.

**Набор данных.** При решении поставленной задачи были оцифрованы данные и обработаны фотографии страниц 5 справочников студентов Московского Университета (1889, 1891, 1893, 1894, 1895 годов). Общее количество обработанных страниц – 1750, количество внесенных записей – 18749, количество полей для одной записи – 13.

**Реализация.** При создании БД основным критерием к выбору инструментария для построения ИС было свободное распространение и надежность компонентов:

1. Для хранения информации БД была выбрана СУБД MySQL.
2. Для создания веб-интерфейса загрузки данных в БД использовался язык программирования PHP и MySQL.

3. В целом для создания веб-интерфейса использовались CSS, HTML, JS, PHP.

4. Обеспечена портируемость системы, реализован запуск на UsbWebServer (либо на любом ином сервере).

**Результаты.** В рамках выпускной квалификационной работы реализовано:

- Разработан программный комплекс (с использованием PHP, JS, HTML, CSS), представляющий собой веб-клиент для загрузки, просмотра и редактирования данных справочников студентов Московского Университета, с возможностью просмотра скан-копий оригиналов страниц справочников.

- Обеспечена возможность переноса Информационной системы и ее локального использования.

- Обеспечена возможность импорта данных из системы, как целиком, так и согласно выбранных критериев. Удобная функция подсчета отфильтрованных позиций позволяет выполнять простую аналитику (подсчет числа студентов семестра, факультета и т.д.).

- В перспективе имеется возможность расширения функциональности системы, добавления сводных таблиц и группировок, что позволит выводить и формировать статистические данные о студентах.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Prokhorenok N.A. HTML, JavaScript, PHP and MySQL. Gentleman's Set Webmasters. 3rd ed., reprint. and additional – St. Petersburg: BVH-Petersburg, 2010. – 912 p.
- [2] Welling L., Thomson L., Шаблонов Ш. Ш. Development of web applications using PHP and MySQL. Translated from English - M.: Publishing house «Williams», 2017. – 760 p.
- [3] Nixon R.. Creating dynamic websites using PHP, MySQL, JavaScript, CSS and HTML5. 5th edition, reprint and additional - St. Petersburg: Publishing house «Peter», 2019. – 816 p.
- [4] Vasiliev A.N. JavaScript programming in examples and tasks. Publishing house «Eksmo», 2022. – 720 p.

## О поиске максимальных логических закономерностей в задаче классификации по прецедентам

*Анисимова Диана Вадимовна*

*Кафедра математических методов прогнозирования*

*e-mail: diana.anisimova.01@mail.ru*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. доц. Дюкова Елена Всеволодовна*

Задача классификации по прецедентам является одной из центральных задач машинного обучения и заключается в следующем. Под прецедентной (обучающей) информацией понимается совокупность примеров изучаемых объектов, в которой каждый объект представлен в виде числовой последовательности, полученной на основе измерения или наблюдения ряда его параметров или характеристик, называемых признаками. В самом простом случае прецеденты делятся на два непересекающихся класса (класс положительных и класс отрицательных примеров). В общем случае число классов может быть больше двух. Требуется уметь классифицировать объекты, не вошедшие в обучающую выборку, то есть по признаковому описанию каждого такого объекта определять, какому классу он принадлежит.

Существует несколько подходов к решению сформулированной задачи, одним из них является дискретный (логический) подход. Этот подход возник в связи с необходимостью прогнозировать редкие события, для которых нет достаточного статистического материала.

Считается, что каждый признак имеет ограниченное число допустимых значений, которые кодируются целыми числами. Анализ прецедентной информации сводится к поиску в признаковых описаниях обучающих объектов таких специальных фрагментов, которые позволяют различать прецеденты из разных классов. Искомые фрагменты, как правило, имеют содержательное описание в той области, в которой решается задача, и называются логическими закономерностями (ЛЗ) [1]. По их наличию или отсутствию в описании распознаваемого объекта решается задача классификации. Главными считаются вопросы корректного обучения, позволяющего безошибочно классифицировать прецеденты.

Один из наиболее используемых типов ЛЗ — максимальные ЛЗ. Для их поиска в [2] был предложен так называемый комбинаторный алгоритм (КАР). У этого алгоритма есть два существенных недостатка: низкая точность классификации из-за большого числа отказов от классификации и длительное время работы из-за многократного перебора одних и тех же наборов значений признаков. С указанными недостатками позволяет бороться предложенный в ВКР алгоритм КАР2, являющийся модификацией КАР и основанный на двух следующих идеях. Первая из них — многократное применение комбинаторного алгоритма к тем прецедентам, которые не содержат ни одну из уже найденных ЛЗ. Такая процедура позволяет найти большее число ЛЗ и повысить точность классификации. Вторая идея — использование FP-дерева

(frequent-pattern tree) [3], применяемого обычно для быстрого нахождения в данных (максимальных) частых элементов. Благодаря этой структуре каждый набор значений признаков рассматривается не более одного раза. Экспериментально показано, что КАР2 работает в сотни раз быстрее КАР и показывает более высокое качество классификации.

Не всегда решение задачи классификации возможно в классической постановке, так как она не учитывает наличие сложных отношений на множествах допустимых значений признаков. Представляет интерес случай, когда каждый признак принимает значения из некоторого частично упорядоченного множества чисел.

По аналогии с тем, как это было сделано в [4], в ВКР обобщено понятие максимальной ЛЗ на случай частично упорядоченных данных. На основе КАР2 был построен алгоритм КАР2+, который позволяет работать с информацией, представленной в виде декартова произведения конечных частично упорядоченных множеств.

Проведено экспериментальное сравнение алгоритмов семейства КАР, алгоритмов голосования по тупиковым представительным элементарным классификаторам [4] и классических алгоритмов машинного обучения — логистической регрессии, случайного леса и градиентного бустинга. Для использования алгоритмов, работающих с частично упорядоченными данными, выборки были преобразованы с использованием быстрой линейной процедуры независимого упорядочивания признаков, описанной в [5]. Экспериментально показано, что алгоритм КАР2+, работая в сотни раз быстрее комбинаторного алгоритма, показывает и лучшее качество среди всех тестируемых алгоритмов на большинстве задач.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] G. Alexe, S. Alexe, T. O. Bonates, A. Kogan. Logical Analysis of Data — the vision of Peter L. Hammer // *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*. 2007. Vol. 49, N 1. P. 265–312.
- [2] Ковшов Н. В., Моисеев В. Л., Рязанов В. В. Алгоритмы поиска логических закономерностей в задачах распознавания // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2008. Т. 48, № 2. С. 329–344.
- [3] Charu C. Aggarwal, Jiawei Han. *Frequent Pattern Mining*. Springer, 2014. 471 p.
- [4] Дюкова Е. В., Масляков Г. О., Прокофьев П. А. О логическом анализе данных с частичными порядками в задаче классификации по прецедентам // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2019. Т. 59, № 9. С. 1605–1927.
- [5] Дюкова Е. В., Масляков Г. О. О выборе частичных порядков на множествах значений признаков в задаче классификации // *Информатика и её применения*. 2021. Т. 15, № 4. С. 72–78.

# Исследование качества восстановления сжатого видео с использованием нейросетевых методов повышения разрешения

*Богатырев Евгений Николаевич*

*Кафедра интеллектуальных информационных технологий*

*e-mail: evgeneu.zimin@graphics.cs.msu.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. м.н.с. Ерофеев Михаил Викторович*

*Научный консультант — аспирант Молодецких Иван Андреевич*

Популярность задачи повышения разрешения растет с каждым днем, новые нейросетевые алгоритмы появляются ежемесячно. Несмотря на это, многие алгоритмы повышения разрешения не приспособлены к работе со сжатыми видео и производят визуально некачественные результаты при работе с такими данными. Более того, до сих пор нет хорошего способа оценить качество работы метода повышения разрешения при восстановлении видео после сжатия.

К 2023 году на видеотрафик приходится более 80% всего потребительского интернет-трафика, и, по прогнозам, эта цифра будет расти и дальше. Разрешение экранов мобильных устройств растет, и современные мобильные устройства имеют разрешение FullHD или выше. Однако сотовые сети по-прежнему имеют низкую пропускную способность в большинстве регионов мира, поэтому сжатие видео при минимальном изменении визуального качества видео сейчас как никогда актуально. Видео, которое передается по сети, чаще всего предобрабатывается определенными методами сжатия, чтобы оптимизировать скорость передачи.

Многие методы повышения разрешения обучаются на наборах данных, не содержащих видео с искажениями сжатия, поэтому при работе с такими данными эти методы не могут восстановить качественное видео высокого разрешения. Наиболее часто возникает ситуация, когда метод повышения разрешения сохраняет или даже усиливает искажения, появившиеся на входном видео в процессе сжатия.

Так как на сегодняшний день большая часть видео в сети передается в сжатом виде, задача оценки качества работы методов повышения разрешения на сжатых видео является актуальной. Самый точный способ оценить качество восстановления видео — это проведение субъективного сравнения, однако этот подход требует материальных и временных затрат. Качество видео можно также оценить с помощью существующих объективных методов оценки качества видео, таких как PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) и SSIM (Structural Similarity Index Measure) [1]. Однако эти методы показывают низкую корреляцию с субъективными оценками при работе с видео, полученными методами повышения разрешения [2].

В данной работе представлен тестовый набор данных, состоящий из видео, закодированных видекодеками 5 различных стандартов. На основе по-

строенного тестового набора данных проведен анализ работы 17 различных алгоритмов повышения разрешения видео. Оценка качества работы методов проводилась с помощью объективных методов оценки качества видео (PSNR, SSIM [1], VMAF, LPIPS [3], ERQA [4], MDTVSFA [5]), а также с помощью субъективного сравнения, в котором приняло участие 5,662 человека.

Также в данной работе представлен метод оценки качества восстановления видео после сжатия, предсказывающий качество видео по признакам его кадров с помощью метода опорных векторов. Разработанный метод показывает более высокую корреляцию с субъективными оценками, чем другие существующие методы оценки, на представленном наборе данных.

Метод оценки качества	PLCC	SRCC	KRCC
SSIM [1]	0,159	0,165	0,153
PSNR	0,190	0,285	0,243
VMAF	0,352	0,449	0,343
LPIPS [3]	0,435	0,452	0,362
ERQA [4]	0,607	0,656	0,502
MDTVSFA [5]	0,639	0,641	0,528
Разработанный метод	<b>0,868</b>	<b>0,897</b>	<b>0,744</b>

Табл. 1: Корреляция методов оценки качества видео с субъективными оценками.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Image quality assessment: from error visibility to structural similarity / Wang Zhou, Bovik Alan C, Sheikh Hamid R, and Simoncelli Eero P // IEEE transactions on image processing. — 2004. — Vol. 13, no. 4. — P. 600–612.
- [2] Huynh-Thu Quan, Ghanbari Mohammed. The accuracy of PSNR in predicting video quality for different video scenes and frame rates // Telecommunication Systems. — 2012. — Vol. 49, no. 1. — P. 35–48.
- [3] The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric / Zhang Richard, Isola Phillip, Efros Alexei A, Shechtman Eli, and Wang Oliver // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. — 2018. — P. 586–595.
- [4] ERQA: Edge-restoration quality assessment for video super-resolution / Kirillova Anastasia, Lyapustin Eugene, Antsiferova Anastasia, and Vatolin Dmitry // arXiv preprint arXiv:2110.09992. — 2021.
- [5] Unified quality assessment of in-the-wild videos with mixed datasets training / Dingquan Li, Tingting Jiang, and Ming Jiang // International Journal of Computer Vision — 2021. — Vol. 129, — P. 1238-1257.

## Обратные задачи для уравнения теплопроводности в случае малого коэффициента теплопроводности

*Бочкарев Семен Владиславович*

*Кафедра математической физики*

*e-mail: bochkasema@mail.ru*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Денисов Александр Михайлович*

В процессе выполнения ВКР было проведено исследование двух обратных задач для уравнения теплопроводности в случае малого коэффициента теплопроводности. В работе [1] были предложены методы решения подобных задач, основанные на использовании разложения решения начально-краевой задачи по малому параметру. Идеи этой работы были использованы для построения приближенных решений других обратных задач.

Первая обратная задача имеет вид

$$u_t(x, t) = \varepsilon^2 u_{xx}(x, t), \quad (x, t) \in Q_T, \quad (1)$$

$$u_x(0, t) = u_x(\pi, t) = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (2)$$

$$u(x, 0) = \varphi(x), \quad 0 \leq x \leq \pi, \quad (3)$$

где  $Q_T = \{(x, t) : 0 \leq x \leq \pi, 0 \leq t \leq T\}$ ,  $\varepsilon \in (0, 1)$ .

Требуется определить  $\varphi(x)$ , если задана дополнительная информация о решении задачи (1) - (3)

$$u(x, T; \varepsilon) = g(x; \varepsilon), \quad 0 \leq x \leq \pi. \quad (4)$$

Задача (1) - (4) рассматривается в предположении, что функция  $\varphi(x)$  удовлетворяет следующим условиям:

$$\varphi \in C^{2m+3}[0, \pi], \quad \varphi^{(2k+1)}(0) = \varphi^{(2k+1)}(\pi) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, m + 1.$$

Идея метода состоит в разложении решения задачи (1)-(3) по параметру  $\varepsilon$ :

$$u(x, t; \varepsilon) = \varphi(x) + \sum_{k=1}^m \varepsilon^{2k} \frac{t^k}{k!} \varphi^{(2k)}(x) + O(\varepsilon^{2(m+1)}).$$

Учитывая это разложение при  $m = 1$ , определим приближенное решение обратной задачи  $\varphi_1(x; \varepsilon)$  как решение краевой задачи

$$\varepsilon^2 T \varphi_1''(x; \varepsilon) + \varphi_1(x; \varepsilon) = g(x; \varepsilon), \quad 0 \leq x \leq \pi,$$

$$\varphi_1'(0; \varepsilon) = \varphi_1'(\pi; \varepsilon) = 0.$$

В этом случае возникает условие  $|\sin(\varepsilon^{-1} T^{-1/2} \pi)| \geq a > 0$ . От него можно отказаться, если дополнительно известно значение точного решения в нуле  $\varphi(0) = \varphi_{00}$ .

Определим в этом случае приближенное решение обратной задачи как решение задачи Коши



$$\varepsilon^2 T \varphi_1''(x; \varepsilon) + \varphi_1(x; \varepsilon) = g(x; \varepsilon), \quad 0 \leq x \leq \pi,$$

$$\varphi_1(0; \varepsilon) = \varphi_{00}, \quad \varphi_1'(0; \varepsilon) = 0.$$

Вторая обратная задача имеет вид

$$u_t(x, t) = \varepsilon^2 u_{xx}(x, t) + f(x)p(t), \quad (x, t) \in Q_T, \quad (5)$$

$$u_x(0, t) = u_x(\pi, t) = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (6)$$

$$u(x, 0) = 0, \quad 0 \leq x \leq \pi, \quad (7)$$

где  $Q_T = \{(x, t) : 0 \leq x \leq \pi, 0 \leq t \leq T\}$ ,  $\varepsilon \in (0, 1)$ .

Требуется определить  $f(x)$ , если известна  $p(t)$  и задана дополнительная информация о решении задачи (5) - (7)

$$u(x, T; \varepsilon) = g(x; \varepsilon), \quad 0 \leq x \leq \pi. \quad (8)$$

Задача (5) - (8) рассматривается в предположении, что функция  $f(x)$  удовлетворяет следующим условиям:

$$f \in C^{2m+3}[0, \pi], \quad f^{(2k+1)}(0) = f^{(2k+1)}(\pi) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, m + 1.$$

$$\text{а } p \in C[0, T].$$

Справедливо следующее асимптотическое представление:

$$u(x, t; \varepsilon) = \sum_{k=0}^m \varepsilon^{2k} f^{(2k)}(x) p_k(t) + O(\varepsilon^{2(m+1)}), \text{ где}$$

$$p_k(t) = \int_0^t \frac{(t - \tau)^k}{k!} p(\tau) d\tau, \quad k = 0, 1, \dots, m.$$

Возьмем  $m = 1$  и определим приближенное решение обратной задачи 2 как решение краевой задачи

$$\varepsilon^2 p_1(T) f_1''(x; \varepsilon) + p_0(T) f_1(x; \varepsilon) = g(x; \varepsilon), \quad 0 \leq x \leq \pi,$$

$$f_1'(0; \varepsilon) = f_1'(\pi; \varepsilon) = 0.$$

Компьютерная программа, реализованная на языке C++, позволяет задавать произвольные параметры задач и находить приближенное решение. На этой основе проведен ряд расчетов, иллюстрирующих точность разработанных методов в зависимости от величины коэффициента теплопроводности. Также в работе доказаны оценки погрешностей приближенных решений для каждой обратной задачи.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Денисов А.М. Приближенное решение обратных задач для уравнения теплопроводности с сингулярным возмущением. // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2021. Т. 61. № 12. С. 2040–2049.

## Разработка функциональных основ системы визуализации информационных графов алгоритмов

*Гадиева Тамара Романовна*

*Кафедра Суперкомпьютеров и Квантовой Информатики*

*e-mail: tamara.gadievaa@mail.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Антонов Александр Сергеевич*

В рамках данной работы рассмотрена возможность исследования особенностей алгоритмов путем анализа их тонкой информационной структуры [1].

Одним из инструментов для этих целей является информационный граф алгоритма. Он представляет собой ациклический граф, вершины которого соответствуют операциям алгоритма, а дуги – связям по данным между этими операциями. Анализ информации, полученной с помощью исследования таких графов, эффективен с точки зрения выявления возможностей лучшей организации параллельных вычислительных процессов. Для этого можно использовать, например, такое свойство графа алгоритма, как представление в ярусно-параллельной форме.

Ярусно-параллельная форма [2] – это представление графа алгоритма, в котором:

- все вершины разбиты на пронумерованные подмножества ярусов;
- начальная вершина каждой дуги расположена на ярусе с номером меньшим, чем номер яруса конечной вершины;
- между вершинами, расположенными на одном ярусе, не может быть дуг.

Представление информационного графа в ярусно-параллельной форме позволяет, главным образом, определять множества независимых друг от друга операций алгоритма, что может быть использовано для выявления скрытого параллелизма и поиска подходящего распределения операций по процессорам вычислительной системы. На данный момент понятие информационного графа алгоритма активно используется в рамках проекта Algowiki [3] – открытой библиотеки по свойствам алгоритмов и особенностям их реализации на различных программно-аппаратных платформах.

С целью облегчения процесса исследования информационных графов алгоритмов естественным представляется выбор создания системы 3D визуализации таких графов с последующим интерактивным выделением особенностей их структуры.

Таким образом, в рамках данной работы была реализована вычислительная составляющая системы визуализации графов заданных алгоритмов. Разработанная программа составляет описание модели многомерного информационного графа по заданному описанию алгоритма на языке Algolang [4], который предназначен для описания информационной структуры фрагмента программы. Полученная модель представляет собой перечисление всех вершин и дуг графа с указанием их свойств.

Для написания программы были предложены и реализованы алгоритмы валидации и обработки входных данных, алгоритм, определяющий координаты вершин и дуг графа алгоритма в трехмерном пространстве, и алгоритм, определяющий уровень ярусно-параллельной формы для каждой вершины. Далее, по полученному в рамках данной работы описанию модели графа, вторая часть системы визуализации создает интерактивное изображение.

Таким образом, разработанная система визуализации информационных графов алгоритмов обеспечивает наглядное представление внутренней структуры алгоритмов, облегчает анализ свойств алгоритмов и освобождает от необходимости воспроизводить визуализацию вручную.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. (СПб.: БХВ-Петербург, 2002.)
- [2] AlgoWiki. Глоссарий. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – URL: <https://algowiki-project.org/ru/Глоссарий> (дата обращения: 10.12.2022).
- [3] Волков Н.И. Документация языка Algotang. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – URL: [https://parallel.ru/sites/default/files/info/education/opisanie\\_yazyka\\_algotang.pdf](https://parallel.ru/sites/default/files/info/education/opisanie_yazyka_algotang.pdf) (дата обращения: 11.09.2022)
- [4] AlgoWiki. Открытая энциклопедия свойств алгоритмов. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – URL: [https://algowiki-project.org/ru/Открытая\\_энциклопедия\\_свойств\\_алгоритмов](https://algowiki-project.org/ru/Открытая_энциклопедия_свойств_алгоритмов) (дата обращения: 03.04.2023)

## Анализ косвенных вызовов для использования в статическом анализаторе

*Галустов Артемий Львович*

*Кафедра системного программирования*

*e-mail: artemiy.galustov@ispras.ru*

*Научный руководитель — д. ф.-м. н. Белеванцев Андрей Андреевич*

*Научный консультант — к. ф.-м. н. Бородин Алексей Евгеньевич*

Статический анализ кода — анализ программ, осуществляемый без запуска исследуемой программы — один из наиболее популярных и эффективных подходов к автоматизированному поиску ошибок в современном процессе разработки программного обеспечения. Подавляющее большинство языков программирования содержит механизмы косвенных вызовов — указатели на функции, виртуальные методы классов и функции-замыкания (лямбды). Для получения точных статический анализ большинства программ нуждается в быстром и точном *анализе косвенных вызовов* — алгоритме, строящем для каждого косвенного вызова множество, покрывающее набор функций в которое может быть передано управление во время выполнения программы.

В работе предлагается межпроцедурный алгоритм анализа косвенных вызовов на основе анализа псевдонимов, поддерживающий языки C, C++, Java, Kotlin и Go. Алгоритм реализован в составе статического анализатора *Svace* разрабатываемого в ИСП РАН им. В. П. Иванникова [1]. Предложенный алгоритм, выполняется в несколько независимых шагов, что позволяет распараллеливать его выполнение, а также организовать кэширование результатов для эффективного анализа изменений в кодовой базе. На первом шаге алгоритм, используя унифицированное промежуточное представление *SvaceIR*, независимо анализирует исходный код функций и составляет для них резюме. Переменные объединяются в классы псевдонимов, соответствующие указателям на различные функции или объектам различных классов. Также дополнительно вводятся классы транзитивных псевдонимов для переменных зависящих от данных вне функции. Полученное резюме для отдельных функций скрывает все особенности анализируемых языков и упрощает представление потока данных в отдельных функциях, что позволяет объединить независимые результаты для отдельных функций и обрабатывать их итеративным межпроцедурным анализом псевдонимов [2, 3]. Результатом работы алгоритма является множество новых рёбер, добавленных в граф вызовов, и информация о множестве кандидатов для каждого отдельного косвенного вызова.

Реализация алгоритма была протестирована на наборе проектов с открытым исходным кодом размерами от 24 тысяч до 33 миллионов строк кода. Предложенный алгоритм не более чем за 1.5% от времени работы *Svace* разрешил до 54% всех косвенных вызовов. Был разработан набор из 117 синтетических тестов для всех поддерживаемых языков, подтверждающий коррект-

ность работы предложенного алгоритма и его реализации. Результаты также были представлены на открытой конференции ИСП РАН и опубликованы [4].

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Borodin A. E., Belevancev A. A. A static analysis tool svace as a collection of analyzers with various complexity levels // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS, Vol. 27, N 6, P. 111-134, 2015
- [2] Compilers: principles, techniques, and tools // A. V. Aho, M. S Lam, R. Sethi, J. D. Ullman // Pearson Education, 2007.
- [3] I. Forgács Double iterative framework for flow-sensitive interprocedural data flow analysis // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM), Vol.3, N 1, P.29-55, 1994
- [4] Galustov A. L., Borodin A. E., Belevancev A. A. Devirtualization for static analysis with low level intermediate representation // 2022 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS), P.18-23, IEEE, 2022

## Вычислительные свойства эpsilon-ациклических префиксных трансдюсеров

*Демидович Евгений Владимирович*

*Кафедра математической кибернетики*

*e-mail: zhenyademidovich@mail.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Подымов Владислав Васильевич*

*Конечные автоматы-преобразователи (трансдюсеры)* — это модель вычислений, в которой программа с конечным числом состояний управляет двумя головками (считывающей и записывающей), однонаправленно перемещающимися по соответствующим им лентам. Множество пар слов  $TR(\pi, q) = \{(h, u) : q \xrightarrow{h|u}_* q', q' \in F\}$ , которыми помечены финальные прогоны (последовательности переходов) трансдюсера  $\pi$  из состояния  $q$ , называется *отношением трансдукции*, вычисляемым  $\pi$  в состоянии  $q$ . Состояния  $q_1$  и  $q_2$  трансдюсера  $\pi$  называются *эквивалентными*, если верно равенство  $TR(\pi, q_1) = TR(\pi, q_2)$ .

Известно, что *проблема эквивалентности* алгоритмически неразрешима для довольно широких классов трансдюсеров, например, для недетерминированных трансдюсеров произвольного вида. Существуют полиномиальные по времени алгоритмы проверки эквивалентности для детерминированных и однозначных трансдюсеров [1]. В [2] автор расширяет свойство однозначности трансдюсеров, используемое в [2] применительно ко входным словам, вводя «однозначность» применительно к паре из входного и выходного слова. Так, для класса префиксных однородных трансдюсеров в [2] был предложен алгоритм проверки эквивалентности состояний на основе алгебраического метода, имеющий кубическую временную сложность относительно размера анализируемого трансдюсера.

В алгебраическом методе вычисления трансдюсера описываются при помощи системы языковых уравнений. К системе добавляется уравнение, приравнивающее переменные, соответствующие анализируемым состояниям. Разрешимость такой системы равносильна эквивалентности состояний. Уравнения системы записываются при помощи регулярных выражений. В [2] регулярные  $\Delta$ -выражения описываются при помощи multi-DFA — ДКА с несколькими множествами допускающих состояний. На каждой итерации алгоритма проверки эквивалентности к системе уравнений применяются преобразования, в результате которых либо алгоритм сообщает о неразрешимости системы, либо число приведённых переменных увеличивается на 1.

В данной работе исследовались свойства замкнутости  $\epsilon$ -ациклических префиксных однородных трансдюсеров относительно основных операций, а также проблема эквивалентности.

Была доказана лемма об устройстве отношений трансдукции префиксных однородных трансдюсеров. С помощью данной леммы было доказано, что классы отношений трансдукции, вычисляемых префиксными однородными

трансдюосерами, а также  $\varepsilon$ -ациклическими префиксными однородными трансдюосерами не замкнуты относительно операций: дополнения, реверсии, конкатенации, относительного произведения, итерации относительно операции конкатенации, итерации относительно операции относительного произведения. За счёт свойства  $\varepsilon$ -ациклическости для  $\varepsilon$ -ациклических префиксных однородных трансдюосеров было показано отсутствие замкнутости относительно инверсии.

Кроме этого, был адаптирован алгоритм проверки эквивалентности из [2] для  $\varepsilon$ -ациклических префиксных однородных трансдюосеров. В статье [2] этапы устранения нестандартных уравнений были описаны без подробностей. В частности, не была обоснована корректность подстановок  $\Delta$ -выражений с использованием операций над multi-DFA без копирования, что ставит под сомнение полиномиальную оценку сложности алгоритма. В данной работе были предложены упрощенные операции над multi-DFA, допускающие копирование. Кроме этого, для префиксных multi-DFA, используемых в алгоритме, были предложены алгоритм проверки эквивалентности и алгоритм нахождения кратчайшего различающего слова, основанные на «почти» линейном алгоритме проверки эквивалентности [3, 4].

Было доказано утверждение об устройстве  $\Delta$ -выражения  $E$  в системе уравнений  $\mathcal{E}_\pi \cup \{X_k = E\}$ , которое позволило упростить один из шагов алгоритма. Доказана теорема о корректности алгоритма проверки эквивалентности. Итоговая временная оценка сложности алгоритма не превышает  $O(|\Sigma||\Delta| \cdot n^{n+1} \cdot \mathbf{a}(|\Delta| \cdot n^n))$ , где  $n$  — размер трансдюосера,  $\Sigma$ ,  $\Delta$  — размеры входного и выходного алфавитов, а  $\mathbf{a}(n)$  — «очень медленно растущая функция» [4].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gurari E. M., Ibarra O. H. A note on finite-valued and finitely ambiguous transducer. *Mathematical systems theory*, Vol. 16, No. 1, 1983, p. 61–66.
- [2] Захаров В. А. Эффективные алгоритмы проверки эквивалентности для некоторых классов автоматов // *Моделирование и анализ информационных систем*. — 2020. 27, 3. — С. 260–303.
- [3] Hopcroft J. E., Karp R. M. A linear algorithm for testing equivalence of finite automata: Technical Report TR 71-114. Cornell Univ., Comput. Sci. Dep., 1971.
- [4] Norton D. A. Algorithms for testing equivalence of finite automata, with a grading tool for JFLAP. Master's thesis. Rochester Institute of Technology, 2009. URL: <https://scholarworks.rit.edu/theses/6939/>.

# Использование методов интеллектуального анализа данных для изучения взаимосвязи групп показателей в биомедицинских исследованиях

*Дмитриева Татьяна Юрьевна*

*Кафедра математических методов прогнозирования*

*e-mail: s02190092@gse.cs.msu.ru*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Сенько Олег Валентинович*

В рамках данного исследования была поставлена цель разработать модифицированный метод оптимальных достоверных разбиений, позволяющий эффективно находить оптимальное разбиение объектов в многомерном целевом пространстве, в отличие от стандартного метода оптимальных достоверных разбиений [1, 2], предназначенного для поиска разбиений в одномерном пространстве.

