

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ
СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ИННОВАЦИОННЫХ
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

СТНО-2020

III МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ

Сборник трудов

Том 5

Рязань
Book Jet
2020

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5
С 568

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020 [текст]: сб. тр. III междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2020; Рязань. – 230 с.,: ил.

Сборник включает труды участников III Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2020.

В сборнике освещаются вопросы математического моделирования, новых технологий в радиотехнике, телекоммуникациях, электротехнике и радиоэлектронике, вопросы полупроводниковой наноэлектроники, приборостроения, лазерной, микроволновой техники, силовой промышленной электроники, новые технологии в измерительной технике и системах, биомедицинских системах, алгоритмическое и программное обеспечение вычислительной техники, вычислительных сетей и комплексов, вопросы систем автоматизированного проектирования, обработки изображений и управления в технических системах, перспективные технологии в машиностроительном и нефтехимическом производствах, новые технологии и методики в высшем образовании, в т.ч. вопросы гуманитарной и физико-математической подготовки студентов, обучения их иностранным языкам, перспективные технологии электронного обучения, в том числе, дистанционного, вопросы экономики, управления предприятиями и персоналом, менеджмента, а также вопросы гуманитарной сферы.

Авторская позиция и стилистические особенности сохранены.

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5

ISBN 978-5-7722-0301-9

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2020
© Издательство «Book Jet»,
макет, 2020

ИНФОРМАЦИЯ О III МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2020

III Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2020 состоялся 04.03.2020-06.03.2020 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2020 состоялась работа четырех Международных научно-технических конференций:

«Современные технологии в науке и образовании. Радиотехника и электроника», секции

- Радиотехнические системы и устройства;
- Телекоммуникационные системы и устройства;
- Цифровые информационные технологии реального времени;
- Промышленная силовая электроника, электроэнергетика и электроснабжение;
- Физика полупроводников, микро- и нанoeлектроника;
- Микроволновая, оптическая и квантовая электроника;
- Актуальные задачи химических технологий;

«Современные технологии в науке и образовании. Вычислительная техника и автоматизированные системы», секции

- Алгоритмическое и программное обеспечение вычислительных систем и сетей;
- ЭВМ и системы;
- Системы автоматизированного проектирования;
- Информационные системы и защита информации;
- Математические методы в научных исследованиях;
- Обработка изображений и управление в технических системах;
- Геоинформационные и космические технологии;
- Автоматизация производственно-технологических процессов в приборо- и машиностроении;

Информационно-измерительные устройства и системы в технике и медицине.

Стандартизация и управление качеством;

- Информационные системы и технологии;

«Современные технологии в науке и образовании. Экономика и управление», секции;

- Современные технологии государственного и муниципального управления;
- Экономика, менеджмент и организация производства;
- Бухгалтерский учет, анализ и аудит;
- Управление персоналом;
- Экономическая безопасность;

«Современные технологии в науке и образовании. Новые технологии и методы в высшем образовании», секции

- Современные технологии электронного обучения;
- Иностранный язык в техническом вузе;
- Лингвистика и межкультурная коммуникация;
- Направления и формы гуманитаризации высшего образования и гуманитарная

подготовка студентов;

- Методы преподавания и организация учебного процесса в вузе;
- Физико-математическая подготовка студентов;
- Технологии обучения и воспитания на военной кафедре.

Организационный комитет Форума:

Чиркин М.В., ректор, д.ф.-м.н., проф. – председатель
Гусев С.И., проректор по научной работе, д.т.н., проф. – зам. председателя;
Бухенский К.В., зав. кафедрой высшей математики, к.ф.-м.н., доц. – зам. председателя;
Миловзоров О.В., зам. директора института магистратуры и аспирантуры, к.т.н, доц. – координатор;

Устинова Л.С., начальник отдела информационного обеспечения – отв. за информационную поддержку;

Трубицына С.Г., вед. инженер – секретарь оргкомитета;

Благодарова И.А., ведущий программист – секретарь оргкомитета;

члены оргкомитета:

Авилкина С.В., доцент кафедры государственного, муниципального и корпоративного управления, к.п.н., доц.;

Алпатов Б.А., профессор кафедры автоматизации и информационных технологий в управлении, д.т.н., проф.;

Бабаян П.В., проректор по учебной работе, зав. кафедрой автоматизации и информационных технологий в управлении, к.т.н., доц.;

Витязев В.В., зав. кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники, д.т.н., проф.;

Евдокимова Е.Н., зав. кафедрой экономики, менеджмента и организации производства, д.э.н., проф.;

Еремеев В.В., директор НИИ «Фотон», д.т.н., проф.;

Есенина Н.Е., зав. кафедрой иностранных языков, к.п.н., доц.;

Животягин Д.А. нач. кафедры связи военного учебного центра, полковник;

Жулев В.И., зав. кафедрой информационно-измерительной и биомедицинской техники, д.т.н., проф.;

Кириллов С.Н., зав. кафедрой радиоуправления и связи, д.т.н., проф.;

Клейносова Н.П., директор центра дистанционного обучения, к.п.н., доц.;

Ключко В.К., профессор кафедры автоматизации и информационных технологий в управлении, д.т.н., проф.;

Коваленко В.В., зав. кафедрой химической технологии, к.т.н., доц.;

Корячко В.П., д.т.н., проф., зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования вычислительных средств;

Костров Б.В., зав. кафедрой электронных вычислительных машин, д.т.н., проф.;

Кошелев В.И., зав. кафедрой радиотехнических систем, д.т.н., проф.;

Куприна О.Г., доцент кафедры иностранных языков, к.филол.н., доц.;

Круглов С.А., зав. кафедрой промышленной электроники, к.т.н., доц.;

Лукиянова Г.С., доцент кафедры высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Мусолин А.К., зав. кафедрой автоматизации информационных и технологических процессов, д.т.н., проф.;

Овечкин Г.В., зав. кафедрой вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Паршин Ю.Н., зав. кафедрой радиотехнических устройств, д.т.н., проф.;

Перфильев С.В., зав. кафедрой государственного, муниципального и корпоративного управления, д.э.н., проф.;

Пржегорлинский В.Н., зав. кафедрой информационной безопасности, к.т.н., доц.;

Пылькин А.Н., профессор кафедры вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Рохлина Т.А., доцент кафедры иностранных языков, к.филол.н., доц.;

Серебряков А.Е., зам. зав. кафедрой электронных приборов, к.т.н.;

Соколов А.С., зав. кафедрой истории, философии и права, д.и.н.;

Таганов А.И., зав. кафедрой космических технологий, д.т.н., проф.;

Токарь А.Д., нач. кафедры ВКС военного учебного центра, полковник;

Холомина Т.А., зав. кафедрой микро- и наноэлектроники, д.ф.-м.н., проф.;

Холопов С.И., декан ф-та автоматизации и информационных технологий в управлении, зав. кафедрой автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

Чеглакова С.Г., зав. кафедрой экономической безопасности, анализа и учета, д.э.н., проф..

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ.
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ»**

**СЕКЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В НАУЧНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ»**

УДК 502.74; ГРНТИ 27.35.43

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ
РУССКОЙ ВЫХУХОЛИ В БАСЕЙНЕ ОКИ**

Ю.С. Кострова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, julia-alpha@rambler.ru*

Аннотация. На основании данных о продуктивности и численности различных возрастных групп русской выхухолы в русле Оки построена матричная модель динамики данной популяции.

Ключевые слова: матричная популяционная модель, русская выхухоль, Окский заповедник.

**MODELING THE POPULATION DYNAMICS
OF RUSSIAN MUSKRAT IN THE OKA BASIN**

Yu.S. Kostrova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, julia-alpha@rambler.ru*

The summary. Based on the data on the productivity and number of different age groups of the Russian muskrat in the Oka River channel, a matrix model of the dynamics of this population is constructed.

Keywords: matrix population model, Russian muskrat, Oka Nature Reserve.

Главным условием нормального функционирования экосистем является видовое разнообразие животного мира. В этой связи, особую остроту и актуальность приобретает вопрос о находящихся под угрозой исчезновения видах. Одним из таких видов является русская выхухоль – древнейшее млекопитающее планеты, около 95% общего поголовья которого, обитает на территории нашей страны. Численность популяции неизменно уменьшается. В настоящее время наибольшим ареалом обитания русской выхухолы является территория Окского заповедника. В течение последних сорока лет здесь ведутся работы по изучению возрастного и полового состава популяции, осуществляется ежегодный мониторинг численности популяции. Активные мероприятия по изучению и сохранению вида (Г.В. Ханин [1], А.А. Иванов [2], А.С. и М.В. Онуфреня [3], Л.П. Бородин [4], С.Я. Чельцов [5]) позволили стабилизировать размер популяции на критически низком уровне (численность выхухолы в бассейне Оки настоящее время составляет порядка 200 зверьков).

С целью определения количества особей в популяции в настоящее время используется метод осеннего учета по норам. Размер популяции определяется по формуле:

$$X = K \frac{Ln}{l_i},$$

где X - абсолютная численность выхухолы;
 K - пересчетный коэффициент;

L - длина береговой линии;

n - число подсчитанных убежищ;

l_i - протяженность обследованной береговой линии [6].

Однако данный метод имеет свои недостатки: выхухольские норы в природе сложно определяются, кроме того, имеются совместные норы с ондатрами.

В этой связи, с целью минимизации погрешностей учета количества особей выхухоли в бассейне Оки, предлагается матричная модель, которая может стать дополнительным инструментарием в оценке размера популяции русской выхухоли.

Зная размер и возрастную структуру популяции можно спрогнозировать ее поведение в будущем посредством построения матричной популяционной модели. Переход от одного временного промежутка к другому осуществляется посредством модифицированной матрицы Лесли [7].

Для исследуемой популяции русской выхухоли была получена следующая матрица перехода:

$$L = \begin{pmatrix} 0 & f_2 & f_3 \\ p_{12} & s_2 & 0 \\ 0 & p_{23} & s_3 \end{pmatrix},$$

где s_2, s_3 – коэффициенты сохранения (т.е. вероятность особи остаться в той же возрастной группе);

f_2, f_3 - коэффициенты продуктивности (среднее количество потомства, приходящееся на одну особь соответствующей возрастной группы);

p_{12}, p_{23} - коэффициенты выживаемости (вероятность особи перейти из одной возрастной группы в другую).

Популяция выхухоли была разделена на три возрастные группы: сеголетки s (особи возрастом до 1 года), молодые половозрелые особи m (возраст 1-2 года), взрослые особи v (3 года и старше). Изучение данных о динамике численности популяции, половой и возрастной структуре, особенностях размножения были определены коэффициенты выживаемости: $p_{12} = 0,3$; $p_{23} = 0,2$ (т.е. вероятность особи перейти из первой возрастной группы во вторую, и из второй в третью, соответственно); продуктивности: $f_2 = f_3 = 2$ и сохранения вида: $s_2 = 0,2$; $s_3 = 0,1$.

На основании полученных данных была построена матричная диаграмма для модели популяции русской выхухоли, представленная на рисунке 1.

С учетом полученных коэффициентов, была построена матричная модель популяции русской выхухоли, позволяющая на основе данных о размере каждой возрастной группы в момент времени t , определять размер популяции в следующий момент времени $t + 1$:

$$\begin{pmatrix} s(t+1) \\ m(t+1) \\ v(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 2 \\ 0,3 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0,1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} s(t) \\ m(t) \\ v(t) \end{pmatrix},$$

где $s(t), m(t), v(t)$ - количество особей в соответствующей возрастной группе в момент времени t ;

$s(t+1), m(t+1), v(t+1)$ - объем каждой возрастной группы в момент времени $t + 1$.

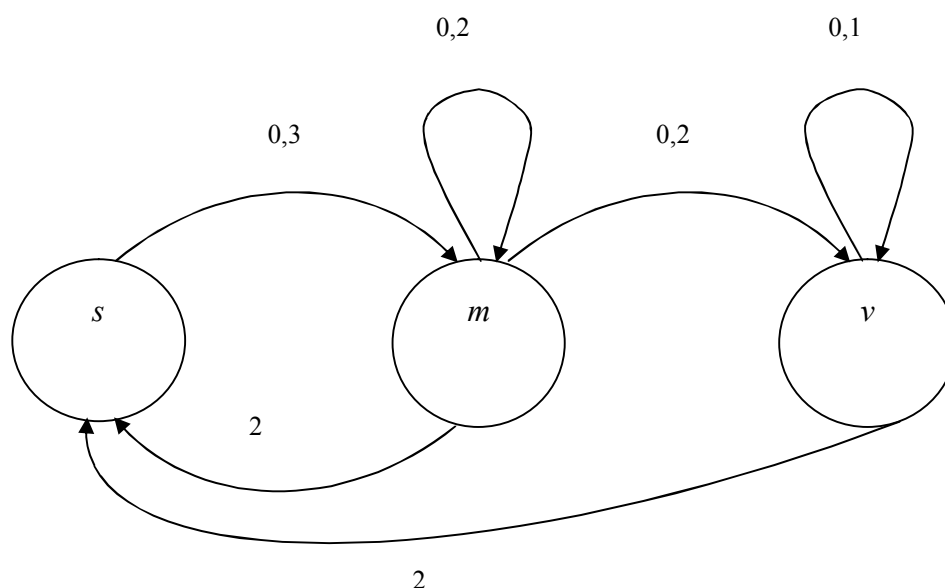


Рис. 1. Матричная диаграмма популяции русской выхухоли

Полученные с помощью построенной модели результаты (рисунок 2) соответствуют данным полевых наблюдений, фиксируя продолжающееся снижение численности популяции русской выхухоли.

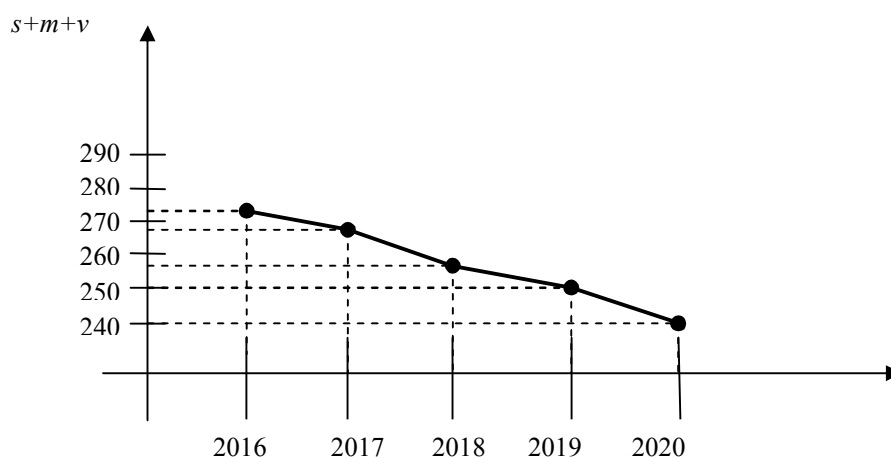


Рис. 2. График динамики популяции русской выхухоли

Дальнейшая судьба популяции русской выхухоли на территории Окского заповедника во многом зависит от антропогенных и метеорологических факторов. Вместе с тем, использование модели позволяет спрогнозировать динамику популяции на несколько лет вперед и осуществить деятельность по сохранению среды обитания с целью сохранения и восстановления устойчивости данного редкого вида млекопитающих.

Библиографический список

1. Ханин Г.В. Русская выхухоль в опасности: динамика численности и проблемы охраны. – М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2009. 101 с.
2. Ханин Г.В., Иванов А.А. Выхухоль. – М.: Агропромиздат, 1990. 192 с.

3. Онуфрения А.С., Онуфрения М.В. Некоторые аспекты биологии русской выхухолы *Desmana moschata* в среднем течении р. Оки //Труды Окского заповедника. Вып. XXIV. – Рязань, 2005. С. 92-134.
4. Бородин Л.П. Русская выхухоль. – Саранск: Мордовское кн. изд-во, 1963. 301 с.
5. Чельцов С.Я. Онуфрения М.В. О результатах учета численности русской выхухолы на территории Рязанской области в 1999 г. // Фауна, экология и эволюция животных: Сб. Науч. Трудов кафедры зоологии РГПУ. – Рязань, 2001. С. 116-120.
6. Онуфрения А.С., Онуфрения М.В. Русская выхухоль в бассейне Оки / Труды Окского государственного природного биосферного заповедника. Выпуск 37. – Рязань: НП «Голос Губерний», 2016. С. 64.
7. Leslie P. H. On the use of matrices in certain population mathematics // Biometrika. 1945. V.33, No. 3. P.183-212.

УДК 378.63

МЕТОДИКА ВЫБОРА ПРИОРИТЕТНЫХ ВАРИАНТОВ ПРИ ПЕДАГОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Т.Ю. Дорохова, Н.П. Пучков

*Тамбовский государственный технический университет,
Российская Федерация, Тамбов, puchkov@nnn.tstu.ru, tandor81@mail.ru*

Аннотация. Показана возможность использования математических методов экспертных оценок в научных педагогических исследованиях по выбору приоритетных образовательных программ. Рассматривается итерационный алгоритм, построенный на основе многократного использования формулы Байеса - формулы переоценки гипотез.

Ключевые слова: профессиональная подготовка, образовательные программы, педагогическое проектирование, обработка экспертной информации.

METHOD OF SELECTION OF PRIORITY OPTIONS AT PEDAGOGICAL DESIGN

T.Yu. Dorokhova, N.P. Puchkov

*Tambov State Technical University,
Russia, Tambov, puchkov@nnn.tstu.ru, tandor81@mail.ru*

Abstract. The possibility of using mathematical methods of expert assessments in scientific pedagogical research on the choice of priority educational programs is shown. An iterative algorithm is considered, built on the basis of the multiple use of the Bayes formula - hypothesis revaluation formula.

Keywords: vocational training, educational programs, pedagogical design, processing of expert information.

Деятельность специалиста с высшим техническим образованием происходит в условиях конкретной экономической и социокультурной ситуации, которая детерминирует характер развития профессиональной среды. Эволюция инженерной деятельности, с одной стороны, обусловлена социальными потребностями, с другой стороны, развитие этого вида деятельности испытывает влияние большого числа самых разнообразных факторов, среди которых ключевую роль играют научно-технический прогресс, формирование новых ценностей и образа жизни, направления экономической и кадровой политики государства, ситуация на рынке труда.

От работников требуют владения новыми профессиональными компетенциями, а от вузов адекватного и оперативного реагирования на происходящие нововведения при подготовке специалистов, что находит свое отражение в новых образовательных стандартах, учебных планах, образовательных программах. Ключевая роль при этом отводится созданию именно региональной системы профессиональной подготовки специалистов, так как территориальная обусловленность вузов естественно в большей степени ориентирована на подготовку специалистов для предприятий своего региона.

Обновляя, либо разрабатывая новые образовательные программы профессиональной подготовки специалистов педагогическими коллективами вузов намечаются возможные варианты решения проблемы обеспечения качества подготовки кадров. Все варианты реализации такой подготовки необходимо оценить, определить достоинства и недостатки каждой альтернативы и объективно проанализировать вероятные результаты реализации. Осуществление выбора наилучшей альтернативы из имеющихся вариантов, это своего рода качественное прогнозирование, имеющее всегда вероятностный характер. Поэтому очень важно учитывать факторы риска, определяя вероятность осуществления каждой альтернативы. Учет воздействующих факторов приводит к пересмотру самого понятия наилучшего решения: им является не тот вариант, который максимизирует или минимизирует некоторый показатель, а тот, который обеспечивает его достижение с наиболее высокой вероятностью.

Если перенести сказанное на педагогическое проектирование, то проблема выбора организационно-педагогических условий реализации той или иной образовательной программы – это вопрос принятия решений о той или иной форме, технологии обучения, позволяющей достигнуть наилучшего качества обучения в условиях ограниченных ресурсов. Поэтому на этапе принятия решений очень важно опираться на научные достижения соответствующей отрасли знаний.

Уже никого не удивляет тот факт, что качество педагогических исследований определяется степенью использования довольно непростого аппарата математической статистики [3]. Учесть количественную оценку значимости каждого фактора и произвести факторный анализ в ситуации их неопределенности достаточно сложно и проблематично, поэтому целесообразнее использовать комплексную сравнительную экспертную оценку [1].

В частности в работах [1, 4] достаточно научно представлена методика проведения и обработки данных экспертных работ, что не исключает использования новых подходов. В данной работе мы представляем один из таких подходов, основанный на известной в теории вероятностей формуле Байеса – формуле переоценки гипотез (Байесовский подход), реализуемым методом Дельфы – многоуровневой процедуры анкетирования с обработкой и сообщением результатов каждого тура (этапа) экспертам, не работающим совместно.

Решая задачи педагогического проектирования разработчик может столкнуться с выбором формы обучения, либо технологии организации учебного процесса отдельной дисциплины, которая будет реализовываться в рамках образовательной программы. Например, возникла проблема выбора формы обучения из следующих видов:

- классическое лекционное обучение в общих потоках;
- концентрированное обучение [5];
- дистанционное обучение и т.д.

Каждая из указанных форм (альтернативных вариантов), обладает как достоинствами, так и недостатками. Перед проектировщиком стоит задача выбора наилучшего варианта, который позволит с наиболее высокой вероятностью решить задачу формирования требуемых образовательным стандартом компетенций.

Для снижения вероятности ошибок при оперативном принятии решении обозначенных проблем используется итерационный алгоритм последовательного привлечения экспертов. Количество экспертов определяется, как правило количеством групп субъектов, заинтересованных в результатах экспертизы (заказчики, исполнители). При этом учитывается и то обстоятельство, что каждый эксперт в своем заключении не бывает абсолютно уверенным в принятом решении, поэтому можно говорить только о вероятности принятия им определенного решения, которую он может самостоятельно оценить [2], т.е. он указать место проекта и доверительную вероятность этого решения. У каждого эксперта она может быть своей.

Экспертная оценка может осуществляться и одновременно всеми экспертами, а результаты затем проходить статистическую обработку, но на практике оказался более приемлемым вариант последовательного привлечения экспертов, когда их число можно оптимизи-

ровать. Этот вариант последовательного привлечения экспертов наиболее приемлемый при работе с педагогическими проектами по той причине, что педагогические проекты являются собой более мягкие модели информационного моделирования, доступные для постоянной корректировки.

Рассмотрим на конкретном примере методику выбора приоритетного варианта среди выделенных выше трех проектов (технологий обучения) и продемонстрируем процесс построения алгоритма принятия решений на основе экспертизы и байесовского подхода:

1. Как это принято в математической статистике первоначально сформулируем группу альтернативных гипотез: H_1 – наилучшим является первый проект; H_2 – наилучшим является второй проект; H_3 – наилучшим является третий проект.