Этот метод было предложено использовать для анализа медицинских данных пациентов, страдающих различными психическими расстройствами. В качестве признаков, используемых для разбиения объектов, использовалась информация о возрасте, диагнозе, предписанных лекарствах, а также показателях тромбодинамики пациентов до лечения. Разбиваемое множество многомерных целевых векторов, которое определяло качество полученного разбиения, содержало информацию о показателях тромбодинамики пациентов после лечения.

Пусть обучающая выборка имеет вид:  $S = \{(\bar{y}_1, x_1), \dots, (\bar{y}_n, x_n)\}$ , где  $\bar{y}_i \in R^p$ ,  $p > 1$ ,  $\forall i = 1, \dots, n$ . Пусть разбиение  $R$  включает элементы  $q_1, \dots, q_k$ , а  $m_j$  — число объектов из  $S$ , для которых  $x_j \in q_j$ . Качество полученного разбиения оценивалось с помощью функционала (1).

$$Q(R, S) = \sum_{j \in 1, \dots, r} \|\hat{y}_0 - \hat{y}_j\|_2^2 * m_j \quad (1)$$

$$\hat{y}_0 = \sum_{i=1}^n \bar{y}_i / n, \hat{y}_j = \sum_{x_i \in q_j} \bar{y}_i / m_j.$$

Требуется отметить, что в методе оптимальных достоверных разбиений рассматриваются только такие разбиения, которые разделяют объекты на четыре подмножества выбором двух пороговых значений для пары признаков в случае с поиском двумерных закономерностей. Для одномерных закономерностей объекты разделяются на два подмножества при выборе порогового значения для одного признака.

В данной работе был предложен и обоснован корректный перевод данных в матрицы специального вида, позволяющие рассчитывать матрицу  $Q$ , каждый элемент которой является значением функционала (1) для разбиения, определяемого позицией этого элемента в матрице. В таком случае оптимальное разбиение будет соответствовать положению максимального элемента в



матрице  $Q$ , получающейся в результате применения матричных операций к матрицам специального вида.

Таким образом, для эффективной реализации модифицированного метода оптимальных достоверных разбиений на языке программирования Python использовался набор матричных операций, позволяющий существенно ускорить работу алгоритма вследствие распараллеливания вычислений при подсчете однотипных и похожих выражений.

**Результаты.** Для одномерных закономерностей было исследовано влияние каждого из 121 признака до лечения на разбиение показателей тромбодинамики после лечения. Значимость полученных разбиений подсчитывалась с помощью перестановочных тестирований [3]. Корректировка осуществлялась с помощью метода Бонферрони–Холма. С учетом скорректированных  $p$ -значений на уровне значимости  $\alpha < 0.05$  были отвергнуты 23 нулевые гипотезы об отсутствии связи между медицинскими показателями пациентов до лечения и показателями тромбодинамики после лечения.

Для двумерных закономерностей было исследовано влияние всевозможных пар различных признаков, что составило 7260 нулевых гипотез.  $P$ -значение для каждой пары рассчитывалось как максимум из двух  $p$ -значений, отражающих значимость каждого из найденных порогов для признаков в данной паре. Таким образом был реализован отбор  $p$ -значений по принципу бритвы Оккама [4]. Среди них на уровне значимости  $\alpha < 0.00005$  были отвергнуты 117 нулевых гипотез.

Предложенный в данной работе метод позволил эффективно находить интерпретируемые двумерные и одномерные закономерности, а также оценивать их статистическую значимость с помощью метода перестановочных тестирований. Это очень важно для многих типов задач, но, разумеется, особое значение имеет при анализировании медицинских данных.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kuznetsova A. V., Kostomarova I. V., Sen'ko O. V. Modification of the method of optimal valid partitioning for comparison of patterns related to the occurrence of ischemic stroke in two groups of patients // Pattern Recognition and Image Analysis. 2014. Vol. 1, P. 114–123.
- [2] Evaluating of multiple testing effect in method of optimal valid partitioning / O. V. Sen'ko, A. M. Morozov, A. V. Kuznetsova, L. L. Klimenko // Machine Learning and Data Analysis. 2016. Vol. 2, P. 26–38.
- [3] Goeman J. J., Solari A. Multiple hypothesis testing in genomics // Statistics in Medicine. 2014. Vol. 33, N 11. P. 1946–1978.
- [4] Chapter 8 - Search of regularities in data: optimality, validity, and interpretability / O. V. Sen'ko, A. V. Kuznetsova, I. A. Matveev, I. S. Litvinchev // Advances of Artificial Intelligence in a Green Energy Environment. 2022. P. 151–171.

## Автоматизация методов синтаксического анализа корейского языка

*Елфимова Анна Евгеньевна*

*Кафедра алгоритмических языков*

*e-mail: elfimova509@yandex.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Полякова Ирина Николаевна*

*Научный консультант —*

В наше время особенно заметна тенденция упрощать жизнь с помощью технологий, автоматизировать простые и сложные задачи. В том числе это касается обработки текстов на естественном языке. На данный момент существует много подходов для автоматической обработки текста. Выбор подхода напрямую зависит от поставленной задачи. До сих пор разработчики продолжают изучать различные методы и оптимизировать их. Синтаксический анализ является главной составляющей обработки текста на естественном языке.

**Введение.** Автоматическая обработка текста на естественном языке стала востребованной задачей во многих сферах. Не только при самостоятельном изучении языка, но и при анализе отзывов, написании краткого содержания и т.д. В любом языке существуют свои правила синтаксического анализа. В некоторых странах их даже изучают в школах. То есть общая модель языка так или иначе существует со своими элементами: подлежащим, сказуемым, дополнением и прочими. Возможно ли разработать такую математическую модель, которая покрыла бы достаточное количество грамматических правил? Для языков программирования существуют разные алгоритмы синтаксического анализа: нисходящий разбор, восходящий разбор, табличные методы [1]. Языки программирования обладают строгими правилами и стандартами, и поэтому для них легко разрабатывать модели и алгоритмы. Теми же свойствами не обладают естественные языки. В рамках научной работы была реализована программа для проверки текста на корейском языке на соблюдение грамматических правил с использованием синтаксического анализа.

**Алгоритм Эрли.** Табличные методы синтаксического анализа обладают рядом преимуществ. Алгоритм Эрли во всех отношениях так же хорош, как и алгоритм Кока-Янгера-Касами, а для многих грамматик даже лучше. Для однозначных грамматик время квадратичное, а с некоторыми модификациями можно добиться и линейных времени и емкости. Таким образом для дальнейшей работы был выбран алгоритм Эрли.

**Модель грамматики корейского языка.** В последние годы корейский язык набирает популярность по всему миру. Кроме того, он обладает строгими правилами. Во-первых, слова в предложении идут в определенном порядке. Во-вторых, члены предложения определяются своими окончаниями. Это означает, что в нем для каждого предложения можно построить одно дерево разбора. При помощи учебников по корейскому языку [2] была построена

модель грамматики корейского языка. Она является контекстно-свободной, а следовательно, к ней применим алгоритм Эрли. Очевидно, что формальная модель грамматики не сможет покрыть все грамматические правила корейского языка. По этой причине для решения задачи рассматривается лишь такое подмножество множества правил, чтобы алгоритм работал с большей частью предложений.

**Разработка синтаксического анализатора.** В первую очередь был реализован алгоритм Эрли. Очевидно, его недостаточно для корректного синтаксического анализа естественного языка. В связи с этим были реализованы вспомогательные функции, которые необходимы для работы с корейским языком. Они применяются в процессе анализа предложения, и имеют большое влияние на конечный результат. Полученный синтаксический анализатор был протестирован на некотором наборе предложений из учебника, по которому строилась грамматика, чтобы убедиться, что программа работает корректно.

**Использование реализованного алгоритма для проверки корейских текстов.** С использованием полученной программы была собрана статистика по соблюдению грамматических правил в разных источниках. Проверялись предложения из художественной литературы, социальных сетей и форумов, из комментариев пользователей, а также из различных статей. Дополнительно была собрана единая статистика по всем источникам. Она лучше покажет гибкость алгоритма, так как тексты отличаются не только по стилю, но и по структуре предложений и используемым правилам.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ахо А. В., Лам М. С., Сети Р., Ульман Д. Д. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий. М. : Издательский дом «Вильямс», 2008. 1128 с.
- [2] Ан Чинмён, Ли Кёна, Хан Хуён. Грамматика корейского языка для начинающих. М.: АСТ, 2021. 384 с.

# Исследование эффективности стратегий глобального и локального прореживания нейронных сетей на примере задачи классификации изображений

*Имашев Владислав Родиславович*

*Кафедра суперкомпьютеров и квантовой информатики  
e-mail: vladimashev@mail.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Буряк Дмитрий Юрьевич*

Актуальность задачи прореживания больших глубоких нейронных сетей вытекает из общей тенденции увеличения размеров моделей, повсеместно используемых в настоящее время для решения задач компьютерного зрения. Большое количество параметров позволяет таким сетям лучше решать поставленную проблему, но вызывает трудности при их развёртывании на устройствах с ограниченным объемом ресурсов.

Прореживание нейронной сети — метод сжатия, который заключается в удалении параметров из модели. Главная цель процесса прореживания — сжать модель нейронной сети до необходимого размера, удалив при этом наименее значимые параметры, и при этом не уменьшить точность модели ниже допустимого порога. Для определения того, какие параметры можно удалить без значительных потерь в точности, используют различные методы прореживания [1]. В литературе различают две основные стратегии прореживания — **локальную** и **глобальную**.

При локальном прореживании на каждой итерации прореживанию подвергается лишь конкретный слой сети, после чего проводится несколько эпох дообучения. При этом гиперпараметры прореживания (число параметров для удаления из модели, число эпох дообучения и т.д.) подбираются индивидуально для каждого слоя. При глобальном сценарии прореживания за одну итерацию прореживаются одновременно сразу все слои сети: удаляется некоторый процент параметров сразу по всем слоям архитектуры, после производится дообучение.

В рамках данной работы проводится экспериментальное сравнение эффективности глобального и локального методов прореживания глубоких свёрточных нейронных сетей на примере задачи бинарной классификации изображений. Для тестирования были предложены сценарии глобального итеративного прореживания, а также локального прореживания, основанного на анализе чувствительности каждого слоя: идея данного подхода заключается в подборе индивидуального процента сжатия для каждого слоя в зависимости от того, насколько снижается точность модели после удаления из него параметров без дообучения. В качестве критериев для оценки эффективности рассматриваемых сценариев прореживания были взяты такие показатели, как снижение точности модели (разница между точностями исходной и прореженной моделями на тестовой выборке), уменьшение размера (разница между количеством параметров исходной и прореженной сетей, выражен-

ная в процентах от изначального объема) и снижение количества операций умножения-накопления (MACs). В работе были рассмотрены следующие методы прореживания свёрточных нейронных сетей: первый – удаление фильтров слоёв свёртки на основе их L1 нормы [3] – не использует входные данные, второй – удаление фильтров на основе их среднего процента околонулевых активаций [2] – требует использование выборки. Для экспериментов была выбрана модельная задача распознавания кошек и собак и использованы глубокие свёрточные нейронные сети VGG-16 [4] и AlexNet, обученные на базе изображений “Dogs vs. Cats” ([www.kaggle.com/c/dogs-vs-cats](http://www.kaggle.com/c/dogs-vs-cats)).

Предложенный локальный сценарий показал себя эффективнее глобального в методе прореживания, не использующем данные: при сжатии моделей на 96% разница в точности составляет  $\approx 10\%$  в пользу локального сценария. В методе прореживания, зависящем от данных, локальный сценарий показал себя эффективно с точки зрения сокращения вычислительной нагрузки: при снижении MACs на 92% (локальный сценарий) точность сети VGG-16 выше, чем при сокращении MACs на 86% (глобальный сценарий).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jiayi Liu, Samarth Tripathi, Unmesh Kurup, Mohak Shah: Pruning Algorithms to Accelerate Convolutional Neural Networks for Edge Applications: A Survey // arXiv preprint arXiv:2005.04275. – 2020.
- [2] Hengyuan Hu, Rui Peng, Yu-Wing Tai, Chi-Keung Tang: Network Trimming: A Data-Driven Neuron Pruning Approach towards Efficient Deep Architectures // arXiv preprint arXiv:1607.03250. – 2016.
- [3] Hao Li, Asim Kadav, Igor Durdanovic, Hanan Samet, and Hans Peter Graf. Pruning filters for efficient convnets. // arXiv preprint arXiv:1608.08710v3. - 2017.
- [4] Sergey Zagoruyko. 92.45% on CIFAR-10 in Torch. <http://torch.ch/blog/2015/07/30/cifar.html>, 2015.

## Адаптация изображений аншлифов геологических образцов на основе данных пользовательской разметки

*Индычко Олеся Игоревна*

*Кафедра математической физики*

*e-mail: olindyv@mail.ru*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Крылов Андрей Сердэжевич*

В работе предложен метод цветовой адаптации изображений аншлифов геологических образцов для использования ранее обученной нейросетевой модели, осуществляющей сегментацию минералов.

Одной из трудностей в применении моделей автоматической сегментации минералов является неоднородность данных. На изображения аншлифов сильно влияют условия съемки: оборудование, освещение, расположение образца, настройка камеры и др. Разработанный алгоритм призван решить эту проблему и позволяет приблизить цветовые и яркостные характеристики изображений к значениям на снимках аншлифов, ранее использованных при обучении нейросетевой модели [1].

Метод цветовой коррекции основан на векторном представлении цветового пространства [2]. По набору полностью размеченных изображений аншлифов LumenStone\*, на котором обучалась модель сегментации, была получена матрица  $C$  референсного цветового пространства, состоящая из усредненных цветов различных минералов. Из входных изображений при помощи частичной пользовательской разметки аналогичным образом извлекается матрица  $C'$  искаженного цветового пространства. Задача цветокоррекции сводится к поиску матрицы перехода  $M_{CCM}$  от цветового пространства  $C'$  к пространству  $C$ :

$$C = C' \times M_{CCM}.$$

Эта задача решается численно методом наименьших квадратов [3] с начальным приближением, инициализируемым методом «баланса белого»:

$$M_{CCM}^0 = \begin{bmatrix} k_R & 0 & 0 \\ 0 & k_G & 0 \\ 0 & 0 & k_B \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

здесь  $k_R$ ,  $k_G$ ,  $k_B$  — коэффициенты, вычисляемые как отношения усредненных значений красной, зеленой и синей компонент соответственно в матрицах референсного и искаженного цветовых пространств. После вычисления матрицы цветовой коррекции  $M_{CCM}$  адаптированное изображение получается путем матричного умножения входного изображения на эту матрицу.

В реальных условиях результат работы предложенного алгоритма адаптации на одном изображении не всегда может быть удовлетворительным в связи с нехваткой информации. Была реализована возможность «дообучать»

\*<https://imaging.cs.msu.ru/en/research/geology/lumenstone>

модель цветовой коррекции. На вход алгоритму можно последовательно подавать искаженные изображения до тех пор, пока качество адаптации не достигнет желаемого уровня. Усредненная матрица цветовой коррекции в режиме «дообучения» вычисляется следующим образом

$$M_{ССМ} = \sum_{i=1}^N k_i \cdot M_{ССМ}^i = \sum_{i=1}^N \frac{p_i}{\sum_j p_j} M_{ССМ}^i.$$

Здесь  $M_{ССМ}^i$  — матрица цветовой коррекции, вычисленная для  $i$ -го изображения,  $p_i$  — процент заполненности частичной маски  $i$ -го изображения, где  $i = 1, \dots, N$ . Такой выбор коэффициентов обусловлен тем, что наибольший вклад в работу алгоритма цветовой коррекции должно вносить наиболее полно размеченное изображение.

Для оценки качества работы алгоритма адаптации в данной работе используется точность автоматической сегментации (процент корректно размеченных пикселей изображения) нейросетевой моделью [1] на наборах референсных изображений и адаптированных. Чем ближе полученные на адаптированном наборе значения к показателям на наборе референсных изображений, тем лучше работает реализованный метод.

Результаты экспериментов, представленные в таблице 1, показали, что цветовая адаптация изображений с помощью разработанного метода существенно повышает качество нейросетевой сегментации минералов.

Тип изображений	Точность
Референсные	0.9504
Искаженные	0.2911
Адаптированные	0.8818

Табл. 1: Оценка качества автоматической сегментации минералов.

Предложенный метод цветовой коррекции был программно реализован на языке Python3. Алгоритм отличается высокой скоростью работы (полная обработка одного изображения размером  $3000 \times 2500$  пикселей занимает порядка 10 секунд) и возможностью обучения на небольшом количестве данных.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Khvostikov A. V., Korshunov D. M., Krylov A. S., Boguslavskiy M. A. Automatic Identification of Minerals in Images of Polished Sections // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2021. Vol. 44. P. 113–118.
- [2] Cohen J. B. Color and color mixture: Scalar and vector fundamentals // Color Research & Application (Wiley Online Library). 1988. Vol. 13, no. 1. P. 5–39.
- [3] Vrhel M. J., Trussel H. J. Color correction using principal components // Color Research & Application. 1992. Vol. 17, no. 5. P. 328–338.

## Теоретико-игровой анализ аукциона размещения частот

*Каплан Владимир Сергеевич*

*Кафедра исследования операций*

*e-mail: 213kap@gmail.com*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Новикова Наталья Михайловна*

Целью моей ВКР является методами теории игр исследовать специфику проведения аукциона электромагнитного спектра по правилам закрытых аукционов первой и второй цены.

**Определение.** *Аукцион спектра - это аукцион, который используется государственным регулятором для продажи прав на передачу информации в определенных диапазонах электромагнитного спектра и для выделения ограниченных ресурсов спектра. Участки частот электромагнитного спектра могут быть куплены с двумя альтернативными режимами лицензионных прав. Правила использования устанавливает покупатель:*

1) *l (licensed) - лицензированный режим участка спектра, при котором лицензиат сохраняет исключительные права на использование спектра в соответствии с набором правил, l-игрок.*

2) *u (unlicensed) - нелицензированный режим участка спектра, при котором им могут пользоваться сразу несколько пользователей, u-игрок.*

Таким образом, лицензированным участком спектра может пользоваться только непосредственно игрок, который его выиграл. В то время как нелицензированным участком спектра могут пользоваться абсолютно все.

Данный тип аукционов отличается от традиционных, так как в нём для u-игроков не всегда выгодно выигрывать в игре, потому что у них есть возможность получить лот бесплатно, если выигрывает другой u-игрок.

Актуальность этого аукциона тяжело поставить под сомнение. Его применение в настоящем и даже будущем времени было неоднократно изучено, например, в [1] и [2], однако без разделения на лицензированные и нелицензированные участки.

Стратегиями игроков являются их ставки:  $b_i$  - ставка игрока  $i$ ,  $b_i \in [b_0, \text{inf}]$ , где  $b_0$  - минимально возможная ставка. Ценность лота игрока  $i$  равна  $v_i$ .  $v_1 > v_2 > v_3$ .

**Рассмотрим аукцион первой цены.**

Функция выигрыша для  $l$ -игрока  $i$ :

$$u_i(b_1, b_2, b_3) = \begin{cases} v_i - b_i, & \text{если } \max(b_1, b_2, b_3) = b_i \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Функция выигрыша для  $u$ -игрока  $i$ :

$$u_i(b_1, b_2, b_3) = \begin{cases} v_i - b_i, & \text{если } \max(b_1, b_2, b_3) = b_i \\ v_i, & \text{если } \max(b_1, b_2, b_3) = b_j, j - u\text{-игрок} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$



Приведу некоторые утверждения, характерные для рассматриваемого аукциона, и не характерные для стандартного, описанного в [3].

**Утверждение 1.** *Если в аукционе все игроки имеют тип  $u$ , то единственный равновесный исход:  $(b_0, b_0, b_0)$ .*

**Утверждение 2.** *Если в аукционе участвуют один  $l$ -игрок и два  $u$ -игрока, и если игроки 1 и 3 имеют тип  $u$ , а игрок 2 – тип  $l$ , то множество равновесных исходов состоит из:  $(b, b, b_3)$ , для всех  $b_3 \in [b_0, b]$ ,  $b \in [v_2, v_1]$ .*

Теперь рассмотрим аукцион второй цены, который представляет наибольший интерес, так как в случае всех  $l$ -игроков он выявляет предпочтения. Функция выигрыша для  $l$ -игрока  $i$ :

$$u_i(b_1, b_2, b_3) = \begin{cases} v_i - b_j, & \text{если } b_i > b_j > b_k \text{ при } j, k \in \{1, 2, 3\} \setminus i \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Функция выигрыша для  $u$ -игрока  $i$ :

$$u_i(b_1, b_2, b_3) = \begin{cases} v_i - b_j, & \text{если } b_i > b_j > b_k \text{ при } j, k \in \{1, 2, 3\} \setminus i \\ v_i, & \text{если } b_j = \max(b_1, b_2, b_3), \text{ для } u\text{-игрока } j \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

**Утверждение 3.** *Если в аукционе все игроки имеют тип  $u$ , то равновесные исходы имеют вид:  $(b_1, b_0, b_0)$ , где  $b_1 \geq b_0$ .*

**Утверждение 4.** *Если игроки 1 и 3 – имеют тип  $u$ , а игрок 2 –  $l$ , то во множество равновесных исходов входит исход в честных стратегиях.*

В моей выпускной квалификационной работе методами теории игр исследована специфика проведения аукциона электромагнитного спектра при помощи закрытых аукционов первой и второй цены.

Для игр двух и трёх лиц найдены множества равновесных исходов для обоих правил аукциона и всех возможных наборов игроков.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dang Y. Li Z. The analysis and discussion of spectrum auctions based on case study. // Journal of education, humanities and social science V. 2. - 2022.
- [2] Hu S. Shi R. Analysis of recent development of spectrum auction and forecast of future development. // 3rd International conference on economic management and cultural industry. - 2021.
- [3] Мулен Э. Теория игр с примерами из математической экономики. М.: Мир. - 1985.

## Численное исследование спектральных методов деконволюции

*Киселёв Евгений Иванович*

*Кафедра математической физики*

*e-mail: kiseliov.evgeniy.iv@yandex.ru*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. зав. каф. Разгулин Александр Витальевич*

Задача восстановления искажённых изображений относится к классу обратных задач и часто встречается в таких областях, как офтальмология, астрономия и т. п. Решение этой обратной задачи в силу её специфики сопряжено с определёнными трудностями.

Математическая постановка задачи восстановления изображения записывается с помощью интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода типа свертки. О структуре ядра этого уравнения доступна довольно подробная информация при различных типах аберраций, поскольку для них хорошо известны формулы, выражающие ядро. Но параметры этих ядер для конкретного изображения неизвестны. Такая обратная задача с неизвестным ядром является сильно некорректной, поскольку фурье-образ функции, представляющей ядро, может проходить через ноль, что приводит к инверсии интенсивности на регистрируемом изображении и сильной неустойчивости обычных методов деконволюции. Поэтому сначала необходима предобработка имеющихся данных, нацеленная на уточнения типа ядра, а затем и его параметров.

В данной работе исследуется вопрос восстановления изображений, аберрации в которых являются дефокусировкой. При дефокусировке фактически важен один параметр, который задаёт вид ядра в интегральном уравнении. Поскольку задача поиска параметра дефокусировки и задача восстановления наблюдаемого изображения не связаны, то исходная задача разделяется на два этапа: оценка параметра дефокусировки по наблюдаемому изображению и восстановление изображения, при котором используется ядро, восстановленное на предыдущем этапе. Принципиальная особенность дефокусировки, как типичного представителя классической аберрации оптической системы, от других типов размытия изображений состоит в том, что соответствующая функция, отвечающая ядру, с которой сворачивается искомое изображение, имеет сильно осциллирующий характер, существенно отличающий ее от традиционно используемых упрощенных моделей размытия, которые обычно сводятся к использованию цилиндра или гауссовой функции. Вследствие этого известные методы слепой деконволюции для дефокусированных изображений как правило не работают без предварительно найденного хорошего приближения для неизвестного параметра дефокусировки.

В работе в качестве метода восстановления параметра дефокусировки реализован алгоритм, основанный на специальной обработке энергетического спектра изображений и локализации его нулей. В качестве методов восстановления изображений рассматривались: классический метод решения обратных

задач – метод Тихонова [2], и модифицированный биспектральный метод. Под модифицированным биспектральным методом [1] понимается биспектральный метод [3], в котором учтён возможный переход через ноль оптической передаточной функции, с которой в спектральном пространстве сворачивается изображение. В работе было проведено численное исследование указанных методов восстановления изображения и выявлены особенности их применения для различных типов симулированных и реальных изображений.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] A modified bispectral image reconstruction method in ophthalmology / N.G. Iroshnikov, A.V. Larichev, A.V. Razgulin, A.S. Starostin // Computational Mathematics and Modeling. 2015. Vol. 26, N 4.
- [2] Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола // М.: Наука, 1990.
- [3] Bispectral reconstruction of speckle-degraded images / Jin Song // Department of Electrical Engineering College of Engineering Rochester. New York. 1992.

## Снижение ресурсоемкости численного моделирования осевого обтекания изолированного винта вертолета

*Князев Олег Игоревич*

*Кафедра вычислительных методов*

*e-mail: oleee01@mail.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. н.с. Бобков Владимир Георгиевич*

Проектирования винтов вертолета является важной комбинированной задачей, в которой требуется определять аэродинамические, динамические, прочностные и акустические характеристики винтов. Все чаще при разработке новых моделей винтокрылых машин используется методика вычислительного эксперимента, позволяющего существенно снизить стоимость и скорость разработки летательного аппарата.

Подобные вычислительные эксперименты являются сложными, ресурсоемкими задачами. В связи этим задача ускорения подобных расчетов, рассмотренная в работе, крайне актуальна и востребована разработчиками, использующими методику вычислительного эксперимента при разработке винтов новых перспективных вертолетов.

Цель данной работы - разработка и исследование различных методов и алгоритмов для снижения ресурсоемкости численного моделирования осевого обтекания изолированного винта с сохранением точности результатов.

Для расчета течения вокруг вращающейся лопасти, использовалась математическая модель на основе уравнений Навье-Стокса в неинерциальной вращающейся системе координат [1]. В этой системе лопасть обтекаемая потоком является неподвижной. Также математическая модель была дополнена однопараметрической моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса, и граничными условиями: на периодических поверхностях были использованы периодические граничные условия, на поверхности профиля используется условие прилипания, а на внешних границах расчетной области установлено условие входа/выхода потока.

Применяемая в работе методика численного моделирования реализована в исследовательском пакете NOISEtte, разрабатываемом в секторе вычислительной аэродинамики и аэроакустики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [2]. Вычисления производимые в работе основаны на приближении уравнений Навье-Стокса на схеме EBR5, и схеме EBR3 для конвективных потоков [3]. Для интегрирования по времени системы уравнений используется неявная схема четвертого порядка.

Рассматривался симметричный двухлопастной винт Caradonna-Tung, со следующими характеристиками: радиус винта 1.143 м, лопасти на основе профиля НАСА-0012 с длиной хорды 0.1905 м. Данный винт является хорошо исследованным, и для него имеются подробные экспериментальные данные. Моделирование проводилось при скорости вращения 1250 об/мин, и угле установки профиля 8°. Симметрия и осевой режим обтекания винта, позво-

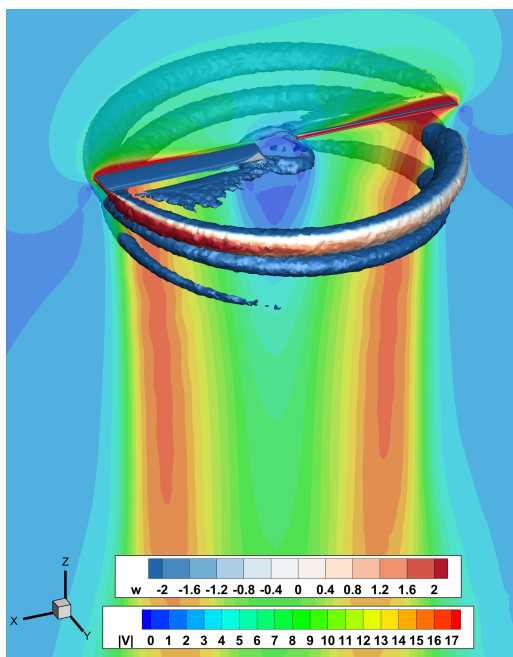


Рис. 1: Поле модуля скорости и изоповерхность Q-критерия

ляют построить только один сектор расчетной области с одной лопастью и использовать его для моделирования всей геометрии.

Для получения эталонных данных для последующего сравнения, использовались результаты вычислительного эксперимента, в котором было получено поле течения после 700 оборотов винта (см. рис. 1). Общая картина течения соответствуют реальной физике задачи, а сравнение распределений давления на лопасти с экспериментальными данными показали хорошее согласование.

В ходе работы было установлено, что методы снижения ресурсоемкости расчета могут значительно ускорить процесс моделирования при достаточно высокой точности получаемых результатов.

Так на исследуемой задаче для винта Caradonna-Tung получено ускорение в 2.5 раза при использовании решения полученного на более грубой сетке в качестве начального поля, и ускорение более чем в 2 раза при ускорении развития индуцированного течения путем увеличения угла установки лопастей, использование гибридной разностной схемы позволило ускорить расчет в 2 раза, улучшив при этом точность.

Выяснено, что не все методы, использованные в данной работе, применимы для решения данной задачи. В частности, использование специальных граничных условий не привело к значительному улучшению сходимости расчета и даже привело к ухудшению точности, а введение начального потока не оказало существенного влияния на результаты скорости расчета.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Численное моделирование аэродинамических и акустических характеристик винта в кольце / И. В. Абалакин, П. А. Бахвалов, В. Г. Бобков, Т. К. Козубская, В. А. Аникин // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 4. С. 128–130.

- 
- [2] Бобков В. Г., Абалакин И. В., Козубская Т. К. Методика расчёта аэродинамических характеристик винтов вертолётa на основе реберно ориентированных схем в комплексе программ NOISEtte // Компьютерные исследования и моделирование. 2021. Т. 10, № 1. С. 1–28.
- [3] Абалакин И. В., Козубская Т. К. Схема на основе реберно-ориентированной квазиодномерной реконструкции переменных для решения задач аэродинамики и аэроакустики на неструктурированных сетках // Математическое моделирование. 2013. Т. 25, № 9. С. 109–136.

## Символьные предикаты безопасности для обнаружения ошибок в бинарном коде

*Кобрин Илай Александрович*

*Кафедра системного программирования*

*e-mail: kobrineli@ispras.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Батузов Кирилл Андреевич*

*Научный консультант — к.ф.-м.н. Вишняков Алексей Вадимович*

Современное программное обеспечение стремительно развивается, принося с собой новые ошибки и уязвимости. Самостоятельно программист может тестировать ПО только на ограниченном наборе тестов, поэтому необходимо разрабатывать методы автоматического тестирования. Одним из таких методов является динамическая символьная интерпретация [1, 2].

Динамическая символьная интерпретация является методом автоматического тестирования программ, при котором происходит интерпретация программы, где конкретным значениям переменных, зависящих от входных данных, сопоставляются символьные переменные, принимающие произвольные значения.

Предикат пути представляет собой систему из уравнений и неравенств над символьными переменными и константными значениями, решение которой обеспечивает прохождение потока управления по исследуемому пути.

Предикат безопасности задает дополнительные условия на предикат пути, которые позволяют обнаружить ошибку в программе [3, 4].

В данной работе предлагается метод построения и проверки символьных предикатов безопасности для обнаружения ошибок в бинарном коде с помощью динамической символьной интерпретации, который позволяет находить ошибки целочисленного переполнения, выхода за границы массива, деления на ноль и разыменования нулевого указателя. Также метод позволяет генерировать входные данные, которые приводят к проявлению ошибки.

**Схема проверки предиката безопасности.** Для построения предиката безопасности мы интерпретируем программу и анализируем каждую инструкцию на пути выполнения. Для определенных инструкций составляется предикат безопасности для обнаружения конкретной ошибки. Далее составляется конъюнкция предиката безопасности и предиката пути. Затем проверяется выполнимость конъюнкции с помощью математического решателя. Если конъюнкция выполнима, то печатаем предупреждение и сохраняем файл для воспроизведения ошибки. Например, для ошибок разыменования нулевого указателя и деления на ноль составляются уравнения на равенство адреса и делителя нулю.

**Выход за границу массива.** Для поиска ошибок выхода за границу массива мы строим предикат безопасности для инструкций, разыменовывающих адрес. Границы массива находятся с помощью теневой кучи, теневого стека или с помощью эвристического подхода. Далее составляется предикат

безопасности в виде неравенства на то, может ли адрес выходить за границы. Также мы составляем дополнительные условия, чтобы попытаться перезаписать адрес возврата из функции или разыменовать отрицательный адрес.

**Целочисленное переполнение.** Для поиска ошибок целочисленного переполнения мы строим предикат безопасности для арифметических инструкций, представляющий из себя равенство флагов `CF/OF` единице. Так как таких инструкций в программах очень много, то проверяем предикат только если было найдено опасное место, использующее переполненное значение (сток ошибки). Стоками ошибки являются: условный переход, разыменование адреса, аргументы опасных функций (`malloc`, `memcpy` и т.п.), аргументы остальных функций. Знаковость переполнения определяем по ранее встретившимся инструкциям условных переходов (например, инструкция `JL` будет обозначать знаковый тип). Для функций копирования и функций выделения памяти составляем предикат безопасности так, чтобы ошибка переполнения вероятнее привела к дальнейшему выходу за границы массива.

**Оценка точности на наборе тестов Juliet.** Для оценки точности символьных предикатов безопасности была сделана тестовая система на основе набора тестов Juliet. Разработанный метод был протестирован на 15772 тестовых программах и показал итоговую точность в 96.20%.

**Результаты практического применения.** В результате практического применения символьных предикатов безопасности были найдены ошибки в следующих проектах с открытым исходным кодом: FreeImage (целочисленное переполнение), `rizin` (целочисленное переполнение, приводящее к выходу за границы массива), `xlnt` (целочисленное переполнение и выход за границы массива), `unbound` (целочисленное переполнение), `hdp` (деление на ноль), `miniz` (целочисленное переполнение).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. C. King Symbolic Execution and Program Testing // Communications of the ACM. – 1976. – Vol. 19, no. 7. – Pp. 385–394. DOI: 10.1145/360248.360252.
- [2] Sydr: Cutting Edge Dynamic Symbolic Execution / A. Vishnyakov, A. Fedotov, D. Kuts, A. Novikov, D. Parygina, E. Kobrin, V. Logunova, P. Belecky, Sh. Kurmangaleev // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. – 2020. – Vol. 9. – Pp. 46–54. DOI: 10.1109/ISPRAS51486.2020.00014.
- [3] Symbolic Security Predicates: Hunt Program Weaknesses / A. Vishnyakov, V. Logunova, E. Kobrin, D. Parygina, A. Fedotov // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. – 2021. – Vol. 9. – Pp. 76–85. DOI: 10.1109/ISPRAS53967.2021.00016.
- [4] Вишняков А. В., Кобрин И. А., Федотов А. Н. Поиск ошибок в бинарном коде методами динамической символьной интерпретации // Труды Института системного программирования РАН. – 2022. – Т. 18. – С. 25–42. DOI: 10.15514/ISPRAS-2022-34(2)-3.



## Методы вычислительной статистики и машинного обучения в задачах анализа информационных систем

*Козловская Анастасия Леонидовна*

*Кафедра математической статистики*

*e-mail: analeokoz@gmail.com*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. доц. Горшенин Андрей Константинович*

Актуальность анализа и прогнозирования сетевого трафика вытекает из необходимости оптимизации производительности сети, повышения её эффективности, надежности и устойчивости к внешним воздействиям, а также снижении затрат на эксплуатацию и обслуживание. В крупномасштабных сетях даже незначительные улучшения производительности могут оказывать положительное влияние на общую работу сети.

В данной работе представлены методы, разработанные для анализа и прогнозирования характеристик сети мобильного оператора в пределах одной соты. Все предложенные методы были протестированы на реальных данных, предоставленных мобильным оператором. В данных содержатся объемы загруженных и отправленных данных по каждому пользователю и приложению за час с 10.02 по 22.02 и с 01.03 по 04.03, часовые метки внутри суток, идентификаторы пользователей (всего – более 94 тысяч уникальных пользователей за период наблюдений) и одного из 16 различных типов приложений. В качестве тестовой выборки используется 20% значений начиная с 01.03.

В ходе данной работы реализована модель глубоких гауссовских смесей [1], представляющая собой иерархическую структуру с вложенными компонентами, которые являются смесями многомерных нормальных распределений на каждом из слоев:

- 1)  $x_i = \eta_{s_1}^{(1)} + \Lambda_{s_1}^{(1)} z_i^{(1)} + u_i^{(1)}$  с вероятностями  $\pi_{s_1}^{(1)}$ ,  $s_1 = \overline{1, k_1}$ ,
- 2)  $z_i^{(1)} = \eta_{s_2}^{(2)} + \Lambda_{s_2}^{(2)} z_i^{(2)} + u_i^{(2)}$  с вероятностями  $\pi_{s_2}^{(2)}$ ,  $s_2 = \overline{1, k_2}$ ,
- ...
- h)  $z_i^{(h-1)} = \eta_{s_h}^{(h)} + \Lambda_{s_h}^{(h)} z_i^{(h)} + u_i^{(h)}$  с вероятностями  $\pi_{s_h}^{(h)}$ ,  $s_h = \overline{1, k_h}$ ,

где  $i = \overline{1, n}$  – номер наблюдаемого  $d$ -мерного вектора,  $z_i^{(h)} \sim \mathcal{N}(0, I_d)$  – скрытые латентные переменные,  $u_i^{(1)}, \dots, u_i^{(h)}$  – ошибки, имеющие нормальное распределение  $u^{(l)} \sim \mathcal{N}(0, \Psi_{s_l}^{(l)})$ ,  $\eta_{s_1}^{(1)}, \dots, \eta_{s_h}^{(h)}$  – векторы длины  $d$ ,  $\Lambda_{s_1}^{(1)}, \dots, \Lambda_{s_h}^{(h)}$  – квадратные матрицы размерности  $d$ . Предполагается, что случайные величины  $u$  не зависят от скрытых переменных  $z$ . Такой подход позволяет более гибко [2] описывать параметры смеси распределений, чем классическая модель гауссовских смесей. Также были программно реализованы различные версии EM-алгоритма (классический EM, стохастическая версия и Монте-Карло модификация) для оценивания параметров в слоях данной модели – наибольшая скорость достигнута с помощью стохастической модификации

[3]. Модель глубоких гауссовских смесей применена для кластеризации типов приложений и пользователей, что позволило получить разбиение данных объектов на хорошо интерпретируемые кластеры.

В ходе работы был предложен алгоритм регрессии на основе модели глубоких гауссовских смесей, который позволил повысить точность прогнозирования на несколько процентов даже для обучающих выборок умеренного объема. Для оценки качества прогнозов используется среднее абсолютное процентное отклонение (MAPE). Предложенная регрессионная версия алгоритма позволила уменьшить ошибку до 5.50% для объемов данных и до 1.34% для количества пользователей на тестовой выборке [4].

Для кластеризации данных была построена модель на основе EM-алгоритма с зашумлением [5]:

$$X_{noise} = X + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2 I),$$

где  $X$  – исходные данные,  $X_{noise}$  – зашумленные данные,  $\mathcal{N}(0, \sigma^2 I)$  – нормальное распределение с нулевым средним и диагональной матрицей ковариации  $\sigma^2 I$ , где  $\sigma^2$  – дисперсия шума. С помощью данной модели получено повышение скорости кластеризации от 20 до 30% на различных наборах данных.

Кроме того, в ходе исследования была разработана процедура выявления аномальных пользователей и прогнозирования потребления ими ресурсов сети с использованием ансамбля алгоритмов на основе таких методов, как локальный фактор выброса, фактор выброса на основе связанности, фактор локального выброса на основе кластеров, метод к ближайших соседей, агломеративная кластеризация.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Viroli, Cinzia. Deep gaussian mixture models // Statistics and Computing. 2017. Vol. 29. DOI: 10.1007/s11222-017-9793-z.
- [2] Ибрагимова, А. Р., Горшенин А. К. О глубоких гауссовских моделях в задачах машинного обучения // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2021. № 4. С. 121–124.
- [3] Celeux G. The SEM algorithm: a probabilistic teacher algorithm derived from the EM algorithm for the mixture problem // Comput. Stat. Q. 1985. Vol. 2, N 1. P. 73–82.
- [4] Козловская А. Л., Горшенин А. К. О глубоких смешанных гауссовских моделях в задачах анализа трафика // Научная конференция «Ломоносовские чтения». Тезисы докладов. 2023. С. 100–101.
- [5] Osoba O., Kosko B. The noisy expectation-maximization algorithm // Fluctuation and Noise Letters. 2013. Vol. 12. DOI: 10.1142/S0219477513500120.

## Система автоматического построения маршрутов на пересеченной местности

*Козуб Денис Владимирович*

*Кафедра алгоритмических языков*

*e-mail: denikozub@gmail.com*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Корухова Юлия Станиславовна*

В выпускной квалификационной работе поставлена задача разработки системы построения маршрутов на пересеченной местности. В качестве источника географических данных выбраны открытые векторные карты OpenStreetMap, что позволило решить проблему дискретизации непрерывных географических объектов. В качестве структуры данных, задающей множество допустимых перемещений, использован взвешенный граф видимости [1] для множества многоугольников и ломаных на плоскости, задающих географические объекты. Доказано [2], что для множества полигональных препятствий кратчайший путь между двумя точками проходит по ребрам редуцированного графа видимости (графа видимости, ребра которого — отрезки опорных прямых к многоугольникам). Для определения весов ребер, которые зависят от типов соответствующих им объектов, был применен алгоритм обработки открытых маршрутов реальных туристических групп.

Известные алгоритмы построения графа видимости обладают одним из двух недостатков: либо они строят нередуцированный граф, что приводит к кратному увеличению числа ребер, либо они не реализуют возможность построения ребер, инцидентных заданной вершине, без построения полного графа. В настоящей работе предложен алгоритм построения графа видимости, лишенный данных недостатков, и имеющий амортизированную сложность порядка  $O(nh \log nh)$  операций, где  $n$  — количество вершин,  $h$  — количество многоугольников (не ограничивая общности) на плоскости. Данная сложность достигается за счет использования предложенного алгоритма построения опорных прямых к выпуклому многоугольнику за логарифмическое время, а также предварительного построения выпуклых оболочек многоугольников. Возможность построения ребер, инцидентных заданной вершине, использована в совокупности с алгоритмом поиска пути  $A^*$  (в качестве допустимой эвристики используется гаверсинус), который с большой вероятностью не проходит через все вершины графа, что сильно ускоряет однократный поиск кратчайшего пути.

Описанные алгоритмы реализованы в программной системе на языке Python [3]. В системе также реализованы механизмы загрузки и обработки географических данных, включая алгоритм Рамера—Дугласа—Пекера, алгоритм сжатия ребер и фильтрацию объектов внутри выбранной области. В системе также присутствуют механизмы экспорта и визуализации графа видимости и построенных маршрутов. Работа системы протестирована на примере местности в Новгородской области.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: введение // М. : Мир, 1989. 478 с.
- [2] Вычислительная Геометрия. Алгоритмы и приложения / М. де Берг, Ченг О., Кревельд М., Овермарс М. // М. : ДМК Пресс, 2017. 438 с.
- [3] Программная реализация системы построения маршрутов [Электронный ресурс] // URL: <https://github.com/Denikozub/Offroad-routing-engine>

## О некоторых замкнутых классах полиномиальных функций в восьмизначной логике

*Костиков Егор Вячеславович*

*Кафедра математической кибернетики*

*e-mail: kostikovev@mail.ru*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Селезнева Светлана Николаевна*

**Введение.** В 1997 году были описаны все замкнутые классы полиномиальных функций, содержащие класс линейных функций, для функций из  $P_4[1]$ . В 2017 году были описаны все замкнутые классы полиномиальных функций  $k$ -значной логики, содержащие класс линейных функций, для случая  $k = p^2$ , где  $p$  — некоторое простое число [2]. Полного описания замкнутых классов полиномиальных функций, содержащих класс линейных функций, для произвольного  $k$ , в частности, равного кубу некоторого простого числа, к настоящему времени не получено. В работе рассматриваются некоторые замкнутые классы полиномиальных функций из  $P_8$ , содержащие класс линейных функций  $L_8$ .

**Описание результатов.** Пусть  $A \subseteq P_8$ . Тогда будем обозначать через  $\langle A \rangle$  замкнутый класс  $[A \cup L_8]$ . В работе вводятся и подробно рассматриваются классы функций следующих видов:  $\langle 4x_1 \cdot \dots \cdot x_n \rangle$ ,  $\langle 2x_1^2 \cdot \dots \cdot x_k^2, 4x_1 \cdot \dots \cdot x_n \rangle$ , где  $k \geq 1$ ,  $n \geq 2$ . Также дополнительно рассматривается класс  $\langle x^3 \rangle$ . Указанные классы будем обозначать следующим образом:

1.  $A_n = \langle 4x_1 \cdot \dots \cdot x_n \rangle$ ,  $n \geq 2$ ;  $A_\infty = \langle 4x_1 \cdot \dots \cdot x_n | n \geq 2 \rangle$ ;
2.  $B_{k,n} = \langle 2x_1^2 \cdot \dots \cdot x_k^2, 4x_1 \cdot \dots \cdot x_n \rangle$ ,  $k \geq 1$ ,  $n \geq 2$ ;  
 $B_{\infty,\infty} = \langle 2x_1^2 \cdot \dots \cdot x_k^2, 4x_1 \cdot \dots \cdot x_n | k \geq 1, n \geq 2 \rangle$ .

Установлены следующие критерии принадлежности функций из  $P_8$  введенным классам в зависимости от вида нелинейных слагаемых в представлении функции полиномом:

**Утверждение 1.** Пусть  $n \geq 2$ . Тогда  $f(x_1, \dots, x_m) \in A_n$  тогда и только тогда, когда функцию  $f(x_1, \dots, x_m)$  можно представить в виде полинома, в котором каждое нелинейное слагаемое имеет вид  $4x_{i_1} \cdot \dots \cdot x_{i_s}$ , где  $1 \leq i_1, \dots, i_s \leq m$ ,  $2 \leq s \leq \min(m, n)$ .

**Утверждение 2.** Пусть  $k \geq 1$ ,  $n \geq 2$ . Тогда  $f(x_1, \dots, x_m) \in B_{k,n}$  тогда и только тогда, когда функцию  $f(x_1, \dots, x_m)$  можно представить в виде полинома, в котором каждое нелинейное слагаемое имеет вид  $4x_{i_1} \cdot \dots \cdot x_{i_s}$ , где  $1 \leq i_1, \dots, i_s \leq m$ ,  $2 \leq s \leq \min(m, \max(k+1, n))$ , или вид  $2ax_{j_1}^2 \cdot \dots \cdot x_{j_l}^2$ , где  $a \in E_4$ ,  $1 \leq j_1, \dots, j_s \leq m$ ,  $1 \leq l \leq \min(m, k)$ .

В следующих утверждениях показывается, что между введенными замкнутыми классами другие промежуточные замкнутые классы отсутствуют.

**Утверждение 3.** Справедливы следующие утверждения:

1. Для любого  $n \geq 2$  верно, что между классами  $A_n$  и  $A_{n+1}$  замкнутых классов не имеется;  $\bigcup_{n \geq 2} A_n = A_\infty$ ;
2. Для любого  $k \geq 1$  и  $n \geq k + 1$  верно, что между классами  $B_{k,n}$  и  $B_{k,n+1}$  замкнутых классов не имеется;  $\bigcup_{n \geq k+1} B_{k,n} = B_{k,\infty}$ ;
3. Между классами  $L_8$  и  $A_2$  замкнутых классов не имеется.

**Утверждение 4.** Для любого  $n \geq 2$ :

1. между  $A_n$  и  $B_{1,n}$  не имеется замкнутых классов;
2. между  $B_{k,n}$  и  $B_{k+1,n}$  не имеется замкнутых классов, где  $1 \leq k \leq n - 2$ .

С помощью указанных утверждений полностью описывается подынтервал интервала  $[L_8; F_8]$ , где через  $F_8$  обозначен класс всех полиномиальных функций. Также можно сделать следующий вывод о строении решетки замкнутых классов полиномиальных функций в восьмизначной логике:

**Теорема 1.** Решётка классов  $L_8$ ,  $A_n$ ,  $B_{k,n}$ , где  $k \geq 1$ ,  $n \geq 2$ ,  $\langle x^3 \rangle$ ,  $F_8$  устроена приведенным на рис. 1 образом.

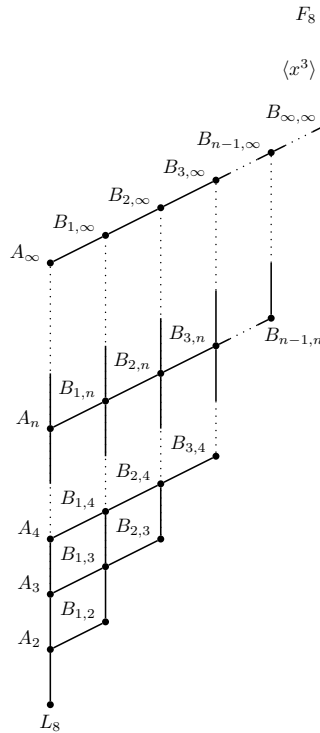


Рис. 1: Фрагмент решётки  $[L_8; F_8]$

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Крохин А. А., Сафин К. Л., Суханов Е. В. О строении решетки замкнутых классов полиномов // Дискретная математика. 1997. Т. 9, № 2. С. 24–39.
- [2] Мещанинов Д. Г. Замкнутые классы полиномов по модулю  $p^2$  // Дискретная математика. 2017. Т. 29, № 3. С. 54–69.

## Повышение производительности некоторых методов решения систем линейных уравнений за счёт оптимизации работы с памятью

*Куприй Роман Михайлович*

*Кафедра суперкомпьютеров и квантовой информатики*

*e-mail: roman.kupry@gmail.com*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. асс. Жуков Константин Андреевич*

**Введение.** Операция умножения разреженной матрицы на вектор является важным вычислительным блоком для многих численных итерационных алгоритмов решения систем линейных алгебраических уравнений. Однако, производительность этой операции намного ниже пиковых значений существующих вычислительных систем [1]. Одним из способов повышения производительности является использование более эффективных методов хранения разреженных матриц. Таким образом, были изучены существующие форматы хранения матриц, повышающие производительность целевой операции, исследованы их преимущества и недостатки.

**Реализованные форматы хранения.** В работе представлены две модификации широко распространенного формата Compressed Sparse Row (CSR). Они направлены на сокращение потребления памяти, необходимой для хранения индексов столбцов ненулевых элементов разреженной матрицы. Так, в первой модификации Row Incremental Compressed Sparse Row хранятся инкрементальные смещения каждого последующего индекса столбца от самого первого в строке. Вторая модификация Successive Row Incremental Compressed Sparse Row является расширением первой и направлена на увеличение числа матриц, для которых возможно сокращение объема потребляемой памяти. В этой модификации сохраняются инкрементальные смещения каждого последующего индекса столбца относительно предыдущего. Суть этих преобразований в том, что для ряда матриц для хранения смещений можно использовать 1 или 2 байта, вместо 4 байт как для хранения номеров столбцов. Такие улучшения, связанные с уменьшением битности целочисленного типа данных для хранения элементов матрицы, называются оптимизацией сжатия индексов. Необходимо отметить, что оптимизация сжатия индексов применима к исходному CSR формату, хоть и для очень малого числа матриц. Для модифицированных форматов сформулированы теоретические оценки эффективности и критерий применимости.

**Результаты вычислительных экспериментов.** Соответствующие реализации тщательно протестированы для оценки производительности операции умножения матрицы на вектор и для решения систем уравнений. Для проведения экспериментов использовались два подмножества тестовых матриц из коллекции SuiteSparse Matrix Collection [2]. Тестирование включало в себя сравнение времени вычислений при использовании предложенных модификаций относительно базового формата CSR. Для операции умножения

матрицы на вектор получено ускорение в 1.28 и 1.16 раза при использовании чисел с плавающей точкой одинарной и двойной точности соответственно, для обеих модификаций. Достижимое ускорение приведено для матриц удовлетворяющих критерию применимости. Соответствующий прирост производительности линейного итерационного метода решения систем уравнений приводит к сокращению времени вычислений примерно на 15% и 10%, для одинарной и двойной точности.

Полученные результаты показывают, что использование типов данных со сжатыми индексами может быть выгодным даже для исходного формата данных, но предлагаемые модификации также могут дополнительно повысить производительность вычислений.

Исследуемые форматы хранения разреженных матриц реализованы в библиотеке XAMG [3]. По результатам работы опубликованы статьи [4, 5].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Williams S., Waterman A., Patterson D. Roofline: An insightful visual performance model for multicore architectures // Communications of the ACM. 2009. Vol. 52, N 4. P. 65–76.
- [2] Davis T. A., Hu Y. The university of Florida sparse matrix collection // ACM Transactions on Mathematical Software. 2011. Vol. 38, N 1. P. 1–25.
- [3] Krasnopolsky B., Medvedev A. XAMG: Source code repository // URL: <https://gitlab.com/xamg/xamg/> (дата обращения: 05.04.2023).
- [4] Kuprii R., Krasnopolsky B., Zhukov K. RICSr: A modified CSR format for storing sparse matrices // Lecture Notes in Computer Science. 2022. Vol. 13708. P. 486–500.
- [5] Kuprii R., Krasnopolsky B., Zhukov K. Estimating the Effect of Indices Compression in the CSR-like Data Storage Formats for Matrix-Vector Multiplications and Solving Linear Systems // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023. Vol. 8.



# Исследование и разработка методов машинного обучения в задаче обнаружения неисправностей оборудования

*Ломоносова Вероника Евгеньевна*

*Кафедра интеллектуальных информационных технологий*

*e-mail: ve.lomonosova@gmail.com*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Царёв Дмитрий Владимирович*

Работа оборудования, находящегося в неисправном состоянии, способна привести к возникновению несчастных случаев (например, пожар), к появлению более серьёзной поломки самого оборудования, а также к перерасходу электроэнергии [1]. Исходя из идеи, что значения характеристик функционирования оборудования в штатном и неисправном состояниях существенно отличаются друг от друга, в данной работе было проведено исследование подхода по обнаружению аномального поведения оборудования. При этом поведение оборудования описывалось в виде временного ряда потребления его электроэнергии. Из-за разнообразия существующих типов оборудований также предъявлялось требование, что разрабатываемые методы обнаружения аномалий должны быть основаны на машинном обучении.

В рамках работы были исследованы два класса методов обнаружения аномалий: на основе обучения без учителя и на основе авторегрессии с дальнейшим анализом отклонений реальных данных от прогнозируемых. В качестве методов обучения без учителя были рассмотрены: одноклассовый метод опорных векторов (англ. One-Class Support Vector Machine, OCSVM), изолирующий лес (англ. Isolation Forest, IF), локальный уровень выброса (англ. Local Outlier Factor, LOF). Для реализации авторегрессии были выбраны: линейная авторегрессия, градиентный бустинг и нейронные сети различных архитектур (долгосрочная краткосрочная память (англ. Long short-term memory, LSTM), рекуррентная нейронная сеть (англ. Recurrent neural network, RNN), управляемый рекуррентный блок (англ. Gated Recurrent Units, GRU), многослойный персептрон).

На основе проведенного обзора научных работ для экспериментального исследования разрабатываемых методов были выбраны два набора данных:

- LEAD – почасовые данные электропотребления 200 зданий с 2016 года;
- IQDS – поминутные данные электропотребления 5 вентиляционных систем коммерческих зданий с 2021 года.

Набор LEAD хотя и содержит данные об электропотреблении зданий целиком, а не отдельных оборудований, был рассмотрен в дополнение к IQDS, т.к. является открытым набором и часто встречается в научной литературе [2]. Набор IQDS содержит лишь частичную экспертную разметку, поэтому в ходе работы была произведена типизация выделенных неисправностей, после чего был самостоятельно размечен фрагмент данных, состоящий из 426240

точек (296 суток). В результате было получено 4% аномальных точек в 44 различных днях.

Как показал анализ наборов данных, временные ряды электропотребления имеют достаточно сложную структуру, обусловленную различными режимами работы оборудования, а также могут содержать шум [3]. Поэтому дополнительно было предложено исследовать применение предобработки получаемых временных рядов. Для этого были выбраны следующие методы: декомпозиция эмпирических мод (англ. Empirical Mode Decomposition, EMD), анализ сингулярного спектра (англ. Singular spectrum analysis, SSA), фильтр Калмана.

В ходе проведённых экспериментальных исследований было предложено два метода обнаружения неисправностей оборудования. Первый метод, основанный на локальном уровне выбросов (LOF) и использующий декомпозицию эмпирических мод (EMD) для предобработки исходных данных, показал лучшее качество обнаружения аномалий на наборе LEAD по сравнению с методами, предложенными авторами данного набора. Второй разработанный метод основан на авторегрессии (CatBoostRegressor) с использованием анализа сингулярного спектра (SSA) в качестве предобработки входящих временных рядов. Данный метод показал наилучшее качество обнаружения на наборе данных IQDS.