2. Интуитивно, на основе собственного опыта работы вуза или на основе анализа его возможностей по вопросам комфортности предлагаемых форм обучения задается оценка приоритетности среди альтернативных вариантов обучения. $P(H_1)=0,25$; $P(H_2)=0,5$; $P(H_3)=0,25$, т.е. задаются так называемые начальные вероятности гипотез $H_i, i = 1, 2, 3$, утверждающих приоритетность i -ой гипотезы (работа «нулевого» эксперта). A_0 – событие приоритетности «нулевого» эксперта.

3. Далее осуществляется первый тур экспертизы – работа первого эксперта, определяющего рейтинг проектов с личной оценкой их значимости (значение доверительной вероятности для каждой позиции рейтинга). Выбор первым экспертом приоритетного проекта считается свершившимся событием A_1 , что дает возможность пересчитать вероятности гипотез $P(H_i / A_1)$ используя формулы Байеса:

$$P(H_i / A_j) = \frac{P(A_j / H_i) \cdot P(H_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_j / H_i) \cdot P(H_i)}, \quad i = \overline{1, n}, \dots \dots \dots (1)$$

где H_i – гипотеза о том, что i -ый проект является приоритетным;

A_j – событие (результат экспертизы) о приоритетности j -го рейтинга;

n – число рассматриваемых вариантов;

$P(H_i)$ – априорная вероятность гипотезы H_i ;

$P(H_i / A_j)$ апостериорная вероятности гипотезы H_i (после того, как A_j произошло: j -ый вариант поставлен на первое место);

$P(A_j / H_i)$ – доверительная вероятность оценки j -ым экспертом i -ого проекта.

4. Следующим шагом является усреднение всех оценок приоритетности по каждому проекту, т.е. нахождение среднего арифметического оценок «нулевого» и первого эксперта после его работы, затем «нулевого», первого и второго после работы второго эксперта и т.д. Результаты каждого усреднения используются при обработке информации следующего эксперта.

В итоге получается усредненная оценка (в виде значений вероятности) приоритетности всех гипотез на множестве всех экспертов. Гипотеза, получившая максимальную оценку, считается приоритетной. Процесс привлечения новых экспертов может быть досрочно приостановлен, если усредненная вероятность какой-то из гипотез окажется стабильно максимальной после нескольких итераций, как например, в примере, проиллюстрированном в табл.1.

Когда мнения экспертов относительно множества альтернативных вариантов являются заметно несогласованными, расчет средних апостериорных вероятностей для каждого варианта делает возможным нахождение центральных моментов соответствующих распределе-

ний и принятия обоснованного решения относительно выбора предпочтительного варианта из имеющихся альтернативных, а расчет апостериорной вероятности на каждой итерации позволяет нивелировать заведомо неприоритетные варианты.

Пример. Пусть на экспертизу выставлено три проекта: проект №1 – традиционное обучение; проект №2 – концентрированное обучение; проект №3 – дистанционное обучение. Их исходные оценки приоритетности таковы $P(H_1) = P(H_3) = 0,25$; $P(H_2) = 0,5$. Доверительные вероятности оценки приоритетности для всех экспертов одинаковые и составляют: для выделенного первого места $P_1 = 0,75$; для второго места $P_2 = 0,15$; для третьего места $P_3 = 0,1$. Тогда протокол экспертной оценки получается следующим (Табл.1).

Таблица 1. Протокол экспертной оценки

Варианты технологий	Традиционное обучение	Концентрированное обучение	Дистанционное обучение
Априорные ранги	2	1	3
Вероятности	0,25	0,5	0,25
Ранги первого эксперта	1	3	2
Усредненные апостериорные вероятности	0,466	0,341	0,193
Ранги второго эксперта	2	1	3
Усредненные апостериорные вероятности	0,306	0,528	0,116
Ранги третьего эксперта	2	3	1
Усредненные апостериорные вероятности	0,307	0,348	0,292
Ранги четвертого эксперта	3	2	1
Усредненные апостериорные вероятности	0,286	0,378	0,325

Здесь приведены данные по работе четырех экспертов. Самое простое правило определение приоритетности – сравнение сумм рангов дает один и тот же результат: $2+1+2+2+3=1+3+1+3+2=3+2+3+1+1=10$. Все проекты равноценны. Однако вероятность приоритетности второго проекта максимальная в четырех из пяти вариантов. Следовательно этот проект можно признать приоритетным.

В то же время, если исключить различие оценки «нулевого» эксперта, т.е. считать, что $P(H_1) = P(H_3) = P(H_2) = 0,33$, то распределение рейтингов (по вероятностям) будет следующим:

Проект №1 – 0,302; проект №2 – 0,344; проект №3 – 0,341, т.е. оценки второго и третьего проектов практически равны и следует продолжать экспертизу.

Таким образом, просматривается фактор, заметно влияющий на результаты экспертизы. Это: уровень доверия экспертов к выставленным ими оценкам.

Процесс обработки результатов экспертиза – итерационный, поэтому интересен вопрос его сходимости и, соответственно, нахождения оптимального числа экспертов. Мы работаем над этой проблемой, в частности, для автоматизации расчетов разработан программный модуль, благодаря чему осуществляются многочисленные численные эксперименты.

Подобная методика экспертизы новых образовательных программ использовалась при организации целевой подготовки специалистов радиоэлектронного профиля в ТГТУ для направлений подготовки бакалавров: 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 11.03.02

«Инфокоммуникационные технологии и системы связи». С наибольшей вероятностью для организации целевой подготовки была выбрана технология концентрированного обучения, которая реализуется базовыми кафедрами на нескольких предприятиях г. Тамбова и демонстрирует свою эффективность в плане удовлетворения потребностей предприятий и организаций радиотехнического профиля в компетентных специалистах, высокой производительности их труда, устранения перегрузок персонала, расширения спектра инновационной деятельности предприятия [2]. Одновременно функционирование этой системы оказало значимое положительное влияние на качество научной и учебно-методической деятельности университета.

Библиографический список

1. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Статистика, 1980. 263 с.
2. Дорохова Т.Ю., Пучков Н.П. Байесовский подход к проблемам определения приоритетности педагогических проектов/ Т.Ю. Дорохова, Н.П. Пучков // Continuum. Математика. Информатика. Образование. 2019. № 3 (15). С. 30-35.
3. Новиков Д.А. Статистические методы педагогических исследований (типовые случаи). М.: МЗ-Пресс, 2004. – 67 с.
4. Павлов А.Н., Соколов Б.В. Методы обработки экспертной информации: учебно-метод. пособие/ А.Н.Павлов, Б.В. Соколов; ГУАП. СПб., 2005. 42 с.
5. Пучков Н.П., Дорохова Т.Ю. Технический университет – системообразующее звено региональной системы целевой подготовки специалистов для профильных предприятий (на примере радиоэлектронной промышленности) / Н.П. Пучков, Т.Ю. Дорохова// Сборник трудов II международного научно-технического форума: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2019. – Рязань 2019. С. 38-42.

УДК 519.766.2; ГРНТИ 27.03.33

ОПЕРАЦИИ НАД НЕЧЕТКИМИ ЧИСЛАМИ И МЕРА НЕЧЕТКОСТИ

К.В. Бухенский, А.Н. Конюхов, А.Б. Дюбуа, А.С. Сафошкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, chronos@bk.ru*

Аннотация. Изложены некоторые результаты исследования преобразований нечеткости нечетких чисел, обусловленных операциями над ними.

Ключевые слова: нечеткое множество, нечеткое число, функция принадлежности, принцип расширения Заде, мера нечеткости, индекс нечеткости.

OPERATIONS ON FUZZY NUMBERS AND MEASURE OF FUZZINESS

K.V. Bukhensky, A.N. Konyukhov, A.B. Dubois, A.S. Safoshkin

*Ryazan state radio engineering university named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, chronos@bk.ru*

Abstract. Some results of investigation of fuzzy numbers fuzziness transformations, associated with operations on them are described.

Keywords: fuzzy set, fuzzy number, membership function, Zadeh's extension principle, measure of fuzziness, index of fuzziness.

Моделирование в условиях неопределенностей второго рода, связанных с особенностями восприятия и мышления человека, представляет огромный практический интерес. Для создания и анализа таких «нечетких» моделей, начиная со второй половины XX века, применяется теория нечетких множеств и нечеткая логика (ТНМНЛ), являющаяся обобщением классической канторовой теории множеств и математической логики.

Практические приложения ТНМНЛ чрезвычайно обширны: это системы нечеткого вывода (*fuzzy inference systems*, FIS), являющиеся центральным звеном управления техниче-

скими устройствами на нечеткой логике, экспертные системы, средства для распознавания образов, текста, системы искусственного интеллекта [1-3].

Во многих алгоритмах нечеткого вывода в качестве антецедентов используются нечеткие числа (НЧ), над которыми производятся различные операции, осуществляемые по правилам ТНМНЛ. Так как нечеткие числа можно охарактеризовать различными обобщенными показателями (индексами) нечеткости, представляет интерес проследить влияние некоторых операций над НЧ на нечеткость результата. Данный материал представляет собой краткое обобщение промежуточных результатов исследований по указанной проблеме.

По L. Zadeh, нечетким подмножеством $\tilde{A}$ универсума U или просто нечетким множеством (НМ) называется совокупность всех пар следующего вида: $\tilde{A} = \{ \langle x \in U, \mu_{\tilde{A}}(x) \rangle \}$, где $\mu_{\tilde{A}}(x)$ – функция принадлежности (ФП) множества $\tilde{A}$, число $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1$ – степень принадлежности элемента x множеству $\tilde{A}$ [4]. Совокупность всевозможных нечетких множеств, заданных на универсуме U , будем обозначать $\mathcal{F}(U)$.

Надо полагать, что целесообразность и особенности оперирования в терминах НМ определяются, прежде всего, тем, в какой степени выражены нечеткие свойства множеств предметной области. Таким образом, возникает потребность исчисления нечеткости множеств, что требует в свою очередь обоснования и введения «меры нечеткости» на $\mathcal{F}(U)$.

В качестве меры математической нечеткости НМ принимаем всякую функцию $mf(\tilde{A})$ (*measure of fuzziness*), заданную на $\mathcal{F}(U)$, и удовлетворяющую системе аксиом 1-4 [5]:

1. $(mf(\tilde{A}) = 0) \Leftrightarrow ((\mu_{\tilde{A}}(x) = 1) \vee (\mu_{\tilde{A}}(x) = 0) \forall x \in U)$, т.е. мера нечеткости четкого множества и только его равна нулю;

2. $((\mu_{\tilde{A}}(x) = 0,5) \forall x \in \text{supp}(\tilde{A})) \Rightarrow (mf(\tilde{A}) = \max_{\tilde{X} \in \mathcal{F}(U)} mf(\tilde{X}))$, т.е. мера максимизируется на НМ, состоящих из точек перехода;

3. $\left. \begin{array}{l} \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x), \text{ если } \mu_{\tilde{B}}(x) \leq 0,5 \\ \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \mu_{\tilde{B}}(x), \text{ если } \mu_{\tilde{B}}(x) \geq 0,5 \end{array} \right\} \Rightarrow (mf(\tilde{A}) \leq mf(\tilde{B}))$ – критерий сравнения нечеткости двух НМ;

4*. $mf(\tilde{A}) = mf(\bar{\tilde{A}})$, где $\bar{\tilde{A}}$ – дополнение НМ $\tilde{A}$, причем $\mu_{\bar{\tilde{A}}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x)$, $\forall x \in U$ по Л.Заде. Не является обязательной аксиомой.

Индексом математической нечеткости НМ называем величину $if(\tilde{A})$ (*index of fuzziness*), удовлетворяющую аксиоматической базе меры математической нечеткости, приведенную, помимо прочего, к единичному отрезку значений: $0 \leq if(\tilde{A}) \leq 1$. Последнее создает сопоставимую базу сравнения результатов, полученных различными способами.

Существуют различные индексы нечеткости, однако все их можно разделить на два класса: метрические и неметрические. Метрические индексы требуют введения метрики на $\mathcal{F}(U)$. Подробное описание наиболее распространенных индексов нечеткости (энтропийного, кардинального Б.Коско, метрических Р.Ягера и А.Кауфмана) можно найти в [6].

В наших исследованиях в виду удобства преобразований и вычислений использовался индекс нечеткости Ягера с линейной метрикой Хэмминга, рассчитываемого для НМ с непрерывным носителем по формуле

$$if(\tilde{A}) = 1 - \frac{1}{b-a} \int_a^b |2\mu_{\tilde{A}}(x) - 1| dx, \quad (1)$$

где $(a, b) = \text{supp}(\tilde{A})$ – носитель НМ $\tilde{A}$ [6].

В качестве объекта исследования были взяты нечеткие числа (НЧ).

НЧ – это нечеткое множество $\tilde{A}$, заданное своей функцией принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x)$ на универсуме $U = \mathbb{R}$ – множестве всех действительных чисел, удовлетворяющее, по меньшей мере, следующим трем свойствам:

1. $\tilde{A}$ – нормальное НМ, т.е. его высота $\text{height}(\tilde{A}) = 1$;
2. $\tilde{A}$ – выпуклое НМ;
3. $\text{supp}(\tilde{A})$ – ограниченное множество [7].

На практике чаще всего используются числа LR -типа (англ. left-right), описываемые при помощи ФП вида

$$\mu_{LR}(x) = [m, ls, rs]_{LR}(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{ls}\right), & \text{если } m-ls \leq x \leq m, \quad ls > 0, \\ R\left(\frac{x-m}{rs}\right), & \text{если } m < x \leq m+rs, \quad rs > 0, \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (2)$$

где m – ядро НЧ;

ls и rs – левый и правый спрэды НЧ;

$L(t), R(t): [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ – левая и правая функции формы, т.е. непрерывные убывающие функции, удовлетворяющие условиям $R(0) = L(0) = 1$ и $R(1) = L(1) = 0$, [7].

Операции над НМ осуществляли на основе принципа обобщения Заде. Пусть задано отображение $f: X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow Y$, где $X_i, Y \subseteq \mathbb{R}$ – универсальные множества, а $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ – декартово произведение множеств. Пусть $\tilde{A}_i$ – некоторые нечеткие подмножества универсумов $X_1, X_2, \dots, X_n$ соответственно. Отображение $\hat{f}$ называется нечетким обобщением отображения f , если его действие порождает нечеткое подмножество $\tilde{B} = \hat{f}(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n)$ универсума Y с функцией принадлежности

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \begin{cases} \sup_{(x_1, \dots, x_n) \in f^{-1}(y)} \min(\mu_{\tilde{A}_1}(x_1), \dots, \mu_{\tilde{A}_n}(x_n)), & \text{если } f^{-1}(y) \neq \emptyset, \\ 0, & \text{если } f^{-1}(y) = \emptyset, \end{cases} \quad (3)$$

где $f^{-1}(y) = \{(x_1, \dots, x_n) \mid f(x_1, \dots, x_n) = y\}$ – все прообразы элемента y , [8].

Были получены следующие результаты.

1. Для каждого НМ, задаваемого функцией принадлежности определенного вида, все индексы имеют строго определенное постоянное значение, не зависящее от длины носителя $\text{length}(\text{supp}(\tilde{A})) = b - a$. Например, значения индекса Ягера (1): 0,5 (кусочно-линейная ФП); 0,391 (усеченная парабола), 0,323 (гауссова гладкая) и т.п., [6].

Различные виды индексов проявляют неодинаковую чувствительность (по относительной вариации) при переходе от НМ с одной функцией принадлежности к НМ с другой. Так, при переходе от НМ с гауссовой гладкой ФП ко множеству с треугольной ФП индекс Коско увеличился на 73,4%; индекс Ягера – на 65,2%; индекс Кауфмана – на 54,8%; энтропийный индекс – лишь на 43,6%. Вместе с тем выявлена высокая попарная линейная корреляционная зависимость значений перечисленных индексов (линейный коэффициент корреляции свыше +0,94) на различных модельных НЧ LR-типа, что позволяет ограничиться в исследованиях рассмотрением лишь одного из индексов [6].

2. Произведена дифференциация спрэдовой (англ. spread – размах) и математической (истинной) нечеткости нечетких чисел. Первая определяется длиной носителя НЧ и преобразуется по правилам интервальной математики: в этом смысле ее правильнее было бы называть спрэдовой неопределенностью. Вторая определяет степень отличия НМ от четкого множества и преобразуется в результате операций по иным законам. Различие этих двух видов нечеткости будет нагляднее проиллюстрировать на следующем примере.

Рассмотрим несколько вариантов НЧ с одинаковой спрэдовой нечеткостью в виде промежутка $\text{supp}(\tilde{u}) = (a, b)$, с ядром $\text{core}(\tilde{u}) = m$, но описываемых различными функциями принадлежности:

– треугольная (кусочно-линейная):

$$\mu_{\tilde{u}}^t(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{m-a}, & \text{если } a \leq x < m, \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{если } m \leq x \leq b, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

– гауссова гладкая (где $m = (a + b) / 2$):

$$\mu_{\tilde{u}}^{sg}(x) = \begin{cases} \exp \left[1 - \frac{(b-a)^2}{4(b-x)(x-a)} \right], & \text{если } a < x < b, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

– усеченная парабола (где $m = (a + b) / 2$):

$$\mu_{\tilde{u}}^{cp}(x) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{x-m}{b-m} \right)^2, & \text{если } a \leq x \leq b, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

Индексы математической нечеткости (1) приведенных НЧ, как отмечалось выше, существенно различаются, в то время как спрэдовая нечеткость во всех случаях одинакова и равна $(b - a)$, (рисунок 1).

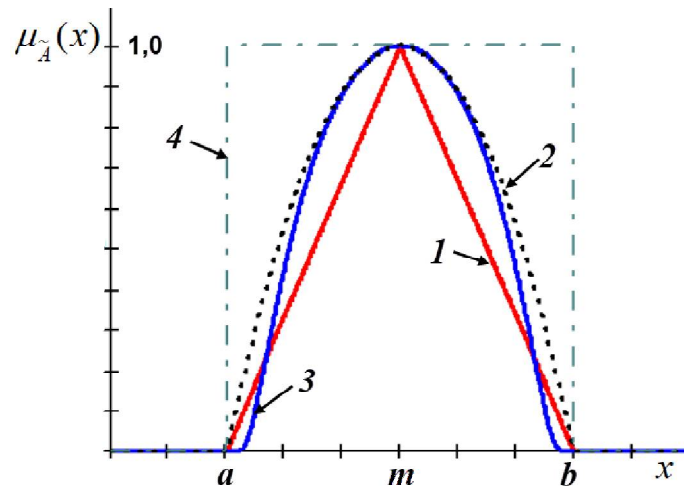


Рис. 1. Нечеткие числа (функции принадлежности: 1 – треугольная, 2 – усеченная парабола, 3 – гауссова гладкая) и четкий интервал (a, b) – 4.

Индексы математической нечеткости: 0,5 (1); 0,391 (2); 0,323 (3); 0 (4).

Спрэдовая нечеткость во всех случаях $(b-a)$.

Не смотря на то, что в формулу индекса нечеткости (1) явно входит величина спрэдовой нечеткости $sf = (b-a)$, этот и другие индексы в случае унимодальных НЧ не зависят от величины спрэда, а являются лишь функцией кривых формы $L(t), R(t): [0,1] \rightarrow [0,1]$, [6].

3. Исследовано инъективное непрерывное отображение $f: X \rightarrow Y$ и его нечеткое обобщение $\hat{f}: \tilde{A} \rightarrow \tilde{B}$, где $\tilde{A} \subseteq X$, $\tilde{B} \subseteq Y$, в соответствии с принципом расширения (3). Очевидно, что в таком случае прообраз элемента $y \in \tilde{B}$, т.е. $f^{-1}(y) = \{x \mid f(x) = y\}$ определен однозначно.

Пусть $\text{supp}(\tilde{A}) = (a, b)$, $a < b$ и $\text{supp}(\tilde{B}) = (c, d)$, $c < d$. В силу инъективности имеет место однозначное отображение носителя НМ $\tilde{A}$ на носитель НМ $\tilde{B}$ $f: \text{supp}(\tilde{A}) \rightarrow \text{supp}(\tilde{B})$, т.е. $f: ((a, b) \subseteq X) \rightarrow ((c, d) \subseteq Y)$ в случае $f \uparrow$ или $f: ((a, b) \subseteq X) \rightarrow ((d, c) \subseteq Y)$, если $f \downarrow$. Рассмотрим только первый случай (по второму рассуждения аналогичные).

Индекс математической нечеткости (1) для исходного НМ $\tilde{A}$

$$if(\tilde{A}) = 1 - \frac{1}{b-a} \int_a^b |2\mu_{\tilde{A}}(x) - 1| dx. \quad (7)$$

То же для образа – НМ $\tilde{B}$

$$if(\tilde{B}) = 1 - \frac{1}{d-c} \int_c^d |2\mu_{\tilde{B}}(y) - 1| dy, \quad (8)$$

который, пользуясь инъективностью $f \uparrow$, можно переписать следующим образом:

$$if(\tilde{B}) = 1 - \frac{1}{f(b) - f(a)} \int_{f(a)}^{f(b)} |2\mu_{\tilde{A}}(f^{-1}(y)) - 1| dy. \quad (9)$$

Произведя замену переменного $y = f(x)$, $x = f^{-1}(y)$ в интеграле (9), получим

$$if(\tilde{B}) = 1 - \frac{1}{f(b) - f(a)} \int_a^b |2\mu_{\tilde{A}}(x) - 1| f'(x) dx, \quad (10)$$

из чего следует, что, вообще говоря, $if(\tilde{B}) \neq if(\tilde{A})$ даже при инъективном отображении.

Однако, если преобразование линейное $y = kx + l$, ($k \neq 0$), то из (10) и (7) следует, что

$$if(\tilde{B}) = 1 - \frac{1}{kb - ka} \int_a^b |2\mu_{\tilde{A}}(x) - 1| (kx + l)' dx = 1 - \frac{1}{b - a} \int_a^b |2\mu_{\tilde{A}}(x) - 1| dx = if(\tilde{A}), \quad (11)$$

то есть математическая нечеткость НМ инвариантна относительно его линейного преобразования. Заметим, что конкретный вид функции принадлежности не задавался, что делает данный вывод универсальным и применимым к любым НМ с ограниченным непрерывным носителем, а не только к НЧ. Очевидно, что тем самым доказана и инвариантность математической нечеткости относительно операции умножения НМ на действительное число $k \neq 0$, в то время как спредовая нечеткость изменяется в k раз.

4. Исследовано преобразование нечеткости в результате операций сложения НЧ.

Использовался α -уровневый принцип обобщения.

Пусть $f: X \rightarrow Y$ – непрерывное отображение, $\tilde{u}$ – нечеткое число, заданное на носителе X . Тогда для всех $0 \leq \alpha \leq 1$ имеет место $[\hat{f}(\tilde{u})]_{\alpha} = f(u_{\alpha})$. Иными словами, α -сечения образа $\hat{f}(\tilde{u})$ совпадают с образами α -сечений, полученными в результате действия на них непрерывного отображения f . Проще говоря, нахождение образа НЧ методом α -сечений сводится к классической задаче нахождения образа четкого интервала. Требование непрерывности здесь существенно [8].

Показано, что

$$if(\tilde{u} + \tilde{v}) = \frac{(ls_u + rs_u)if(\tilde{u}) + (ls_v + rs_v)if(\tilde{v})}{ls_u + rs_u + ls_v + rs_v}, \quad (12)$$

или в приведенной форме

$$if(\tilde{u} + \tilde{v}) = s_u^* if(\tilde{u}) + s_v^* if(\tilde{v}), \quad (13)$$

где $0 \leq s_u^* \leq 1$, $0 \leq s_v^* \leq 1$ – относительные доли спредов НЧ $\tilde{u}$ и $\tilde{v}$ в спреде суммы $(\tilde{u} + \tilde{v})$.

Анализ (13) показывает, что

$$\min\{if(\tilde{u}), if(\tilde{v})\} \leq if(\tilde{u} + \tilde{v}) \leq \max\{if(\tilde{u}), if(\tilde{v})\}, \quad (14)$$

то есть значение индекса математической нечеткости суммы НЧ LR-типа с одинаковыми с каждой стороны функциями формы $L_u(t) \equiv L_v(t) \equiv L(t)$ и $R_u(t) \equiv R_v(t) \equiv R(t)$ заключено между значениями индексов нечеткости слагаемых. Если же кроме того $L(t) \equiv R(t)$, то есть функции формы слева и справа одного типа, то $if(\tilde{u}) = if(\tilde{v}) = if(\tilde{u} + \tilde{v})$. Как следствие мате-

математическая нечеткость инвариантна относительно операции сложения для любых НЧ LR -типа одного класса (например, треугольных, гауссовых, квадратичных, гармонических и др.).

5. Исследован кросс-классовый случай, то есть сложение НЧ с различными функциями формы с каждой стороны: $L_u(t) \neq L_v(t)$, $R_u(t) \neq R_v(t)$. Доказано, что

$$\begin{aligned} if(\tilde{w}) &= if(\tilde{u} + \tilde{v}) = \frac{(ls_u + ls_v)if(L_w) + (rs_u + rs_v)if(R_w)}{ls_u + ls_v + rs_u + rs_v} = \\ &= \frac{\frac{ls_u if(L_u) + rs_u if(R_u)}{ls_u + rs_u} (ls_u + rs_u) + \frac{ls_v if(L_v) + rs_v if(R_v)}{ls_v + rs_v} (ls_v + rs_v)}{ls_u + ls_v + rs_u + rs_v} = \\ &= \frac{if(\tilde{u})(ls_u + rs_u) + if(\tilde{v})(ls_v + rs_v)}{ls_u + ls_v + rs_u + rs_v} = s_u^* if(\tilde{u}) + s_v^* if(\tilde{v}), \end{aligned} \quad (15)$$

где $0 \leq s_u^* \leq 1$, $0 \leq s_v^* \leq 1$ – относительные доли спредов НЧ $\tilde{u}$ и $\tilde{v}$ соответственно в спреде суммы – НЧ $\tilde{w} = \tilde{u} + \tilde{v}$. Очевидно, что $s_u^* + s_v^* = 1$.

6. Проведен ряд вычислительных экспериментов, подтверждающих (15). Пусть, например, $\tilde{u}$ – НЧ LR -типа с функциями формы соответственно $L_u(t) = 0,5(1 - \cos(\pi(t-1)))$ – гармоническая и $R_u(t) = \sqrt{1-t}$ – корень квадратный; параметры $m_u = 3$, $ls_u = 1$, $rs_u = 2$. Индексы нечеткости $if(L_u) = 0,363$; $if(R_u) = 0,5$.

Пусть $\tilde{v}$ – НЧ LR -типа с функциями формы: $L_v(t) = \frac{\sin \pi t}{\pi t}$ – усеченный кардинальный синус и $R_v(t) = 1 - t^2$ – усеченная парабола; параметры $m_v = 4$, $ls_v = 3$, $rs_v = 2$. Индексы нечеткости $if(L_v) = 0,405$; $if(R_v) = 0,391$ (рисунок 2).

Теоретические значения индексов математической нечеткости операндов и результата:

$$\begin{aligned} if(\tilde{u}) &= \frac{ls_u}{ls_u + rs_u} if(L_u) + \frac{rs_u}{ls_u + rs_u} if(R_u) = \frac{1}{3} \cdot 0,363 + \frac{2}{3} \cdot 0,5 = 0,454; \\ if(\tilde{v}) &= \frac{ls_v}{ls_v + rs_v} if(L_v) + \frac{rs_v}{ls_v + rs_v} if(R_v) = \frac{3}{5} \cdot 0,405 + \frac{2}{5} \cdot 0,391 = 0,399; \\ f(\tilde{u} + \tilde{v}) &= \frac{sf(\tilde{u})}{sf(\tilde{u}) + sf(\tilde{v})} if(\tilde{u}) + \frac{sf(\tilde{v})}{sf(\tilde{u}) + sf(\tilde{v})} if(\tilde{v}) = \frac{3}{8} \cdot 0,454 + \frac{5}{8} \cdot 0,399 = 0,420. \end{aligned} \quad (16)$$

Прямое расчетное значение индекса суммы по принципу обобщения Заде (3): 0,420.

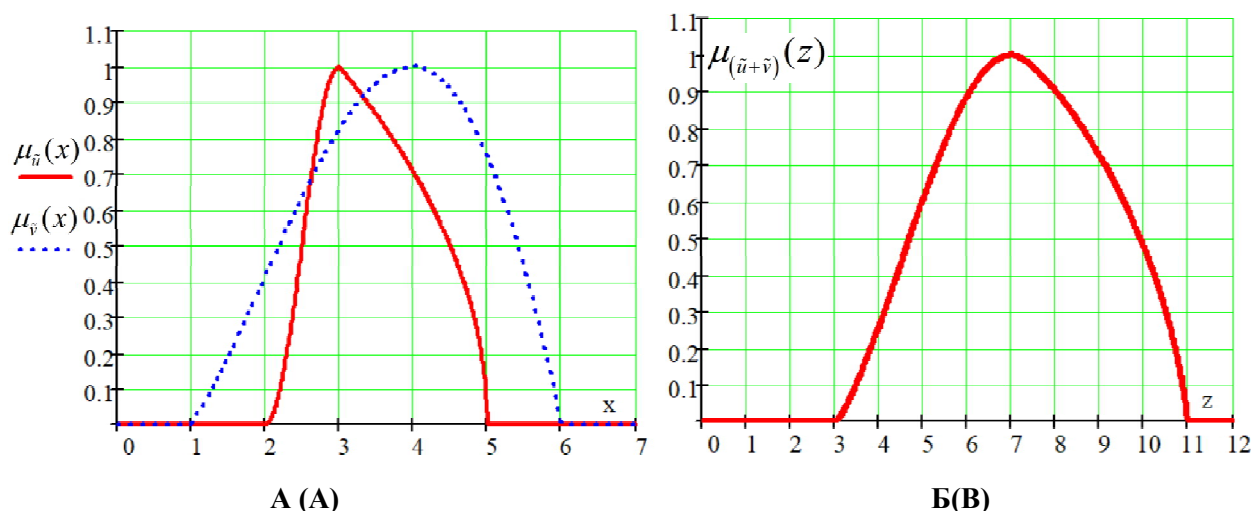


Рис. 2. (А) Нечеткие числа $\tilde{u}[3,1,2]_{LR}$ (функции формы: левая – гармоническая, правая – корень квадратный; $if(\tilde{u}) = 0,454$) и $\tilde{v}[4,3,2]_{LR}$ (функции формы: левая – усеченный кардинальный синус, правая – парабола $if(\tilde{v}) = 0,399$). (Б) $\tilde{u} + \tilde{v} = \tilde{w}[7,4,4]_{LR}$, $if(\tilde{w}) = 0,420$.

Логическим продолжением данной работы станет исследование преобразований нечеткости при нелинейных операциях – умножении и делении нечетких чисел, распространение полученных результатов на нечеткие отношения и операции над ними.

Библиографический список

1. Ojha, V., Abraham, A. and Snášel, V. Heuristic design of fuzzy inference systems: a review of three decades of research. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2019, vol. 85, pp. 845-864.
2. Kovac, P., Rodic, D., Pucovsky, V., Savkovic, B., Gostimirovic, M. Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling. J. Intell. Manuf. 2012, vol. 24, pp. 755–762.
3. Миронов В.В., Розанов А.К. Подходы к оптимизации алгоритма определения форм слов естественных языков, основанного на цепочках последовательных преобразований строк // Информатизация образования и науки. - М.: Государственный НИИ ИТ и телекоммуникаций, 2015. № 1(25). С. 43-54.
4. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and control. 1965, vol. 8, pp. 338-353.
5. De Luca A., Termini S. A definition of a nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory. Information and control. 1972, vol. 20, pp. 301-312.
6. Бухенский К.В., Конюхов А.Н., Дюбуа А.Б., Сафошкин А.С. Быстрый алгоритм расчета индексов нечеткости для унимодальных нечетких чисел LR-типа // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. №70. С. 65-75.
7. Bede B. Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. London: Springer, 2013. 276 p.
8. Конюхов А.Н., Дюбуа А.Б., Сафошкин А.С. Основы теории нечетких множеств. Часть 2: учеб. пособие / А.Н.Конюхов, А.Б.Дюбуа, А.С.Сафошкин; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2018. 108 с.

УДК 539.3:620.193:669

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАВОДОРОЖИВАНИЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА НДС СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В.О. Кузнецова

*Тульский государственный университет», Российская Федерация,
Тула, kuznecova_violetta@mail.ru*

Аннотация. В статье построена математическая модель, описывающая влияние агрессивной водородосодержащей среды на напряжённо-деформированное состояние пологой сферической оболочки из титанового сплава, загруженной нагрузкой по периметру. Для этого использована нелинейная модель, описанная в нормированных пространствах напряжений. Нагрузка на оболочку принималась с тем расчетом, чтобы прогибы оболочки были большими. Закрепление оболочки по периметру жёсткое. Выведена последовательность решения задач влияния агрессивной водородной среды на оболочки, выполненные из титанового сплава. Решение на практике произведено двухшаговым методом последовательных возмущений параметров при помощи пакетов прикладных программ MatLab и Maple. Для решения системы разрешающих дифференциальных уравнений был применен метод конечных разностей. В статье представлено решение уравнения диффузирования агрессивной водородной среды, а также произведено сличение выведенного решения с результатами классической теории без учета агрессивного воздействия водородосодержащей среды.

Ключевые слова: пологая оболочка, титановый сплав, конечные разности, нелинейное деформирование, изотропный материал, большие прогибы.

MATHEMATICAL MODELING OF THE HYDROGENATION PROCESS AND ITS EFFECT ON THE STRUCTURE OF A SPHERICAL SHELL MADE OF TITANIUM ALLOY

V.O. Kuznetsova

*Tula State University,
Russia, Tula, kuznecova_violetta@mail.ru*

The summary. The article presents a mathematical model describing the effect of an aggressive hydrogen-containing medium on the stress-strain state of a flat spherical shell made of titanium alloy loaded with a load along the perimeter. The nonlinear model described in normalized stress spaces is used for this purpose. The load on the shell was taken so that the deflections of the shell were large. Securing the shell around the perimeter is rigid. The sequence of solving problems of the influence of an aggressive hydrogen medium on shells made of titanium alloy is derived. In practice, the solution was made using the two-step method of sequential perturbations of parameters using the MatLab and Maple application packages. The finite difference method was used to solve the system of resolving differential equations. The article presents the solution of the diffusing equation of an aggressive hydrogen medium, and compares the derived solution with the results of the classical theory without taking into account the aggressive effects of the hydrogen-containing medium.

Keywords: flat shell, titanium alloy, finite differences, nonlinear deformation, isotropic material, large deflections.

Сплавы титана широко применяются в строительстве, для изготовления сооружений в авиационной, ракетной и химической отраслях. Это связано с тем, что титан и его сплавы обладают большим набором ценных свойств, такими как: высокая стойкость к разрушению, малый удельный вес, высокая механо- и жаропрочность, хорошая пластичность при низких температурах, широкое распространение титана в природе и пр. [1]. Сплавы титана, изначально не обладая восприимчивостью к виду напряженного состояния, в процессе насыщения водородом получают свойства разносопротивляемости, изменяющиеся в процессе времени. Это приводит к повышению хрупкости и раннему разрушению.

Выбранный метод решения задачи влияния наводороживания на НДС тонкой пологой сферической оболочки из титанового сплава представляет собой численный метод, который базируется на замещении производных разностными схемами. Чтобы решить задачу, обла-

дающую тройной нелинейностью, принимаем двухшаговый метод последовательных возмущений параметров [9], который может линеаризовать заданные уравнения, а также обладает высокой точностью. Для решения данной задачи конечными разностями на расчётной зоне строим сетку, затем выбираем разностную схему. Для каждого из узлов сетки записываем разностное уравнение, а затем производим учёт краевых условий. В итоге получаем систему линеаризованных алгебраических уравнений, при решении которой результатом являются приближенные результаты в дискретных узлах.

Рассмотрим тонкие пологие сферические оболочки, отношение стрелы подъема которых в центре f к меньшему радиусу a в плане составляет:

$$\frac{f}{a} \leq \frac{1}{5},$$

а отношение толщины оболочки h к наименьшему радиусу кривизны

$$\frac{h}{R_{\min}} \leq \frac{1}{20}. \quad (1)$$

В связи с пологостью оболочки геометрия поверхности отождествляется с геометрией на проектной плоскости, и криволинейная система координат заменяется полярной системой.

Рассмотрим упругое равновесие пологой сферической оболочки толщиной h под действием поперечной осесимметричной равномерно-распределенной нагрузки q и водородо-содержащей среды с концентрацией λ . Примем кинетический потенциал деформаций в виде [11]:

$$W_1 = (A_e(\lambda) + B_e(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_e(\lambda) + D_e(\lambda)\xi + E_e(\lambda)\eta\cos 3\varphi)\tau^2 + \\ + [(A_p(\lambda) + B_p(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi + E_p(\lambda)\eta\cos 3\varphi)\tau^2]^n, \quad (2)$$

где $A_e(\lambda)$, $B_e(\lambda)$, $C_e(\lambda)$, $D_e(\lambda)$, $E_e(\lambda)$, $A_p(\lambda)$, $B_p(\lambda)$, $C_p(\lambda)$, $D_p(\lambda)$, $E_p(\lambda)$ – физические функции потенциала соответственно квазилинейной и нелинейной частей, зависящие от степени водородонасыщения. Зависимости механических свойств материала вычислены в результате полиномиальной интерполяции значений коэффициентов при заданном уровне концентрации среды λ (0; 0,01; 0,03 и 0,05%) для сплава ВТ1-0 принимают вид:

$$V_{ek}(\lambda) = e_{0k} + e_{1k} \cdot \lambda + e_{2k} \cdot \lambda^2; V_{pk}(\lambda) = p_{0k} + p_{1k} \cdot (p_{2k})^\lambda \\ A_e(\lambda) = V_{e1}(\lambda); B_e(\lambda) = V_{e3}(\lambda); C_e(\lambda) = V_{e2}(\lambda); D_e(\lambda) = V_{e4}(\lambda); E_e(\lambda) = V_{e5}(\lambda) \\ A_p(\lambda) = V_{p1}(\lambda); B_p(\lambda) = V_{p3}(\lambda); C_p(\lambda) = V_{p2}(\lambda); D_p(\lambda) = V_{p4}(\lambda); E_p(\lambda) = V_{p5}(\lambda), \quad (3)$$

где e_{ik} , p_{ik} – коэффициенты полиномов $i = 0..3$; $k = 1..3$.

Заданную оболочку принимаем достаточно тонкой, настолько, чтобы считать верными гипотезы Кирхгофа-Лява (1).

Для оболочки принято постоянство основных радиусов кривизны средней поверхности в плане: $R_1 = R_2 = R$.

Главные кривизны оболочки обретают значение $k_1 = k_2 = k = 1/R$. Рассмотрим такие оболочки, в которых возможно не учитывать разницу между длиной дуги срединной поверхности и её проекцией на плоскость [1].

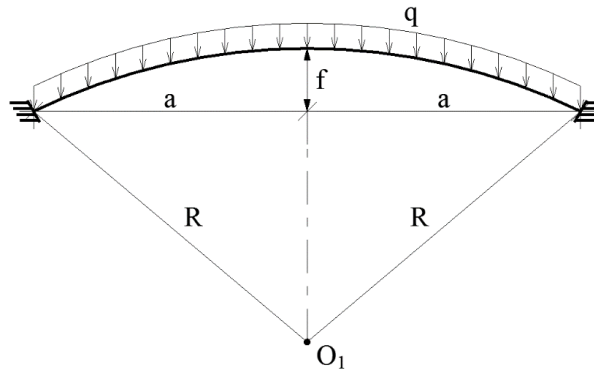


Рис. 1. Схема задачи

Тогда используем зависимости вида:

а) компоненты деформации срединной поверхности:

$$\varepsilon_r = u'_r - kw + 0,5(w'_r)^2; \quad \varepsilon_\varphi = \frac{u}{r} - kw, \quad (4)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$ – радиальные и окружные относительные деформации в срединных поверхностях; u, w – радиальные перемещения и прогибы; k – главная кривизна; r – радиальная координата;

б) компоненты изгибной деформации:

$$\chi_r = -w_{rr}; \quad \chi_\varphi = -\frac{w'_r}{r}; \quad (5)$$

в) формулы для компонентов тензора деформаций через параметры $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$ и кривизны χ_r, χ_φ :

$$e_r = \varepsilon_r + z\chi_r; \quad e_\varphi = \varepsilon_\varphi + z\chi_\varphi, \quad (6)$$

где z – вертикальная координата, которая отмеряется от средней поверхности оболочки, имеет направление к центру кривизны.

Подставляя зависимости (4)-(5) в (6), в результате получаем выражения для компонентов тензора деформаций через перемещения и прогибы:

$$e_r = u'_r - kw + 0,5(w'_r)^2 - zw'_{rr}; \quad e_\varphi = \frac{u}{r} - kw - z\frac{w'_r}{r}. \quad (7)$$

Связь между деформациями и напряжениями представим в виде:

$$\begin{Bmatrix} e_r \\ e_\theta \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Обращая соотношения (13), получаем зависимость напряжений от деформаций:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} e_r \\ e_\theta \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

где $[B] = [A]^{-1}$.

Усилия и моменты найдём через напряжения традиционным способом:

$$\begin{aligned}
N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r dz; \quad N_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi dz; \\
M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz; \quad M_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi z dz.
\end{aligned} \tag{10}$$

Связь моментов и усилий с компонентами деформаций оболочки приведём к виду:

$$\begin{aligned}
M_r &= K_{11}(\lambda)\varepsilon_r + K_{12}(\lambda)\varepsilon_\varphi + D_{11}(\lambda)\chi_r + D_{12}(\lambda)\chi_\varphi; \\
M_\varphi &= K_{21}(\lambda)\varepsilon_r + K_{22}(\lambda)\varepsilon_\varphi + D_{21}(\lambda)\chi_r + D_{22}(\lambda)\chi_\varphi; \\
N_r &= C_{11}(\lambda)\varepsilon_r + C_{12}(\lambda)\varepsilon_\varphi + K_{11}(\lambda)\chi_r + K_{12}(\lambda)\chi_\varphi; \\
N_\varphi &= C_{21}(\lambda)\varepsilon_r + C_{22}(\lambda)\varepsilon_\varphi + K_{21}(\lambda)\chi_r + K_{22}(\lambda)\chi_\varphi.
\end{aligned} \tag{11}$$

С учётом влияния степени наводороживания материалов при концентрации λ материальные функции имеют вид:

$$C_{ij}(\lambda) = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) dz; \quad K_{ij}(\lambda) = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z dz; \quad D_{ij}(\lambda) = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z^2 dz, \tag{12}$$

где B_{ij} – функции, подлежащие определению из экспериментов по деформированию образцов материала при разных уровнях концентрации водорода λ .

Применение любых определяющих соотношений не меняет уравнений статико-геометрической природы [2], поэтому, при условии $zk \ll 1$ уравнения равновесия принимают вид:

$$\begin{aligned}
M_r'_{rr} - M_\varphi'_{r/r} + 2M_r'_{r/r} + k(N_r + N_\varphi) + N_r w'_{rr} &= -q; \\
N_r'_{r/r} + (N_r - N_\varphi)/r - k[M_r'_{r/r} + (M_r - M_\varphi)/r] &= 0.
\end{aligned} \tag{13}$$

Используя условия (13), а также выражения для усилий и моментов (12), получим систему двух нелинейных дифференциальных уравнений относительно функций u и w , связанных с уровнем наводороживания λ . Для линеаризации этих уравнений используем двухшаговый метод последовательных возмущений параметров [9, 10], согласно которому запишем выражения для приращений деформаций и кривизн срединной поверхности:

$$\delta\varepsilon_r = \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_r} \delta\sigma_r + \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_\varphi} \delta\sigma_\varphi + \frac{\partial e_r}{\partial \lambda} \delta\lambda; \quad \delta\varepsilon_\varphi = \frac{\partial e_\varphi}{\partial \sigma_\varphi} \delta\sigma_\varphi + \frac{\partial e_\varphi}{\partial \sigma_r} \delta\sigma_r + \frac{\partial e_\varphi}{\partial \lambda} \delta\lambda \tag{14}$$

$$\delta\varepsilon_r = \delta u'_{r/r} - k\delta w + w'_{r/r} \delta w'_{r/r}; \quad \delta\varepsilon_\varphi = \frac{\delta u}{r} - k\delta w \tag{15}$$

$$\delta\chi_r = -\delta w'_{rr}; \quad \delta\chi_\varphi = -\frac{\delta w'_{r/r}}{r}. \tag{16}$$

Зависимости приращений деформаций в точке через приращения деформаций срединной поверхности $\delta\varepsilon_r$ и $\delta\varepsilon_\varphi$ и кривизн срединной поверхности $\delta\chi_r$ и $\delta\chi_\varphi$ представляются следующим образом:

$$\delta e_r = \delta\varepsilon_r + z\delta\chi_r; \quad \delta e_\varphi = \delta\varepsilon_\varphi + z\delta\chi_\varphi. \quad (17)$$

Используя уравнения (14) – (16), получим выражения, связывающие приращения деформаций и перемещений:

$$\delta e_r = \delta u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}; \quad \delta e_\varphi = \frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w'_r}{r}. \quad (18)$$

Далее рассматриваем задачу, где процесс воздействия агрессивной водородосодержащей среды на оболочку завершён, и она наводорожена. Таким образом, дифференцировать по параметру λ в выражениях приращений деформаций (14) не требуется. Это необходимо в том случае, когда процесс наводороживания сопровождается ростом нагрузки, а следовательно – увеличением напряжений. Зависимости приращений усилий и моментов от напряжений имеют вид:

$$\begin{aligned} \delta N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_r dz; \quad \delta N_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_\varphi dz; \\ \delta M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_r z dz; \quad \delta M_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_\varphi z dz, \end{aligned} \quad (19)$$

где δN_r , δN_φ – приращения усилий в средней поверхности оболочки, δM_r , δM_φ – приращения моментов.