Результаты, представленные в работе, были доложены на конференции «Ломоносовские чтения» (Россия, Москва, 2023) и опубликованы в виде тезисов [4].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yeckle J., Tang B. Detection of electricity theft in customer consumption using outlier detection algorithms //2018 1st international conference on data intelligence and security (ICDIS). – IEEE, 2018. – С. 135-140.
- [2] Gulati M., Arjunan P. LEAD1. 0: a large-scale annotated dataset for energy anomaly detection in commercial buildings //Proceedings of the Thirteenth ACM International Conference on Future Energy Systems. – 2022. – С. 485-488.
- [3] Himeur Y. et al. Artificial intelligence based anomaly detection of energy consumption in buildings: A review, current trends and new perspectives //Applied Energy. – 2021. – Т. 287. – С. 116601.
- [4] Царёв Д. В., Ломоносова В. Е. Применение методов машинного обучения в задаче обнаружения неисправностей оборудования //Ломоносовские чтения. – 2023. – С. 117-119.

## Применение генеративно-сопоставительных сетей к задаче секционирования полупрозрачного слоистого объекта

*Мещерякова Юлия Федоровна*

*Кафедра математической физики*

*e-mail: yuliya.mes@gmail.com*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Романенко Татьяна Евгеньевна*

Анализ структуры кровеносных сосудов сетчатки является информативной методикой диагностики ретинопатии — наиболее распространённого заболевания сетчатки в мире, вследствие чего неинвазивное восстановление трехмерной структуры глазного дна является одной из актуальных задач современной офтальмологии.

Компьютерные методы решения данной задачи предполагают, в том числе, быстрое решение задачи оптического секционирования на основании стека изображений, полученных при фокусировке на разном расстоянии от зрачка [1]. Основная сложность задачи заключается в том, что, помимо флуктуаций фиксации и аберраций оптической системы глаза на истинное изображение слоя в фокусе накладываются расфокусированные изображения соседних слоев, что принципиально отличает задачу оптического секционирования от задачи двумерной деконволюции.

Целью данной работы является численное решение задачи секционирования — обратной задачи, для чего, во-первых, численно решается прямая задача получения стека наблюдаемых изображений по истинным плоским сечениям объекта и параметрам оптической системы, генерируются синтетические данные для обучения нейронных сетей. Затем показавшие наибольшую эффективность в предыдущих исследованиях методы применяются к задаче двумерной деконволюции и адаптируются к задаче секционирования.

Решение обратной задачи производится при помощи генеративно-сопоставительных сетей GAN. Основное отличие применяемых в работе нейронных сетей GAN-D [2] от классической архитектуры GAN заключается в том, что при обучении искомое истинное изображение известно, поэтому в loss-функции генератора учитывается среднеквадратичная ошибка между полученным изображением и искомым. В качестве генератора в работе используются нейронная сеть ODCNN [2] — комбинация классической сверточной нейронной сети с блоком шумоподавления, и нейронная сеть U-Net, как было предложено в [3]. В качестве дискриминатора используется классификационная нейронная сеть специальной структуры для использования в системе GAN — PatchGAN [3].

Второй рассматриваемой в данной работе системой нейронных сетей являются физически-обусловленные генеративно-сопоставительные сети Physics-Based GAN [4]. Данная архитектура позволяет учитывать соответствие между генерируемым восстановленным изображением и наблюдаемым при помощи включения в систему еще одной нейронной сети-дискриминатора. Фи-

зическая обусловленность сети достигается за счет использования конкретного вида функции рассеяния точки (PSF) — на вход второму дискриминатору подаются наблюдаемое изображение и восстановленное, размытое при помощи предполагаемой PSF. Для двух дискриминаторов, аналогично системе GAN-D, использовалась архитектура PatchGAN. В качестве генератора, аналогично [4], используется циклическая нейронная сеть, состоящая из остаточных блоков.

Для сравнения полученных результатов используется индекс PSNR. Для двумерной задачи деконволюции на экспериментальных данных визуально и численно наилучший результат показала система нейронных сетей GAN-D U-Net. Системы GAN-D U-Net и Physics-Based GAN были адаптированы для трехмерного случая.

Полученные для задачи оптического секционирования результаты работы генеративно-сопоставительных сетей сравниваются с результатами, полученными классическими методами — методом ближайших соседей и алгоритмом Ричардсона—Люси. Из всех рассмотренных методов наилучшим образом трехмерную задачу деконволюции решает система нейронных сетей Physics-Based GAN. Ее применение к экспериментальным данным, не участвовавшим в обучении моделей, дает стабильно высокое значение индекса PSNR, что позволяет говорить о применимости системы нейронных сетей Physics-Based GAN к задаче оптического секционирования.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Об одной задаче численного секционирования в офтальмологии / А. В. Разгулин, Н. Г. Ирошников, А. В. Ларичев, С. Д. Павлов, Т. Е. Романенко // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 5. С. 777–786.
- [2] GAN-D: Generative adversarial networks for image deconvolution / Ha Yeon Lee, Jin Myung Kwak, Byunghyun Ban, Seon Jin Na, Se Ra Lee, Heung-Kyu Lee // ICTC 2017. IEEE, 2017. P. 132–137
- [3] Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks / Phillip Isola, Jun-Yan Zhu, Tinghui Zhou, Alexei A. Efros // CVPR 2017. IEEE, 2017. P. 1125–1134
- [4] Physics-Based Generative Adversarial Models for Image Restoration and Beyond / Jinshan Pan, Jiangxin Dong, Yang Liu, Jiawei Zhang, Jimmy Ren, Jinhui Tang, Yu-Wing Tai, Ming-Hsuan Yang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2021. Vol. 43, N 7. P. 2449–2462

## Определение и локализация регрессий производительности во время исследовательского тестирования мобильных приложений

*Михальцов Данила Алексеевич*

*Кафедра системного программирования*

*e-mail: danila-mikh@ya.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Турдаков Денис Юрьевич*

*Научный консультант — Сорокин Константин Сергеевич*

В последнее время наблюдается рост рынка мобильных приложений. Современные мобильные приложения — это сложные программные продукты, поэтому в них присутствуют ошибки, в том числе вызывающие проблемы с производительностью. Такие ошибки в приложениях сильно влияют на пользовательский опыт [1], и разработчики заинтересованы в их автоматизированном поиске [2]. Один из видов автоматизированного тестирования приложений, популярный в настоящее время [3,4] — *исследовательское тестирование* (exploratory testing, GUI testing). Это тестирование производится с помощью имитации тестирующей системой взаимодействия пользователя с графическим интерфейсом приложения: тестирующая система получает информацию о состоянии устройства и посылает ему информацию о действии, которое необходимо совершить на устройстве.

В процессе разработки мобильного приложения некоторые изменения могут приводить к появлению *регрессий производительности* — ухудшению производительности приложения по сравнению с прошлыми версиями. Для обнаружения регрессий применяется метод *регрессионного тестирования* — приложение регулярно проходит набор определённых тестов. В качестве таких тестов могут выступать сеансы исследовательского тестирования.

Целью работы является создание системы для определения и локализации регрессий производительности во время исследовательского тестирования мобильных приложений. Разработанная система устроена следующим образом. Определён набор приложений, которые регулярно тестируются с помощью исследовательского тестирования (например, настроен процесс Continuous Integration). Во время исследовательского тестирования собираются *данные трассировки* — показатели загрузки устройства: использование ресурсов процессора, объём занимаемой оперативной памяти и т. д. При каждом запуске исследовательского тестирования данные трассировки сохраняются в аналитической системе для дальнейшего использования в качестве исторических данных данного приложения. При тестировании новой версии приложения его данные трассировки проходят проверку на аномальность с использованием имеющихся исторических данных. Если эти данные трассировки аномальны, то пользователю системы сообщается, что в этой версии могли появиться проблемы с производительностью. Также пользователю предоставляется интерактивный интерфейс для просмотра локализованных

аномальных участков. Эти данные и данные, полученные от инструмента исследовательского тестирования, используются специалистом для поиска потенциальной проблемы с производительностью.

В результате данной работы были получены следующие результаты:

- разработан модуль для инструмента исследовательского ИСП РАН для сбора данных трассировки;
- разработаны и реализованы методы для *обнаружения* и *локализации* аномалий в данных трассировки на основе построения модели ожидаемого поведения приложения и анализа временных рядов с помощью матричных профилей соответственно;
- для предложенных методов была проведена оценка качества их работы на подготовленных наборах данных, для классификации получено значение метрики  $F1\text{-score} = 0,701$ ;
- на основе разработанных методов для обнаружения и локализации аномалий была построена система регрессионного тестирования для обнаружения проблем с производительностью в мобильных приложениях.

На основе данной работы была опубликована статья [5] в сборнике «Proceedings of Ivannikov ISPRAS Open Conference».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Investigating types and survivability of performance bugs in mobile apps / Alejandro Mazuera-Rozo, Catia Trubiani, Mario Linares-Vasquez, Gabriele Bavota // Empirical Software Engineering. 2020. Vol. 25. P. 1–43.
- [2] Adrian Nistor, Tian Jiang, Lin Tan Discovering, reporting, and fixing performance bugs // 2013 10th Working Conference on Mining Software Repositories (MSR). 2013. P. 237–246.
- [3] Juha Eskonen, Julen Kahles, Joel Reijonen Automating GUI Testing with Image-Based Deep Reinforcement Learning // 2020 IEEE International Conference on Autonomic Computing and Self-Organizing Systems (ACSOS). 2020. P. 160–167.
- [4] Improving Automated GUI Exploration of Android Apps via Static Dependency Analysis / Wunan Guo, Liwei Shen, Ting Su, Xin Peng, Weiyang Xie // 2020 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME). 2020. P. 557–568.
- [5] Mikhaltsov D. A., Sorokin K. S. Detecting anomalous device loads during exploratory testing of mobile applications // 2022 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS). 2022. P. 43–49.

## Метод компьютерного анализа изображений плодовых деревьев

*Работа удостоена диплома  
степени*

**Нестеров Дмитрий Андреевич**

*Кафедра математической физики  
e-mail: dim.nesterov2015@gmail.com*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Крылов Андрей Серджевич*

В настоящее время в большинстве агротехнологических операций на фермах и в садах используется ручной труд, который отнимает много времени и подвержен влиянию человеческого фактора. С развитием информационных технологий появляется всё больше возможностей автоматизировать многие сельскохозяйственные процессы, в том числе процесс оценивания размера урожая плодов в промышленных садах.

Автоматизация подобного процесса может быть реализована за счёт анализа изображений плодовых деревьев, при этом ключевыми задачами являются детектирование, подсчет и локализация плодов.

Целью работы является разработка и реализация метода автоматической детекции и сегментации плодов на изображениях яблоневых деревьев в промышленных садах. В работе рассматривается задача *объектной сегментации*: по входному изображению предсказывается маска сегментации и ограничивающий прямоугольник для каждого яблока.

Современные методы решения данной задачи в основном используют нейронные сети, поскольку в последние годы они значительно превосходят классические методы по качеству работы. Нейросетевые методы детекции можно разделить на две категории: Single-Shot Detectors (SSD, одностадийные детекторы) и Region-Based Detectors (двухэтапные детекторы). Как правило, одностадийные отличаются большей скоростью работы и лучше подходят для работы в режиме реального времени, однако проигрывают двухстадийным по точности.

В работе предложен метод на основе двухэтапной нейросети Mask R-CNN [1] и проведено его сравнение с алгоритмом на основе той же нейросети авторов работы [2] на предложенном ими наборе данных Fuji-SfM.

Нейросеть Mask R-CNN состоит из двух частей: *кодировщика* (backbone) и *генератора гипотез* (region-proposal network, RPN). Кодировщик извлекает из подданого ему изображения набор карт признаков, которые представляют собой тензоры с пространственным разрешением меньше, чем у входного изображения, при этом с большим числом каналов.

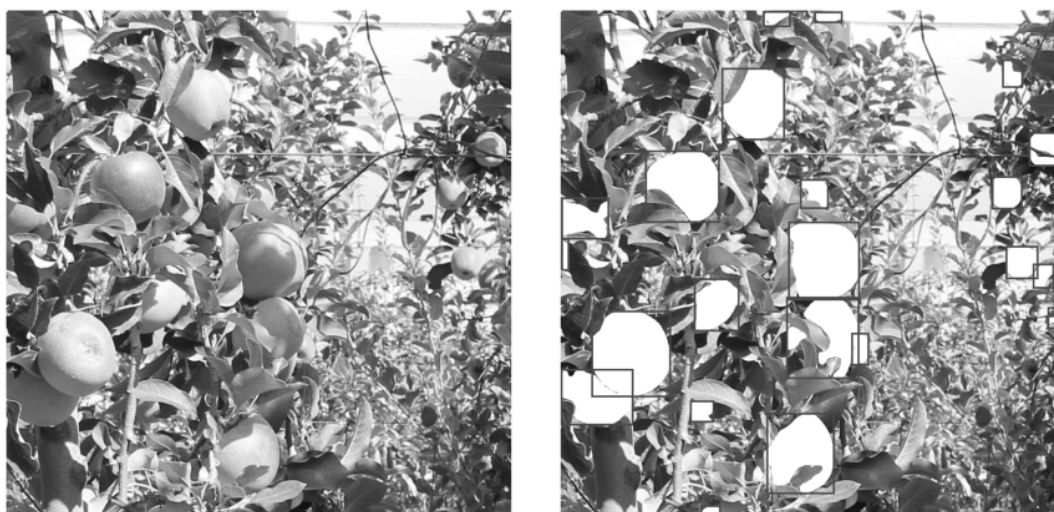
С помощью извлеченных карт признаков RPN строит гипотезы о местонахождении целевых объектов, фактически выбирая прямоугольные фрагменты с карт признаков, после чего по этим фрагментам с помощью свёрточных и полносвязных слоёв предсказываются маски сегментации и ограничивающие прямоугольники.

Авторы статьи [2] обучали нейросеть Mask R-CNN, используя стохастический градиентный спуск (SGD) с постоянным темпом обучения. В работе предлагается использовать более современный адаптивный оптимизатор Adam, также используя механизм разогрева (warmup) и уменьшая темп обучения с течением времени.

Для оценки результатов использовалась метрика average precision, AP:

$$AP = \frac{1}{11} \sum_{r \in \{0, 0.1, \dots, 1\}} precision(r),$$

где  $r$  — полнота,  $precision(r)$  — точность при заданной полноте  $r$  на precision-recall кривой. Полнота определяется как доля найденных детектором целевых объектов среди всех объектов в эталонной разметке изображения. Точность определяется как отношение количества верных срабатываний детектора к числу всех детекций на изображении.



Пример работы метода. Слева — исходное изображение, справа — полученные маски сегментации и ограничивающие прямоугольники для каждого яблока.

Результаты показали улучшение целевых метрик для масок сегментации и ограничивающих прямоугольников на 4-12%, предложенный метод был программно реализован на языке Python3.8 с использованием фреймворка PyTorch. Весь исходный код доступен по ссылке:

<https://github.com/dmitrylala/apple-detection>.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mask R-CNN / K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, R. Girshick // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2017. P. 2961–2969
- [2] Fruit detection and 3D location using instance segmentation neural networks and structure-from-motion photogrammetry / J. Gené-Mola, R. Sanz-Cortiella, J.R. Rosell-Polo, J.-R. Morros, J. Ruiz-Hidalgo, V. Vilaplana, E. Gregorio // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 169, P. 105165



# Исследование методов автоматической генерации входных данных для тестирования модулей обработки шаблонов веб-страниц

*Николайчук Артём Константинович*

*Кафедра информационной безопасности*

*e-mail: antyartem1@yandex.ru*

*Научный руководитель — м.н.с Петухов Андрей Александрович*

Шаблонизаторы - это программные инструменты, которые применяются для генерации сложных HTML-документов на основе шаблонной части. В шаблонной части обозначены точки подстановки данных, которые в процессе генерации итогового документа динамически связываются с конкретными значениями. Подставляемые в шаблон данные в том числе могут поступать от пользователя веб-приложения. Чтобы подстановка пользовательских данных в HTML-страницу не привела к уязвимости XSS, данные должны проходить т.н. санитизацию - кодирование или экранирование специальных символов, которые могут изменить структуру генерируемого документа. Шаблонизатор может выполнять санитизацию автоматически, опираясь на контекст подстановки. Нахождение ошибок в этом механизме автоматизированными средствами — до сих пор нерешенная и актуальная задача.

В данной работе проводится исследование применимости методов fuzz-тестирования для проверки корректности функции автоматической санитизации, реализованной в стандартном шаблонизаторе языка Go. В чём сложность fuzz-тестирования шаблонизатора - нужно уметь генерировать шаблоны, которые являются синтаксически корректными и при этом обладают хорошей вариативностью. Как оценить полезность каждого из шаблонов и определить, что фаззер не застрял на месте - нужно опираться на покрытие исходного кода. Как генерировать различные шаблоны и при этом оптимизировать метрику покрытия - нужно использовать мутации, которые позволят создавать поколения, отличающиеся друг от друга. Как и откуда брать данные для подстановки в шаблон - нужно уметь генерировать код на языке программирования, который соединит заранее подготовленные данные и шаблон. Как автоматически определять ошибку санитизации - нужно уметь сравнивать результат работы шаблонизатора с эталонным.

В ходе исследования был разработан и реализован полностью автоматический фаззер для шаблонизатора языка Golang. Была составлена контекстно-свободная грамматика шаблонизатора, по которой фаззер генерировал тестовые данные. Грамматика была аннотирована вероятностями: на первой эпохе фаззинга используются вероятности, подсчитанные по шаблонам из открытых проектов, на следующих этапах вероятности пересчитываются. Алгоритм реализует идею fuzz-тестирования с обратной связью - на каждой итерации процесса тестирования фаззер получает информацию о покрытии строчек исходного кода шаблонами текущей эпохи, на основании которой изменяет

вероятности в грамматике. Реализовано два типа мутаций для выхода из точек локального максимума. Разработан отдельный модуль для определения ошибок шаблонизатора в механизме санитизации.

Было проведено экспериментальное исследование следующих свойств и параметров алгоритма: алгоритмы мутаций [1], глубина генерируемых абстрактных синтаксических деревьев [2], количество шаблонов в каждом поколении и коэффициент «устаревания». Для поиска оптимальных параметров применялся итерационный метод. После двух недель fuzz-тестирования алгоритм покрыл 55.8% исходного кода шаблонизатора.

Реализованный алгоритм достигает высоких показателей покрытия исходного кода шаблонизатора языка Golang и может быть адаптирован для тестирования других шаблонизаторов.

Готовая реализация алгоритма выложена в открытом доступе на ресурсе github [3]. К инструменту приложена инструкция по повторению экспериментов и использованию фаззера для дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hodovan R., Kiss A., Gyimothy T. Grammarinator: A Grammar-Based Open Source Fuzzer. // Proceedings of the 9th ACM SIGSOFT International Workshop on Automating TEST Case Design, Selection, and Evaluation. 2018. P. 45-48.
- [2] Havrikov N. Kampmann A. Zeller A. From Input Coverage to Code Coverage: Systematically Covering Input Structure with k-Paths. // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. ISSN 1049-331X
- [3] Николайчук А. К. Реализация алгоритма // <https://github.com/iStrannik/FuzzGoTemplate>

## Исследование эффективности метода прореживания нейронных сетей в процессе обучения

*Новиков Дмитрий Андреевич*

*Кафедра Суперкомпьютеров и Квантовой Информатики*

*e-mail: s02190162@gse.cs.msu.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Буряк Дмитрий Юрьевич*

*Научный консультант — к.ф.-м.н. доц. Попова Нина Николаевна*

Глубокие нейронные сети имеют десятки, а иногда сотни скрытых слоев и огромное количество параметров. Однако известно, что многие параметры нейронной сети излишни, так как оказывают незначительное влияние на результат ее работы. Для определения и удаления таких параметров применяют алгоритмы прореживания, которые разделяются на два типа:

1. Итеративное прореживание - часть параметров удаляется из предварительно обученной нейронной сети, после чего она дообучается до необходимой точности.
  - (a) Прореживание на основе величины (Magnitude-based pruning [1])
  - (b) Прореживание на основе  $L_1$  нормы [4]
  - (c) Прореживание на основе расстояния Евклида [5]
2. Прореживание в процессе обучения - избыточные параметры нейронной сети детектируются и удаляются непосредственно в процессе обучения.
  - (a) Эволюционное обучение (SET [6])
  - (b) Эволюционное обучение на основе градиента (Rig [7])

В рамках данной работы был разработан метод прореживания глубокой нейронной сети в процессе обучения. Предложенный метод прореживания нейронных сетей в процессе обучения основан на идее метода «Случайный выбор функции подмножества» [3]. Где задача классификации разбивается на набор классификаторов, которые используют случайные подмножества признаков, и где качество каждого отдельного признака можно оценить по его участию в правильных классификациях.

Каждый параметр сети  $f_j$  из множества всех параметров сети  $F$  имеет значение релевантности  $r_j \in (0, +\infty)$ . Кроме того, вводится набор фиктивных параметров  $z_j \in Z$ , значение релевантности  $q_j \in (0, +\infty)$ .

Во время каждой  $i$ -ой итерации алгоритма:

1. Осуществляется случайный выбор с равномерным распределением  $n$  параметров из множества  $F$ , которые формируют множество  $S_i$  ( $|S_i| = n$ )
2. Модель нейронной сети осуществляет классификацию, используя параметры из множества  $S_i$ , и вычисляет значение функции потерь  $c_i$ , которая характеризует эффективность классификации.

3. Обновление значения релевантности  $r_j$  используемых параметров  $f_j$ :

$$\text{new\_r}_j = r_j + c_i - E(c), \quad (1)$$

здесь  $c_i$  - значение функции потерь на итерации  $i$ ,  $E(c)$  - математическое ожидание функции потерь.

Параллельно с обновлением релевантности параметров  $f_j$  аналогичный процесс выполняется для фиктивных параметров  $z_j$ , всегда выбирая случайное подмножество из  $m$  фиктивных параметров, а затем обновление значений их релевантности  $q_j$  в соответствии с формулой:

$$\text{new\_q}_j = q_j + c_i - E(c). \quad (2)$$

Релевантность фиктивных параметров обеспечивает базовый уровень  $r_{rand}$ , чтобы найти набор параметров  $S \subset F$  проводится статистическая проверка. В частности, требуется, чтобы релевантность  $r_j$  параметра  $f_j$  удовлетворяла:

$$p(r_j > r_{rand}) \geq \delta, \forall f_j \in S_i, F, \quad (3)$$

здесь  $\delta$  - фиксированный порог вероятности. Случайный базовый уровень  $r_{rand}$  моделируется как нормальное распределение фиктивных релевантностей  $q_j$ , таким образом, вероятность того, что функция более актуальна, чем фиктивная функция, получается из нормального распределения:

$$p(r_j > r_{rand}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{r_j} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (4)$$

здесь  $\mu$  и  $\sigma$  - среднее значение и стандартное отклонение релевантности  $q_j$  по всем фиктивным параметрам множества  $Z$ .

Проведено сравнительное исследование разработанного метода с методами прореживания на основе  $L_1$  нормы и на основе расстояния Евклида. Для проведения экспериментов был выбран набор данных Cifar10, модели сверточных нейронных сетей ResNet18 [8] и VGG16 [9].

Из анализа полученных экспериментальных результатов следует, что при прореживании сверточной нейронной сети ResNet-18 на 60% точность предложенного метода превосходит точность метода прореживания на основе  $L_1$  нормы на 0.26%, точность метода на основе расстояния Евклида на 0.69%. При аналогичном прореживании сверточной нейронной сети VGG-16 превосходит соответствующие методы на 4.12% и 5.81%.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Song H., Jeff P., John T., Dally W. Learning both Weights and Connections for Efficient Neural Network.
- [2] Yann Le Cun, John S. S, Sara A. S. Optimal Brain Damage
- [3] RSFS Jouni P., Okko R. Feature Selection Methods and Their Combinations in High-Dimensional Classification of Speaker Likability, Intelligibility and Personality Traits

- 
- [4] Structured Pruning for Efficient ConvNets via Incremental Regularization / Huan W., Qiming Z., Yuehai W., Lu Y., Haoji H.
  - [5] Luis G., Bohan Z., Ian Reid, Tom D. Automatic Pruning for Quantized Neural Networks.
  - [6] Scalable training of artificial neural networks with adaptive sparse connectivity inspired by network science / Constantin M., Elena M., Peter S., Phuong N., Madeleine G., Antonio L.
  - [7] Rigging the Lottery: Making All Tickets Winners / Utku E., Trevor G., Jacob M., Pablo C., Erich E.
  - [8] Deep Residual Learning for Image Recognition / Kaiming H., Xiangyu Z., Shaoqing R., Jian S.
  - [9] Karen S., Andrew Z. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition.

# Исследование эффективности масштабирования алгоритма многоагентного обучения с подкреплением для балансировки трафика

Озерова Дарья Александровна<sup>1</sup>, к.ф.-м.н. Антоненко Виталий Александрович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов, e-mail: s02190164@gse.cs.msu.ru

<sup>2</sup> Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов, e-mail: anvial@lvk.cs.msu.ru

Инженерия трафика (Traffic Engineering, TE) — хорошо зарекомендовавший себя механизм, который играет фундаментальную роль в производительности современного Интернета. Его основной целью является обеспечение эффективной и надежной работы сети при условии оптимизации использования сетевых ресурсов. Одной из реализаций TE является алгоритм балансировки трафика MARL-GNN-CN, критерием оптимизации которого является минимизация максимальной нагрузки на сетевой канал. В данном алгоритме реализована архитектура, сочетающая в себе многоагентное обучение с подкреплением (Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL), графовые нейронные сети (Graph neural networks, GNN) и консистентное хеширование (Consistent Hashing, CH). На начальном этапе алгоритма запускается графовая нейросеть MPNN (Message Passing Neural Network), которая принимает на вход сетевую топологию в виде ориентированного мультиграфа и возвращает его векторное представление, где на выходе для каждого узла будет сформирован собственный вектор значений, который в дальнейшем будет использоваться для формирования хеш-весов для ребер сетевой топологии.

Недостаток алгоритма заключается в сложности масштабирования данной модели с точки зрения роста размера топологии сети. Работа MPNN на больших сетевых топологиях требует большого объема оперативной памяти для хранения векторного представления полного графа на каждой итерации и характеризуется долгим временем выполнения.

Данная работа посвящена разработке и реализации модуля динамического масштабирования вышеописанного алгоритма. Для минимизации использования ресурсов вычислительной системы было принято решение распараллелить работу MARL-GNN-CN алгоритма на разных частях сетевой топологии. Для решения поставленной задачи был проведен обзор алгоритмов разбиения графа на подграфы, основными критериями которого были сбалансированность разбиения и минимизация размера среза. Было проведено экспериментальное исследование параллельного MARL-GNN-CN алгоритма, на основе которого была откалибрована метрика масштабирования, которая показыва-

ет оптимальное количество подграфов для распараллеливания в зависимости от размера заданной топологии.

Таким образом, в данной работе были решены все вышеперечисленные проблемы. При помощи параллельной версии MARL-GNN-CH удалось сократить время работы алгоритма, по результатам экспериментального исследования параллельный MARL-GNN-CH имеет скорость работы в 2 раза превышающую скорость работы исходного алгоритма. Также экспериментально было доказано, что модифицированный алгоритм позволяет найти баланс между точностью обучения модели, сокращением временных задержек и количеством требуемых ресурсов оперативной памяти.