Используя уравнения (12) и зависимости (19), получим зависимости приращений усилий и моментов от приращений перемещений:

$$\begin{aligned} \delta N_r &= C_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - \\ &- K_{11}(\lambda)\delta w'_{rr} + C_{12}(\lambda)\left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w'_r}{r}\right) - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} \\ \delta N_\varphi &= C_{12}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - \\ &- K_{12}(\lambda)\delta w_{rr} + C_{22}(\lambda)\left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w'_r}{r}\right) - K_{22}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} \\ \delta M_r &= K_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - \\ &- D_{11}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} + K_{11}(\lambda)\left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w\right) - D_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} \\ \delta M_\varphi &= K_{12}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - \\ &- D_{12}(\lambda)\delta w'_{rr} + K_{22}(\lambda)\left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w\right) - D_{22}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r}. \end{aligned} \quad (20)$$

Запишем в приращениях уравнения равновесия пологой сферической оболочки, исключая члены второго порядка малости и выше:

$$\begin{aligned} \delta M'_{r,rr} - \delta M'_{\varphi,r}/r + 2\delta M'_{r,r}/r + k(\delta N_r + \delta N_{\varphi}) + \delta N_r w'_{rr} + N_r \delta w'_{rr} = -\delta q \\ \delta N'_{rr} + (\delta N_r - \delta N_{\varphi})/r - k[\delta M'_{rr} + (\delta M_r - \delta M_{\varphi})/r] = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Полученную в приращениях систему разрешающих дифференциальных уравнений (25) дополним граничными условиями. Для осесимметричной задачи в центре оболочки поворот нормали к срединной поверхности, радиальные перемещения и их приращения равны нулю ($w'_r = 0$, $u = 0$, $\delta w'_r = 0$, $\delta u = 0$,). По внешнему контуру оболочки граничные условия зависят от способа закрепления. Для жесткого защемления оболочки по периметру полагаем, что радиальные перемещения, их приращения, прогибы и поворот нормали к срединной поверхности равны нулю ($u = 0$, $w = 0$, $w'_r = 0$, $\delta w'_r = 0$, $\delta u = 0$,).

Подставив в уравнения равновесия (21) выражения для приращений усилий и моментов (20), получаем систему линеаризованных разрешающих дифференциальных уравнений относительно приращений прогибов и радиальных перемещений:

$$\begin{aligned} \frac{\delta u}{r} [K_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - D_{11}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} + K_{11}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w) - D_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r}] - \\ - \delta w'_r [K_{12}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - D_{12}(\lambda) \delta w'_{rr} + K_{22}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w) - D_{22}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r}] + \\ 2 \frac{\delta u}{r} [K_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - D_{11}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} + K_{11}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w) - D_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r}] + \\ + k(C_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - \\ - K_{11}(\lambda) \delta w'_{rr} + C_{12}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w'_r}{r}) - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} + C_{12}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - \\ - K_{12}(\lambda) \delta w'_{rr} + C_{22}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w'_r}{r}) - K_{22}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} + w'_{rr} [C_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - \\ - K_{11}(\lambda) \delta w'_{rr} + C_{12}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w'_r}{r}) - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r}] + \delta w'_{rr} [C_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - \\ - K_{11}(\lambda) \delta w'_{rr} + C_{12}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w'_r}{r}) - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r}] = -\delta q \\ \frac{\delta u}{r} [C_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - K_{11}(\lambda) \delta w'_{rr} + C_{12}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w'_r}{r}) - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r}] + \\ + (C_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - K_{11}(\lambda) \delta w'_{rr} + C_{12}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w'_r}{r}) - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} - \\ - C_{12}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - K_{12}(\lambda) \delta w'_{rr} + C_{22}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w'_r}{r}) - K_{22}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r}) - \\ - k[\frac{\delta u}{r} [K_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - D_{11}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} + K_{11}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w) - D_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} + \\ + (K_{11}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - D_{11}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} + K_{11}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w) - D_{12}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r} - \\ - K_{12}(\lambda)(u'_r - k\delta w + w'_r \delta w'_r - z\delta w'_{rr}) - D_{12}(\lambda) \delta w'_{rr} + K_{22}(\lambda)(\frac{\delta u}{r} - k\delta w) - D_{22}(\lambda) \frac{\delta w'_r}{r})] = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

В процессе химической адсорбции водород в конечном итоге распадается на атомы, которые затем проникают вглубь материала [5, 6]. Плотность потока J или количество вещества, проникающего за единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярную этому потоку, строго пропорциональна пространственному градиенту концентрации λ . Для не больших перепадов концентрации водорода в среде возможно применение первого закона Фика, который гласит, что количество вещества, проникающее через воображаемое сечение, перпендикулярное направлению диффундирования, строго пропорционально величине градиента концентрации вещества в этом сечении, площади сечения и времени диффундирования:

$$J = -D \text{grad} \lambda = -D \frac{\delta \lambda}{\delta z}, \quad (24)$$

где D - константа диффузии, z - координата в направлении диффузии.

В рассматриваемой задаче физически активная среда контактирует с оболочкой только по верхней или нижней поверхности, что приводит к одномерности процесса диффузии.

Для поставленной одномерной задачи уравнение (24) запишется в виде первого закона Фика, имеющего вид:

$$J = -D \delta \lambda'_z.$$

Для титановых сплавов концентрация не влияет на коэффициент диффундирования, поэтому из первого закона Фика вытекает второй закон в виде:

$$\frac{\partial \lambda(z, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \lambda(z, t)}{\partial z^2}, \quad (25)$$

где t – текущее время.

Из выражения (25) очевидно, что скорость изменения процесса диффузии во времени зависит только от константы диффузии D . Диффундирование водорода в оболочку подобно теплопроводности. Заданное уравнение аналогично дифференциальному уравнению теплопроводности для одномерного потока тепла. Разница лишь в том, что в выражении для передачи тепла вместо константы диффузии принимается коэффициент теплопроводности [8].

Чтобы решить уравнение диффузии, используются методы, что и для решения температурных задач. Используем метод разделения переменных – нахождение совокупности частных решений, которые удовлетворяют уравнению (25) начальными и граничными условиями. Далее рассмотрим решения по принципу наложения: частное решение найдём в виде произведения двух функций – одна из них зависит от времени, а другая – от координаты. Для решения задач наводороживания целесообразно применять метод интегрального преобразования Фурье. Кроме этого применимы численные методы решения, такой как метод конечных разностей [6, 8].

Для решения уравнения (25) при явлении одностороннего и двухстороннего диффундирования используем решения, представленные в работе [9].

При процессе одностороннего диффундирования решение имеет вид:

$$\lambda(z, t) = \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1)z/h + (2/\pi) \sum_{i=1}^{\infty} \sin(i \cdot \pi \cdot z/h) \exp(-F_0 \pi^2 i^2) \times \\ \times [\lambda_2 \cos(i \cdot \pi) - \lambda_1]/i, \quad (26)$$

где $F_o = Dt / h^2$ – число Фурье; i – число членов ряда; λ_1 и λ_2 – краевые условия для концентрации среды сверху и снизу оболочки; h – толщина оболочки; z – координата по толщине оболочки.

Граничные условия выразим следующим образом:

а) воздействие среды происходит со стороны приложения силовой нагрузки:

$$\lambda(-h/2, t) = \lambda_\infty = \lambda_1; \lambda(+h/2, t) = 0 = \lambda_2. \quad (27)$$

Начальные условия запишутся в виде

$$\lambda(z, 0) = 0. \quad (28)$$

Учитывая в уравнении (26) начальные (28) и краевые условия (27), получаем модель воздействия активной водородной среды [10, 11].

Заменяя производные конечными разностями в программном комплексе MATLAB полученные разрешающие уравнения, и обработав вычислительный алгоритм, приходим к следующим результатам решения поставленной задачи при процессе односторонней диффузии со стороны приложения поперечной силовой нагрузки, которые приведены на рисунках 2-7:

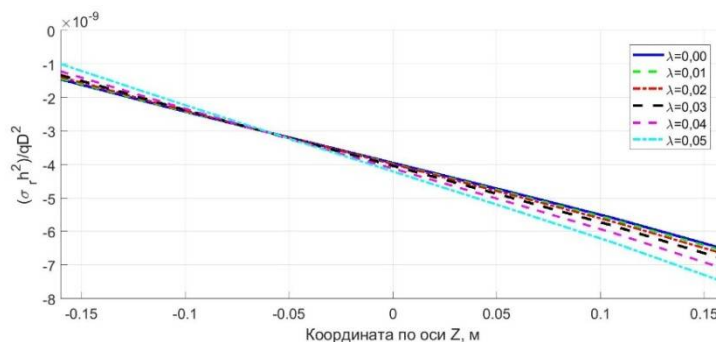


Рис. 2. Напряжения σ_r в точке 1/2 диаметра оболочки (по толщине)

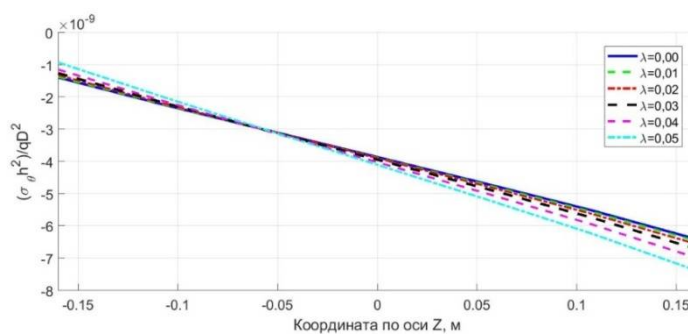


Рис. 3. Напряжения σ_φ в точке 1/2 диаметра оболочки (по толщине)

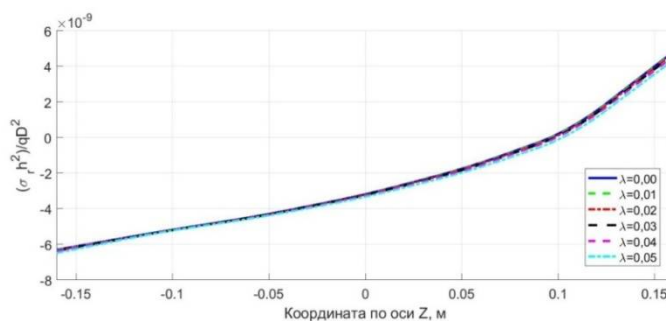


Рис. 4. Напряжения σ_t в точке края оболочки (по толщине)

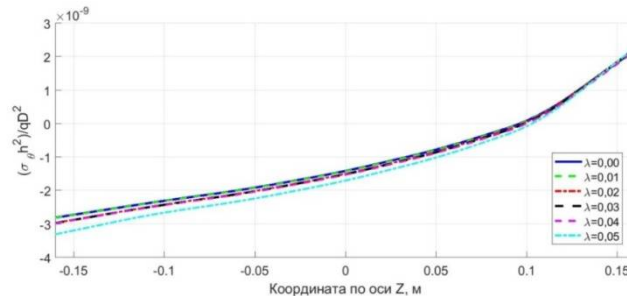
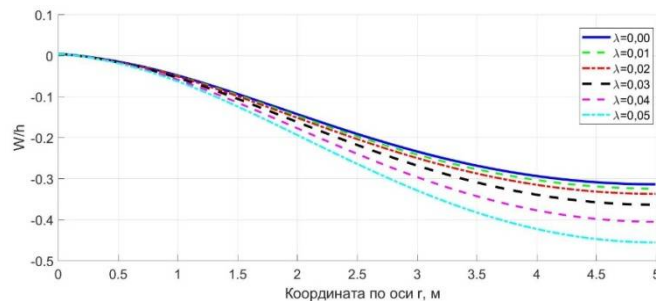
Рис. 5. Напряжения σ_φ в точке края оболочки (по толщине)

Рис. 6. Прогибы в оболочке

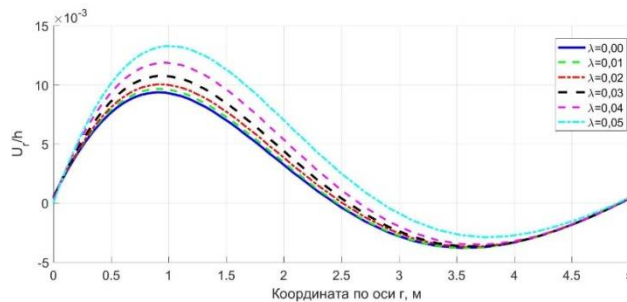


Рис. 7. Горизонтальные перемещения вдоль радиуса

На рисунках 2-5 показаны графики зависимости напряжений σ_r и σ_φ по толщине оболочки от степени концентрации агрессивной водородосодержащей среды. Рисунки 6 и 7 отражают графики прогибов и горизонтальных перемещений оболочки.

Сравним полученные результаты с результатами И.Г. Овчинникова и Л.А. Кирилловой [6], при получении которых использовались простейшие физические соотношения, в зависимости от степени концентрации λ [7]:

$$\sigma_r = k \frac{\psi}{1-\nu^2} (\varepsilon_r + \nu \varepsilon_\varphi)$$

$$\sigma_\varphi = k \frac{\psi}{1-\nu^2} (\varepsilon_\varphi + \nu \varepsilon_r)$$

$$\psi = \sigma_i / \varepsilon_i,$$

где ψ – функция, учитывающая воздействие вида напряжённого состояния, а также водородного воздействия на характер физических соотношений, k – главная кривизна оболочки, σ_i – интенсивность напряжений, ε_i – интенсивность деформаций, ν – к-т поперечной деформации.

Считая, что влияние среды не приводит к изменению вида уравнений состояния, а меняются лишь коэффициенты, которые становятся функциями параметров λ, ε , авторы [6-8] представляют диаграмму деформирования $\sigma - \varepsilon$ в виде: $\sigma_i = A\varepsilon_i - B(\lambda, \varepsilon_i)E^{m(\lambda, \varepsilon)}$,

$$\text{где } \sigma_i = (\sigma_r^2 - \sigma_r\sigma_\varphi + \sigma_\varphi^2)^{1/2}; \varepsilon_i = \mu_1(\varepsilon_r^2 - \mu_2\varepsilon_r\varepsilon_\varphi + \varepsilon_\varphi^2)^{1/2}; \psi = (\lambda, \varepsilon) = \begin{cases} \psi^+ = A_0 - B(\lambda)\varepsilon_i^{m(\lambda)-1}, & \varepsilon \geq \varepsilon_0 \\ \psi^- = A_0 - B_0\varepsilon_i^{m_0-1}, & \varepsilon < \varepsilon_0 \end{cases},$$

ε_0 – критическое значение деформации при насыщении водородом; A, B, A_0, B_0, m, m_0 – константы, определяемые по экспериментальным диаграммам деформирования, которые аппроксимируется функцией $\sigma_i = A\varepsilon_i^m - B\varepsilon_i^n$,

где $\mu_1 = (1 - \nu + \nu^2)^{1/2} / (1 - \nu^2)$; $\mu_2 = 3\nu / (1 - \nu + \nu^2) - 1$.

Сравнивая в программном комплексе MATLAB полученные решения по разработанной модели [10-11] с результатами по теории И.Г. Овчинникова [6-7], можно произвести следующий анализ: результаты отличаются из-за того, что в теории И.Г. Овчинникова не учитывается влияние наводороживания при разных сложных видах напряжённого состояния.

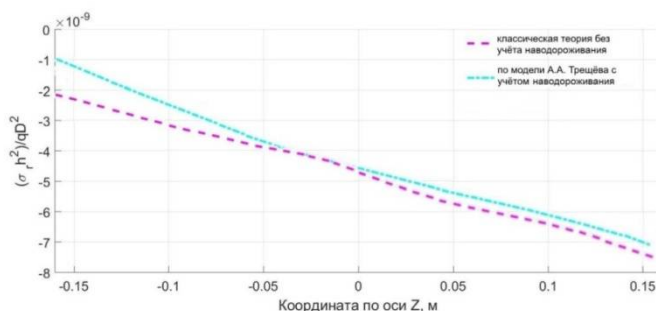


Рис. 8. Напряжения σ_r в точке 1/2 диаметра оболочки (по толщине)

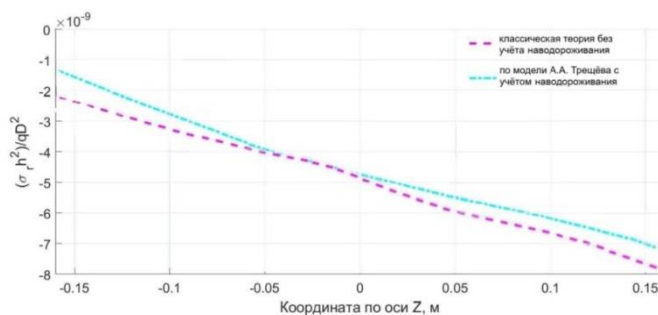


Рис. 9. Напряжения σ_θ в точке 1/2 диаметра оболочки (по толщине)

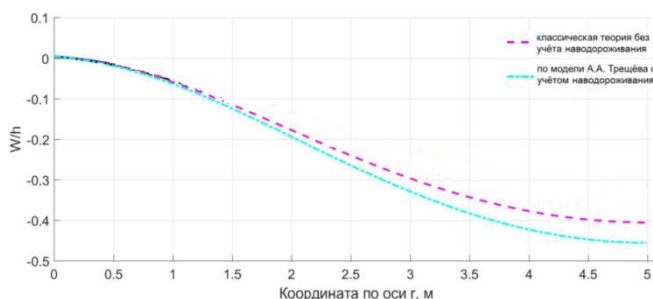


Рис. 10. Прогибы в оболочке

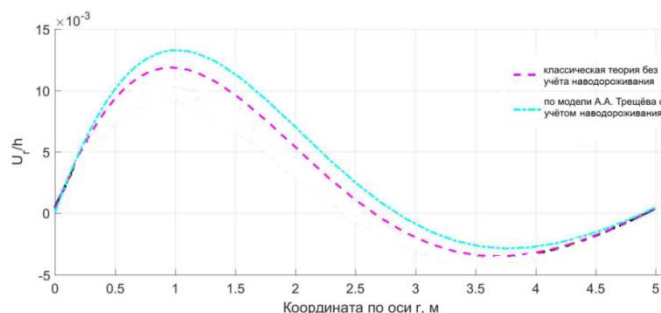


Рис. 11. Горизонтальные перемещения в оболочке

На рисунках 10-11 показано, что разница в величинах максимальных прогибов и перемещений при учёте и без учета воздействия агрессивной водородной среды значительное, что составляет 16,5 %, напряжений – до 50%. Такая разница не допустима, так как превышает предельное значение погрешности для строительных конструкций, равное 5% (см. рис. 8-11).

Учет зависимости деформационных и прочностных характеристик от степени насыщения водородом вносит значительные поправки в результаты определения напряжённо-деформированного состояния сферических оболочек из титановых сплавов, а поэтому необходим для получения достоверных результатов расчета.

Выводы

Множественные фундаментальные исследования доказывают тот факт, что воздействие водородной среды на конструкционные материалы сопутствует появлению в них неоднородности и разносопротивляемости, изменяющейся в течение времени. Это обуславливает потребность создания новых моделей, которые будут описывать НДС тел с учетом наведенной восприимчивости механических свойств материалов к наводороживанию в широком диапазоне изменения напряжённого состояния.

Контроль воздействия агрессивной водородной среды в работе был организован на основе нелинейных соотношений, которые учитывают наведённую чувствительность к наводороживанию в широком диапазоне изменения видов напряжённого состояния [4].

В данной работе произведено построение математической модели влияния наводороживания на НДС пологой сферической оболочки и приведено численное решение задачи с иллюстрацией прогибов, перемещений и напряжений.

Библиографический список

1. Астафьев В.И. Накопление повреждённости и коррозионное растрескивание металлов под напряжением / В.И. Астафьев, Л.К. Ширяева. – Самара: Изд-во Самарский университет, 1998. 123 с.
2. Баландин П.П. К вопросу о гипотезах прочности / П.П. Баландин // Вестник инженеров и техников. – 1937. – №1. – С. 37-41.
3. Колачев Б.А. Механические свойства титана и его сплавов / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, Л.А. Буханова. – М.: Металлургия, 1974. 544 с.
4. Маркин А.А. К обоснованию теории оболочек / А.А. Маркин // Работы по механике деформируемых сред. – Тула: ТПИ. – 1974. – С. 121-129.

УДК 66.011; ГРНТИ 61.01.77

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

О.С. Дмитриев, А.А. Барсуков

Тамбовский государственный технический университет,
Россия, Тамбов, phys@nnn.tstu.ru

Аннотация. Рассмотрено моделирование кинетических характеристик процесса отверждения полимерных композитов на основе применения искусственных нейронных сетей. Получена зависимость изменения кинетической функции полимерного композита от его степени отверждения, проверена работоспособность нейронной сети, проведено сравнение полученной с помощью нейронной сети модели с экспериментальными данными и моделями, полученными классическими методами аппроксимации.

Ключевые слова: кинетические характеристики, полимерные композиты, моделирование, нейронные сети.

SIMULATION OF THE CURE PROCESS KINETIC CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITES

O.S. Dmitriev, A.A. Barsukov

Tambov State Technical University,
Russia, Tambov, phys@nnn.tstu.ru

Abstract. The simulation of the cure process kinetic characteristics of polymer composites based on the use of artificial neural networks is considered. The dependence of the change in the kinetic function of the polymer composite on the degree of cure was obtained, the operability of the neural network was verified, and the model obtained using the neural network was compared with experimental data and models obtained by classical approximation methods.

Keywords: kinetic characteristics, polymer composites, simulation, neural networks.