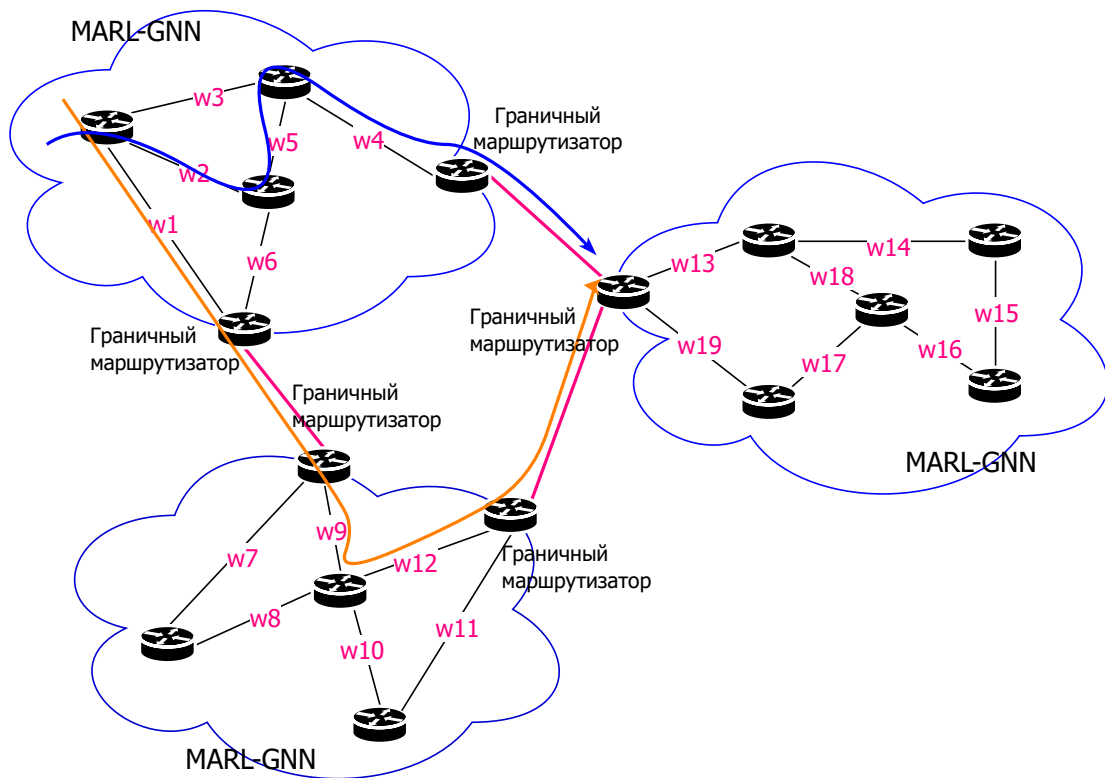


Рис.1 Схема работы масштабированного алгоритма MARL-GNN.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Bernárdez, G., Suárez-Varela, J., López, A., Wu, B., Xiao, S., Cheng, X., ... Cabellos-Aparicio, A. (2021, November). Is machine learning ready for traffic engineering optimization?. In 2021 IEEE 29th International Conference on Network Protocols (ICNP) (pp. 1-11). IEEE.
- [2] Kernighan, B. W., Lin, S. (1970). An efficient heuristic procedure for partitioning graphs. The Bell system technical journal, 49(2), 291-307.
- [3] Gupta, J. K., Egorov, M., Kochenderfer, M. (2017). Cooperative multi-agent control using deep reinforcement learning. In Autonomous Agents and Multiagent Systems: AAMAS 2017 Workshops, Best Papers, São Paulo, Brazil, May 8-12, 2017, Revised Selected Papers 16 (pp. 66-83). Springer International Publishing.
- [4] Zeng, H., Zhou, H., Srivastava, A., Kannan, R., Prasanna, V. (2019). Graphsaint: Graph sampling based inductive learning method. arXiv preprint arXiv:1907.04931.
- [5] Chiang, W. L., Liu, X., Si, S., Li, Y., Bengio, S., Hsieh, C. J. (2019, July). Cluster-gcn: An efficient algorithm for training deep and large graph convolutional networks. In Proceedings of the 25th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery data mining (pp. 257-266).



## Управление окном перегрузки с помощью методов машинного обучения

*Оконишников Арий Ариевич*

*Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов*

*e-mail: a3.okonishnikov@mail.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. м.н.с. Степанов Евгений Павлович*

Одним из методов обеспечения качества сервиса являются алгоритмы управления перегрузкой (АУП) [1]. АУП позволяют контролировать размер окна перегрузки, определяющий интенсивность отправки пакетов в сеть. В работе разработан АУП, который учитывает прогноз параметров качества сервиса канала: вероятности потери пакета - Loss, задержки доставки пакета - RTT, доступной пропускной способности - R. Предполагается, что прогноз качества канала составлен на все время жизни транспортного потока.

Существующие АУП в своей работе не опираются на прогноз. Это может приводить к выбору неоптимального окна перегрузки, и как следствие - повышенной задержке и неполному использованию доступной пропускной способности. Таким образом, цель данной работы - разработать алгоритм, учитывающий прогноз состояния канала для обеспечения низкой задержки и высокой скорости отправки. Также разработан метод проверки корректности прогноза на случай, если прогноз состояния канала станет недействительным.

Разработанный АУП можно рассматривать в применении к сетям Network powered by computing (NPC) [2], CDN [3] и CPN [4]. Например, в NPC вычислительные ресурсы связаны наложенными каналами. И согласно ее архитектуре периодически происходит мониторинг качества каналов. Эту информацию можно использовать для настройки АУП.

Основной идеей рассматриваемого в работе подхода является поиск размера окна перегрузки методом машинного обучения (ML) с учителем. Такая задача относится к типу задач регрессии машинного обучения, которые рассчитывают целевой признак на основе входных. В данном случае целевым признаком является размер окна перегрузки, а входными параметры Loss, RTT, R. Для выбора алгоритма решения задачи регрессии проведен обзор и сравнительный анализ доли ошибки на тестовой выборке, в которые вошли ансамбли деревьев [5] и методы, основанные на линейной и полиномиальной регрессии. В итоге самый точный регрессор (назовем его  $R_{use}$ ) из библиотеки CatBoost [6] с процентом ошибки 3.2% в метрике MAPE встроен в разработанный АУП.

В работе предложен алгоритм на основе BBRv2 [7], названный BBR FORECAST ML. В предложенный алгоритм добавлено состояние FORECAST, в котором АУП устанавливает размер окна перегрузки с помощью регрессора  $R_{use}$ . В данном состоянии АУП находится в начале работы и до тех пор, пока прогноз остается верным. В случае нарушения прогноза

АУП переходит в состояние PROBE\_RTT [7] и действует далее по алгоритму BBRv2.

В основу контроля соблюдения прогноза BBR FORECAST ML положено сравнение текущих параметров Loss, RTT, R с эталонными. Эталонами доли потерянных пакетов и круговой задержки являются соответствующие спрогнозированные значения. Эталонном скорости, которую транспортное соединение может достичь на канале с заданным прогнозом, является скорость  $R_{BBR}(Loss, R, RTT)$  под управлением АУП BBRv2. Для расчета  $R_{BBR}$  решена аналогичная задача регрессии методами случайного леса [5] и градиентного бустинга. Процент ошибки расчета скорости  $R_{BBR}$  от собранного датасета составил в метрике MAPE 4.9%.

Проведено экспериментальное исследование разработанного алгоритма BBR FORECAST ML с использованием реализации протокола QUIC ngtcp2 [8]. На соединении под управлением разработанного алгоритма наблюдается увеличение задержки на канале в 1.163 раза, вместо 1.622 раза у CUBIC [9] и 1.477 раза у BBRv2. Также скорость отправки данных оказалась выше в 1.804 и 1.209 раз чем у CUBIC и BBRv2 соответственно. Помимо этого найдена область применимости алгоритма в пространстве переменных RTT, Loss, R. Проведен анализ возможных причин несоблюдения прогноза вне этой области. Разработан механизм распознавания нарушения прогноза, исследованы и проанализированы результаты его работы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Allman, V. Paxson. Request for Comments: 5681 - TCP Congestion Control. Сентябрь 2009
- [2] Smeliansky R. Network Powered by Computing //2022 International Conference on Modern Network Technologies (MoNeTec). – IEEE, 2022. – С. 1-5.
- [3] Peng G. CDN: Content distribution network //arXiv preprint cs/0411069. – 2004.
- [4] Sun Y. et al. Computing power network: A survey //arXiv preprint arXiv:2210.06080. – 2022.
- [5] Banfield R. E. et al. A comparison of decision tree ensemble creation techniques //IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2006. – Т. 29. – №. 1. – С. 173-180.
- [6] Hancock J. T., Khoshgoftaar T. M. CatBoost for big data: an interdisciplinary review //Journal of big data. – 2020. – Т. 7. – №. 1. – С. 1-45.
- [7] Cardwell N. et al. BBRv2: A model-based congestion control performance optimization //Proc. IETF 106th Meeting. – 2019. – С. 1-32.
- [8] ngtcp2 [HTML] <https://github.com/ngtcp2/ngtcp2/>
- [9] Rhee I. et al. RFC 8312: CUBIC for Fast Long-Distance Networks. – 2018.

# Разработка системы управления движением голономного мобильного робота с использованием визуальной обратной связи

*Островерхов Андрей Сергеевич*

*Кафедра нелинейных динамических систем и процессов управления  
e-mail: andrey26052001@gmail.com*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Гончаров Олег Игоревич*

**Введение.** Целью выпускной квалификационной работы была разработка системы траекторного управления для голономного мобильного робота с роликонесущими колесами. Для определения положения робота в пространстве использовалась система локализации на основе видеокамеры. Основной сложностью реализации таких систем является наличие задержек (на получение и обработку изображений, на передачу управляющих сигналов роботу). В работе описана математическая структура такой системы управления и проведены эксперименты, позволяющие оценить работоспособность системы.

**Математическое описание системы.** Система управления содержит три основных компонента: робот, система локализации и регулятор.

Полная математическая модель робота описана в [1, 2, 3], она включает кинематическую модель, динамическую модель и модель приводов робота. Использование такой модели требует проведения дополнительной идентификации параметров робота. Игнорированием динамики и массы робота получена упрощенная модель:

$$\dot{\xi} = \frac{1}{c_1}(R^T(\theta)E^{-1}U), \quad (1)$$

где  $\xi = (x, y, \theta)$  – положение робота в пространстве, координаты на плоскости и угол ориентации,  $c_1$  – коэффициент противоЭДС двигателей робота,  $R(\theta)$  – матрица поворота,  $E$  – матрица кинематических связей робота,  $U$  – управляющее воздействие, напряжения, подаваемые на приводы робота.

Система локализации основана на ArUco метках и решении задачи обратной проекции [4]. Метками помечается робот и поверхность, на которой он расположен. Решение задачи обратной проекции позволяет рассчитать два преобразования координат: между камерой и роботом и между камерой и поверхностью, на которой расположен робот. Используя эти два преобразования координат, можно вычислять положение робота на поверхности.

Целью управления является движение робота по заданной траектории. Для построения регулятора введена ошибка регулирования  $\xi_e$ , произведена линеаризация упрощенной системы (1) заменой входа, после чего использован П регулятор. Получен результирующий закон управления, позволяющий вычислять напряжения, которые необходимо подавать на приводы робота:

$$U = c_1ER(\theta)K_p\xi_e,$$

гдк  $K_p$  – матрица параметров регулятора.

**Техническое описание системы.** Для тестирования системы использовался робот INEX ROBO-128, камера HD Pro Webcam C920, для обработки изображений написана программа на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV. Управляющие воздействия отправлялись роботу через радиоканал, организованный с помощью модулей XBee pro s1.

Были оценены задержки в контуре управления, возникающие в связи с необходимостью передачи изображения от камеры компьютеру, обработки изображения и передачи управляющих сигналов роботу. Установлено, что в 82.8 процентах случаев задержка составляет один кадр.

Работоспособность системы управления проверялась на тестовых траекториях, имеющих вид прямой и окружности. При движении по прямой использовалось 4 метки на столе и одна метка на роботе, при движении по окружности использовалось 5 меток на столе и 4 метки на роботе. Точность следования робота траектории отражена в таблице 1.

Координаты робота	Средняя ошибка	Стандартное отклонение ошибки	Максимальная ошибка
Движение по прямой			
По оси X (см)	0.015	0.622	3.240
По оси Y (см)	-0.436	0.504	2.051
Угол ориентации (рад)	-0.029	0.070	0.065
Движение по окружности			
По оси X (см)	-0.026	0.490	1.552
По оси Y (см)	0.056	0.445	1.371
Угол ориентации (рад)	-0.010	0.065	0.191

Табл. 1: Точность следования робота траектории.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Waldron K., Schiedeler J. Kinematics // Springer Handbook of Robotics. 2008. С. 9–33.
- [2] Featherstone R., Orin D.E. Dynamics // Springer Handbook of Robotics. 2008. С. 35–65.
- [3] Анюшева И. Б. Разработка системы управления для робота со шведскими колесами : выпускная квалификационная работа : 01.03.02 / Анюшева Ирина Батыровна. Москва, 2015. 27 с.
- [4] OpenCV documentation. Camera Calibration and 3D Reconstruction [Электронный ресурс]. URL: [https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group\\_\\_calib3d.html](https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html) (дата обр. 25.04.2023).

## Управление нелинейным процессом в условиях неопределенности

*Пальтов Никита Сергеевич*

*Кафедра оптимального управления*

*e-mail: nickpaltov@icloud.com*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Григоренко Николай Леонтьевич*

**Постановка задачи.** Будем рассматривать движение конфликтно управляемого объекта  $z$ , описываемое в  $n$ -мерном евклидовом пространстве уравнением

$$\dot{z} = F(z, t, u, v), \quad z \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

Вектор  $u \in P \subset \mathbb{R}^p$  находится в распоряжении первого («догоняющего») игрока. Вектор  $v \in Q \subset \mathbb{R}^q$  — в распоряжении второго («убегающего») игрока. Вектор  $z$  — фазовые координаты управляемой системы.

Задача рассматривалась с точки зрения догоняющего. В пространстве  $\mathbb{R}^n$  выделено непустое замкнутое множество  $M$ , которое будем называть терминальным. Целью являлось добиться включения  $z(t_1) \in M$  при некотором  $t_1 \geq t_0$  из заданной начальной точки  $z(t_0)$ . В момент первого попадания точки  $z(t)$  на  $M$  преследование считается законченным. Мы будем рассматривать случай, когда догоняющему неизвестно управление убегающего, но даны фазовые координаты системы, то есть необходимо построить позиционное управление для первого игрока.

**Линейный случай.** В качестве линейной системы рассматривался линейный случай контрольного примера Понтрягина [1, 2]

$$P : \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, & x_1(0) = x_{10}, & x_1 \in \mathbb{R}^2 \\ \dot{x}_2 = -\alpha x_2 + \rho u, & \|u\| \leq 1, & x_2(0) = x_{20}, & x_2 \in \mathbb{R}^2 \end{cases}$$

$$E : \begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, & y_1(0) = y_{10}, & y_1 \in \mathbb{R}^2 \\ \dot{y}_2 = -\beta y_2 + \sigma v, & \|v\| \leq 1, & y_2(0) = y_{20}, & y_2 \in \mathbb{R}^2 \end{cases}$$

Окончание преследования осуществлялось при  $\|x_1 - y_1\| = 0$ , то есть точном совпадении координат двух объектов.

Мы решаем задачу при помощи метода экстремального прицеливания.

Приводим основную линейную задачу к виду

$$\dot{z} = Az + Bu_0 + Cv, \quad z(0) = z_0 \quad (1)$$

Строим дополнительную систему-поводырь, удовлетворяющую следующему уравнению:

$$\dot{\omega}(t) = A\omega + Bu_* + Cv_*, \quad \omega(t_0) = z_0 \quad (2)$$

где  $v_*(t) = V_*(\tau_i, x_i, \omega_i)$  определяется из уравнения

$$\langle (x - \omega), CV_*(t, x, \omega) \rangle = \max_{v \in Q} \langle (x - \omega), Cv \rangle$$

а наше основное управление  $u_0(\cdot) = U_0(\tau_i, x_i, \omega_i)$  выбирается из условия

$$\langle (x - \omega), BU_0(t, x, \omega) \rangle = \min_{u \in P} \langle (x - \omega), Bu \rangle$$

Управление  $u_*(\cdot)$  является контр-управлением и находится из первого прямого метода преследования Понтрягина.

Таким образом, общая система (1), (2), которую необходимо решить, содержит четыре управления, причём три из них находятся в распоряжении первого игрока, а второй игрок управляет выбором управления  $v(t)$  в (1). [3]

**Теорема 1.** Пусть  $u_*(t)$  - управление, полученное первым прямым методом преследования Понтрягина, и  $\mathcal{U}^0(U^0, \phi_1^0, \chi^0)$  - процедура управления с поводырём. Тогда для любого движения  $x(\cdot) \in \mathfrak{X}(t_0, x_0, \mathcal{U}^0)$  из пучка движений для линейной задачи выполняется эpsilon-достижение терминального множества.

**Нелинейный случай.** В качестве нелинейной системы рассматривался нелинейный случай контрольного примера Понтрягина

$$P : \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, & x_1(0) = x_{10}, & x_1 \in \mathbb{R}^2 \\ \dot{x}_2 = -\alpha x_2 / (1 + \|x_2\|^2) + \rho u, & x_2(0) = x_{20}, & x_2 \in \mathbb{R}^2 \end{cases}$$

$$E : \begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, & y_1(0) = y_{10}, & y_1 \in \mathbb{R}^2 \\ \dot{y}_2 = -\beta y_2 / (1 + \|y_2\|^2) + \sigma v, & \|v\| \leq 1, & y_2(0) = y_{20}, & y_2 \in \mathbb{R}^2 \end{cases}$$

Окончание преследования при  $\|x_1 - y_1\| = 0$

Задача решалась при помощи метода экстремального прицеливания.

Основная система:  $\dot{z} = F(t, z, u_0, v)$ ,  $z(0) = z_0$

Система-поводырь:  $\dot{\omega} = F(t, \omega, u_*, v_*)$ ,  $\omega(0) = z_0$  (3)

где  $u_0$  и  $v_*$  выбирались из условий

$$\max_{v \in Q} (x - \omega)' f(t, x, U^0(t, x, \omega), v) = \min_{u \in P} \max_{v \in Q} (x - \omega)' f(t, x, u, v)$$

$$\min_{u \in P} (x - \omega)' f(t, x, u, V_*(t, x, \omega)) = \max_{v \in Q} \min_{u \in P} (x - \omega)' f(t, x, u, v)$$

А  $u_*(\cdot)$  является контр-управлением, решающим нелинейную задачу поимки (3), получаемым методом АКАР [4].

**Теорема 2.** Пусть  $u_*(t)$  - управление, полученное методом АКАР,  $F(\cdot)$  непрерывна, Липшицева по  $z$ , выполняется условие седловой точки в маленькой игре,  $|z' f(t, z, u, v)| \leq \kappa(1 + \|z\|^2)$  и  $\mathcal{U}^0(U^0, \phi_1^0, \chi^0)$  - процедура управления с поводырём. Тогда для любого движения  $x(\cdot) \in \mathfrak{X}(t_0, x_0, \mathcal{U}^0)$  из пучка движений для нелинейной задачи выполняется эpsilon-достижение терминального множества. [5]

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Понтрягин Л. С. Линейные дифференциальные игры преследования. Матем. сб., 1980, том 154, номер 3.

- 
- [2] Григоренко Н. Л. Математические методы управления несколькими динамическими процессами. Москва: Издательство московского университета, 1990.
  - [3] Камзолкин Д. В., Кряжимский А. В. Введение в позиционные дифференциальные игры, Москва, 2009.
  - [4] Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. Москва: Едиториал УРСС, 2005.
  - [5] Субботин А. И., Ченцов А. Г. Оптимизация гарантии в задачах управления. Москва: Издательство «Наука», 1981.

## Построение обобщённого критерия для установки биоэквивалентности

*Панов Павел Владиславович*

*Кафедра математической статистики*

*e-mail: mazeinmind@yandex.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Захарова Татьяна Валерьевна*

Исследования биоэквивалентности играют важную роль при создании аналогов к существующим лекарственным препаратам. Для обеспечения необходимого лечения важно, чтобы воспроизведенные лекарственные препараты имели такие же качество и эффективность, как и оригинальные лекарства. Поскольку ошибочные выводы в данных исследованиях подразумевают под собой клинический риск, повышение точности критерия проверки биоэквивалентности является актуальной задачей для математики и медицины. В работе предлагается новый метод проверки лекарств на биоэквивалентность, имеющий лучшую точность по сравнению с классическим методом.

В исследованиях биоэквивалентности одной из используемых сравнительных характеристик лекарств, является площадь под кривой «концентрация—время». Основной проблемой классического критерия является нечувствительность к форме этой кривой, что может влечь за собой некорректную оценку действия воспроизведенного лекарства.

Предложенный метод обобщает классический метод и строит последовательность критериев в разных системах координат.

В работе сформулирована и доказана лемма о снижении ошибки первого рода при использовании разработанного метода. Аналогичный вывод подтвердился практическими исследованиями на данных, полученных с помощью модели  $BPFTPК_1$ .

Основные результаты работы докладывалась на конференциях «Ломоносов—2022», «Ломоносов—2023» и на международной научной конференции «BIG BRAIN 2022», по материалам которой сдана в редакцию журнала Springer статья «Assessing the bioequivalence of different drugs», также сдана статья «Проверка гипотез биоэквивалентности лекарственных препаратов» в редакцию журнала «Вестник Московского университета».

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Драницына М.А., Захарова Т. В., Ниязов Р.Р., Свойства процедуры двух односторонних тестов для признания биоэквивалентности лекарственных препаратов, Ремедиум. Журнал о рынке лекарств и медицинской технике, 3, 40–47 (2019).
- [2] Т.В. Захарова, А.А. Тархов. Оценка уровня значимости критерия Шуирманна для проверки гипотезы биоэквивалентности при наличии пропущенных данных. Информатика и ее применения, 2019 (3): 58-62.



- 
- [3] Chryssafidis, P., Tsekouras, A.A. & Macheras, P. Revising Pharmacokinetics of Oral Drug Absorption: II Bioavailability-Bioequivalence Considerations. *Pharm Res* 38, 1345–1356 (2021).
- [4] Shein-Chung Chow, Jen-pei Liu, *Design and Analysis of Bioavailability and Bioequivalence Studies*, Third Edition, 2009 by Taylor & Francis Group, LLC

## Устранение избыточных ограничений в процессе динамической символьной интерпретации

*Парыгина Дарья Алексеевна*

*Кафедра системного программирования*

*e-mail: pa\_darochek@ispras.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. асс. Батузов Кирилл Андреевич*

*Научный консультант — к.ф.-м.н. Вишняков Алексей Вадимович*

Любое программное обеспечение, создаваемое в рамках безопасного цикла разработки ПО [1], нуждается в проверке и тщательном тестировании для получения гарантий безопасности его работы. Важной задачей специалистов в сфере безопасности программ является усовершенствование методов защиты и поиска ошибок.

Существует множество различных по надёжности, структуре, простоте использования способов нахождения уязвимостей в программах. В последнее время активно распространяется *метод символьной интерпретации программ* [2]. Он позволяет обнаруживать нетривиальные ошибки на большом наборе путей выполнения. Метод основывается на абстракции символьных переменных, которые, по предположению, могут принимать произвольные значения и обычно сопоставляются входным данным программы. В процессе анализа кода программы составляются уравнения для символьных переменных, описывающие возможные сценарии выполнения. Решения уравнений представляют собой входные данные для программы, которые могут провести её по определённому пути выполнения и, в некоторых случаях, привести к проявлению ошибки.

Важнейшим этапом символьной интерпретации программы является построение системы символьных уравнений — *предиката пути*. Система уравнений содержит ограничения, собранные по условиям всех переходов, вошедших в трассу выполнения при интерпретации программы. Однако следствием применения данного метода является возникновение проблем недостаточной и избыточной помеченности данных программы. Они заключаются в отсутствии пометки на данных, зависящих от недостоверных источников, а также в пометке данных, не оказывающих существенного влияния на ход символьной интерпретации.

В данной работе для преодоления проблем, возникающих при построении предиката пути во время анализа бинарного кода, предлагается реализация и применение *метода устранения избыточных ограничений из предиката пути*, включающего в себя метод слайсинга предиката пути и метод сильно оптимистичных решений. Применение двух методов в совокупности позволяет при инвертировании перехода, зависящего от символьных данных, оставить в предикате только те ограничения, от которых целевое ограничение зависит и по данным, и по управлению одновременно.

**Метод слайсинга предиката пути.** Метод слайсинга предполагает отбор ограничений из предиката пути по подмножеству входных данных, соответствующих символьным переменным целевого перехода [3]. Применение метода влечёт за собой изменение только некоторой части входных байтов; ограничения из предиката выбираются таким образом, чтобы корректно изменять эти байты и сохранять желаемый путь выполнения.

Слайсинг предиката пути является эффективным методом устранения избыточных ограничений из предиката пути. Он стремится минимизировать размер предиката пути с учётом *зависимостей по данным* от целевого ограничения, однако предикат после применения к нему слайсинга снова может оказаться несовместным. В таком случае некоторые символьные ограничения всё ещё могут быть удалены из него без потери точности решения.

**Метод сильно оптимистичных решений.** Для устранения таких ограничений был разработан и реализован метод сильно оптимистичных решений [4]. Он основывается на удалении из предиката символьных ограничений с учётом *зависимостей по управлению* и вложенности символьных переходов. В итоговый предикат попадают только те ограничения, от которых ограничение инвертируемого перехода зависит по управлению.

Метод сильно оптимистичных решений предлагается применять к предикату, получаемому после слайсинга, перед отправкой запроса к SMT-решателю, генерирующему подходящие значения символьных переменных. Вместе с методом сильно оптимистичных решений предлагается применять метод оптимистичных решений [5], целью которого является проверка совместности целевого ограничения. Использование этого метода может существенно повысить эффективность применения метода сильно оптимистичных решений в тех случаях, когда целевое ограничение несовместно само по себе.

**Реализация и тестирование метода.** Метод устранения избыточных ограничений из предиката пути был реализован в рамках инструмента динамической символьной интерпретации Sydr [3] и протестирован на наборе однопоточных 64-битных программ для Linux. На нескольких из них *точность* символьной интерпретации повысилась в несколько раз, *скорость* увеличилась до 2 раз, а *число открытых путей выполнения* возросло на несколько процентов. Полученные результаты показывают, что разработанный метод обеспечивает увеличение числа корректно инвертируемых переходов в программах, увеличение скорости инвертирования переходов, повышение эффективности запросов к SMT-решателю, увеличение покрытия кода.

Таким образом, метод устранения избыточных ограничений из предиката пути позволяет удалять из предиката пути излишние ограничения, не оказывающие влияния на инвертирование целевого перехода, а также ограничения, приводящие к недостатку условий на символьные переменные. Применение метода обеспечивает преодоление недостаточной и избыточной помеченности в процессе динамической символьной интерпретации.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] ГОСТ Р 56939-2016. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. // <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=195653>
- [2] King J. C. Symbolic execution and program testing // Communications of the ACM. 1976. Vol. 19, N 7. P. 385–394.
- [3] Sydr: cutting edge dynamic symbolic execution / A. Vishnyakov, A. Fedotov, D. Kuts, A. Novikov, D. Parygina, E. Kobrin, V. Logunova, P. Belecky, S. Kurmangaleev // 2020 Ivannikov ISPRAS Open Conference (ISPRAS) (Moscow, 10–11 December 2020). IEEE, 2020. P. 46–54.
- [4] Parygina D., Vishnyakov A., Fedotov A. Strong optimistic solving for dynamic symbolic execution // 2022 Ivannikov Memorial Workshop (IVMEM) (Kazan, 23–24 September 2022). IEEE, 2022. P. 43–53.
- [5] QSYM: a practical concolic execution engine tailored for hybrid fuzzing / I. Yun, S. Lee, M. Xu, Y. Jang, T. Kim // SEC'18: proceedings of the 27th USENIX conference on Security Symposium. 2018. P. 745–761.

## Интерактивный метод выделения просвета желез на гистологических изображениях

*Почернина Ольга Леонидовна*

*Кафедра математической физики*

*e-mail: olya\_pochernina@mail.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. н.с. Хвостиков Александр Владимирович*

В последнее время использование цифровых изображений становится все более популярным в различных сферах нашей жизни, включая цифровую патологию — одно из наиболее перспективных направлений в диагностической медицине. Одной из актуальных задач цифровой патологии является анализ слизистых желез на гистологических изображениях, который позволяет выявить изменения в форме просвета желез, что может говорить о потенциальных проблемах в организме пациента.

Для проведения анализа формы просвета врачам—гистологам требуется выделять просветы на гистологических изображениях. Проще всего это делать автоматически с помощью сверточных нейросетевых моделей, но они требуют большого количества размеченных данных. В связи с этим, актуальными являются также и полуавтоматические методы разметки, т. е. методы с использованием данных от пользователя. Одной из основных характеристик алгоритма должна быть интерактивность, т. е. возможность программы мгновенно отображать результат во время взаимодействия с пользователем. В таком случае можно будет удобно разметить большое количество изображений и впоследствии использовать методы глубокого обучения для разработки полностью автоматических методов выделения просвета желез.

Пользователь взаимодействует с программой путем нанесения на изображение двух видов штрихов, относящихся к объекту (просветам желез) и фону (остальному изображению). В качестве основы алгоритма интерактивного выделения просветов желез в данной работе был использован алгоритм разреза графа GraphCut [1], так как данный алгоритм является смешанным и использует как региональную информацию изображения, так и граничную. Метод GraphCut был расширен и доработан и использует не только интенсивность, но и признаки, извлеченные нейронной сетью. Признаки, дающие наиболее релевантную информацию для задачи выделения просветов желез, были получены в ходе обучения на открытом наборе данных PATH-DT-MSU S1 [2, 3] сверточного автокодировщика, задача которого — восстановить входное изображение.

Разработанный метод является интерактивным и способен работать с гистологическими изображениями высокого разрешения. Для изображений разрешения  $1150 \times 700$  пикселей построение сегментации после нанесения пользователем штрихов занимает в среднем 700–800 миллисекунд.

Предложенный в данной выпускной квалификационной работе интерактивный метод выделения просветов желез на гистологических изображениях

реализован на языке Python 3 с использованием библиотек numpy, pillow, tkinter и rumaflow. Нейронная сеть была реализована с использованием открытой библиотеки для задач глубокого обучения Tensorflow 2.

Результаты работы метода изображены на рис. 1.