Полимерные композиты (ПК) в настоящее время находят применение во всех областях промышленности, заменяя традиционные конструкционные материалы. Качество изделий из ПК и эффективность производства в целом определяется, в первую очередь, их оптимальным температурно-временным режимом отверждения. Для проведения оптимизации процесса отверждения изделий из ПК, необходимо как опытным, так и расчетным путем, определить множество параметров процесса отверждения, например теплофизические, кинетические, реологические и другие характеристики [1, 2].

Обобщенная математическая модель теплопереноса и кинетики процесса отверждения ПК, состоит из дифференциальных уравнений:

- теплопроводности

$$C_i \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_{ni} \frac{\partial \beta_i}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$T \equiv T(r, \tau), \quad 0 \leq R_{i-1} < r < R_i, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad i = 1, 2,$$

$$C_1 \equiv C_1(T), \quad \lambda_1 \equiv \lambda_1(T), \quad Q_{n1} = 0,$$

$$C_2 \equiv C_2(T, \beta), \quad \lambda_2 \equiv \lambda_2(T, \beta), \quad Q_{n2} \neq 0,$$

$$T(r, 0) \equiv f(r), \quad 0 \leq R_0 \leq r \leq R_2,$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \alpha [T_B(\tau) - T(R_0, \tau)], \quad -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha [T_B(\tau) - T(R_2, \tau)], \quad 0 < \tau \leq \tau_k,$$

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_i-0} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_i+0}, \quad T(r, \tau) \Big|_{r=R_i-0} = T(r, \tau) \Big|_{r=R_i+0}, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad i = 1, 2,$$

- кинетики отверждения

$$\frac{\partial \beta}{\partial \tau} = \begin{cases} \varphi(\beta) \exp \left[-\frac{E(\beta)}{R \cdot T} \right], & \beta < 1 \\ 0, & \beta = 1 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\beta \equiv \beta(r, \tau), \quad 0 \leq R_1 < r < R_2, \quad 0 < \tau \leq \tau_k,$$

$$\beta(r, 0) = \beta_0(r), \quad 0 \leq R_1 < r < R_2, \quad h = R_2 - R_1,$$

где C – объемная теплоемкость;

E – энергия активации отверждения;

f – начальное распределение температуры;

h – толщина изделия;

Q_n – тепловой эффект;

i – номер слоя;

R – универсальная газовая постоянная;

R_i, r – радиус;

T – температура, К;

α – коэффициент теплоотдачи;

β – степень отверждения;

φ – кинетическая функция;

λ – теплопроводность;

τ – время.

Слой: 1 – формообразующая оправка, 2 – цилиндрическое изделие из ПК.

Параметры математической модели (1)-(2) определяются с помощью информационно-измерительной системы [1, 2]. Разработаны соответствующие методы и алгоритмы для определения теплофизических и кинетических характеристик, а также техническое оснащение.

Для определения кинетических характеристик (2) процесса отверждения ПК, включающих энергию активации E и кинетическую функцию φ , известно множество различных методов и математических моделей [3, 4]. Однако не все из моделей кинетики с одинаковой точностью могут описывать изменение кинетической функции φ для каждого конкретного режима отверждения ПК, поэтому поиск и подбор адекватной модели отверждения требует высокой квалификации химика-технолога и много времени. Для упрощения моделирования предлагается использовать нейронные сети (НС), которые в настоящее время успешно применяются для прогнозирования и аппроксимации во многих областях технических и гуманитарных наук. Целью работы является проверка возможности и целесообразности применения нейронной сети для прогнозирования кинетической функции $\varphi(\beta)$ отверждения композита.

Для адекватного моделирования режима отверждения полимера, необходимо аппроксимировать кинетическую функцию $\varphi(\beta)$ в пределах изменения степени отверждения β от 0 до 1, и найти энергию активации. Энергия активации определяется экспериментально и имеет слабую зависимость от степени отверждения, таким образом, ее можно представить как константу E . Кинетическая функция аппроксимируется по одной из моделей (табл. 1).

Таблица 1. Модели аппроксимации кинетической функции

Модель 1	Модель 2	Модель 3
$\phi(\beta) = K(1 - \beta)^m$	$\phi(\beta) = K\beta^n(1 - \beta)^m$	$\phi(\beta) = K(1 - \beta)(1 + k_0\beta)$
$K = 1,093 \cdot 10^6$	$K = 1,15 \cdot 10^6$	$K = 1,15 \cdot 10^6$
$m = 1,25$	$m = 1,26$	$k_0 = -0,66$
	$n = 0,02$	

Здесь m , n – порядки химических реакций, K – константа скорости химической реакции.

Порядки реакции и константа химической реакции определяются на основе экспериментальных данных, являются эмпирически вычисленными константами для каждого отдельного вида ПК и зависят от характера химической реакции процесса отверждения [5]. Поэтому требуется высокая квалификация химика-технолога, способного оценить тип химической реакции и выбрать соответствующее математическое описание кинетической функции, которое адекватно моделировало бы процесс отверждения данного композита и не зависело бы от температурно-временного режима отверждения. Для того чтобы гарантировать выбор адекватной модели кинетической функции, предлагается использовать нейронную сеть. Для прогнозирования кинетической функции использован массив данных, содержащий расчетные зависимости изменения кинетической функции $\phi(\beta)$ от степени отверждения β .

Нейронная сеть создавалась в пакете MATLAB с использованием плагина NEURON FITTING TOOLS. Данный плагин дает возможность выбора из нескольких тренировочных алгоритмов, таких как метод Левенберга-Марквардта, метод Байесовой регуляризации или масштабированный метод сопряженных градиентов. Так же, плагин позволяет задавать количество нейронов в скрытом слое, изменять процент обучающей, тестовой и проверочной выборки. В качестве входных значений (INPUTS) использовался экспериментальный массив изменения степени отверждения, а в качестве выходных значений (OUTPUTS) – значения кинетической функции, рассчитанные по моделям 1–3.

Для построения нейронной сети использовался каждый из доступных методов обучения, количество нейронов в скрытом слое – 50 шт, обучающая выборка составляла 70%, тестовая и проверочная выборка – 15%. Структурная схема сети представлена на рисунке 1, и проведено исследование регрессии НС с использованием вышеприведенных алгоритмов, подтверждающие ее работоспособность и производительность.

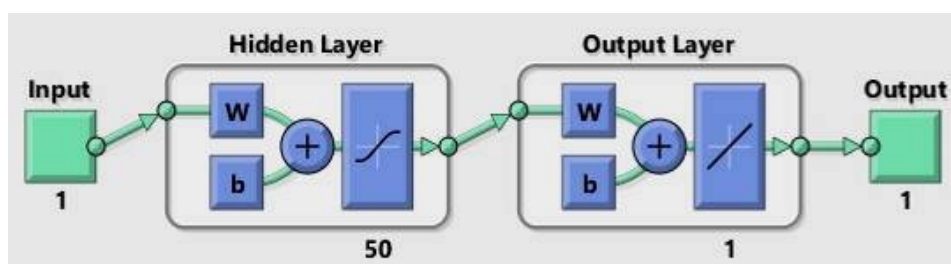


Рис. 1. Структурная схема нейронной сети

По результатам исследования регрессии НС, наибольшая производительность достигается при обучении сети по методу Байесовой регуляризации. Результаты прогнозирования кинетической функции в зависимости от степени отверждения представлены на рисунке 2.

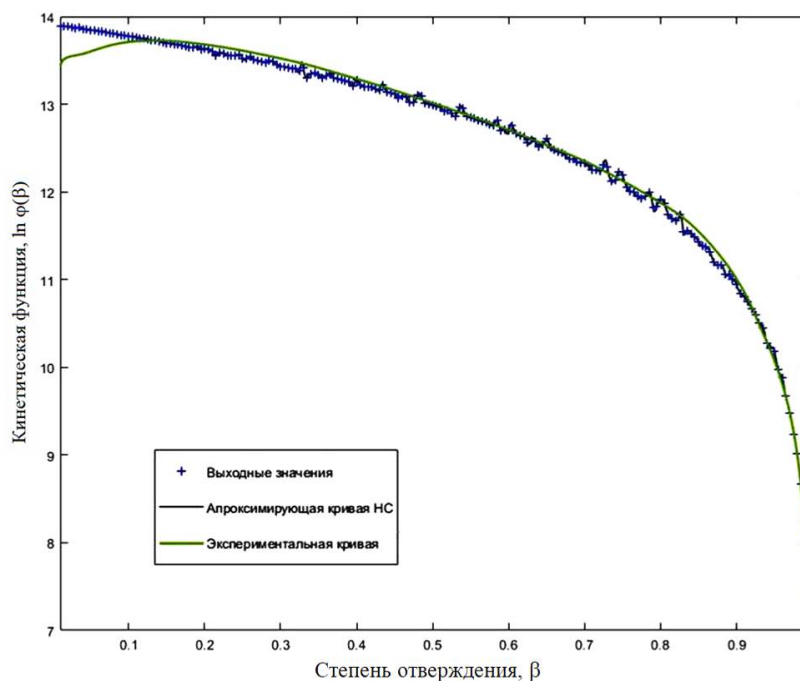


Рис. 2. Результаты моделирования кинетической функции

Для определения работоспособности нейронной сети и сравнения результатов, составим таблицу 2, в которую занесем 10 случайных значений степени отверждения полимерного композита, значения $\ln \varphi(\beta)$ вычисленные с использованием моделей 1–3, нейронной сети и экспериментальные значения $\ln \varphi(\beta)$.

Таблица 2. Сравнение методов моделирования кинетической функции

Степень отверждения, β	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Нейронная сеть	Экспериментальные данные
Логарифм кинетической функции, $\ln \varphi(\beta)$					
0,003	13,837	13,950	13,845	13,048	13,900
0,017	13,852	13,926	13,884	13,520	13,883
0,164	13,693	13,661	13,682	13,718	13,680
0,251	13,563	13,484	13,535	13,613	13,542
0,347	13,397	13,268	13,337	13,452	13,371
0,467	13,147	12,957	13,059	13,142	13,118
0,642	12,653	12,378	12,559	12,607	12,622
0,743	12,239	11,924	12,128	12,165	12,208
0,835	11,685	11,356	11,711	11,743	11,656
0,967	9,661	9,531	9,638	9,704	9,645

Из рисунка 2 и таблицы 2, видим что моделирование кинетики отверждения ПК с помощью НС достаточно точно прогнозирует экспериментальные данные.

В ходе данной работы, мы создали нейронную сеть моделирующую изменение кинетической функции полимерного композита в процессе его отверждения, что подтвердило возможность и целесообразность использования НС для моделирования кинетики процесса отверждения полимерных композитов. Однако для функционирования НС требуется определять эмпирические параметры моделей кинетики, поэтому, актуальна дальнейшая разработка системы обработки экспериментальных данных на основе НС, которая позволит определять

в автоматическом режиме все необходимые кинетические характеристики процесса отверждения только на основе экспериментальных данных, без выполнения промежуточных вычислений и выбора подходящих аппроксимирующих моделей.

Библиографический список

1. Мищенко, С. В. Автоматизированная система исследования процесса отверждения композиционных полимерных материалов / С. В. Мищенко, О. С. Дмитриев, Н. П. Пучков, А. В. Шаповалов // Промышленная теплотехника. – 1989. – Т. 11, № 5. – С. 79-84.
2. Dmitriev, O. S. Optimization of Curing Cycles Products of the Polymer Composite Materials on Base of Glutinous Prepregs / O. S. Dmitriev, S. V. Mischenko, S. O. Dmitriev, V. N. Kirillov // Polymer Science. Series D. – 2009. – V. 2, No. 4. – pp. 223–229.
3. Дмитриев, О. С. Метод исследования параметров течения связующего при отверждении композитов / О. С. Дмитриев, С. В. Мищенко, А. О. Дмитриев // Вестник ТГТУ. – 2005. – Т. 11, № 1. – С. 53-61.
4. Vafayan, M. Advanced integral isoconversional analysis for evaluating and predicting the kinetic parameters of the curing reaction of epoxy prepreg / M. Vafayan, M. H. Beheshty, M. H. R. Ghoreishy, H. Abedini // Thermochimica Acta. – 2013. – 557, – P. 37–43.
5. Дмитриев, О. С. Планирование эксперимента при исследовании кинетики отверждения полимерных композитов / О. С. Дмитриев, А. А. Барсуков, А. О. Дмитриев // Энергосбережение и эффективность в технических системах: Материалы VI Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов. – 2019. – С. 309-311.

УДК 532.5.013.4

О ТЕЧЕНИИ НЕСЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Ш.Р. Сеттiev

Ташкентский филиал «РЭУ им. Г.В. Плеханова»
Республика Узбекистан, Ташкент, shamsis@rambler.ru

Аннотация. В работе рассматриваются математическая модель течения вязкой несжимаемой жидкости по наклонной плоскости под действием силы тяжести. Показано каким образом получается система уравнений гидравлики и методы его решения.

Ключевые слова: уравнение Навье-Стокса, уравнение гидравлики, угол наклона, свободная поверхность жидкости, глубина потока, гидравлическое сопротивление.

ABOUT THE FLOW OF INCOMPRESSIBLE VISCOUS FLUID ON INCLINED PLANE

Sh.R. Settiev

Plekhanov Russian University of Economics in Tashkent
Republic of Uzbekistan, Tashkent, shamsis@rambler.ru

Abstract. The paper considers a mathematical model of flow of viscous incompressible fluid on inclined plane under action of gravity. It is shown how a system of equations of hydraulics and methods for its solution are obtained.

Keywords: Navier-Stokes equation, hydraulics equation, angle of inclination, free surface of liquid, depth of flow, hydraulic resistance.

Рассмотрим течения несжимаемой вязкой жидкости по наклонной плоскости под действием силы тяжести. Выберем декартовую систему координат X, Y, Z с осью X , направленной по течению. Ось Z ориентирована по направлению нормали к донной поверхности. Обозначим поверхность дна через $h_b(x, y, t)$. Угол наклона плоскости (X, Y) к горизонту обозначим через θ . Свободную поверхность зададим в виде $z = h(x, y, t)$.

Движение вязкой несжимаемой жидкости по наклонной плоскости под действием силы тяжести опишем уравнением Навье-Стокса

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g \sin \theta, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \cos \theta, \end{cases} \quad (1)$$

где u, v, w - компоненты вектора скорости;

p - давление;

ρ - плотность жидкости;

g - ускорение свободного падения;

ν - кинематическая вязкость жидкости;

θ - угол наклона плоскости (X, Y) к горизонту.

Традиционный вид уравнений Навье-Стокса дано во многих монографиях в том числе [36-39, 41, 53, 71-76].

Будем изучать длинные волны. Здесь волны носят название «длинных» волн, в противоположность «коротким» волнам, длина которых λ^* меньше глубины потока h . Надо отметить, что «длинные» волны могут быть короче «коротких», поскольку эти два термина характеризуют не абсолютную длину волны, а отношение их длины к глубине (или наоборот). В работе [Шуляк] показано, что для таких волн с очень большой точностью оказывается справедливым выражение для фазовой скорости $c = \sqrt{gh}$, где g - ускорение силы тяжести, h - глубина потока.

Как видно, фазовая скорость не зависит от длины волны. Основные свойства длинных волн:

а) длина волн много больше глубины потока;

б) амплитуда колебаний много меньше глубины потока;

в) вертикальные ускорения частиц жидкости пренебрежимо малы по сравнению с горизонтальными, так что можно считать, что $\frac{dw}{dt} = 0$.

Но не стоит пренебречь величиной вертикальной компоненты скорости w , т.е. по направлению оси Z . Как бы мала не была вертикальная составляющая скорости w , пренебречь ею в процессе решения задачи невозможно, так как волновое движение обусловлено исключительно вертикальным поднятием поверхности жидкости и, следовательно, вертикальными составляющими скоростей. Условие $\frac{dw}{dt} \approx 0$ приводит к гидростатическому распределению давления. Рассмотрим длинные волны, т.е.

$$\frac{\partial}{\partial z} \gg \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}.$$

В этом случае имеем

$$\begin{aligned} x \sim L, \quad y \sim L, \quad z \sim \varepsilon L, \quad \varepsilon \ll 1, \\ u \sim U, \quad v \sim U, \quad w \sim \varepsilon U, \quad p = \rho U^2. \end{aligned}$$

Учитывая это, перепишем систему (1) в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + g \sin \theta, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \cos \theta = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Обозначим через h_s свободную поверхность жидкости, h_b донную поверхность, тогда глубина потока есть $h = h_s - h_b$. Из последнего уравнения найдем давление и используем граничные условия для давления:

$$p = A - \rho g \cos \theta \cdot z, \quad p_a = A - \rho g \cos \theta \cdot h_s$$

$$p = p_a + \rho g \cos \theta \cdot (h_s - z).$$

Подставляя последнее выражение в систему уравнений (2), получим

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \cos \theta \frac{\partial h_s}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + g \sin \theta \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \cos \theta \frac{\partial h_s}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}. \end{cases} \quad (3)$$

Если учесть, что $h = h_s - h_b$, то полученная система уравнений примет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \cos \theta \frac{\partial (h_b + h)}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + g \sin \theta \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \cos \theta \frac{\partial (h_b + h)}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Вместо вязкого сопротивления $\nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$, $\nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$ введем гидравлическое сопротивление $-\lambda \frac{|\vec{v}| \vec{v}}{2(h_s - h_b)}$. При этом уравнение Навье – Стокса называется уравнением гидравлики:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \cos \theta \frac{\partial (h_b + h)}{\partial x} - \lambda \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{2h} + g \sin \theta, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \cos \theta \frac{\partial (h_b + h)}{\partial y} - \lambda \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{2h}. \end{cases} \quad (5)$$

Вместе с уравнением Навье-Стокса обычно рассматривают уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

Интегрируем уравнение неразрывности по глубине потока

$$\int_{h_b}^{h_s} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = 0. \quad (7)$$

Учитывая следующие граничные условия на верхней и нижней поверхности жидкости

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_s}{\partial t} + u \frac{\partial h_s}{\partial x} + v \frac{\partial h_s}{\partial y} &= w \quad \text{где } z = h_s(x, y, t) \\ \frac{\partial h_b}{\partial t} + u \frac{\partial h_b}{\partial x} + v \frac{\partial h_b}{\partial y} &= w \quad \text{где } z = h_b(x, y, t) \end{aligned} \quad (8)$$

получим

$$\frac{\partial(h_s - h_b)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_b}^{h_s} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_b}^{h_s} v dz = 0. \quad (9)$$

Применяя теорему о среднем и учитывая равенство $h_s - h_b = h$, получим

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0. \quad (10)$$

Таким образом, получили систему уравнений (5), (10), описывающую движение несжимаемой вязкой жидкости по наклонной плоскости под действием силы тяжести. Эта система называется системой уравнений гидравлики:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \cos \theta \frac{\partial(h_b + h)}{\partial x} - \lambda \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{2h} + g \sin \theta, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cos \theta \frac{\partial(h_b + h)}{\partial y} - \lambda \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{2h}, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Имеем три уравнения с четырьмя неизвестными u, v, h, h_b . Введем безразмерные переменные

$$\begin{aligned} x &= H_c \tilde{x}, \quad y = H_c \tilde{y}, \quad z = H_c \tilde{z}, \quad T = \frac{H_c}{U_c} \tilde{t}, \\ u(x, y, t) &= U_c \tilde{u}(x, y, t), \quad v(x, y, t) = U_c \tilde{v}(x, y, t), \\ h_b(x, y, t) &= H_c \tilde{h}_b(x, y, t), \quad h_s(x, y, t) = H_c \tilde{h}_s(x, y, t) \end{aligned} \quad (12)$$

где H_c - характеристическая длина,

U_c - характеристическая скорость течения,

H_b - уровень донной поверхности,

H_s - уровень свободной поверхности,

T - безразмерное время.

Предполагается, что компоненты скорости u и v – суть средние по глубине слоя значения их истинных величин. Для введенных величин система уравнений Навье-Стокса (иногда называют уравнением гидравлики) имеет вид (волны над переменными опускаем)

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\cos \theta}{Fr^2} \frac{\partial(h_b + h)}{\partial x} - \lambda \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{2h} + \frac{\sin \theta}{Fr_2}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\cos \theta}{Fr^2} \frac{\partial(h_b + h)}{\partial y} - \lambda \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{2h}, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0, \end{cases} \quad (13)$$

где $Fr = \frac{U_c}{\sqrt{gH_c}}$ - число Фруда, λ - коэффициент сопротивления. Чтобы замкнуть систему уравнений (13), необходимо добавить уравнение для определения h_b .

Рассмотрим частный случай, когда течение с недеформируемым (твердое дно) дном $h_b = \text{const}$ и $u(x, t)$, $h(x, t)$. Тогда система уравнений (13) имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\cos \theta}{Fr^2} \frac{\partial h}{\partial x} - \lambda \frac{u^2}{2h} + \frac{\sin \theta}{Fr^2}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0. \quad (15)$$

Стационарные решения: $h_0 = 1$, $u_0 = 1$. Эти решения удовлетворяют системе при выполнении равенства

$$\frac{\sin \theta}{Fr^2} = \frac{\lambda}{2}.$$

Проведем анализ линейной неустойчивости. Зададим малые возмущения u_1, h_1

$$u = 1 + u_1, \quad h = 1 + h_1. \quad (16)$$

Подставляя (16) в (14), (15), получим

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\cos \theta}{Fr^2} \frac{\partial h_1}{\partial x} + \lambda(u_1 - \frac{h_1}{2}) = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0. \quad (18)$$

Ищем решение в виде:

$$h_1 = h_2 \exp[i\alpha(x - ct)],$$

$$u_1 = u_2 \exp[i\alpha(x - ct)],$$

где c - комплексная частота. После подстановки в (17), (18) имеем:

$$\begin{aligned} u_2 &= (c - 1)h_2, \\ \left(\frac{\cos \theta}{Fr^2} + \frac{\lambda i}{2\alpha}\right)h_2 + \left(1 - c - \frac{\lambda i}{\alpha}\right)(c - 1)h_2 &= 0. \end{aligned}$$

Подставляя сюда

$$\lambda = \frac{2 \sin \theta}{Fr^2}$$

и решая последнее уравнение относительно c , получим

$$c = 1 + \left\{ -\frac{i \sin \theta}{\alpha Fr^2} \pm \sqrt{\left(\frac{i \sin \theta}{\alpha Fr^2} + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{\cos \theta}{Fr^2} - \frac{1}{4}} \right\}.$$

Рассмотрим случай, когда $\theta \ll 1$, $Fr \geq 1$, $\alpha \geq 1$. В этом случае $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2}$.

Подкоренное выражение может быть переписано в виде

$$\begin{aligned} \left(\frac{i \sin \theta}{\alpha Fr^2} + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{\cos \theta}{Fr^2} - \frac{1}{4} &= \frac{1}{4} + \frac{i\theta}{\alpha Fr^2} - \frac{\theta^2}{\alpha^2 Fr^4} + \frac{1 - \frac{\theta^2}{2}}{Fr^2} - \frac{1}{4} = \\ &= \frac{1}{Fr^2} \left(1 + \frac{i\theta}{\alpha} - \left(\frac{1}{2} + \frac{i}{\alpha^2 Fr^2} \right) \theta^2 \right). \end{aligned}$$

С учетом этого имеем

$$\begin{aligned} \sqrt{\left(\frac{i \sin \theta}{\alpha Fr^2} + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{\cos \theta}{Fr^2} - \frac{1}{4}} &= \frac{1}{Fr} \sqrt{\left(1 + \frac{i\alpha}{\theta} - \left(\frac{1}{2} + \frac{i}{\alpha^2 Fr^2} \right) \theta^2 \right)} = \\ &= \frac{1}{Fr} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{i\theta}{\alpha} - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\alpha^2 Fr^2} \right) \theta^2 \right) - \frac{1}{8} \left(\frac{i\theta}{\alpha} - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\alpha^2 Fr^2} \right) \theta^2 \right)^2 \right] = \\ &= \frac{1}{Fr} \left[1 + \frac{i\theta}{2\alpha} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\alpha^2 Fr^2} \right) \theta^2 - \frac{1}{8} \left(-\frac{\theta^2}{\alpha^2} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{Fr} \left[1 + \frac{i\theta}{2\alpha} + \frac{1}{2\alpha^2} \left(\frac{1}{4} - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{1}{Fr^2} \right) \theta^2 \right]. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$c = 1 \pm \frac{1}{Fr} \left(1 + \frac{\theta^2}{2\alpha^2} \left(\frac{1}{4} - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{1}{Fr^2} \right) \right) + \frac{i\theta}{\alpha Fr} \left(-\frac{1}{Fr} \pm \frac{1}{2} \right).$$

Из $\theta \ll 1$ следует, что

$$c = 1 \pm \frac{1}{Fr} + \frac{i\theta}{\alpha Fr} \left(-\frac{1}{Fr} \pm \frac{1}{2} \right). \quad (19)$$

Неустойчивость рассматриваемого течения определяет мнимая часть величины c , т.е. c_i . Из (19) нетрудно заметить, что знак c_i зависит от знака суммы, которая стоит в скобках. Неустойчивость получается, когда

$$-\frac{1}{Fr} + \frac{1}{2} > 0 \quad \text{т.е. } Fr > 2.$$

Приведем некоторые результаты численных расчетов в форме таблицы.

Таблица. Значения собственных чисел $c = c_r + ic_i$ в одномерном случае, когда $\theta = 0.001$, $\alpha = 1$

число Фруда	Значение $c = c_r + ic_i$
Fr= 0.2	c= 6.0000 -0.022500i
	c= -4.0000 -0.027500i
Fr= 0.4	c= 3.5000-0.00500i
	c= -1.5000 -0.00750i
Fr= 0.6	c= 2.66670-0.00194i
	c= -0.66667-0.00361i
Fr= 0.8	c= 2.2500-0.00093i
	c= -0.25000-0.00218i
Fr= 1.0	c= 2.00000-0.00050i
	c= 0.00000-0.00150i
Fr= 1.2	c= 1.83330-0.00027i
	c= 0.16667-0.00111i
Fr= 1.4	c= 1.71430-0.00015i
	c= 0.28571-0.00086i
Fr= 1.6	c= 0.37500-0.00070i
	c= 1.62500-0.00007i
Fr= 1.8	c= 1.55560-0.00003i
	c= 0.44444-0.00058i
Fr= 2.0	c= 1.50000+0.00000i
	c= 0.50000-0.00050i
Fr= 2.2	c= 1.45450+0.00002i
	c= 0.54545-0.00043i
Fr= 2.4	c= 1.41670+0.00003i
	c= 0.58333-0.00038i
Fr= 2.6	c= 1.38460+0.00004i
	c= 0.61538-0.00034i
Fr= 2.8	c= 1.35710+0.00005i
	c= 0.64286-0.00030i
Fr= 3.0	c= 1.33330+0.00005i
	c= 0.66667-0.00027i
Fr= 3.2	c= 1.31250+0.00006i
	c= 0.68750-0.00025i
Fr= 3.4	c= 1.29410+0.00006i
	c= 0.70588-0.00023i
Fr= 3.6	c= 1.27780+0.00006i
	c= 0.72222-0.00021i
Fr= 3.8	c= 1.26320+0.00006i
	c= 0.73684-0.00020i
Fr=4.0	c= 1.25000+0.00006i
	c= 0.75000-0.00018i

Полученные аналитические выражения (19) согласуются с результатами работы [1,3], где утверждается, что неустойчивость течения начинается при $Fr \geq 2$.

Библиографический список

1. Englund F. , Fredsoe J. Sediment ripples and dunes //Annual Review of Fluid Mechanics. 1982.V.14.P13-19.
2. Ладыженская О.А. Математические вопросы динамики вязкой несжимаемой жидкости. -М.: Наука, 1970. -288с.
3. Ляпидевский В.Ю., Тешуков В.М. Математические модели распространения длинных волн в неоднородной жидкости. –Новосибирск.: Изд-во СО РАН, 2000. -419 с.

УДК 330.4; ГРНТИ 27.43.87

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ВОЛН НА ПРИМЕРЕ НАСЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Е.Ю. Лискина

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, e.liskina@365.rsu.edu.ru*

Аннотация. В статье предложены две математические модели динамики общего коэффициента рождаемости, содержащие тренд и циклическую составляющую. Определён период колебаний общего коэффициента рождаемости, построены линейный и экспоненциальный тренды. Сделан прогноз величины общего коэффициента рождаемости на период с 2019 по 2023 гг.

Ключевые слова: эконометрическое моделирование, временной ряд, метод декомпозиции, прогнозирование, численность населения, демография.

MATHEMATICAL MODEL OF DEMOGRAPHIC WAVES ON THE EXAMPLE OF THE RUSSIAN FEDERATION'S POPULATION

E.Ju. Liskina

*S.A. Esenin Ryazan State University,
Russia, Ryazan, e.liskina@365.rsu.edu.ru*

The summary. The article proposes two mathematical models of the dynamics of the general birth rate coefficient containing a trend and a cyclic component. The period of fluctuations in the overall fertility rate is determined, and linear and exponential trends are constructed. The forecast of the total birth rate for the period from 2019 to 2023 is made.

Keywords: econometric modeling, time-series data, decomposition method, forecasting, population, demographics.

Введение

Проблема прогнозирования рождаемости в Российской Федерации весьма актуальна, так как адекватные прогнозы с учётом соответствующего временного лага (3, 7 и 18 лет) позволяют планировать количество бюджетных мест в муниципальных дошкольных учреждениях, школах и государственных вузах. При этом следует отметить следующее:

1) имеются структурные сдвиги численности населения РФ, связанные с коррекцией вследствие учёта результатов переписей населения и присоединения Республики Крым [1, 2] (рис. 1);

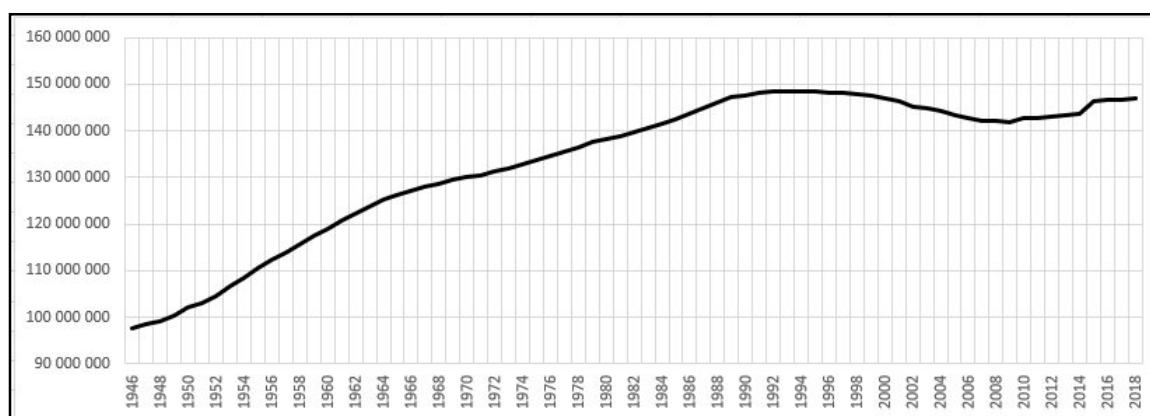


Рис. 1. Численность населения Российской Федерации в 1946–2018 гг.

2) прямой показатель – число родившихся в данном году – также испытывает структурные сдвиги, связанные с изменением правил учёта родившихся в стране (учитываются или нет дети мигрантов) и присоединением Республики Крым [1, 2] (рис. 2).

Для исключения влияния структурных сдвигов принято рассматривать относительные показатели – общий коэффициент рождаемости (ОКР) и суммарный коэффициент рождаемости (СКР). Общий коэффициент рождаемости равен отношению числа родившихся в данном году к среднегодовой численности населения в данном году на 1000 человек. По сравнению с СКР общий коэффициент рождаемости является менее точным для описания глобальных демографических процессов воспроизводства населения, но для краткосрочного прогнозирования он более удобен. Поэтому целевой переменной X_t данной работы будет общий коэффициент рождаемости.

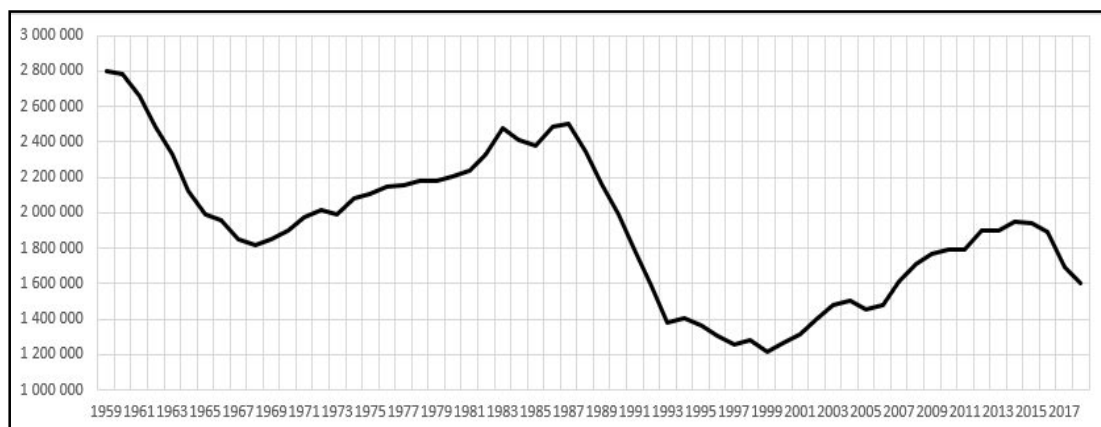


Рис. 2. Число родившихся в Российской Федерации в 1959–2018 гг.

Постановка задачи

Цель настоящей работы – построение математической модели общего коэффициента рождаемости. Для построения математической модели использовались данные из [1, 3, 4], в соответствии с которыми для значений ОКР имеется более длинный динамический ряд ($n = 69$ наблюдений), чем для СКР (рис.3). Для выделения системных компонент временного ряда ОКР использовался классический метод декомпозиции. Расчёты проводились в табличном процессоре MS Excel на уровне значимости 0,05.

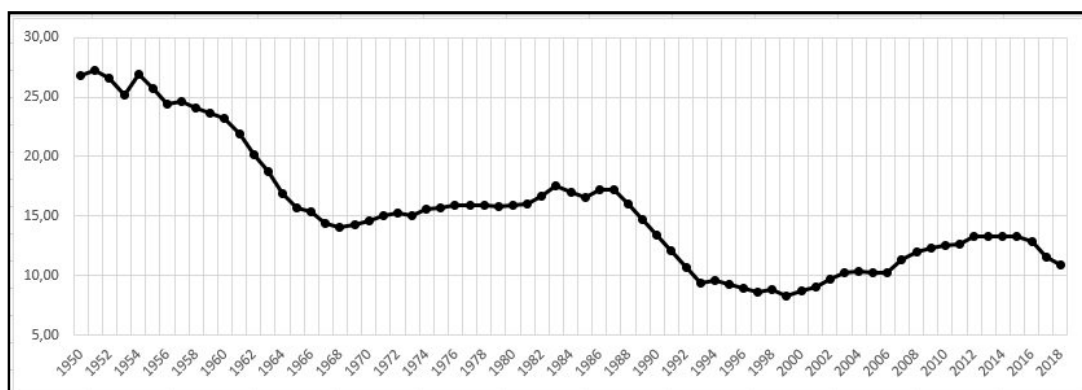


Рис. 3. Общий коэффициент рождаемости в Российской Федерации в 1950–2018 гг.

Результаты исследования

С целью выявления системных компонент временного ряда ОКР была построена выборочная автокорреляционная функция (АКФ) до уровня $r(37)$ включительно (рис. 4). Было выявлено, что АКФ имеет два максимальных значения $r(1) = 0,9899$, что говорит о наличии

тренда, близкого к линейному, и $r(28) = 0,9056$, что говорит о наличии циклических колебаний с периодом 28 лет. Все $r(t)$, $t = 1; 37$ являются статистически значимыми на выбранном уровне значимости.

Далее методами скользящего сглаживания и построения циклично-аддитивной модели была выделена периодическая составляющая временного ряда и построен сглаженный ряд (рис. 5). По данным сглаженного ряда с помощью надстройки «Анализ данных. Регрессия» были определены оценки коэффициентов линейного и экспоненциального трендов и их статистические характеристики (таблица 1).

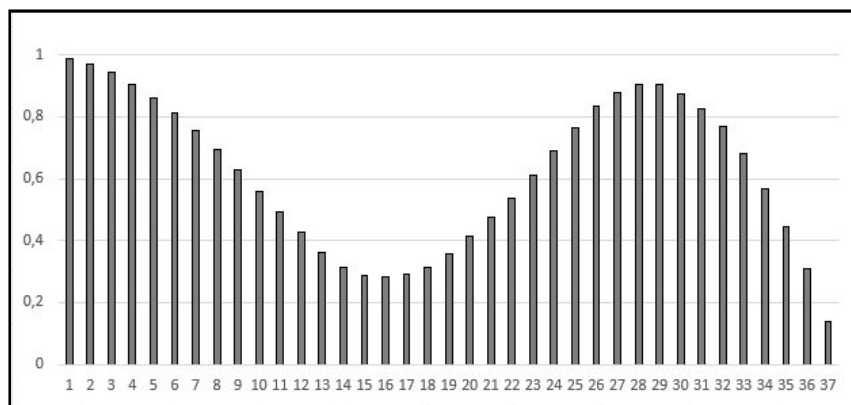


Рис. 4. АКФ временного ряда

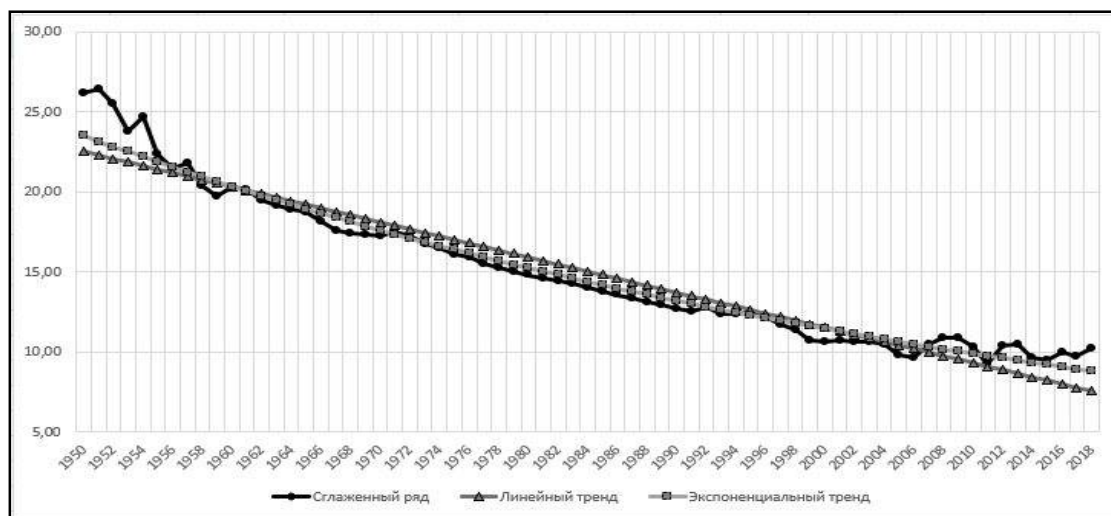


Рис. 5. Сглаженный временной ряд ОКР и тренды

Таблица 1. Статистические характеристики трендов сглаженного ряда

Показатель	Линейный тренд	Экспоненциальный тренд
Уравнение	$X_t = 452,0394 - 0,2202t$	$X_t = e^{31,2321 - 0,144t}$
Значимость уравнения	$1,7 \cdot 10^{-38}$	$6,4 \cdot 10^{-52}$
Значимость коэффициентов	$P_{a_0} = 2,1 \cdot 10^{-39}$, $P_{a_1} = 1,7 \cdot 10^{-38}$	$P_{a_0} = 1,9 \cdot 10^{-54}$, $P_{a_1} = 6,4 \cdot 10^{-52}$
R^2	0,9201	0,9652 (несмещённый)
S_0 (остаточная сумма квадратов)	115,2404	50,2456 (несмещённая)
S (стандартная ошибка)	1,3115	0,8660

Проверка гипотезы об использовании линейного тренда вместо нелинейного показала,

что $t_n = \frac{R^2 - r_{xy}^2}{s_{R-r_{xy}}} = 0,8837$ (где $s_{R-r_{xy}} = 2\sqrt{\frac{(R^2 - r_{xy}^2) - (R^2 - r_{xy}^2)^2 (2 - (R^2 + r_{xy}^2))}{n}} = 0,0510$) при

$t_{кр} = 1,9955$, то есть статистическое различие между трендами статистически не значимо, следовательно, в модели можно использовать линейный тренд.

Затем были построены динамические модели временного ряда ОКР, учитывающие циклический компонент и оба найденных тренда (рис. 6). Их статистические характеристики приведены в таблице 2, из которой следует, что лучшей по статистическим характеристикам является циклическая модель с экспоненциальным трендом.

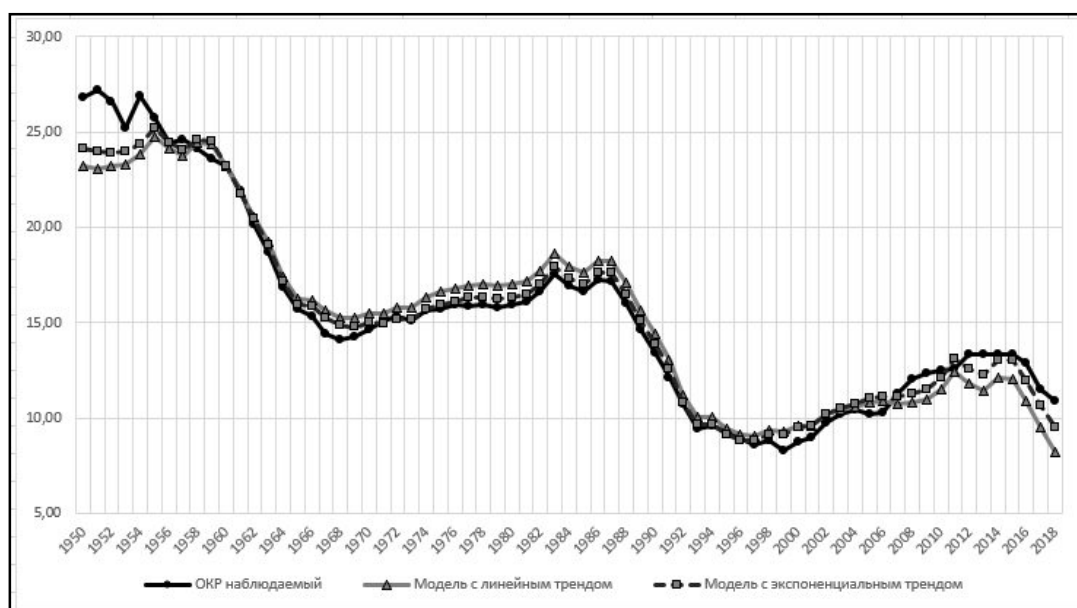


Рис. 6. Наблюдаемые значения и модели временного ряда ОКР

Таблица 2. Статистические характеристики моделей временного ряда

Показатель	Модель с линейным трендом	Модель с экспоненциальным трендом
R^2	0,9382	0,9730
S (стандартная ошибка)	1,3115	0,8660
A (средняя ошибка аппроксимации), %	6,66	3,82
DW (статистика Дарбина – Уотсона)	0,1694 (отрицательная автокорреляция остатков)	0,3664 (отрицательная автокорреляция остатков)

Далее были построены прогнозы величины ОКР на 2019–2025 гг. с использованием обеих моделей и соответствующие доверительные интервалы (рис. 7–8). Предсказанные и прогнозные значения и значения доверительных интервалов на 2015–2025 гг. представлены в таблице 3, из которой следует, что циклическая модель с экспоненциальным трендом предсказывает более быстрое снижение величины ОКР, чем циклическая модель с линейным трендом.