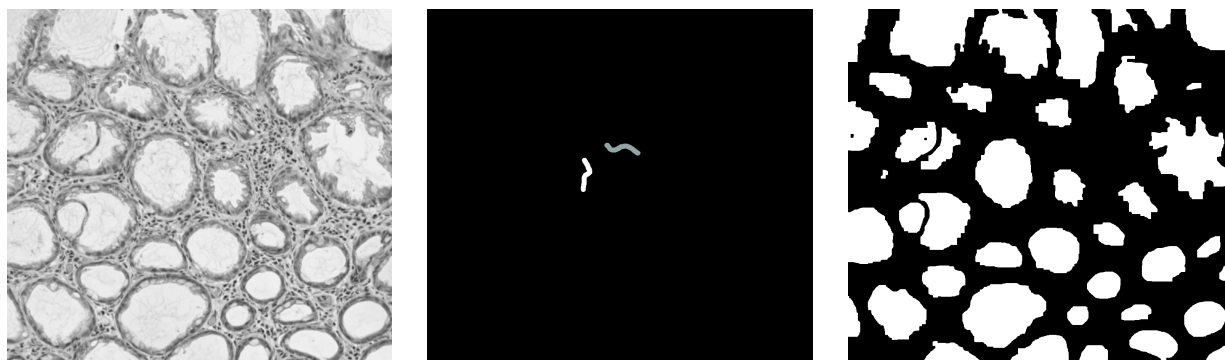


Рис. 1: Пример работы алгоритма для задачи выделения просветов желез на гистологическом изображении тканей желудка. Слева изображено входное изображение, по центру — штрихи, нанесенные пользователем, справа — полученная маска. Белым цветом обозначен штрих, отвечающий за объект, серым — за фон. На маске белым изображены просветы желез.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Image segmentation: A survey of graph-cut methods / Yi, Faliu and Moon, Inkyu // 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012), 1936–1941.
- [2] Tissue Type Recognition in Whole Slide Histological Images / Khvostikov A., Krylov A., Mikhailov I., Malkov P., and Danilova N. - 2021.
- [3] Development of CNN-based algorithm for automatic recognition of the layers of the wall of the stomach and colon / Mikhailov I., Khvostikov A., Krylov A., Malkov P., Danilova N., and Oleynikova N. // Virchows archiv / Springer one New York plaza, Suite 4600, New York, NY, United States. — 2021. — Vol. 479. — P. S36–S37.

## Штриховая сегментация рукописного текста по медиальному представлению

*Пронина Наталья Михайловна*

*Кафедра математических методов прогнозирования*

*e-mail: natalka-pronina@mail.ru*

*Научный руководитель — д.т.н. проф. Местецкий Леонид Моисеевич*

Задача перевода изображений рукописного или печатного текста в текстовые данные (OCR) популярна уже давно. Точность для распознавания печатных документов по чётким изображениям в настоящее время превышает 99%. Точность для распознавания документов с рукописным текстом составляет 80%-90%, и как правило она достигается с применением нейронных сетей.

Возникла гипотеза, что общие представления о каллиграфии могут помочь в навигации по тексту. Так как каждый человек использует ограниченное количество каллиграфических элементов, штрихов, можно попробовать составить «алфавит» штрихов для конкретного почерка и свести задачу распознавания букв к задаче распознавания штрихов. Предполагается, что алфавит штрихов будет сильно меньше алфавита букв, что позволит существенно уменьшить объём данных для обучения.

**Цель работы:** разработать интерпретируемую метрику сходства каллиграфических элементов, востребованную в задачах навигации по тексту. Для решения этой задачи был предложен новый метод, основной идеей которого лежит использование расстояния Фреше между кривыми на плоскости [1, 2].

Расстояние Фреше соотносится с интуитивным представлением о различии кривых, в его определении кривые рассматриваются как упорядоченные множества точек, чем и являются штрихи. В работе также описаны и реализованы модификации расстояния Фреше.



Рис. 1: Результат сегментации штрихов.

Работа состоит из нескольких этапов. Для начала изображение переводится в бинарное. Для всех связных компонент строится скелетное представление, оно предоставляет достаточно точную информацию о том, как двигалось перо во время написания текста. Производится сегментация скелета на более простые элементы, штрихи (рис. 1). Для этого использовался алгоритм сегментации скелетного представления бинарного изображения, предложенный Л. М. Местецким и описанный в [3]. Далее производится нормализация штрихов-колец и штрихов-цепей, вычисляется оценка различия штрихов по расстоянию Фреше. Таким образом получаем интерпретируемую метрику сходства штрихов.

Стоит отметить, что расстояние Фреше сильно зависит от взаимного расположения кривых и от их направления обхода, поэтому так важно для начала «наложить» штрихи, то есть произвести нормализацию. Для обоснования практической применимости предложенной метрики было проведено несколько экспериментов на разных почерках.

Полученная метрика дала возможность произвести иерархическую кластеризацию штрихов эталонного почерка и построить алфавит из 10-20 элементов. По самым большим кластерам узнаются основные каллиграфические элементы письма, что подтверждает целесообразность выбора расстояния Фреше для данной задачи.

Буква	Precision	Recall
«а»	0.9677	0.9677
«и»	0.9069	0.8125
«ф»	0.8333	0.7142

Табл. 1: Качество распознавания букв в текстовом фрагменте

В конце работы был поставлен эксперимент по поиску букв в новом текстовом фрагменте по запросу на основе биграмм и триграмм штрихов. Меры качества распознавания для некоторых букв приведены в таблице 1.

В дальнейшем планируется применить предложенную метрику в задачах распознавания почерков, навигации в рукописном контексте по ключевым словам.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Anne Driemel, Sarel Har-Peled, Carola Wenk. Approximating the Frechet Distance for Realistic Curves in Near Linear Time [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2012. arXiv:1003.0460
- [2] Thomas Eiter, Heikki Har-Peled, Heikki Mannila. Computing Discrete Frechet Distance [Электронный ресурс] // ResearchGate.net. 1994.
- [3] Местецкий Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. 231 с.



## Поиск ошибок синхронизации в программах на языке C# методами статического анализа

*Рагозина Полина Ильинична*

*Кафедра системного программирования*

*e-mail: pragozina@ispras.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Игнатъев Валерий Николаевич*

При написании инструментов анализа кода, предназначенных для программ на языке C#, зачастую не уделяется достаточного внимания ошибкам, связанным с синхронизацией при многопоточности (такими её видами, как, например, критическая секция). При этом, не обнаруженные вовремя, подобные ошибки могут привести к состоянию гонки или взаимной блокировке (тупику), а значит, и к уязвимости. Целью данной работы было создание алгоритмов поиска некоторых ошибок синхронизации и написание на их основе детекторов в рамках статического анализатора SharpChecker, разрабатываемого в ИСП РАН.

Критическая секция в языке C#, как правило, реализована либо с помощью методов `.NET System.Threading.Monitor.Enter(object obj)` и `System.Threading.Monitor.Exit(object obj)` — для входа в критическую секцию и выхода из неё соответственно, либо с помощью оператора `lock(object obj)`, представляющего собой «синтаксический сахар», объединяющий их функции. В обоих случаях аргумент `obj` указывает на объект, принимающий на себя роль мьютекса секции: заходя в секцию, поток блокирует его, а выходя — освобождает.

В процессе работы были рассмотрены следующие ошибки:

1. Переопределение переменной мьютекса внутри критической секции. Является ошибкой, так как изменённый объект-мьютекс уже не будет заблокирован и целостность секции нарушится.
2. Использование общего ресурса (объекты типа `Type`, литералы и так далее) в качестве мьютекса. Является ошибкой, так как может спровоцировать тупик, если объект используют в нескольких критических секция одновременно.
3. Несовпадение числа входов в критическую секцию и выходов из неё (для `Monitor.Enter` и `Monitor.Exit`).
4. Использование оператора асинхронного ожидания `await` внутри критической секции. Является ошибкой, так как управление после завершения работы `await` может вернуться на другой поток.

Для всех ошибок были разработаны детекторы SharpChecker, использующие для анализа метод символьного выполнения. На наборе из 20 проектов с открытым кодом для каждого из них получена доля истинных срабатываний от 73 до 100%.

Несмотря на серьезность перечисленных ошибок синхронизации, многие статические анализаторы их не обнаруживают. Так, Infer Static Analyser не включает в себя детекторов ни для одной из них, а Clang Static Analyser обнаруживает только несбалансированное количество входов в секции и выходов из них.

Таким образом, в рамках выпускной квалификационной работы был создан ряд детекторов, имеющих малое количество аналогов, обнаруживающих ошибки с приемлемой точностью и готовых к эксплуатации. Кроме того, результаты работы были представлены на международной научной конференции «Иванниковские чтения» и опубликованы в сборнике трудов ИСП РАН. [1]

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Рагозина П. И., Игнатъев В. Н. Обнаружение ошибок взаимоисключающей блокировки в программах на языке С при помощи методов статического анализа // Труды Института системного программирования РАН. 2022. Т. 34, № 4. С. 63–78.

## Восстановление рациональных коэффициентов при использовании подхода с модулярной арифметикой к решению систем линейных уравнений

*Романова Анастасия Игоревна*

*Кафедра суперкомпьютеров и квантовой информатики*

*e-mail: igromanas@yandex.ru*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. зав.лаб. НИВЦ МГУ Смирнов Александр Владимирович*

Выпускная квалификационная работа посвящена решению задачи восстановления рациональных чисел по их образам в конечных полях по модулю больших простых чисел и реализации алгоритма, который осуществляет это восстановление. В математическом моделировании физических процессов часто возникает задача решения параметризованных систем линейных уравнений с полиномиальными коэффициентами [1], в которых количество переменных может достигать миллионов и миллиардов значений [2]. Решение системы осложнено тем, что необходимо производить большое количество промежуточных вычислений, которые подразумевают упрощение полиномов. В частности, такая задача возникает при осуществлении редукции интегралов Фейнмана [2]. Одним из успешных подходов в компьютерной алгебре, получившим распространение в последние десять лет, является подход с модулярной арифметикой [3, 4]: использование конечных полей по модулю больших простых чисел, порядком не превосходящих  $2^{64}$ . Ограниченное количество элементов и их представимость целыми числами машинного размера даёт возможность выполнять быстрые и точные вычисления в статически типизированных языках программирования, таких как C и C++. Такой подход в свою очередь приводит к необходимости восстановления исходных рациональных коэффициентов. При этом задача восстановления принципиально отличается от задачи интерполяции, поскольку целью является не приближение исходной функции, а ее точное восстановление.

В теоретической части работы описано построение алгоритма восстановления рационального коэффициента. На вход алгоритм принимает набор образцов в конечных полях и набор соответствующих простых чисел. Для решения задачи восстановления целого числа используются результаты построения доказательства китайской теоремы об остатках, в частности для поиска обратного по модулю числа используется расширенный алгоритм Евклида. Для последовательного приближения рационального значения используется алгоритм MQRR [4].

В практической части работы приводится описание реализации алгоритма на языке C++ с использованием библиотеки GMP [5] для работы с длинной арифметикой. Реализованный алгоритм был интегрирован в разработанный в университете программный комплекс FIRE (Feynman Integral REduction)

для редукции фейнмановских интегралов и успешно прошёл тестирование на суперкомпьютере МГУ – Ломоносов-2.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Peraro T. Scattering amplitudes over finite fields and multivariate functional reconstruction // Journal of High Energy Physics. 2016. № 12.
- [2] Smirnov A. V., Chuharev F. S. FIRE6: Feynman Integral REduction with Modular Arithmetic // Computer Physics Communications. 2020. № 2.
- [3] Wang P., Guy M., Davenport J. P-adic reconstruction of rational numbers // ACM SIGSAM Bulletin. 1982. № 5.
- [4] Monagan M. Maximal Quotient Rational Reconstruction: An Almost Optimal Algorithm for Rational Reconstruction // ISSAC: International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation. 2004. № 7. P. 243–249.
- [5] GMP – библиотека для работы с арифметикой произвольной точности [Электронный ресурс] // URL: <https://gmplib.org>

## Обратная задача магнитоэнцефалографии

*Сабилов Артур Ильшатович*

*Кафедра математической статистики*

*e-mail: a.i.sabirov@yandex.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Захарова Татьяна Валерьевна*

Магнитоэнцефалография производит большой объем данных. Обработка этих данных с целью локализации источников сигнала с заданной точностью – это очень востребованная, но чрезвычайно некорректная задача. Методы ее решения активно разрабатываются, наиболее популярные методы накладывают ограничения на пространство решений, и в основном эти ограничения никак не связаны с физическими свойствами системы. В работе предлагается новый метод, связанный с независимостью различных функциональных зон головного мозга.

В предположении независимости, регистрируемые МЭГ сигналы нормальной компоненты магнитной индукции можно разложить с помощью метода независимых компонент. Метод находит дипольные моменты возбудителей. Обратным преобразованием для получаемых независимых компонент можно построить множество однодипольных задач. Высокая точность поиска дипольных моментов возбудителей методом независимых компонент позволяет сосредоточиться на методах локализации в однодипольных задачах.

Для однодипольной задачи существует аналитический метод, в работе предлагаются новые методы локализации, связанные с симметричностью картин наблюдаемых величин в однодипольной задаче. Показано, что новые методы улучшают качество для удаленных от поверхности головы источников.

Практические тесты на синтетических данных показывают, что работа метода независимых компонент почти не сказывается на работе методов локализации. Композиция методов имеет достаточно высокую для клинической практики точность и представляет гибкий алгоритм, который можно модифицировать для решения более сложных задач.

Результаты работы докладывались на международной научной конференции «BIG BRAIN 2022», по материалам этой конференции подготовлена статья «The Direct and Inverse MEG problem», которая сдана в редакцию издательства Springer, также сдана статья «Решение обратной задачи МЭГ в многодипольной модели» в редакцию журнала «Вестник Московского университета».

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zakharova T. V. The inverse ill-posed problem of magnetoencephalography // Journal of Mathematical Sciences. — 2020. — Vol. 246, no. 4. — P. 587–591.
- [2] Hyvarinen A., Karhunen J., Oja E. (2001) Independent component analysis. Wiley. ISBN 0-471-22131-7

- 
- [3] Karpov P. I., Zakharova T. V. Magnetoencephalography inverse problem in the spheroid geometry // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. — 2019. — Т. 27, No 2. — С. 159—169.

## Метод анализа аварийных завершений на основе результатов фаззинга

*Савидов Георгий Анатольевич*

*Кафедра системного программирования*

*e-mail: avgor46@ispras.ru*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Белеванцев Андрей Андреевич*

*Научный консультант — к.т.н. Федотов Андрей Николаевич*

Количество строк кода в современном программном обеспечении быстро увеличивается. Тестирование и эксплуатация программных продуктов неразрывно связаны с поиском и исправлением различных уязвимостей и ошибок. В настоящее время в ходе жизненного цикла разработки безопасных программ используются различные инструменты для поиска ошибок. Одним из важнейших подходов является фаззинг-тестирование. В результате работы фаззеров возникает набор аварийных завершений, который необходимо анализировать вручную.

Представленный в данной работе метод позволяет изучать и классифицировать некорректные программные завершения, найденные методами фаззинга. Реализованный метод принимает на вход результаты работы инструмента динамического анализа `sydr-fuzz` [1]. Предлагается следующая последовательность действий:

*Этап 1.* Генерация отчетов об аварийных завершениях. Был разработан и реализован инструмент `casr-san`, который запускает инструментированный бинарный файл на всех входных данных, которые потенциально приводят к аварийному завершению и генерирует отчеты об ошибках на базе отчетов санитайзеров. Для каждого аварийного завершения будет определена степень его критичности и найдено место в исходном коде, где произошла ошибка (если возможно).

*Этап 2.* Дедупликация и кластеризация. Был разработан и реализован инструмент `casr-cluster` [2], производящий дедупликацию отчетов, полученных от `casr-san`, и их последующую иерархическую кластеризацию. Расстояние между объектами кластеризации (отчетами) вычисляется на основе стеков вызовов.

*Этап 3.* Генерация отчетов на базе Gdb. Был разработан и реализован инструмент `casr-gdb`, генерирующий отчеты об аварийных завершениях для неинструментированных бинарных файлов на основе кластеров, полученных на предыдущем этапе. Таким образом, может проявиться другая ошибка на тех же входных данных.

По окончании всей линии анализа собирается итоговая статистика по кластерам и формируется общий отчет о результатах работы фаззера.

Предложенный метод был протестирован на проектах с открытым исходным кодом. В среднем из более чем 1800 сообщений об ошибках инструмент строит 130 кластеров, тем самым необходимые усилия по просмотру результа-

тов работы фаззера сокращаются на порядок. Время работы алгоритма для каждого приложения и сотен завершений не превышает десятков секунд.

Метод анализа аварийных завершений был реализован как часть системы sydr-fuzz [1]. Результаты работы были опубликованы в двух статьях, входящих в список ВАК [1, 2]. Зарегистрированы 3 программы для ЭВМ.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Sydr-Fuzz: Continuous Hybrid Fuzzing and Dynamic Analysis for Security Development Lifecycle / A. Vishnyakov, D. Kuts, V. Logunova, D. Parygina, E. Kobrin, G. Savidov, A. Fedotov // 2022 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS), IEEE, 2022. P. 111–123.
- [2] Savidov G., Fedotov A. Casr-Cluster: Crash clustering for linux applications // 2021 Ivannikov ISPRAS Open Conference (ISPRAS), IEEE, 2021. P. 47–51.



## Доработка программного комплекса Vorg визуализации псевдослучайных генераторов: опция наложения графиков для разного числа длин слов и отображения получившегося результата на тор

*Сахаутдинова Аделина Рифовна*

*Кафедра информационной безопасности*

*e-mail: sakhautdinova21@gmail.com*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Анашин Владимир Сергеевич*

Генераторы псевдослучайных чисел широко применяются в криптографии, компьютерном моделировании, играх и других приложениях. Генераторы, основанные на  $p$ -адических 1-липпицевых функциях, позволяют строить сложные последовательности чисел с нелинейным законом рекурсии. В случае  $p=2$  такие генераторы хорошо реализуются в виде компьютерных программ. Представление графика такой функции на торе и наложение графиков для разных длин слов позволяет выявить зависимости в выходной последовательности, вырабатываемой генератором. В работе рассматриваются линейные зависимости.

**Определение.** Целое  $p$ -адическое  $x$  число может быть записано в виде ряда:  $x = \alpha_0 + p\alpha_1 + \dots + p^n\alpha_n \dots$ , где все  $\alpha_i$  -  $p$ -ичные цифры,  $n \geq 0$ . Такому ряду можно поставить в соответствие последовательность:  $\{\alpha_0\alpha_1 \dots \alpha_n \dots\}$ .

Множество целых  $p$ -адических чисел обозначается  $\mathbb{Z}_p$ .

**Простейший генератор.** Датчик псевдослучайных последовательностей представляет собой систему с дискретным временем (автомат). Для него задано некоторое начальное состояние, каждое последующее состояние представляет собой функцию от предыдущего:  $x_{i+1} = f(x_i) \bmod(2^n)$ .

**Обратное отображение.** [1] Пусть задано целое  $p$ -адическое число  $x = \{\alpha_0\alpha_1 \dots \alpha_{n-2}\alpha_{n-1}\}$ , где  $n \in \mathbb{N}$  - размер регистра (длина слова), и функция  $F(x) : \mathbb{Z}_p \rightarrow \mathbb{Z}_p$ , тогда отображение  $\mathbb{Z}_p \rightarrow [0, 1]$  определяется формулой:

$$\eta(x) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\alpha_{n-i-1}}{p^{i+1}}$$

**Построение.** Рассматривается случай  $p=2$ . Построение происходит в квадрате  $A = [0, 1] \times [0, 1]$ . Выбирается количество графиков, для каждого задается размер  $n$  регистра (длина слова), вычисления проводятся по  $(\bmod 2^n)$ . Перебираются все целые числа, представимые в регистре данного размера (от 0 до  $2^n-1$ ). Для каждого такого числа  $x$  находится значения  $a = \eta(x)$  и  $b = \eta(F(x))$  и в квадрате  $A$  ставится точка с координатами  $(a, b)$ . Таким образом, в квадрате расставляются  $2^n$  точек для каждого из графиков.

Единичный квадрат можно превратить в тор, "склеив" противоположные стороны квадрата. Для этого числа из отрезка  $[0, 1]$  переводятся в отрезок

$[0, 2\pi]$  и далее, согласно параметрическому уравнению тороида расставляются точки.

**Теоретическое обоснование.** Если  $\mathbb{A}$  - конечный автомат, то гладкие кривые, которые полностью лежат на графике, могут быть только прямыми линиями. Более того, если графики конечных автоматов рассматриваются как подмножества единичного тора  $\mathbb{T}^2 \subset \mathbb{R}^3$ , то гладкие кривые, лежащие на графиках, могут быть только обмотками тора [2],[3].

Для линейной функции  $f(x) = \frac{a}{b} \cdot x + \frac{a'}{b'}$  количество обмотк равно  $mult_{mp}$  (мультипликативному порядку  $p$  по модулю  $m$ ), где  $m = \frac{b'}{(b,b')}$ .

**Пример.** Пусть  $p = 2$  и  $f(x) = \frac{3}{5} \cdot x + \frac{1}{3}$ . Тогда  $m = 3 \Rightarrow mult_3 2 = 2$  обмотки с угловым коэффициентом  $\frac{3}{5}$ . (Рис. 1)

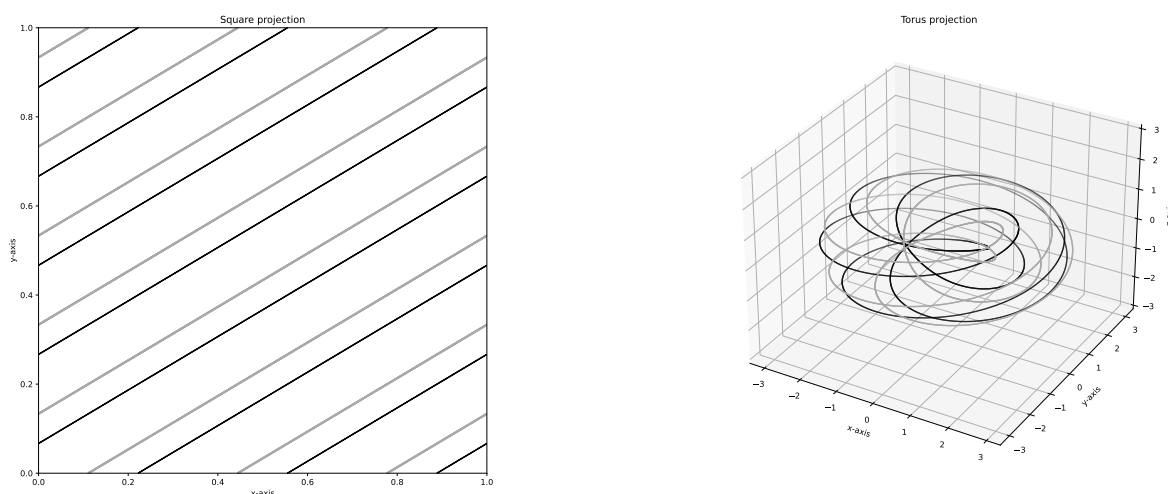


Рис. 1: Графики функции  $f(x) = \frac{3}{5} \cdot x + \frac{1}{3}$  на единичном квадрате и на торе (количество разрядов  $n$  на черном графике 12, количество разрядов  $n$  на сером графике 13)

**Результаты.** Для проведения исследований был создан программный комплекс в среде разработки Microsoft Visual Studio, использовался язык программирования  $C++$  (для математических вычислений) и Python 3.8 (библиотеки matplotlib и tkinter для отрисовки графиков и создания графического интерфейса).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Anashin V., Khrennikov A. Applied Algebraic Dynamics, de Gruyter Expositions in Math. 49. // Walter de Gruyter GmbH & Co., 2009.
- [2] Anashin V. Discreteness causes waves // Facta Universitatis, Series: Physics, Chemistry and Technology y Vol. 14, No 3, Special Issue. — 2016. — С. 143–196.
- [3] Anashin V. Quantization causes waves: Smooth finitely computable functions are affine // p-Adic Numbers, Ultrametric Analysis and Applications. Vol. 7, No. 3. — 2015. — С. 169–227.

## Поиск оптимальной структуры адаптивного логического модуля для некоторых классов операторов

*Синенкова Анна Александровна*

*Кафедра математической кибернетики*

*e-mail: s02190196@gse.cs.msu.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Шуплецов Михаил Сергеевич*

В настоящее время одним из направлений задачи логического синтеза является поиск оптимальных схем для программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Благодаря таким качествам как надежность, относительно невысокая стоимость, высокая производительность, масштабируемость, возможность программирования вне заводских условий, а также возможность перепрограммирования, ПЛИС используются в самых различных сферах.

Современные модели ПЛИС состоят из небольших одинаковых блоков — адаптивных логических модулей (АЛМ), которые представляют собой схему из функциональных элементов в специальном базисе, состоящем из обычных функциональных элементов и специальных универсальных элементов, реализуемая функция которых может быть запрограммирована.

**Определение.** *Универсальный АЛМ с  $n$  входами и  $t$  выходами — это АЛМ, реализующий произвольный логический оператор из  $t$  функций от  $n$  переменных.*

Часто интерес представляют не все возможные функции от  $n$  входов, а только некий небольшой набор операторов.

**Определение.** *АЛМ, который может реализовать любой оператор определенного класса, является универсальным для этого класса.*

**Определение.** *Модификацией АЛМ-а называется следующая последовательность операций:*

- 1. Добавление в модуль новой вершины.*
- 2. Добавление необходимого количества дуг, которые исходят из некоторых входных или внутренних вершин и приходят в добавленную вершину.*
- 3. Добавление не менее одной дуги, которая исходит из добавленной вершины и входит в какую-то внутреннюю вершину. При этом некоторые другие ребра удаляются так, чтобы получился корректный АЛМ.*

В данной работе рассматривалась задача поиска модификаций современных АЛМ, преобразующих их структуру к такой, что он становится универсальным для заданного класса операторов.

Для решения был выбран метод сведения задачи к задаче выполнимости булевых формул. Было разработано сведение на основе [1], а также показано,

что полученная в результате сведения КНФ имеет полиномиальную относительно количества элементов в схеме сложность.

Для полученного сведения был реализован пакет программ на языке Python. С его помощью были найдены модификации модельного АЛМ-а малой сложности, а также АЛМ-а современной архитектуры Stratix 10 корпорации Intel для некоторых классов операторов. Все полученные модификации были верифицированы при помощи специальных тестовых программ.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Kojevnikov A., Kulikov A. S, Yaroslavtsev G. Finding Efficient Circuits Using SAT-solvers // Theory and Applications of Satisfiability Testing - SAT 2009. P. 32–44.

## Исследование и разработка методов сегментации изменений между парой кадров, снятых на статичную камеру

*Соколов Артём Константинович*

*Кафедра интеллектуальных информационных технологий*

*e-mail: sokolovartiom130@gmail.com*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Конушин Антон Сергеевич*

В настоящей работе рассматривалась задача сегментации изменений по паре кадров, снятых на статичную камеру. Алгоритм, решающий рассматриваемую задачу, может быть использован для этапа локализации в задаче обнаружения оставленных предметов, которая является широко востребованной в сфере видеоаналитики. Требовалось разработать алгоритм, способный по паре изображений, снятых на статичную камеру, найти бинарную маску и тип изменения, произошедшего в кадре.

Обычно для решения поставленной задачи используются одношаговые методы, основанные на нейросетевых архитектурах, используемых в задаче классической сегментации (но принимающих на вход пару изображений). Однако такой подход имеет недостаточно высокую для обеспечения безопасности в местах наблюдения точность и требует сложных в разметке данных.

В работе был предложен новый многошаговый подход к решению задачи сегментации изменений. Предложенный метод состоит из следующих этапов:

1. Нейросетевой классификатор по паре изображений определяет наличие значимых изменений между парой изображений (игнорируются изменения освещения, движения таких объектов, как листья, флаги и т. п.).
2. При отсутствии изменений алгоритм завершается и возвращается пустая маска. Иначе с помощью алгоритма Grad-CAM [1] выделяется карта внимания классификатора наличия изменений.
3. По карте внимания строятся поля ключевых точек, необходимых для этапа интерактивной сегментации.
4. Нейросетевой классификатор типа перемещения по входным изображениям определяет появился целевой объект или исчез. Выбирается изображение с целевым объектом и передается на этап интерактивной сегментации.
5. Нейросетевой интерактивный сегментатор по полученным на этапе 3 полям точек и выбранному на этапе 4 изображению находит маску целевого объекта.

Экспериментальная оценка показала, что предложенный метод имеет преимущества в точности сегментации и скорости выполнения по сравнению с существующими методами, но имеет меньшую точность локализации.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization / Selvaraju R. R., Cogswell M., Das A., Vedantam R., Parikh D., Batra D. // In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2017. pp. 618–626.

## Разработка модуля оценки интерпретируемости моделей машинного обучения

*Солони́на Елена Андреевна*

*Кафедра информационной безопасности*

*e-mail: s02190711@gse.cs.msu.ru*

*Научный руководитель — с.н.с. Ильюшин Евгений Альбинович*

*Научный консультант — асп. Пилипенко Олег Геннадьевич*

**Введение.** Современные модели машинного обучения превосходят человеческие возможности при выполнении различных задач. Однако большинство этих точных моделей остаются сложными для понимания, их внутренняя логика и работа скрыты от пользователя. В статье предложен модуль оценки интерпретируемости моделей машинного обучения, который поможет анализировать качество полученных объяснений и повысит надежность и прозрачность моделей машинного обучения.