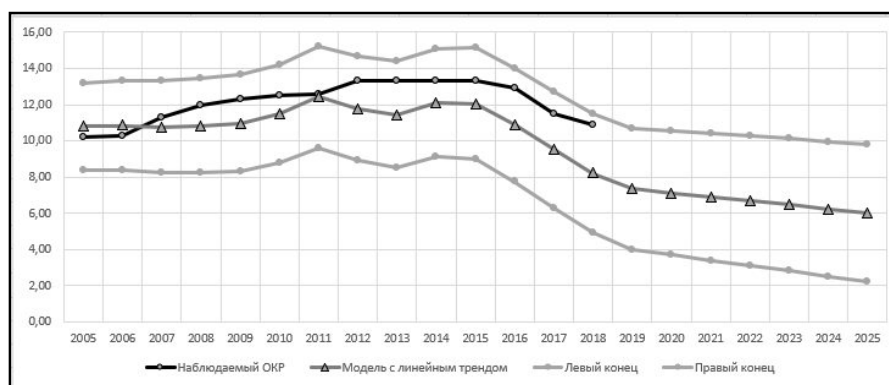


Рис. 7. Прогноз величины ОКР с помощью модели с линейным трендом

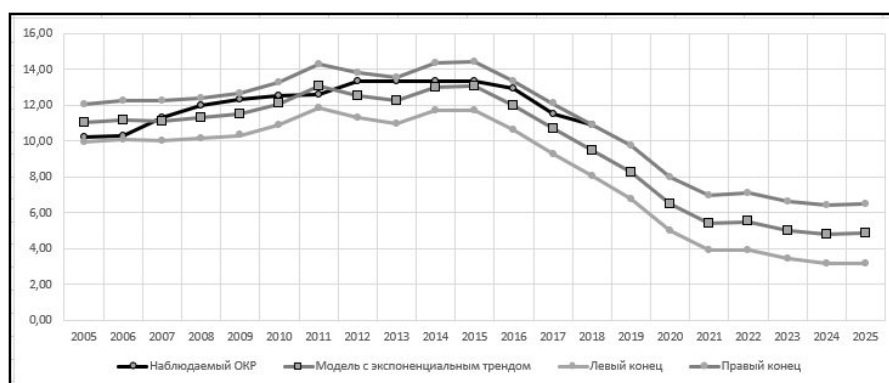


Рис. 8. Прогноз ОКР с помощью модели с экспоненциальным трендом

Таблица 3. Предсказанные и прогнозные значения величины ОКР и границы доверительных интервалов прогнозных значений

Год	Модель с линейным трендом			Модель с экспоненциальным трендом		
	Прогноз	Левый	Правый	Прогноз	Левый	Правый
2015	12,05	8,98	15,13	13,05	11,71	14,39
2016	10,88	7,74	14,03	11,97	10,60	13,34
2017	9,50	6,28	12,71	10,68	9,28	12,08
2018	8,21	4,92	11,50	9,48	8,05	10,91
2019	7,34	3,98	10,70	8,26	6,79	9,72
2020	7,12	3,69	10,55	6,51	5,02	8,01
2021	6,90	3,40	10,40	5,44	3,92	6,97
2022	6,68	3,10	10,261	5,51	3,95	7,07
2023	6,46	2,81	10,11	5,03	3,44	6,62
2024	6,24	2,51	9,96	4,78	3,16	6,41
2025	6,02	2,22	9,82	4,85	3,19	6,51

Выводы

С точки зрения практического применения полученных результатов следует отметить, что в 2020 году в вузы будут поступать дети, рождённые в 2002 году. Так как с 2001 года отмечается рост величины ОКР, то следует ожидать роста числа абитуриентов. В соответствии с построенными моделями положительная динамика числа абитуриентов ожидается с 2020 по 2033 год, а далее в силу того, что с 2016 года наблюдается спад величины ОКР, то с 2034 года ожидается спад количества абитуриентов.

Библиографический список

1. Регионы России. Социально-экономические показатели: статистический сборник. 2011–2019 гг. [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://www.gks.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения 01.02.2020 г.).
2. Таблица рождаемости по годам (Россия) [Электронный ресурс] // World Table. – URL: <https://worldtable.info/gosudarstvo/tablica-rozhdaemosti-po-godam-rossija.html> (дата обращения 01.02.2020 г.).
3. 15 новых независимых государств. Общий коэффициент рождаемости (на 1000 населения), 1950–2017 [Электронный ресурс] // Демоскоп Weekly. – № 845–846. – 3–16 февраля 2020. – URL: http://www.demoscope.ru/weekly/ssp/sng_cbr.php (дата обращения 13.02.2020 г.).
4. Россия. Коэффициент суммарной рождаемости, 1960–2018 [Электронный ресурс] // Демоскоп Weekly. – № 845–846. – 3–16 февраля 2020. – URL: http://www.demoscope.ru/weekly/ssp/sng_cbr.php (дата обращения 13.02.2020 г.).

УДК 517.925; ГРНТИ 27.29.17

МАЛОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С НУЛЕВОЙ МАТРИЦЕЙ ЛИНЕЙНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ

В.В. Абрамов

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, v.abramov@365.rsu.edu.ru*

Аннотация. В работе исследована нормальная система обыкновенных дифференциальных уравнений с малым параметром. Рассмотрен критический случай, в котором при нулевом значении параметра правая часть системы имеет нулевое линейное приближение относительно фазовой переменной. Для проведения рассуждений использованы свойства первого нелинейного приближения оператора монодромии. Получены условия ветвления устойчивого малого периодического решения от нулевого решения системы.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, периодическое решение, колебания, бифуркация, малый параметр, устойчивость, оператор монодромии.

SMALL PERIODIC SOLUTION SYSTEMS OF THE DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH THE ZERO MATRIX OF LINEAR APPROXIMATION

V.V. Abramov

*Ryazan State University named after S.A. Esenin,
Russia, Ryazan, v.abramov@365.rsu.edu.ru*

The summary. A normal system of ordinary differential equations with a small parameter is investigated. A critical case is considered in which the right side of the system has a zero linear approximation relative to the phase variable at zero parameter value. The properties of the first non-linear approximation of the monodromy operator are used for the reasoning. The conditions for branching a stable small periodic solution from the zero solution of the system are obtained.

Keywords: differential equations, periodic solution, oscillations, bifurcation, small parameter, stability, monodromy operator.

Рассмотрим нормальную систему обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\dot{x} = f(t, x, \mu), \quad (1)$$

в которой $x \in R^n$, $\mu \in R^m$ – малый параметр; правая часть $f(t, x, \mu)$ локально гладко зависит от x и от μ и является ω -периодической по t при всех x и μ ; $f(t, 0_n, \mu) \equiv 0_n$; $f'_x(t, 0_n, 0_m) \equiv 0_{nn}$. (Здесь и далее 0_n – нулевой вектор в R^n , 0_{nn} – нулевая $n \times n$ -матрица.)

Заметим, что к виду (1) приводится система $\dot{y} = A(t)y + \varphi(t, y, \mu)$ с ω -периодической по t правой частью, если при нулевом значении параметра все решения соответствующей линейной однородной системы $\dot{y} = A(t)y$ являются периодическими. Для приведения используется замена переменной $y = Y(t)x$, $Y(t)$ – фундаментальная матрица системы $\dot{y} = A(t)y$.

Всюду далее будем предполагать, что правая часть системы (1) имеет вид

$$f(t, x, \mu) = F_s(t, x)\mu + f_k(t, x) + g(t, x, \mu), \quad (2)$$

элементами $F_s(t, x)$ – $n \times m$ -матрицы и вектор-функции $f_k(t, x)$ являются формы от x порядков s и k соответственно, $F_s(t, \alpha x) = \alpha^s F_s(t, x)$, $f_k(t, \alpha x) = \alpha^k f_k(t, x)$, $1 \leq s < k$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} g(t, \alpha x, \alpha^{k-s} \mu) \equiv 0_n$.

Задача. Установить признак существования малого устойчивого периодического решения системы (1)–(2) по свойствам средних интегральных характеристик функций $F_s(t, x)$ и $f_k(t, x)$.

Будем использовать определения и схемы исследования из работ [1–4].

Определение 1. Решение $x(t, a^*, \mu^*)$ с начальным значением $x(0, a^*, \mu^*) = a^*$ системы вида (1) будем называть малым, если имеет место параметризация $a^* = a(\alpha) \neq 0_n$, $\mu^* = \mu(\alpha)$, $0 < \alpha < \Delta$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} a^* = 0_n$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \mu^* = 0_m$.

Определение 2. Малое ω -периодическое решение $x(t, a^*, \mu^*)$ системы вида (1) будем называть α -устойчивым вправо (влево), если для любого $\varepsilon > 0$ существуют $\delta_1, \delta_2 > 0$, для которых при всех $\alpha: 0 < \alpha < \delta_1$, $u: \|u\| < \delta_2$ и $r \in Z_+$ ($r \in Z_-$) определено значение $x(r\omega, a^* + u, \mu^*)$ и справедлива оценка $\|x(r\omega, a^* + u, \mu^*) - a^*\| < \varepsilon$.

Свойство устойчивости по определению 2 является разновидностью устойчивости по параметру [5]. Это свойство может иметь место для неустойчивого по Ляпунову решения.

Для ω -периодической системы, удовлетворяющей условиям существования и единственности частных решений, решение $x(t, a, \mu)$, $x(0, a, \mu) = a$ является ω -периодическим тогда и только тогда, когда его начальное значение a является неподвижной точкой оператора монодромии $Ua: a \rightarrow x(\omega, a, \mu)$ [7, С. 12], то есть удовлетворяет определяющему уравнению $x(\omega, a, \mu) = a$. Устойчивость периодического решения по определению 2 обусловлена свойствами степеней оператора монодромии $U^r a: a \rightarrow x(r\omega, a, \mu)$. Поэтому для решения поставленной задачи установим локальную структуру оператора монодромии системы (1)–(2).

Рассмотрим линейную неоднородную систему с нулевым однородным приближением

$$\dot{y} = f(t, x(t, a, \mu), \mu), \quad (3)$$

в которой $x(t, a, \mu)$ – произвольно выбранное решение системы (1)–(2).

Решение системы (3) имеет вид $y(t, b, \mu) = b + \tilde{y}(t, a, \mu)$,

$\tilde{y}(t, a, \mu) = \int_0^t f(\tau, x(\tau, a, \mu), \mu) d\tau$. В силу единственности решения задачи Коши $y(t, b, \mu) \equiv x(t, a, \mu)$, если $b = a$. Следовательно, для системы (1)

$$x(t, a, \mu) = a + \int_0^t f(\tau, a + \tilde{y}(\tau, a, \mu), \mu) d\tau. \quad (4)$$

По формуле Лагранжа получим разложение $f(t, a + \tilde{y}(t, a, \mu), \mu) = f(t, a, \mu) + h(t, a, \mu)$, в котором $h(t, a, \mu) = f'_x(t, a + q \cdot \tilde{y}(t, a, \mu), \mu) \tilde{y}(t, a, \mu)$, $q \in (0, 1)$ – некоторая величина. По условию (2) справедливо равенство $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-(k-1)} f'_x(t, \alpha x, \alpha^{k-s} \mu) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} ((F_s(t, x)\mu + f_k(t, x))'_x + \alpha^{-(k-1)} g'_x(t, \alpha x, \alpha \mu)) = F'_s(t, x)\mu + f'_k(t, x)$, значит при $\alpha \rightarrow 0$ ограничена величина $\alpha^{-(k-1)} f'_x(t, \alpha x, \alpha^{k-s} \mu)$. Так как $f(t, 0_n, \mu) \equiv 0_n$, $f'_x(t, 0_n, 0_m) \equiv 0_{nm}$, то $x(t, 0_n, 0_m) \equiv 0_n$. Тогда имеет место тождество $\tilde{y}'_a(t, 0_n, 0_m) = \int_0^t f'_x(\tau, x(\tau, 0_n, 0_m), 0_m) x'_a(t, 0_n, 0_m) d\tau \equiv 0_{nn}$, то есть $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-1} \tilde{y}(t, \alpha a, \alpha^{k-s} \mu) \equiv 0_n$. Следовательно,

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} h(t, \alpha a, \alpha^{k-s} \mu) \equiv 0_n. \quad (5)$$

По условиям (2) и (5) имеем $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} \tilde{h}(t, \alpha a, \alpha^{k-s} \mu) \equiv 0_n$, где $\tilde{h}(t, a, \mu) = g(t, a, \mu) + h(t, a, \mu)$. Итак, в силу равенства (4) правый оператор монодромии системы (1)–(2) имеет вид

$$x(\omega, a, \mu) = a + \bar{F}_s(a)\mu + \bar{f}_k(a) + \bar{h}(a, \mu), \quad (6)$$

в котором $\bar{F}_s(x) = \int_0^\omega F_s(t, x) dt$ – $n \times m$ -матрица-форма порядка s , $\bar{f}_k(x) = \int_0^\omega f_k(t, x) dt$ – вектор-форма порядка k , $\bar{h}(a, \mu) = \int_0^\omega \tilde{h}(\tau, a, \mu) d\tau$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} \bar{h}(\alpha a, \alpha^{k-s} \mu) \equiv 0_n$.

Аналогичными рассуждениями устанавливается локальная структура левого оператора монодромии. Так как $\int_0^{-\omega} F_2(t, x) dt = \int_0^0 F_2(t, x) dt$, $\int_0^{-\omega} f_3(t, x) dt = \int_0^0 f_3(t, x) dt$, то

$$x(-\omega, a, \mu) = a - \bar{F}_s(a)\mu - \bar{f}_k(a) + \bar{\bar{h}}(a, \mu), \quad (7)$$

где $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} \bar{\bar{h}}(\alpha a, \alpha^{k-s} \mu) \equiv 0_n$.

Из равенства (6) следует, что при решении задачи о существовании периодического решения системы (1)–(2) определяющее уравнение имеет вид

$$\bar{F}_s(a)\mu + \bar{f}_k(a) + \bar{h}(a, \mu) = 0_n. \quad (8)$$

Обозначим $p(a, \mu) = \bar{F}_s(a)\mu + \bar{f}_k(a)$. Допустим, значение $a = a_0 \neq 0_n$ выбрано таким образом, что выполняется условие

$$\text{rang} [\bar{F}_s(a_0) \mid \bar{f}_k(a_0)] = \text{rang} \bar{F}_s(a_0). \quad (9)$$

Тогда существует значение $\mu = \mu_0$, при котором имеет место равенство

$$p(a_0, \mu_0) = 0_n, \quad (10)$$

которое необходимо для ветвления малого периодического решения системы (1)–(2) [3]. Так как компоненты $\bar{F}_s(x)$ и $\bar{f}_k(x)$ – это формы порядков s и k соответственно, то при условии

$$(10) \text{ справедливо разложение } p(\alpha a_0 + u, \alpha^{k-s} \mu_0) = \alpha^{k-1} P_1 u + \sum_{j=2}^{k-1} \alpha^{k-j} p_j(u) + \bar{f}_k(u), \text{ в котором}$$

$P_1 = p'_a(a_0, \mu_0)$, $p_j(u)$ – вектор-форма порядка j . Вычислим матрицу Якоби $P = [p'_a(a_0, \mu_0) \quad p'_\mu(a_0, \mu_0)] = [P_1 \quad \bar{F}_2(a_0)]$. Предположим, что имеет место равенство

$$\text{rang} P = n. \quad (11)$$

Заметим, что для выполнения условий (9) и (11) достаточно, чтобы размерность параметра удовлетворяла условию $m \geq n$ и имело место равенство $\text{rang} \bar{F}_2(a_0) = n$.

Если для некоторого $b_1 > 0$ при всех малых $\gamma > 0$ имеет место одна из оценок

$$\|E + \gamma P_1\| \leq 1 - \gamma b_1 \quad (12)$$

или

$$\|E - \gamma P_1\| \leq 1 - \gamma b_1 \quad (13)$$

то матрица $E - [E \pm \gamma P_1] = \mp \gamma P_1$ обратима [8, С. 140]. При этом выполняется условие (11).

Выделим какие-либо $n \times n$ -матрицы $P(u): P(u)u = p(a_0 + u, \mu_0)$ и $F(u): F(u)u = \bar{f}_3(u)$. Рассмотрим некоторые оценки для первого приближения оператора монодромии. Допустим, при всех малых $\gamma > 0$ и при всех $u: \|u\| = c$, справедлива одна из оценок

$$\|E + \gamma P(u)\| \leq 1 - \gamma b \quad (14)$$

или

$$\|E - \gamma P(u)\| \leq 1 - \gamma b, \quad (15)$$

где $c > 0$ и $b > 0$ – некоторые числа. Допустим также, что имеет место одна из оценок

$$\|E + \gamma F(u)\| \leq 1 - \gamma b \quad (16)$$

или

$$\|E - \gamma F(u)\| \leq 1 - \gamma b. \quad (17)$$

Заметим, что в оценках (12)–(17) могут фигурировать любые удобные для вычислений матричные нормы.

Теорема. Пусть выполняются условия (9) и (11). Тогда система (1)–(2) имеет малое ω -периодическое решение вида $x(t, a^*, \mu^*)$, $a^* = \alpha(a_0 + z(\alpha))$, $\mu^* = \alpha(\mu_0 + \bar{\mu}(\alpha))$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \|z(\alpha)\| = 0$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \|\bar{\mu}(\alpha)\| = 0$. При этом: 1) если верна оценка (12) (оценка (13)), то малое периодическое решение асимптотически устойчиво вправо (влево); 2) если имеет место одна

из оценок (14) или (16) (одна из оценок (15) или (17)), то малое периодическое решение α -устойчиво вправо (влево).

Доказательство. 1. В уравнении (8) выберем $a = \alpha(a_0 + z)$, $\mu = \alpha^{k-s}(\mu_0 + \bar{\mu})$, где $\alpha \geq 0$ – малый числовой параметр. По условию (10) выполним разложение

$$\begin{aligned} p(\alpha(a_0 + z), \alpha^{k-s}(\mu_0 + \bar{\mu})) &= \bar{F}_s(\alpha a_0 + \alpha z)(\alpha^{k-s}\mu_0 + \alpha^{k-s}\bar{\mu}) + \bar{f}_3(\alpha a_0 + \alpha z) = \\ &= \alpha^k p(a_0 + z, \mu_0) + \alpha^k \bar{F}_s(a_0 + z)\bar{\mu} = \alpha^k \left(P_1 z + \sum_{j=2}^{k-1} p_j(z) + \bar{f}_k(z) + \left[\bar{F}_s(a_0) + \sum_{l=1}^{s-1} \bar{F}_l(z) + \bar{F}_s(z) \right] \bar{\mu} \right), \end{aligned}$$

в котором $\bar{F}_l(z)$ – $n \times m$ -матрица, компоненты которой являются формами порядка l . По условию (11) справедливо равенство вида $P_1 z + \bar{F}_s(a_0)\bar{\mu} = P \text{colon}(z, \bar{\mu}) = Bv + Dd$, где B – $n \times n$ -матрица, составленная из линейно независимых столбцов матрицы P , D – $n \times m$ -матрица, составленная из остальных столбцов матрицы P , $v \in R^n$ и $d \in R^m$ – векторы, составленные из соответствующих элементов столбца $\text{colon}(z, \bar{\mu})$. Выберем $d = 0_m$. Обозначим

$$w(v) = \sum_{j=2}^{k-1} p_j(z) + \bar{f}_k(z) + \sum_{l=1}^{s-1} \bar{F}_l(z)\bar{\mu} + \bar{F}_s(z)\bar{\mu}, \quad \psi(\alpha, v) = \alpha^{-k} \bar{h}(\alpha(a_0 + z), \alpha^{k-s}(\mu_0 + \bar{\mu})).$$

При этом $w'(0_n) = 0_{nn}$. Так как $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} \bar{h}(\alpha a, \alpha^{k-s} \mu) \equiv 0_n$ в силу равенства (6), то $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} \psi(\alpha, v) \equiv 0_n$. Без ограничения общности рассуждений можно предполагать, что функция $\psi(\alpha, v)$ определена при $\alpha \rightarrow 0$ по непрерывности равенствами $\psi(0, 0_n) = 0_n$, $\psi'_v(0, 0_n) = 0_{nn}$. Итак, при условиях (9) и (11) определяющее уравнение (8) преобразовано к виду

$$H(\alpha, v) = Bv + w(v) + \psi(\alpha, v) = 0_n. \quad (18)$$

Так как $H(0, 0_n) = 0_n$, $H'_v(0, 0_n) = B$, $\det B \neq 0$, то по теореме о неявной функции уравнение (18) определяет в некотором интервале $0 < \alpha < \Delta$ однозначную функцию $v = v(\alpha)$, удовлетворяющую условию $\lim_{\alpha \rightarrow 0} v(\alpha) = 0_n$. Вычислив $v = v(\alpha)$, составим векторы

$a^* = \alpha(a_0 + z(\alpha))$, $\mu^* = \alpha^{k-s}(\mu_0 + \bar{\mu}(\alpha))$, $0 < \alpha < \Delta$, удовлетворяющие определяющему уравнению (8). При этом $a^* \neq 0_n$ при малых α , поскольку $a_0 \neq 0_n$ и $\lim_{\alpha \rightarrow 0} z(\alpha) = 0_n$. Таким образом, система (1)–(2) имеет ω -периодическое решение $x(t, a^*, \mu^*)$, которое является малым по определению 1.

2. Допустим, верна оценка (12). Для периодического решения $x(t, a^*, \mu^*)$ составим систему в вариациях. Для этой системы нормированная фундаментальная матрица в силу равенств (6), (10) имеет вид $x'_a(t, a^*, \mu^*) = E + \alpha^k P_1 + Y(\alpha)$ [6, С. 36], где матрица $Y(\alpha)$ удовлетворяет условию $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} Y(\alpha) = 0_{nn}$. При этом можно предполагать, что $\|\alpha^{-3} Y(\alpha)\| \leq b_1 / 2$ при малых α (число b_1 взято из условия (12)). Так как спектральный радиус $\rho(A)$ любой

квадратной матрицы A при произвольно выбранной матричной норме удовлетворяет условию $\rho(A) \leq \|A\|$ [9, С. 359], то, применив неравенство (12), получим оценку

$$\rho(E + \alpha^k P_1 + Y(\alpha)) \leq \|E + \alpha^k P_1 + Y(\alpha)\| \leq \|E + \alpha^k P_1\| + \alpha^k \|\alpha^{-k} Y(\alpha)\| \leq 1 - \alpha^k b_1 / 2.$$

При этом периодическое решение $x(t, a^*, \mu^*)$ асимптотически устойчиво вправо по линейному приближению [7, С. 210].

3. Допустим, справедлива оценка (14). Обозначим $d_r(\alpha, u) = x(r\omega, a^* + u, \mu^*) - a^*$ последовательность возмущений правого оператора монодромии. В силу равенства (6) справедливо соотношение $d_1(\alpha, u) = u + p(\alpha a_0 + u, \alpha^{k-s} \mu_0) + \tilde{\psi}(\alpha, u)$, где $\tilde{\psi}(\alpha, u) = (p(a^* + u, \mu^*) - p(\alpha a_0 + u, \alpha^{k-s} \mu_0)) + \bar{h}(a^* + u, \mu^*)$. Так как значения $a^* = \alpha(a_0 + z(\alpha))$ и $\mu^* = \alpha^{k-s}(\mu_0 + \bar{\mu}(\alpha))$, $\alpha \in (0, \Delta)$, удовлетворяют определяющему уравнению (8), то $d_1(\alpha, 0_n) \equiv 0_n$. Выберем $u = \alpha\lambda$, $\|\lambda\| = c$. Так как $\tilde{\psi}(\alpha, 0_n) \equiv 0_n$, то возможен выбор $n \times n$ -матрицы $\tilde{\Psi}(\alpha, \lambda)$, удовлетворяющей условиям $\tilde{\psi}(\alpha, u) = \tilde{\Psi}(\alpha, \lambda)u$ и $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-(k-1)} \|\tilde{\Psi}(\alpha, \lambda)\| = 0$.