**Цель работы.** Цель работы — разработка модуля оценки интерпретируемости для моделей машинного обучения. Для этого необходимо изучить литературу по теме интерпретации, рассмотреть методы оценки, разработать требования к программной реализации и реализовать модуль согласно этим требованиям. Затем следует провести эксперименты и оценить эффективность модуля на нескольких наборах данных.

**Методы интерпретации.** Методы интерпретации позволяют понять, как модель делает прогнозы, и определить, какие признаки наиболее важны для этих прогнозов. Понимание сильных сторон и ограничений каждого метода интерпретации поможет принять обоснованное решение о том, какие методы интерпретации использовать для разработки модуля. В практической части были реализованы Saliency maps, Occlusion sensitivity, Integrated Gradients, GuidedBackprop, GradCAM, HiResCAM, GradCAM ElementWise, GradCAM++, XGradCAM, AblationCAM, ScoreCAM, EigenCAM, LayerCAM, EigenGradCAM, RandomCAM, FullGrad. Несмотря на широту методов, для проведения экспериментов мы решили сосредоточиться на следующих: Saliency maps, Guided BackPropagation и GradCAM.

**Метрики оценки интерпретируемости.** Исследователи разработали различные метрики для оценки интерпретируемости, которые измеряют степень, в которой метод интерпретации точно отражает поведение модели и согласуется с различными входными данными и аннотациями.

Метрика удаления, представленная в статье [1], измеряет уменьшение вероятности класса по мере того, как важные пиксели постепенно удаляются из изображения. Так называемая «Игра удаления» заключается в том, чтобы найти наименьшую маску удаления, которая приводит к значительному снижению оценки класса. Кроме того, авторы предлагают метрику сохранения, которая измеряется повышением вероятности класса по мере добавления пикселей. «Игра сохранения» заключается в том, чтобы найти наименьшее

подмножество изображения, которое необходимо сохранить, чтобы сохранить высокой оценку класса.

В статье [2] авторами предлагается метрика Average drop, которая рассчитывается как среднее процентное снижение достоверности модели для определенного класса изображения при наличии только explanation map. В дополнение к предыдущей метрике предлагается метрика Increase in confidence. В ней измеряется, сколько раз во всем наборе данных достоверность модели увеличивалась, когда в качестве входных данных предоставлялись только области explanation map. Далее авторы ввели метрику Intersection over Union для интерпретации, которая дает визуальное представление о том, на основе какой области модель приняла то или иное решение.

В статье [3] предлагается метрика Sparsity, количественно определяющая разреженность saliency map. Авторы статьи утверждают, что высокое значение метрики Sparsity подразумевает saliency map с точным фокусом, что облегчает понимание для людей.

**Требования к программному модулю** Программный модуль должен отвечать следующим требованиям: поддержка различных методов интерпретации, возможность анализа нескольких метрик для оценки интерпретируемости моделей машинного обучения, а также эффективность и масштабируемость для обработки больших наборов данных и сложных моделей.

**Эксперименты и результаты.** Экспериментальные исследования проводились на моделях ResNet-18, VGG-16, и EfficientNet-B0 с использованием наборов данных ImageNet и CIFAR-10. В статье приведена визуализация работы методов интерпретации и вычисления метрик.

Из полученных значений метрик можно сделать несколько выводов. Во-первых, экспериментально и численно подтвердилась гипотеза о том, что сложность архитектуры модели коррелирует с ее интерпретируемостью. Во-вторых, не было обнаружено устойчивой метрики интерпретируемости. И, в-третьих, не выявлено превосходства одного метода интерпретации над другим для использования метрики интерпретируемости.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fong R. C., Vedaldi A. Interpretable explanations of black boxes by meaningful perturbation // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2017. С. 3429–3437.
- [2] Chattopadhyay A. et al. Grad-CAM++: Generalized gradient-based visual explanations for deep convolutional networks // 2018 IEEE winter conference on applications of computer vision (WACV). IEEE, 2018. С. 839–847.
- [3] Gomez T., Fréour T., Mouchère H. Metrics for saliency map evaluation of deep learning explanation methods // Pattern Recognition and Artificial Intelligence: Third International Conference, ICPRAI 2022 (Paris, France, June 1–3, 2022, Proceedings, Part I). Cham : Springer International Publishing, 2022. С. 84–95.



# Исследование методов организации повторной обработки пакетов в конвейере сетевого процессорного устройств

*Стамплевский Дмитрий Максимович*

*Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов*

*e-mail: stamplevskiyd@gmail.com*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Волканов Дмитрий Юрьевич*

Сетевое процессорное устройство (СПУ) — это программируемый процессор, архитектура которого оптимизирована для использования в сетевых устройствах и обеспечения устойчивого режима обработки пакетов [1]. Его основные задачи — классификация полученных пакетов по их заголовкам и их обработка. Классификация происходит на конвейерах, состоящих из специальных вычислительных ячеек.

Существуют заголовки, обработка которых занимает длительное время. Конвейер с таким заголовком не может обрабатывать новые пакеты, в результате чего они теряют актуальность. Одно из решений данной проблемы — технология возвратной очереди. Она подразумевает возврат пакета в начало одного из конвейеров для дальнейшей обработки.

В работе предложен подход к организации возвратной очереди, а также проведен обзор существующих алгоритмов выбора конвейера, на который отправится повторно обрабатываемый пакет.

Механизм возвратной очереди был реализован в имитационной модели СПУ RuNPU. В имитационную модель добавлены реализации выбранных на основании обзора алгоритмов с возможностью переключения используемого алгоритма. Были проведены эксперименты с изменением доли повторно обрабатываемых пакетов, а также с неравномерным распределением пакетов между конвейерами. Был выбран лучший среди алгоритмов выбора конвейера — Central Manager [2]. Он подразумевает отслеживание уровня загрузки всех конвейеров и поиск среди них наименее загруженного.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kornaros, Georgios. Multi-Core Embedded Systems // Georgios Kornaros. 2010.
- [2] Sharma S., Singh S., Sharma M. Performance analysis of load balancing algorithms // International Journal of Civil and Environmental Engineering. — 2008. — Т. 2. — №. 2. — p. 367-370.

## Автоматизация развёртывания сервисных цепочек в облачной среде с использованием протокола OpenFlow

*Столяров Роман Константинович*

*Кафедра системного программирования*

*e-mail: roman.stolyarov@mail.ru*

*Научный руководитель — д.т.н. проф. Кузнецов Сергей Дмитриевич*

С 2012 года технология NFV (Network Functions Virtualization) [1] значительно развилась и получила широкое распространение. Она позволяет упростить конфигурацию сетевых функций и снизить стоимость обработки трафика за счет использования программных модулей, работающих на стандартных серверах и виртуальных машинах в центрах обработки данных, что позволяет заменить проприетарное сетевое оборудование. Однако развёртывание и сопровождение ПО для NFV [1], настройка конфигураций, ручная настройка маршрутизации трафика, а также управление взаимодействием отдельно взятых VNF — все еще трудозатратные операции. Отдельно стоит отметить проблему настройки сервисных цепочек (SFC [2]). Они обеспечивают более гибкое и эффективное развёртывание сетевых функций для различных приложений за счет классификации и перенаправления трафика между различными сетевыми функциями (VNF).

В данной выпускной квалификационной работе предлагается схема сущностей NFV [1] в соответствии со стандартом TOSCA [3], позволяющим описывать шаблоны сервисов для развёртывания в облачной среде. А также приложение, принимающее на вход декларативное представление в виде шаблона TOSCA [3] для сетевой службы (состоящей из нескольких сервисных цепочек) в нотации NFV. Приложение транслирует описанное представление в Ansible скрипты и нормативный TOSCA [3] шаблон, который впоследствии может быть использован для развёртывания соответствующей виртуальной сетевой инфраструктуры в произвольной облачной среде при помощи TOSCA [3] оркестратора - системы для автоматического создания облачных приложений, не содержащей реализации их программной части (например Clouni [4]).

Исследовательская часть выпускной квалификационной работы посвящена способам построения сервисных цепочек за счет организации программно-конфигурируемой сети, а также подходам к организации обработки трафика набором виртуализированных сетевых функций, являющихся элементами сервисных цепочек, входящих в сетевую службу.

В качестве сетевых функций были выбраны: NAT, firewall, DPI, анализаторы трафика, а также DNS и DHCP разворачиваемые вне сервисных цепочек. Для организации программно-конфигурируемой сети используется модуль контроллера OpenDayLight для SFC [2], поддерживающий конфигурацию через REST API. Построение сервисных цепочек организовано за счет туннелирования трафика при помощи связки VXLAN-GPE и NSH. В этой связке VXLAN используется для обеспечения неизменности заголовков пакетов (на-

бор сервисных цепочек работает как единое устройство для пользователей (извне), а NSH используется для идентификации сервисов и цепочек, обеспечивая правильный порядок обработки трафика. Обработка распакованного трафика на узлах VNF происходит в изолированных network namespaces на стандартных linux интерфейсах ОС Ubuntu или Cumulus VX, что позволяет расширять список сетевых функций за счет установки linux-приложений для обработки сетевого трафика.

Практическая часть работы посвящена созданию описанного выше приложения. В нем сущности из стандарта ETSI MANO для NFV [1] транслируются в узлы нормативных типов TOSCA [3] и абстрактное представление элементов архитектуры SFC [2] (forwarder, classifier и др.), которое впоследствии преобразуется в REST API запросы к OpenDayLight. Кроме того, для настройки программной части сетевой службы (ПО VNF, сетевые интерфейсы, подключение к контроллеру и др.) к узлам нормативных типов добавляются Ansible скрипты с заполненными входными параметрами.

Таким образом, связка предлагаемого в ВКР приложения и TOSCA [3] оркестратора является решением поставленной задачи, так как полностью избавляет пользователя от нужды вручную управлять перенаправлением трафика между узлами виртуальных сетевых функций, настраивать облачную инфраструктуру и ПО для обработки трафика. Вместо этого используется общепринятый декларативный стандарт для описания сетевых служб, автоматизированные системы развертывания облачных приложений и управление трафиком средствами OpenFlow контроллера, так же развертываемого и настраиваемого автоматически.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] ETSI GS NFV-MAN 001 Network Functions Virtualisation (NFV), Management and Orchestration. — [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/NFV-MAN/001\\_099/001/01.01.01\\_60/gs\\_nfv-man001v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV-MAN/001_099/001/01.01.01_60/gs_nfv-man001v010101p.pdf).
- [2] J. Halpern, C. Pignataro. Service Function Chaining (SFC) Architecture // Internet Engineering Task Force (IETF). — 2015. — <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7665.txt>.
- [3] OASIS Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications (TOSCA). - <http://docs.oasis-open.org/tosca/TOSCA-Simple-Profile-YAML/v1.3/TOSCA-Simple-Profile-YAML-v1.3.html>.
- [4] Using Ansible as Part of TOSCA Orchestrator / Valeriya Shvetcova, Maxim Polischuk, Oleg Borisenko // 2020 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS). — 2020. — <https://github.com/ispras/clouni>.

# Обобщенный метод минимальных невязок для многих правых частей с ортогональными векторами направлений

*Сукманюк Софья Владимировна*

*Кафедра вычислительных технологий и моделирования*

*e-mail: s.sukman@yandex.ru*

*Научный руководитель — акад. РАН, д.ф.-м.н. проф. Тыртыхников Евгений Евгеньевич*

Одним из итерационных методов решения систем линейных уравнений  $Ax = b$  с невырожденной матрицей  $A$  является обобщенный метод минимальных невязок (GMRES) [1]. Исходно метод был разработан для систем с одной правой частью, однако на практике встречаются системы линейных уравнений с многими правыми частями.

Целью данной работы является расширение метода GMRES для систем с многими правыми частями таким образом, чтобы при смене правой части не начинать итерационный процесс заново, а использовать результаты работы с предыдущими правыми частями. В том числе, использовать уже накопленный базис пространства поиска решений. Подобное расширение применимо, если не все правые части известны заранее, а, например, поступают последовательно.

В методе GMRES для одной правой части приближение к решению на  $k$ -м шаге ищется в пространстве Крылова:  $\mathcal{K}_k(r_0, A) = \text{span}(r_0, Ar_0, \dots, A^{k-1}r_0)$ , где  $r_0$  — начальная невязка, так, чтобы норма невязки была минимальной. При этом выполнено соотношение Арнольди:  $AQ_k = Q_{k+1}H_{k+1,k}$ , где столбцы  $Q_k$  образуют ортонормированный базис  $\mathcal{K}_k(r_0, A)$ . Для матрицы  $H_{k+1,k}$  строится QR-разложение:  $G_{k+1}H_{k+1,k} = \begin{bmatrix} R_k \\ \mathbf{0}^T \end{bmatrix}$ , и с его помощью задача минимизации нормы невязки сводится к решению системы с верхней треугольной матрицей  $R_k$ .

В работе показано, как можно расширить метод GMRES на случай многих правых частей и получить соотношения, аналогичные соотношениям классического метода GMRES для одной правой части. В предложенном методе задача минимизации нормы невязки также сводится к решению системы с треугольной матрицей  $R$  меньших размеров, чем у исходной матрицы  $A$ .

Ранее был предложен способ выбора базиса пространства поиска решений как разность невязок с соседних итераций. Однако, такой базис не является ортонормированным как в классическом GMRES.

В данной работе был предложен способ построения ортонормированного базиса пространства поиска решений. Преимущества выбора базиса ортонормированным состоят в том, что число обусловленности матрицы  $R$ , с которой в итоге решается система, не будет превышать числа обусловленности матрицы  $A$ , чего нельзя гарантировать в ином случае. Также более точно вычисляются векторы  $q_1, \dots, q_k$  и оценки на нормы невязок.

В работе показано, как на каждой итерации можно восстановить все предыдущие невязки, с помощью чего построение ортонормированного базиса сводится к QR-разложению матрицы размера  $2m \times m$ , где  $m$  — номер текущей правой части. При этом количество операций и объём используемой памяти увеличиваются незначительно по сравнению с основными операциями метода GMRES.

Возможно несколько реализаций данного метода:

- QR-разложение матрицы  $H$  находится с помощью вращений или отражений.
- Матрица  $Q$  строится методом Грама-Шмидта и хранится полностью или строится с помощью отражений и хранится как набор отражений.

Все 4 варианта представленного алгоритма были реализованы на языке C++ с использованием статического полиморфизма. Для численных экспериментов была выбрана задача рассеяния плоской электромагнитной волны для идеально проводящего тела миндалевидной формы [2].

В результате ряда проведённых численных экспериментов можно сделать вывод, что ортогональность векторов направлений позволяет с высокой точностью вычислять оценку на норму невязки, а также получать более точное решение системы. Кроме того, алгоритм позволяет находить решение для более высокой относительной точности, для которой алгоритм с неортогональными векторами направлений уже не сходится.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Saad Y., Schultz M. H. GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems //SIAM Journal on scientific and statistical computing. — 1986. — Т. 7. — №. 3. — С. 856-869.
- [2] Stavtsev S. L., Tyrtysnikov E. E. Application of mosaic-skeleton approximations for solving EFIE //Progress in Electromagnetics Research Symposium, Moscow. — 2009. — С. 1752-1755.

## Специальные нелокальные задачи для уравнения переноса

*Тепляшин Иван Игоревич*

*Кафедра математической физики*

*e-mail: ivan123050@gmail.com*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Тихонов Иван Владимирович*

В выпускной квалификационной работе исследуются специальные нелокальные задачи для одномерного уравнения переноса на полуоси. В них требуется восстановить неизвестное начальное состояние решения по дополнительной информации в виде интеграла на конечном отрезке времени  $[0, T]$ . Используются результаты работы [1], где был изложен общий метод решения подобных нелокальных задач для дифференциальных уравнений в банаховом пространстве. Требовалось подтвердить теорию [1] численным исследованием для уравнения переноса.

Для функции  $u = u(x, t)$  рассмотрим соотношения

$$\begin{cases} u_x + u_t + \sigma(x)u = 0, & x \geq 0, \quad t \geq 0, \\ u(0, t) = 0, \\ \int_0^T \eta(t)u(x, t)dx = u_1(x), \end{cases}$$

где  $\sigma(x)$  — заданный коэффициент поглощения, а  $\eta(t)$  — заданная весовая функция. Функцию  $u_1(x)$  также считаем заданной. При этом

$$\sigma \in C[0, +\infty), \quad \eta \in C^1[0, T], \quad u_1 \in C^1[0, +\infty) \cap L_1[0, +\infty).$$

Для нахождения неизвестной функции  $u(x, t)$  достаточно восстановить ее начальное состояние  $u(x, 0) = u_0(x)$ .

Специальные условия

$$\sigma(x) \geq 0, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \sigma(x) = +\infty, \quad \eta(0) \neq 0 \quad (*)$$

обеспечивают сходимость алгоритма (см. [1], [2]). Всюду в дальнейшем считаем их выполненными.

Задачу рассматриваем в банаховом пространстве  $E \equiv L_1[0, +\infty)$ . Оператор переноса с поглощением

$$A = -\frac{d}{dx} - \sigma(x), \quad x \in [0, +\infty),$$

заданный на области определения

$$D(A) = \{f \in AC_{\text{loc}}[0, +\infty) : f \in E, Af \in E, f(0) = 0\},$$

порождает при  $t \geq 0$  полугруппу разрешающих операторов вида

$$U(t)f(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq t, \\ f(x-t) \exp(-\int_0^t \sigma(x-s)ds), & t < x < +\infty. \end{cases}$$

При сделанных предположениях это будет квазинильпотентная полугруппа класса  $C_0$  (см. [1], [2]). Отметим, что общая теория *квазинильпотентных* или, по-другому, *суперустойчивых полугрупп* развита в работе [3].

Воспользуемся соотношениями, выведенными в работах [1], [2] при условии, что  $u_1 \in D(A)$ . Тогда начальное состояние  $u_0(x)$  находится из операторного уравнения

$$\beta u_0 - Bu_0 = g,$$

где

$$\beta \equiv \eta(0) \neq 0, \quad g(x) = -Au_1(x), \quad B = \eta(T)U(T) - \int_0^T \eta'(t)U(t)dt.$$

Указанный оператор  $B$  является квазинильпотентным — его спектральный радиус равен нулю. Поэтому  $u_0$  находится в виде ряда Неймана

$$u_0 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{\beta^{k+1}} B^k g = \frac{1}{\beta} g + \frac{1}{\beta^2} Bg + \frac{1}{\beta^3} B^2 g + \dots,$$

быстро сходящегося по норме  $L^1[0, +\infty)$ . Соответственно, приближенное значение  $\tilde{u}_0(x)$  эффективно восстанавливается методом итераций. Отмеченные выше условия (\*) позволяют широко варьировать входные данные и, главное, почти не ограничивать себя в выборе весовой функции  $\eta(t)$ .

Исходя из этого, была подготовлена компьютерная программа на языке Python, и проведено множество вычислительных экспериментов, подтвердивших высокую надежность выбранного метода. Рассмотрен ряд сопутствующих вопросов — скорость сходимости и монотонная сходимость последовательных приближений, а также влияние условий согласования на гладкость получаемых решений. Все прежние теоретические положения [1], [2] нашли подтверждение на практике. При подготовке работы использовались сведения из функционального анализа и теории полугрупп (см. [4], [5]).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тихонов И. В., Ву Нгуен Шон Тунг. Разрешимость нелокальной задачи для эволюционного уравнения с суперустойчивой полугруппой // Дифференциальные уравнения. Т. 56. № 4. 2020. С. 490–510.
- [2] Ву Нгуен Шон Тунг. Условия квазинильпотентности полугруппы переноса на полуоси // Современные проблемы теории функций и их приложения. Саратов: Саратовский университет, 2022. С. 85–88.
- [3] Balakrishnan A. V. On superstability of semigroups // M. P. Polis, et al. (Eds.), Systems modelling and optimization, Proceedings of the 18th IFIP conference on system modelling and optimization, CRC research notes in mathematics. Chapman and Hall, 1999. P. 12–19.
- [4] Балакришнан А. В. Прикладной функциональный анализ. М.: Наука, 1980. 384 с.
- [5] Pazy A. Semigroups of linear operators and applications to partial differential equations. N.-Y.: Springer-Verlag, 1983. 288 p.

## Разработка и исследование параллельных алгоритмов обучения глубоких нейронных сетей

*Толстобров Кирилл Александрович*

*Кафедра Суперкомпьютеров и Квантовой Информатики*

*e-mail: tolstobrov.kirill@yandex.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Попова Нина Николаевна*

Одной из ключевых тенденций в области нейронных сетей является увеличение размера обучаемых нейросетевых моделей. Следствием такой тенденции является увеличение длительности обучения и нехватка памяти на устройстве для хранения весов модели. Для решения этих проблем используются методы параллельного обучения.

Данная работа посвящена актуальной теме разработки новых методов для нейросетевой обработки данных. В работе рассмотрены параллельные алгоритмы обучения нейронных сетей в предположении реализации этих алгоритмов в рамках существующей инфраструктуры высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем. Основное внимание в работе уделено организации коммуникационных взаимодействий параллельных процессов при реализации алгоритмов обучения нейронных сетей. Задачу работы можно рассматривать как задачу оптимизации коммуникационных расходов и связанные с этим необходимые модификации существующих алгоритмов обучения.

В работе предлагается алгоритм параллельного обучения, направленный на уменьшение длительности коммуникаций обучающих процессов. Основная идея алгоритма заключается в разделении коммуникаций на локальные и глобальные и применении разных методов организации параллельного обучения на этих двух уровнях.

Локальные коммуникации происходят между процессами одного вычислительного узла. Ввиду высокой скорости проведения таких коммуникаций, предлагается использовать для их организации параллельные методы, сохраняющие полноту распространяемой по системе информации, такие как BSP [1] и AllReduce, что положительно сказывается на точности модели.

Коммуникации между процессами, расположенными на разных вычислительных узлах, назовём глобальными. Такие коммуникации значительно медленнее локальных. В связи с этим для их организации предлагается использовать методы параллельного обучения, значительно сокращающие длительность коммуникаций. В качестве таких методов были выбраны Local-SGD [2], Gossip [3] и Sparsification.

В ходе работы была выполнена реализация предложенного метода параллельного обучения на языке C++ с использованием MPI. Была проведена серия экспериментов для сравнения предложенного метода с существующими алгоритмами. По результатам экспериментов показано, что предложенный метод позволяет сократить время обучения нейронных сетей, при этом точ-



ность модели при использовании данного метода выше, чем при использовании алгоритмов параллельного обучения, имеющих схожую степень ускорения коммуникаций.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Krizanc R., Saarimaki A. Bulk synchronous parallel: practical experience with a model for parallel computing // Proceedings of the 1996 Conference on Parallel Architectures and Compilation Technique. 1996. P. 208-217.
- [2] Haddadpour F., Kamani M.M., Mahdavi M., Cadambe V. Local SGD with Periodic Averaging: Tighter Analysis and Adaptive Synchronization // NeurIPS 2019. 2019.
- [3] Colin I., Bellet A., Salmon J., Cléménçon S. Gossip Dual Averaging for Decentralized Optimization of Pairwise Functions // ICML'16: Proceedings of the 33rd International Conference on International Conference on Machine Learning. 2016. Vol. 48, P. 1388–1396.

# Методы определения бактериальной резистентности к антибиотикам на основе анализа микробиологических фотоизображений

*Трапезников Михаил Юрьевич*

*Кафедра интеллектуальных информационных технологий*

*e-mail: s02190217@gse.cs.msu.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Казачук Мария Андреевна*

Целью данной работы является исследование существующих и разработка собственных алгоритмов определения степени бактериальной резистентности к антибиотикам на основе анализа микробиологических фотоизображений, показывающих высокое качество работы. Данные методы позволяют решать одну из важнейших задач клинической микробиологии – задачу подбора индивидуальной антибиотикотерапии каждому конкретному пациенту.

В работе рассматриваются существующие способы обнаружения дисков с антибиотиками, распознавания названия и дозы на антибиотиках, автоматического измерения диаметра ореола резистентности, основанные на использовании классических методов машинного обучения, компьютерного зрения и нейронных сетей [1, 2, 3, 4], анализируются их достоинства и недостатки. Предлагаются собственные эвристические подходы и нейросетевые методы решения поставленной задачи. По результатам экспериментального исследования, предложенные нейросетевые методы превосходят по качеству и эффективности все рассмотренные существующие решения. Предложенные эвристические подходы также обладают высоким качеством работы и могут применяться на практике. Дополнительно, разработаны эвристический подход и нейросетевой метод определения одного из вида дефектов процедуры микробиологического анализа – контаминированных проб, обладающие высоким качеством работы. Для оценки качества предложенных алгоритмов использован реальный набор медицинских изображений, предоставленный одной из больниц г. Москвы.

Итоговая точность работы составила 94% для предложенных эвристических подходов и 98% для предложенных нейросетевых методов. Разработанные алгоритмы были встроены в программный прототип интеллектуальной системы анализа микробиологической информации лаборатории Технологий программирования кафедры ИИТ ВМК МГУ и могут применяться в современных медицинских лабораториях с целью автоматизации процесса анализа микробиологической информации.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pascucci M. et al. AI-based mobile application to fight antibiotic resistance // Nature communications. 2021. Т. 12, №. 1. С. 1173.

- 
- [2] Priya B. K. et al. Automatic Inhibition Zone Diameter Measurement for Disc Diffusion Test Using Image Segmentation // IETE Journal of Research. 2021. С. 1–18.
  - [3] Alonso C. A. et al. Antibioqramj: A tool for analysing images from disk diffusion tests // Computer methods and programs in biomedicine. 2017. Т. 143. С. 159–169.
  - [4] Diab A. et al. Automatic reading and interpretation of an antibiogram // 2017 Fourth International Conference on Advances in Biomedical Engineering (ICABME). IEEE, 2017. С. 1–4.

## Схема групповой подписи на основе задачи дискретного логарифмирования

*Утехина Мария Павловна*

*Кафедра информационной безопасности*

*e-mail: masha.utekhina@yandex.ru*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. доц. Логачёв Олег Алексеевич*

Основной задачей схем электронной подписи является аутентификация подписанного сообщения. Однако в некоторых прикладных системах (например, в системе анонимных электронных платежей) появляется задача обеспечения не только аутентификации сообщения, но и анонимности пользователя, сформировавшего подпись для того или иного сообщения.

Одним из подходов к решению указанной задачи является использование такого криптографического механизма как схемы групповой подписи. Для данного класса криптографических механизмов требуется обеспечение двух свойств: аутентификации и анонимности. Обеспечение свойства аутентификации означает, что никто, кроме членов группы, не может сформировать корректную подпись. Обеспечение свойства анонимности означает, что по подписи и сообщению никто, кроме менеджера, не может получить информацию о том, кто именно из членов группы сформировал данную подпись. Динамические групповые подписи позволяют добавлять новых пользователей в группу.

Целью настоящей работы являются исследование и анализ существующих схем групповой подписи на основе задачи дискретного логарифмирования. Были проанализированы существующие формальные модели безопасности для схем групповой подписи на предмет релевантности. Был рассмотрен метод построения схем групповых подписей из работы [2] и построенная с его использованием схема на основе задачи дискретного логарифмирования. У рассмотренной схемы не было найдено уязвимостей в целевых моделях, но указанная схема обладает низкой эффективностью при большом размере группы (при большом количестве пользователей). В результате обзора схем динамической групповой подписи на основе задачи дискретного логарифмирования была выявлена одна перспективная схема [1].

В работе [1] не были формально определены целевые модели безопасности для данной схемы. Вследствие чего являлось неочевидным, в системах с какими требованиями предполагалось использование рассматриваемой схемы подписи. В частности, было неясно, относительно нарушителя с какими возможностями предполагалось обеспечение свойства анонимности. Однако в настоящей работе удалось построить атаки, нарушающие свойство анонимности, со всеми представляющими интерес для рассмотрения с точки зрения практики возможностями нарушителя. В настоящей работе были построены:

1. атака с нарушителем, являющимся одним из доверенных участников;

2. атака с нарушителем, являющимся одним из пользователей, образующих группу;
3. атака с нарушителем, являющимся внешним наблюдателем.

Таким образом, анализ указанной схемы показал, что данная схема не обеспечивает одно из целевых свойств групповой подписи — анонимность.

Также в настоящей работе выявляются негативные особенности схемы, позволившие построить указанные атаки, и формулируется задача синтеза схемы доказательства с нулевым разглашением специального вида, решение которой потенциально позволит построить безопасную схему динамической групповой подписи на основе задачи дискретного логарифмирования.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Yang F. Y., Jan J. K. An efficient group signature based on the discrete logarithm problem // «The sixth international conference on information integration and web-based applications services» (Jakarta, Indonesia, 27-29 September 2004), 2004
- [2] Petersen H. How to convert any digital signature scheme into a group signature scheme // Security protocols 1997. Lecture notes in computer science, Vol. 1361. Springer, Berlin, Heidelberg

## Алгоритм имитации отжига для построения списочных многопроцессорных расписаний

*Федоренко Илья Алексеевич*

*Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов*

*e-mail: iliasfedorenko@mail.ru*

*Научный руководитель — к.т.н. доц. Костенко Валерий Алексеевич*

Общая задача построения списочных расписаний заключается в распределении фиксированного множества работ на процессоры и задания порядка их выполнения таким образом, чтобы оптимизировать желаемую меру эффективности расписания и выполнить заданные ограничения, которые обеспечивают корректность полученного решения. В данной работе рассматривается минимизация длительности расписания с ограничением на количество межпроцессорных передач.

Задача построения многопроцессорных расписаний в рассматриваемой постановке является NP-трудной [1]. Для решения таких задач широко применяются различные приближенные алгоритмы. Был проведен обзор методов решения схожих задач, по результатам которого был выбран алгоритм имитации отжига. Он позволяет с некоторой вероятностью переходить в решение с худшим значением целевой функции, что позволяет выходить из локальных оптимумов.

В выпускной работе реализован адаптированный для решения поставленной задачи алгоритм имитации отжига, который использует ярусную форму наибольшей высоты для представления расписаний, с использованием которой выполняет операции преобразования расписания [2]. Рассмотрены способы модификации алгоритма, направленные на улучшение качества получаемых решений: различные начальные приближения и использование дополнительной операции преобразования расписания, уменьшающей простои процессора.

Было проведено экспериментальное исследование следующих свойств алгоритма: качество решений, получаемых с помощью алгоритма, стабильность алгоритма (т. е. степень разброса качества решений, получаемых с помощью алгоритма) и время работы алгоритма.

При исследовании выбранного алгоритма на данных с известным оптимальным решением алгоритм в среднем строит расписания на 1,5% больше по длительности от оптимального решения в задаче без дополнительных ограничений и на 2,6% в задаче с ограничением на число межпроцессорных передач. Причем при увеличении числа работ точность алгоритма растет. Также алгоритм показывает высокую стабильность.

Алгоритм позволяет решать задачи большой размерности из-за небольшого времени работы (до 500 секунд на наборах данных до 10000 вершин).

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Garey M. R., Johnson D. S. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness / W. H. Freeman & Co., 1979.
- [2] Калашников А. В., Костенко В. А. Параллельный алгоритм имитации отжига для построения многопроцессорных расписаний // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 3. С. 133-142.

## Анализ изменений между двумя версиями программы в бинарном коде

*Цехмистер Александр Андреевич*

*Кафедра системного программирования*

*e-mail: s02190022@gse.cs.msu.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. ст. преп. Соловьев Михаил Александрович*

Декомпиляция и анализ бинарного кода на сегодняшний день являются достаточно сложными задачами. Даже при наличии исходных кодов сравнение поведения различных версий программы нетривиально. Однако подобное сравнение имеет ряд важных применений, связанных, в первую очередь, с поиском уязвимостей в различных версиях программного кода и проверкой на плагиат.

В данной работе рассматривается двухэтапный подход к сравнению бинарных кодов для архитектуры RISC-V32-Linux различных версий программы в рамках инфраструктуры для анализа кода Glassfrog [1] с использованием статического сопоставления фрагментов с помощью машинного обучения и обнаружения различий в их поведении с помощью символьного исполнения. Предлагаемое решение является универсальным и при наличии описания архитектуры в требуемом формате может быть применено к бинарному коду любой архитектуры.

На первом этапе статическое сопоставление производится путём перевода бинарного кода в промежуточное представление Pivot [2] специальным транслятором, созданным в рамках данной работы, получения векторов признаков из кода в промежуточном представлении и последующего сравнения полученных векторов с помощью машинного обучения.

В данной работе признаки подразделяются на «надёжные», используемые для кластеризации, и «ненадёжные», на основе которых, в свою очередь, создаются векторы признаков пар, подаваемые на вход алгоритму машинного обучения. Наилучшие результаты на тестовых данных были получены при использовании случайного леса для классификации и жадного выбора сопоставляемых кандидатов без повторений с максимизацией правдоподобия: из 577 фрагментов для 570 (98.8%) были сопоставлены верные кандидаты.

На втором этапе проводится совместное символьное исполнение пар фрагментов, полученных на предыдущем этапе. Оно позволяет получить возвращаемые значения фрагментов в виде символьных значений — функций от входных символьных переменных. Данные значения сравниваются с помощью символьного решателя Z3 [3] с учётом предикатов путей. Результатом работы решателя является пример конкретных значений входных символьных переменных, при которых сравниваемые значения различаются, либо утверждение, что таких значений не существует. Таким образом, обнаруживается различие в поведении фрагментов в паре или утверждается, что они ведут себя одинаково.



Для реализации описанного подхода был доработан имевшийся в инфраструктуре механизм символьного исполнения. Ввиду ограничений текущей реализации результат был получен лишь для 183 пар сопоставленных фрагментов: для 167 пар утверждается о совпадении и для 16 пар корректно найдены различия в поведении.

Таким образом, в рамках данной работы были реализованы инструменты для трансляции бинарного кода для архитектуры RISC-V32-Linux в промежуточное представление Pivot [2], извлечения признаков и сопоставления фрагментов на основе извлекаемых признаков с помощью машинного обучения, а также проведена интеграция полученного решения с реализацией символьного исполнения для инфраструктуры Glassfrog [1]. Работа полученного инструмента была продемонстрирована на ряде синтетических примеров. Анализ результатов работы инструмента на реальных примерах позволил выявить преимущества и недостатки созданного решения и предложить пути к его дальнейшему улучшению.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Практическая абстрактная интерпретация бинарного / М. А. Соловьев, М. Г. Бакулин, С. С. Макаров, Д. В. Манушин, В. А. Падарян // Труды ИСП РАН. 2020.
- [2] О новом поколении промежуточных представлений, применяемых для анализа бинарного кода / М. А. Соловьев, М. Г. Бакулин, М. С. Горбачев, Д. В. Манушин, В. А. Падарян, С. С. Панасенко // Труды ИСП РАН. 2018.
- [3] Z3 theorem prover. URL: <https://github.com/Z3Prover>.

## Сравнение двух математических моделей для описания процесса отражения оптического импульса от экрана, расположенного за слоем нелинейной среды

**Чакак Ирина Александровна**

*Кафедра математической физики*

*e-mail: ichakak@bk.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Федотов Михаил Валентинович*

Задачи распространения и отражения светового импульса возникают во многих современных технологиях: при селективном лазерном плавлении в 3D-принтерах, при взаимодействии фемтосекундных импульсов с фотоннокристаллическими волокнами, при построении тонких пленок. Подобные задачи были изучены в статьях [1], [2], [3], однако до настоящего времени не рассматривались задачи распространения импульса в нелинейной среде с учетом продольной дифракции.

В данной выпускной квалификационной работе были рассмотрены две модели: новая модель с учетом продольной дифракции и традиционная модель. Новая модель описывалась следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + iD_z \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + iD_x \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + i\alpha(z)TA + i\beta A + \frac{\delta(z)}{2}A = 0 \\ V(z) \frac{\partial T}{\partial x} = \delta(z)q_0|A|^2 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $0 \leq t \leq L_t$ ,  $-L_{x_b} \leq x \leq L_{x_l}$ ,  $0 \leq z \leq L_z$ . Функция  $A(t, x, z)$  обозначает изменяющуюся комплексную амплитуду оптического импульса, а  $T(t, x, z)$  характеризует изменение температуры окружающей среды.

Данная система сопровождалась следующими начальными и краевыми условиями:

$$A(t, x, z)|_{t=0} = e^{-\left(\frac{z-z_c}{az}\right)^2 - 2\pi i\chi(z-z_c) - \left(\frac{x-x_c}{ax}\right)^2 + iF_x(x-x_c)^2}, \quad (2)$$

$$A(t, x, z)|_{x=-L_{x_b}} = A(t, x, z)|_{x=L_{x_l}} = 0, \quad (3)$$

$$A(t, x, z)|_{z=0} = \frac{\partial A(t, x, z)|_{z=L_z}}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$T(t, x, z)|_{x=-L_{x_b}} = 0, \quad (5)$$

где  $t \in [0, L_t]$ ,  $x \in [-L_{x_b}, L_{x_l}]$ ,  $z \in [0, L_z]$ .

Для новой модели были получены следующие инварианты:

**Теорема 1.** *Задача (1) – (5) в линейном случае без поглощения ( $\alpha = 0$  и  $\delta = 0$ ) обладает инвариантом:*

$$\int_{-L_{x_b}}^{L_{x_l}} \int_0^{L_z} |A(t, x, z)|^2 dz dx = \int_{-L_{x_b}}^{L_{x_l}} \int_0^{L_z} |A(0, x, z)|^2 dz dx = const_1.$$

**Теорема 2.** Задача (1) – (5) в линейном случае без поглощения ( $\alpha = 0$  и  $\delta = 0$ ) обладает инвариантом (гамильтонианом):

$$H(t) = -iD_z \int_{-L_{x_b}}^{L_{x_l}} \int_0^{L_z} \left| \frac{\partial A(t, x, z)}{\partial z} \right|^2 dz dx - iD_x \int_{-L_{x_b}}^{L_{x_l}} \int_0^{L_z} \left| \frac{\partial A(t, x, z)}{\partial x} \right|^2 dz dx + \\ + i\beta \int_{-L_{x_b}}^{L_{x_l}} \int_0^{L_z} |A(t, x, z)|^2 dz dx = const_2.$$

**Теорема 3.** Задача (1) – (5) в нелинейном случае с поглощением ( $\alpha \neq 0$  и  $\delta \neq 0$ ) обладает инвариантом:

$$\int_{-L_{x_b}}^{L_{x_l}} \int_0^{L_z} |A(t, x, z)|^2 dz dx = \int_{-L_{x_b}}^{L_{x_l}} \int_0^{L_z} |A(0, x, z)|^2 dz dx - \\ - \delta_0 \int_0^t \left( \int_{L_s}^{L_z} (z - L_s) \int_{-L_{x_b}}^{L_{x_l}} |A(t, x, z)|^2 dx dz \right) dt.$$

**Теорема 4.** Задача (1)–(5) в линейном случае без поглощения ( $\alpha = \delta = \beta = 0$ ) обладает инвариантом:

$$I_{2x} = \int_{-L_{x_b}}^{L_{x_l}} \int_0^{L_z} A(t, x, z) \frac{\partial A^*(t, x, z)}{\partial x} dz dx = \int_{-L_{x_b}}^{L_{x_l}} \int_0^{L_z} A(0, x, z) \frac{\partial A^*(0, x, z)}{\partial x} dz dx.$$

Для традиционной модели без учета продольной дифракции также были получены инварианты для линейного и нелинейного случаев с поглощением.

Для нахождения численного решения каждой из моделей записывалась конечно-разностная схема и использовался итерационный процесс, чтобы привести уравнения к линейному виду. Далее линейные уравнения приводились к трехдиагональной системе, которая решалась методом прогонки. Для некоторых из дифференциальных законов сохранения были получены разностные формы инвариантов и с помощью компьютерного моделирования показана консервативность схем обеих моделей.

Также с помощью компьютерного моделирования проведено сравнение двух математических моделей и сделан вывод, что новая модель является более универсальной и правильной с точки зрения физики, а традиционная модель имеет большее ограничение на применение.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Трофимов В. А. О нелинейных абберациях при самоотклонении светового пучка в движущейся среде // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 1983. Т. 24, № 2. С. 70–72.
- [2] Сухоруков А. П., Трофимов В. А. Об отражении волновых пучков от экрана, расположенного в нелинейной среде // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1983. Т. 26, № 1. С. 12–19.
- [3] Трофимов В. А. К вопросу об инвариантах встречного взаимодействия световых пучков // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 9. С. 1146–1147.

## Метод многомасштабной интерактивной разметки минералов на изображениях геологических аншлифов

*Шпилевой Георгий Дмитриевич*

*Кафедра математической физики*

*e-mail: georg.shpilewoy@yandex.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. н.с. Хвостиков Александр Владимирович*

Данная дипломная работа была направлена на разработку метода многомасштабной интерактивной разметки минералов на изображениях геологических аншлифов и оценку эффективности его применения в качестве вспомогательного средства в работе геологов.

Для тестирования метода используются изображения из набора данных LumenStone2, содержащего изображения аншлифов с минералами из разных рудных ассоциаций. Используемые изображения имеют разрешение  $3396 \times 2547$  пикселей и глубину цвета 8 бит. Все изображения были получены на фотоаппарат Canon G10 с использованием микроскопа ZEISS Axioscop 40 на увеличении 100x.

Целью метода является упростить процесс разметки изображений аншлифов для специалистов геологов.

За основу разработанного метода были взяты алгоритмы суперпиксельной кластеризации. С их помощью можно разбить изображение на большое количество фрагментов (суперпикселей), так чтобы цвето-яркостные характеристики пикселей внутри этих фрагментов были похожи. Одним из основных преимуществ использования суперпиксельной кластеризации является компромисс между тонкой детализацией и эффективностью вычислений. С суперпикселями существенно упрощается работа пользователя, поскольку количество примитивов изображения значительно уменьшается по сравнению с исходными пиксельными представлениями.

Предлагается, чтобы пользователь взаимодействовал с алгоритмом, отмечая на изображении точки (или рисуя штрихи), которые:

1. обозначают принадлежность суперпикселя минералу или вмещающей породе (заднему фону);
2. объединяют соседние суперпиксели, принадлежащие одному классу;
3. уточняют разметку с помощью подразбиения крупных суперпикселей на более мелкие, что позволяет рассматривать метод как многомасштабный;

В методе использовались как классические алгоритмы суперпиксельной кластеризации: Felzenszwalb [1], Watershed [2], так и модифицированные: Preemptive SLIC, Compact-Watershed [3].

Дополнительно в методе реализуется механизм уточнения разметки путем подразбиения крупных суперпикселей на более мелкие пока метки пользователя для разных классов не окажутся в разных суперпикселях. А также реа-

лизуется алгоритм анализа соседних областей для суперпикселей, на которые попал штрих пользователя.

Ниже приведен скриншот графического интерфейса разработанного метода быстрой интерактивной разметки минералов на изображениях геологических аншлифов.

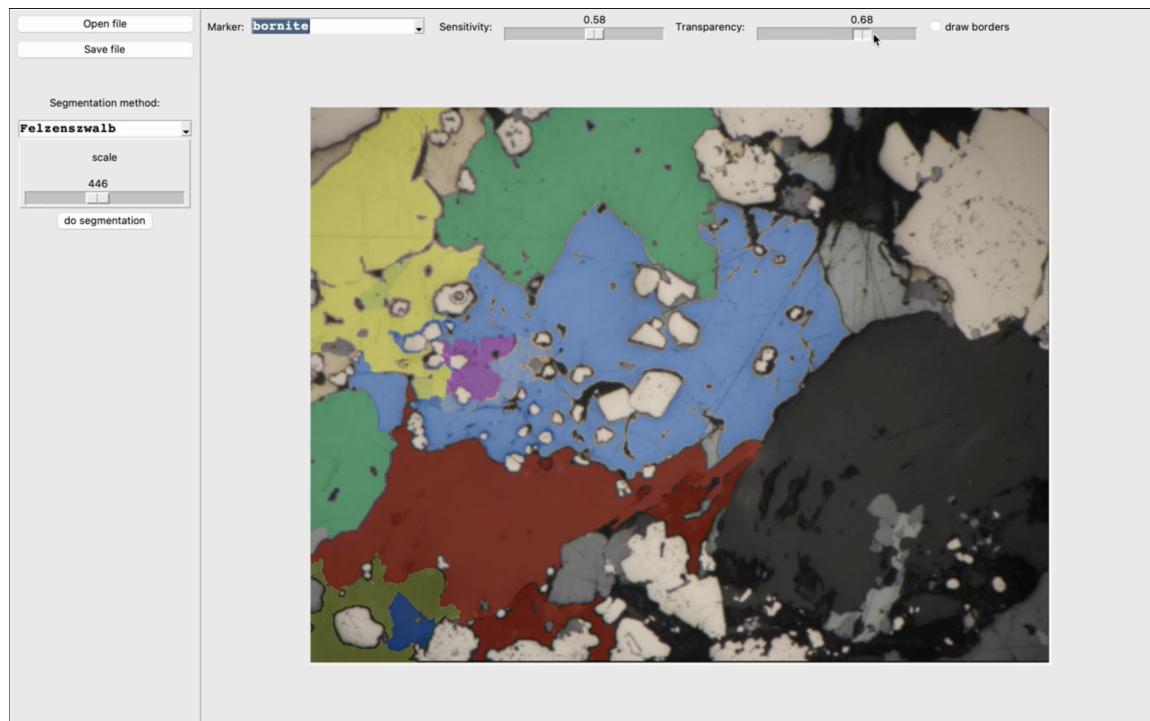


Рис. 1: Скриншот графического интерфейса разработанного метода интерактивной разметки минералов с частичной разметкой изображения геологического аншлифа.

Разработанный метод многомасштабной интерактивной разметки минералов на изображениях геологических аншлифов был программно реализован на языке Python3. Все операции, связанные с обработкой изображения, производились с помощью библиотек NumPy и PIL. Интерфейс и сегментатор общаются по сети при помощи протокола gRPC [4].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Felzenszwalb P. F., Huttenlocher D. P. Efficient graph-based image segmentation //International journal of computer vision. – 2004. – Т. 59. – С. 167-181.
- [2] Hu Z., Zou Q., Li Q. Watershed superpixel //2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – IEEE, 2015. – С. 349-353.
- [3] Neubert P., Protzel P. Compact watershed and preemptive slic: On improving trade-offs of superpixel segmentation algorithms //2014 22nd international conference on pattern recognition. – IEEE, 2014. – С. 996-1001.
- [4] Wang X., Zhao H., Zhu J. GRPC: A communication cooperation mechanism in distributed systems //ACM SIGOPS Operating Systems Review. – 1993. – Т. 27. – №. 3. – С. 75-86.

# Кластеризация текстов с помощью нейросетевых представлений

*Штыков Павел Дмитриевич*

*Кафедра математических методов прогнозирования*

*e-mail: shtykov.pa@gmail.com*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Дьяконов Александр Геннадьевич*

**Введение** В данной работе исследуются способы подбора и построения модели кластеризации текстов на примере *многоступенчатого подхода к кластеризации* (multi-stage clustering).

Предположим, что есть корпус некоторых текстов и необходимо получить общую информацию о его структуре. Самое распространённое решение этой проблемы — кластеризация текстов. Кластеризация представляет собой разбиение исходного корпуса на группы (кластеры) схожих по смыслу текстов. Далее проводится анализ полученных кластеров с помощью ручной оценки или разнообразных метрик качества.

Под многоступенчатым подходом к кластеризации понимается последовательное выполнение следующих этапов:

- Извлечение представлений текстов (эмбеддингов, embeddings) с помощью нейросетей;
- Понижение размерности представлений;
- Метрическая кластеризация представлений с уменьшенной размерностью;
- Подсчет метрик и визуальная оценка качества кластеризации.

В работе дополнительное внимание уделено проблеме кластеризации с *неизвестным числом кластеров*, так как в прикладных задачах часто не существует надежных априорных знаний о структуре анализируемого корпуса текстов.

**Постановка задачи** Пусть  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  — корпус текстов без разметки, каждый текст представляет собой упорядоченный набор слов (токенов). Тогда конечной целью работы модели является присвоение номера кластера (метки)  $t_i \in T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  каждому тексту в корпусе:

$$\mathcal{A}: X \rightarrow T.$$

При многоступенчатом подходе общая модель  $\mathcal{A}$  принимает вид:

$$\mathcal{A}: X \xrightarrow{\mathcal{E}} \mathbb{R}^d \xrightarrow{\mathcal{D}} \mathbb{R}^l \xrightarrow{\mathcal{C}} T, \quad l < d,$$

где:

$\mathcal{E}$  — модель извлечения векторных представлений текстов;

$\mathcal{D}$  — метод понижения размерности;

$\mathcal{C}$  — алгоритм кластеризации с заранее заданным множеством  $T$ .

Такой тип общей модели  $\mathcal{A}$  был выбран для исследования по причине наибольшего контроля над ее модулями и их вариативности.

**Эксперименты** Эксперименты проводились на шести открытых наборах данных из различных областей, взятых с платформы Kaggle: amazon, spotify, imdb, software, emotion и short news.

В ходе экспериментов наилучшее качество кластеризации достигла модель многоступенчатой кластеризации со следующими модулями:

- Сиамская трансформерная нейросеть T5-XL [1] для извлечения представлений текстов;
- Алгоритм UMAP [2] для понижения размерности признакового пространства до значения  $l = 20$ ;
- Процесс Дирихле для смеси гауссиан (Dirichlet process Gaussian mixture model, DPГММ) [3] с диагональной матрицей ковариации в качестве кластеризатора.

В таблице 1 представлены значения ее метрик качества на тестовых наборах данных.

Модель $\mathcal{A}$	amazon			emotion			imdb			short news			software			spotify		
	NMI	ARI	$k$	NMI	ARI	$k$	NMI	ARI	$k$	NMI	ARI	$k$	NMI	ARI	$k$	NMI	ARI	$k$
Финальная	0.48	0.33	12	0.19	0.04	50	0.17	0.11	32	0.28	0.11	40	0.48	0.07	43	0.17	0.01	47
к-средних	0.59	0.56	6	0.14	0.10	6	0.18	0.06	27	0.32	0.17	42	0.29	0.17	8	0.17	0.02	33
Истинное $k$	6			6			27			42			8			33		

Таблица 1: Качество финальной модели  $\mathcal{A}$  многоступенчатой кластеризации.

Значения метрик NMI и ARI, достигаемых финальной моделью, сравнимы с аналогичными при кластеризации с заранее известным количеством кластеров  $k$  методом к-средних, и их абсолютные значения в среднем удовлетворительны. Построенные в работе примеры визуализаций дают понять, что модель способна выделять кластеры, соотносящиеся с истинными классами корпусов. Однако финальное количество кластеров  $k$ , выделяемое моделью, зачастую не совпадает с действительными значениями выборок.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Exploring the Limits of Transfer Learning with a Unified Text-to-Text Transformer / Raffel C., Shazeer N., Roberts A., Lee K., Narang S., Matena M., Zhou Y., Li W., Liu P. J. // The Journal of Machine Learning Research. 2020. Vol. 21, N 1. P. 1532–4435.
- [2] UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection / McInnes L., Healy J., Saul N., Grossberger L. // The Journal of Open Source Software. 2018. Vol. 3, N 29. P. 861.
- [3] Rasmussen C. The Infinite Gaussian Mixture Model // Advances in Neural Information Processing Systems. 1999. Vol. 12. P. 554–560.

## Исследование уязвимости безреференсных метрик качества видео к атакам посредством возмущений

*Шумицкая Екатерина Андреевна*

*Кафедра интеллектуальных информационных технологий*

*e-mail: ekaterina.shumitskaya@graphics.cs.msu.ru*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. с.н.с. Куликов Дмитрий Леонидович*

*Научный консультант — аспирант Анциферова Анастасия Всеволодовна*

Многие современные безреференсные метрики качества видео используют нейросетевые подходы. Это позволяет достичь более высокой корреляции с человеческим восприятием, однако делает их уязвимыми к состязательным атакам. Состязательные атаки на метрики могут быть встроены в видеокодеки и другие алгоритмы обработки видео. Это приводит к повышению значений метрики без улучшения визуального качества, что делает оценку качества работы алгоритмов в бенчмарках с помощью такой метрики некорректной. Также использование уязвимой метрики в функции потерь для обучения нейронных сетей может привести к понижению визуального качества. Поэтому исследование уязвимости безреференсных метрик к состязательным атакам является актуальной задачей.

В данной работе предлагаются неитеративные методы состязательных атак на метрики качества изображений и видео двух типов: атака универсальным возмущением и атака нейросетевым генератором. Атака универсальным возмущением заключается в поиске универсального атакующего возмущения, которое при добавлении к любому изображению и любому кадру видео вызывает повышение атакуемой метрики. Атака нейросетевым генератором заключается в обучении сверточной нейросети архитектуры U-Net с целью генерировать индивидуальное для каждого изображения и кадра атакующее возмущение. Было проведено сравнение с предыдущими методами атак на безреференсные метрики качества видео: MADC [1], Чжан и др. [2], Корхонен и др. [3] и AMI-FGSM [4]. В результате было показано, что предложенные методы превосходят предыдущие методы при том же повышении атакуемых метрик по скорости работы в 30-330 раз (в 150 раз в среднем).

Предложенные методы состязательных атак были применены для анализа уязвимостей 7 популярных безреференсных метрик качества видео: PaQ-2-PiQ, Linearity, VSFA, MDTVSFA, Nima, Koncept512 и SPAQ. Для оценки уязвимости к атакам на изображениях при низком ( $299 \times 299$ ) разрешении были использованы набор изображений NIPS2017, содержащий 1,000 изображений. Для атак при высоком ( $1920 \times 1080$ ) разрешении было использовано 20 FullHD видео из набора видео Xiph.org. Таблица 1 содержит оценки стабильности для тестируемых метрик. На основании полученных оценок, можно сделать вывод, что метрики Koncept512, Nima и SPAQ являются устойчивыми к быстрым состязательным атакам и подходят для сравнения алгоритмов обработки видео в бенчмарках (если разрешение видео высокое). Была выяв-



лена уязвимость метрик PaQ-2-PiQ, Linearity, VSFA и MDTVSAFA к быстрым состязательным атакам. Такие метрики в бенчмарках нужно использовать в совокупности с более устойчивыми метриками.

Таблица 1: Оценки стабильности для тестируемых безреференсных метрик качества видео. **Жирным** выделены результаты устойчивых метрик.

PaQ-2-PiQ	Linearity	VSFA	MDTVSAFA	Koncept512	SPAQ	Nima
-5.3	-4.2	-3.8	-4.8	<b>-0.3</b>	<b>2.6</b>	<b>-0.1</b>

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wang Z., Simoncelli E.P. Maximum differentiation (MAD) competition: A methodology for comparing computational models of perceptual quantities // Journal of Vision. 2008. Т. 8, №. 12, С. 8-8.
- [2] Perceptual Attacks of No-Reference Image Quality Models with Human-in-the-Loop / W. Zhang, D. Li, X. Min, G. Zhai, G. Guo, X. Yang, K. Ma // Proceedings of the conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2022.
- [3] Korhonen J., You J. Adversarial Attacks against Blind Image Quality Assessment Models // Proceedings of the 2nd Workshop on Quality of Experience in Visual Multimedia Applications. 2022. С. 3-11.
- [4] On the Generation of Adversarial Samples for Image Quality Assessment / Q. Sang, H. Zhang, L. Liu, X. Wu, A. Bovik // Available at SSRN 4112969. 2022.

## Алгоритм построения расписания для минимизации пикового использования ресурса в однопроцессорной системе

*Шутков Геннадий Алексеевич*

*Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов*

*e-mail: shutkov6914@gmail.com*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. с.н.с. Балашов Василий Викторович*

В работе рассматривается задача построения однопроцессорного расписания, минимизирующего пиковое потребление ресурса в вычислительной системе (ВС). Рабочая нагрузка на ВС задана в виде ориентированного ациклического графа, определяющего отношение частичного порядка между работами, соответствующими вершинам. Каждой работе сопоставлено неотрицательное целое число - объем ресурса, занимаемого работой. Ресурс высвобождается после завершения выполнения последнего непосредственного последователя работы. Примером ресурса может служить память, выделяемая под результат работы.

Схожая задача, но с сопоставлением ресурса ребрам графа, решается в [1], где предложен оптимальный алгоритм для случая последовательно-параллельного графа работ.

В работе предложен алгоритм решения исходной задачи, основанный на следующей схеме:

1. выделение в графе работ последовательно-параллельного подграфа;
2. переход от исходной задачи к задаче [1];
3. построение оптимального расписания для задачи [1] существующим алгоритмом;
4. обратный переход к исходной задаче;
5. дополнение расписания для учета вершин и ребер, удаленных на шаге 1.

Разработана схема перехода между задачами на шаге 2 и эвристическая схема дополнения расписания на шаге 5. Доказан ряд утверждений о соотношении значений целевой функции на расписании для задачи [1] и соответствующем ему расписании для исходной задачи.

Экспериментальное исследование предложенного алгоритма в сравнении с жадным алгоритмом, последовательно достраивающим расписание, показало, что предложенный алгоритм имеет серьезное преимущество перед жадным алгоритмом по значению целевой функции при последовательно-параллельных входных графах. Для графов, которые не являются последовательно-параллельными, видно значительное преимущество ППГ-алгоритма для графов большого размера с относительно небольшой (до 30%) долей добавленных ребер.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Kayaaslan E., Lambert T., Marchal L., Ucar B. Scheduling Series-Parallel Task Graphs to Minimize Peak Memory : Research Report RR-8975. Inria Grenoble Rhone-Alpes, Universite de Grenoble. 2016. 35 p.