При этом можно предполагать, что существует $\delta_1 \in (0, \min\{\Delta, \Delta/c\}]$, для которого $\|\tilde{\Psi}(\alpha, \lambda)\| < \alpha^{k-1}b/2$ при $\alpha < \delta_1$ и $\lambda: \|\lambda\| = c$, где числа b и c взяты из неравенства (14). Тогда первое возмущение правого оператора монодромии $d_1(\alpha, u) = [E + \alpha^k P(\lambda)]u + \tilde{\Psi}(\alpha, \lambda)u$ при $\alpha < \delta_1$ и $\|u\| < \delta_2 = \delta_1 c$ имеет оценку

$$\|d_1(\alpha, u)\| \leq [1 - \alpha^k b / 2]u. \quad (19)$$

Можно предполагать величину δ_1 достаточно малой для того, чтобы в окрестности решения $x(t, a^*, \mu^*)$ возмущенные решения были продолжаемы, по крайней мере, на промежутке $[0, \omega]$. При этом определена величина $d_2(\alpha, u)$. По групповому свойству решений $d_2(\alpha, u) = d_1(\alpha, d_1(\alpha, u))$. Из оценки (19) следует неравенство $\|d_2(\alpha, u)\| \leq [1 - \alpha^2 b / 2] \|d_1(\alpha, u)\|$. Следовательно, определена величина $d_3(\alpha, u) = d_1(\alpha, d_2(\alpha, u))$, удовлетворяющая условию $\|d_3(\alpha, u)\| \leq [1 - \alpha^2 b / 2] \|d_2(\alpha, u)\|$. Далее по индукции можно установить, что при любом $r \in Z_+$ значение $d_r(\alpha, u)$ действительно определено и справедлива оценка $\|d_r(\alpha, u)\| < \|d_{r-1}(\alpha, u)\| < \dots < \|d_0(\alpha, u)\| = \|u\|$. Итак, для любого $\varepsilon > 0$ по доказанному выше существует $\delta \in (0, \min\{\delta_2, \varepsilon\}]$, при котором для любого $r \in Z_+$ из неравенств $0 < \alpha < \delta/c$, $\|u\| < \delta$ следует оценка $\|d_r(\alpha, u)\| < \varepsilon$. Значит, по определению 2 периодическое решение $x(t, a^*, \mu^*)$ является α -устойчивым вправо.

4. Допустим, справедлива оценка (16). Возмущение правого оператора монодромии представим в виде $d_1(\alpha, u) = [E + F(u) + G(\alpha, u) + V(\alpha, u)]u$, где $\lim_{\beta \rightarrow 0} \beta^{-(k-1)} \|G(\alpha, \beta u)\| \equiv 0$, $V(0, u) \equiv 0_{nn}$. Возьмем $u = \beta\lambda$, $\|\lambda\| = c$. Выберем $\delta_1 > 0$ так, чтобы при всех $\beta: \beta < \delta_1/c$ и $\alpha: \alpha < \delta_1$ выполнялось неравенство $\|G(\alpha, \beta\lambda)\| \leq \beta^2 b / 4$. Существует $\delta_2: 0 < \delta_2 \leq \delta_1$, для которого из условия $\alpha < \delta_2$ при всех $\beta: \delta_1/(2c) \leq \beta < \delta_1/c$ верна оценка $\|V(\alpha, \beta\lambda)\| \leq \beta^2 b / 4$.

Без ограничения общности можно предполагать, что $\|E + F(u) + G(\alpha, u) + V(\alpha, u)\| < 2$, если $\alpha < \delta_2$ и $\beta < \delta_1 / (2c)$. При этом $\|d_1(\alpha, u)\| < 2\|u\| < \delta_1$. Если же $\alpha < \delta_2$ и $\delta_1 / (2c) \leq \beta < \delta_1 / c$, то $\|d_1(\alpha, u)\| \leq (1 - \beta^2 b / 2)\|u\| < \delta_1$. Итак, произвольно выбрав $\varepsilon > 0$, получим, что $\|d_1(\alpha, u)\| < \varepsilon$ для всех $u: \|u\| < \delta = \min\{\varepsilon, \delta_1\}$ и $\alpha < \delta_2$. Тогда, как и в предыдущей части доказательства, по индукции получим, что при всех $r \in Z_+$ справедлива оценка $\|d_r(\alpha, u)\| < \varepsilon$. Значит, по определению 2 периодическое решение $x(t, \alpha^*, \mu^*)$ α -устойчиво вправо.

В силу равенства (7) ясно, что случаи устойчивости влево рассматриваются аналогично. Теорема доказана.

Замечание 1. При условии (12) имеет место некритический случай устойчивости по Ляпунову малого периодического решения системы (1)–(2).

Замечание 2. Если выполняется условие (16), то нулевое решение системы (1)–(2) асимптотически устойчиво по Ляпунову при нулевом значении параметра. Этот факт устанавливается по схеме доказательства теоремы 5 [6]. В этом случае для малого периодического решения имеет место некритический случай α -устойчивости.

Замечание 3. При выполнении условий устойчивости влево и вправо периодическое решение оказывается двусторонне устойчивым. Для этого, например, достаточно, чтобы были справедливы оценки (13) и (16).

Библиографический список

1. Абрамов, В.В. Существование и устойчивость по параметру малого периодического решения неавтономной системы дифференциальных уравнений / В.В. Абрамов // Дифференциальные уравнения. – 1999. – Т. 35. – № 6. – С. 855.
2. Абрамов, В.В. Устойчивость тривиального решения системы дифференциальных уравнений с нулевым линейным приближением / В.В. Абрамов // Дифференциальные уравнения. 1999. – Т. 35. – № 11. – С. 1575.
3. Абрамов, В.В. Устойчивость малого периодического решения / В.В. Абрамов // Вестник РАЕН. – 2013. – Т. 13. – № 4. – С. 3–5.
4. Абрамов, В.В. Двусторонняя устойчивость малого периодического решения / В.В. Абрамов // Вестник РАЕН. – 2014. – Т. 14. – № 5. – С. 6–9.
5. Абрамов, В.В. Устойчивость нулевого решения периодической системы дифференциальных уравнений с малым параметром / В.В. Абрамов // Журнал СВМО. – 2010. – Т. 12. – № 4. – С. 49–54.
6. Абрамов, В.В. Ветвление периодического решения неавтономной системы с малым параметром / В.В. Абрамов // Вестник РАЕН. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 3–7.
7. Красносельский, М.А. Оператор сдвига по траекториям дифференциальных уравнений / М.А. Красносельский // М.: Наука, 1966.
8. Треногин, В.А. Функциональный анализ / В.А. Треногин // М.: Наука, 1980.
9. Хорн, Р.А. Матричный анализ / Р.А. Хорн, Ч.Р. Джонсон // М.: Мир, 1989.

УДК 517.925; ГРНТИ 27.29.17

К ЗАДАЧЕ О ВЕТВЛЕНИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**В.В. Абрамов***Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, v.abramov@365.rsu.edu.ru*

Аннотация. В данной работе периодические системы дифференциальных уравнений с малым параметром исследованы в окрестности нулевого решения, а также в окрестности бесконечности. Предполагается, что правые операторы монодромии являются положительными в этих окрестностях. На основе оценок для нелинейных приближений операторов монодромии получены признаки ветвления малого и большого периодических решений.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, периодическое решение, колебания, бифуркация, малый параметр, оператор монодромии.

TO THE PROBLEM OF BRANCHING OF PERIODIC SOLUTIONS**V.V. Abramov***Ryazan State University named after S.A. Esenin,
Russia, Ryazan, v.abramov@365.rsu.edu.ru*

The summary. In this paper, periodic systems of differential equations with a small parameter are investigated in the vicinity of the zero solution, as well as in the vicinity of infinity. It is assumed that the right monodromy operators are positive in these vicinitys. On the basis of estimates for nonlinear approximations of monodromy operators, signs of branching of small and large periodic solutions are obtained.

Keywords: differential equations, periodic solution, oscillations, bifurcation, small parameter, monodromy operator.

Рассмотрим ω -периодическую по t систему n дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = A(t)x + f(t, x, \alpha) \quad (1)$$

с малым параметром $\alpha \in [0, \Delta)$. Условия для функции $f(t, x, \alpha)$ уточним далее.

Задача. Установить для системы (1) условия существования малого (большого) ω -периодического решения с положительным начальным значением

$$x(t, a^*, \alpha), \quad x(0, a^*, \alpha) = a^*, \quad a^* = a(\alpha) > 0_n, \quad 0 < \alpha < \Delta, \quad \lim_{\alpha \rightarrow 0} a^* = 0_n (= \infty). \quad (2)$$

1. Условия ветвления малого периодического решения

Допустим, $f(t, x, \alpha)$ – достаточно гладкая вектор-функция от x и от α в окрестности точки $(0_n, 0)$, $f(t, 0_n, \alpha) \equiv 0_n$, $f'_x(t, 0_n, 0) \equiv 0_{nn}$. Тогда согласно результатам работы [1] в окрестности решения $x = 0_n$ системы (1) ее односторонние операторы монодромии имеют вид

$$x((-1)^s \omega, a, \alpha) = X_s a + p_s(a, \alpha) + \psi_s(a, \alpha), \quad s = 1, 2, \quad (3)$$

где $X_s = X((-1)^s \omega)$, $X(t)$ – фундаментальная матрица системы $\dot{x} = A(t)x$, $X(0) = E$; функции

$p_s(a, \alpha) = \sum_{l=1}^k \alpha^{k-l} p_{sl}(a)$ определены по формуле Тейлора: $X_s \int_0^{(-1)^s \omega} X^{-1}(t) f(t, X(t)a, \alpha) dt = p_s(a, \alpha) + \eta_s(a, \alpha)$, $k \in N$, $k \geq 2$, $p_{sl}(\gamma a) = \gamma^l p_{sl}(a)$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} \|\eta_s(\alpha a, \alpha)\| \equiv 0$; функции $\psi_s(a, \alpha)$ имеют свойства $\psi_s(0_n, \alpha) \equiv 0_n$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} \|\psi_s(\alpha a, \alpha)\| \equiv 0$.

Допустим, для правой части равенства (3) при всех $\lambda \in \bar{K}(1)$ и при произвольно выбранном малом $\gamma > 0$ справедливы оценки:

$$X_2 \geq 0_m, \quad X_2 + \gamma P_2(\lambda, 1) \geq X_2 + \gamma C > 0_m, \quad (4)$$

$$\|X_2 + \gamma P_{2k}(\lambda)\| \leq 1 - \gamma b, \quad b > 0, \quad (5)$$

$$\|X_1 + \gamma P_{1l}\| \leq 1 - \gamma d, \quad d > 0, \quad (6)$$

где $P_{s1}a = p_{s1}(a)$, $P_{sk}(a)a = p_{sk}(a)$, $P_2(a, \alpha)a = p_2(a, \alpha)$, $K(\sigma) = \{a \in R^n : \|a\| \in (0, \sigma), a \geq 0_n\}$, $\bar{K}(\sigma) = \{a \in R^n : \|a\| = \sigma, a \geq 0_n\}$. В условиях (2), (4)–(6) и далее неравенства для векторов, матриц имеют покомпонентный смысл.

Теорема 1. Если для системы (1) оператор монодромии имеет вид (3) и выполняются условия (4)–(6), то система (1) имеет малое ω -периодическое решение вида (2).

Доказательство. Так как вектор-функция $\psi_2(a, \alpha)$ в равенстве (3) обладает свойствами $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} \|\psi_2(\alpha a, \alpha)\| \equiv 0$, $\psi_2(0_n, \alpha) \equiv 0_n$, то можно выбрать разложение $\Psi_2(a, \alpha)a = \psi_2(a, \alpha)$ и представить правый оператор монодромии системы (1) в виде

$$x(\omega, a, \alpha) = [X_2 + P_2(a, \alpha) + \Psi_2(a, \alpha)]a. \quad (7)$$

Так как $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{1-k} \|\Psi_2(\alpha a, \alpha)\| \equiv 0$, то существует $\delta \in (0, \Delta]$, при котором для любых $a = \alpha \lambda \in K(\delta)$, $\alpha < \delta$ имеет место оценка $\Psi_2(a, \alpha) \leq \frac{1}{2} \alpha^{k-1} C$. Тогда в силу условия (4) и равенства (7) справедливо неравенство

$$x(\omega, a, \alpha) \geq [X_2 + \frac{1}{2} \alpha^{k-1} C]a > 0_n. \quad (8)$$

В равенстве (3) выберем разложения $H_2(a, \alpha)a = \psi_2(a, \alpha) - \psi_2(a, 0) + p_2(a, \alpha) - p_{2k}(a)$, $M_2(a)a = \psi_2(a, 0)$ и представим правый оператор монодромии системы (1) в виде

$$x(\omega, a, \alpha) = [X_2 + P_{2k}(a) + M_2(a) + H_2(a, \alpha)]a. \quad (9)$$

Так как $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-k} \|\psi_2(\alpha a, \alpha)\| \equiv 0$, то $\lim_{\|a\| \rightarrow 0} \|a\|^{1-k} \|M_2(a)\| = 0$. Поэтому существует $\delta_1 \in (0, \delta]$, при котором для любого $a \in K(\delta_1)$ справедлива оценка $\|M_2(a)\| \leq \frac{1}{4} \|a\|^{k-1} b$. Так как $H_2(a, 0) \equiv 0_m$, то существует такое $\delta_2 \in (0, \delta]$, что неравенство $\|H_2(a, \alpha)\| \leq \frac{1}{4} \|a\|^{k-1} b$ верно при всех $a \geq 0_n : \delta_1/2 < \|a\| < \delta_1$, $\alpha < \delta_2$. При этом в силу условия (5) и равенства (9) имеет место оценка

$$\|x(\omega, a, \alpha)\| < (1 - b \|a\|^{k-1}/2) \|a\| < \|a\|, \quad (10)$$

В силу равенства (3) левый оператор монодромии системы (1) имеет вид

$$x(-\omega, a, \alpha) = [X_1 a + \alpha^{k-1} P_1 a + \Phi_1(a, \alpha)]a, \quad (11)$$

где $\Phi_1(a, \alpha)a = \sum_{l=2}^k \alpha^{k-l} p_{1l}(a) + \psi_1(a, \alpha)$. Произвольно зафиксируем $\alpha \in (0, \delta_2)$. Так как $\lim_{\|a\| \rightarrow 0} \|a\|^{-1} \|\Phi_1(a, \alpha)\| \equiv 0$, то существует такое $\delta_3 \in (0, \delta_1/2]$, что при любом $a \in K(\delta_3)$ справедливо неравенство $\|\Phi_1(a, \alpha)\| \leq d \|a\|/2$. Тогда из условия (6) и равенства (11) следует оценка

$$\|x(-\omega, a, \alpha)\| \leq (1 - d\alpha^{k-1}/2) \|a\| < \|a\|. \quad (12)$$

Допустим, $b = x(-\omega, a, \alpha)$ – начальное значение решения системы (1). По групповому свойству решений периодической динамической системы имеем $a = x(-\omega, b, \alpha)$. Поэтому оценка (12) равносильна неравенству

$$\|a\| < \frac{1}{1 - d\alpha^{k-1}/2} \|a\| \leq \|x(\omega, a, \alpha)\|, \quad (13)$$

в котором $\alpha \in (0, \delta_2)$, $a \in K(\delta_3)$, $a \neq 0_n$.

Выберем произвольное значение $\alpha \in (0, \delta_2)$ и найдем $\alpha c_1 \in [\delta_1/2, \delta_1)$, при котором для $a \in \bar{K}(\alpha c_1)$ в силу неравенств (8) и (10) имеет место включение $x(\omega, a, \alpha) \in K(\alpha c_1)$. Далее для того же значения α выберем такое $c_2 \alpha < \delta_3$, что $\|x(\omega, a, \alpha)\| > c_2 \alpha$ и $x(\omega, a, \alpha) > 0_n$ для $a \in \bar{K}(c_2 \alpha)$ в силу неравенств (8) и (13). Таким образом для любого $\alpha \in (0, \delta_2)$ существует компактное множество $S(\alpha) = \{a \in R^n : c_2 \alpha \leq \|a\| \leq c_1 \alpha, a \geq 0_n\}$, для которого правый оператор монодромии системы (1) обладает свойством $x(\omega, a, \alpha) : S(\alpha) \rightarrow \text{int } S(\alpha)$. Так $S(\alpha)$ гомеоморфно выпуклому множеству $\{a \in R^n : h_2 \alpha \leq \|a\| \leq h_1 \alpha, a \geq 0_n\}$, $\|a\| = \sum_{i=1}^m |a_i|$ типа усеченного конуса, то по теореме Брауэра о неподвижной точке существует $a^* = a(\alpha) \in \text{int } S(\alpha) : x(\omega, a^*, \alpha) = a^*$. При этом $a^* = a(\alpha) > 0_n$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} a^* = 0_n$. Следовательно система (1) имеет малое ω -периодическое решение $x(t, a^*, \alpha)$ вида (2). Теорема 1 доказана.

Замечание 1. Условие (8), которое следует из неравенства (4), гарантирует локальную инвариантность конуса положительных векторов в фазовом пространстве системы (1) при отображениях правым оператором монодромии. Из оценки (6) следует условие (12), при котором для малых $\alpha > 0$ нулевое решение системы (1) асимптотически устойчиво влево по линейному приближению [4]. Оценка (5) является достаточным условием асимптотической устойчивости нулевого решения системы (1) при $\alpha = 0$ [4] относительно конуса положительных векторов в фазовом пространстве. То есть теорему 1 можно сформулировать в терминах свойств устойчивости нулевого решения системы (1).

Замечание 2. Допустим, для правой части равенства (3) при всех $\lambda \in \bar{K}(1)$ и при произвольно выбранном малом $\gamma > 0$ справедливы оценки: $X_2 \geq 0_m$, $X_2 + \gamma P_2(\lambda, 1) \geq X_2 + \gamma C > 0_m$; $\|X_1 + \gamma P_{1k}(\lambda)\| \leq 1 - \gamma b$, $b > 0$; $\|X_2 + \gamma P_{21}\| \leq 1 - \gamma d$, $d > 0$. Тогда, поменяв ролями правый и левый операторы монодромии и применив схему доказательства теоремы 1, получим, что система (1) имеет малое ω -периодическое решение вида (2).

2. Условия ветвления большого периодического решения

Допустим, в правой части системы (1) вектор-функция $f(t, x, \alpha)$ достаточно гладко зависит от x и от α в окрестности точки $(\infty, 0)$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-1} \|f(t, x/\alpha, \alpha)\| \equiv 0$. Тогда согласно результатам работ [2, 3] в окрестности бесконечности фазового пространства для односторонних операторов монодромии системы (1) имеет место аналог равенства (3)

$$x((-1)^s \omega, a, \alpha) = X_s a + \bar{p}_s(a, \alpha) + \bar{\psi}_s(a, \alpha), \quad s = 1, 2, \quad (14)$$

в котором $\bar{p}_s(a/\alpha^r, \alpha) = \alpha^{-k} \bar{p}_s(a, 1)$, $0 < r$, $0 < k < 1$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^k \|\bar{\psi}_s(a/\alpha^r, \alpha)\| \equiv 0$.

Выберем разложения $\bar{P}_1(a)a = \bar{p}_1(a, 0)$, $\bar{P}_2(a, \alpha)a = \bar{p}_2(a, \alpha)$.

Определим множества

$$K_1(\sigma) = \{a \in R^n : \|a\| > \sigma, a \geq 0_n\}, \quad \bar{K}_1(\sigma) = \{a \in R^n : \|a\| = \sigma, a \geq 0_n\}.$$

Допустим, для правой части равенства (14) при всех $\lambda \in \bar{K}_1(1)$ и при произвольно выбранном малом $\gamma > 0$ справедливы оценки:

$$X_2 \geq 0_{nn}, \quad X_2 + \gamma \bar{P}_2(\lambda, 1) \geq X_2 + \gamma D > 0_{nn}; \quad (15)$$

$$\|X_1 + \gamma \bar{P}_1(\lambda)\| \leq 1 - b\gamma, \quad b > 0; \quad (16)$$

$$\|X_2 + \gamma \bar{P}_2(\lambda, 1)\| \leq 1 - d\gamma, \quad d > 0. \quad (17)$$

Теорема 2. Если для системы (1) оператор монодромии имеет вид (14) и выполняются условия (15)–(17), то система (1) имеет большое ω -периодическое решение вида (2).

Доказательство теоремы 2 в целом аналогично доказательству теоремы 1. По условию (14) правый оператор монодромии имеет вид $x(\omega, a, \alpha) = [X_2 + \bar{P}_2(a, \alpha) + \bar{\Psi}_2(a, \alpha)]a$, в котором $\bar{P}_2(a/\alpha^r, \alpha) = \alpha^{1-k} \bar{P}_2(a, 1)$, $\bar{\Psi}_2(a, \alpha)a = \bar{\psi}_2(a, \alpha)$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{k-1} \|\bar{\Psi}_2(a/\alpha^r, \alpha)\| \equiv 0$. Допустим, имеет место оценка (15). Тогда существует такое достаточно большое число $\sigma > 0$, что $\bar{\Psi}_2(a, \alpha) < \frac{1}{2} \alpha^{1-k} D$ при условиях $a = \lambda/\alpha^r \in K_1(\sigma)$, $\lambda \in \bar{K}_1(1)$ и $\alpha < 1/\sigma$. При этом верна

оценка $x(\omega, a, \alpha) \geq [X_2 + \frac{1}{2} \alpha^{1-k} D]a > 0_n$. То есть множество $K_1(\sigma)$ инвариантно для правого оператора монодромии системы (1).

Так как $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^k \|\bar{\psi}_1(a/\alpha^r, \alpha)\| \equiv 0$, то существует такое $\delta_1 \geq \sigma$, что $\|\bar{\psi}_s(\lambda/\alpha^r, 0)\| \leq \alpha^k b/2$ для любого $a = \lambda/\alpha^r \in K(\delta_1)$. При этом из условия (16) следует оценка $\|x(-\omega, a, 0)\| < (1 - \alpha^{1-k} b/2) \alpha^{-1} < \alpha^{-1}$. Поэтому найдется такое $\delta_2 \geq \delta_1$, что при $\alpha < 1/\delta_2$, $a \geq 0_n : \delta_1 < \|a\| < 2\delta_1$ справедлива оценка $\|x(-\omega, \lambda/\alpha^r, \alpha)\| < (1 - \alpha^{1-k} b/2) \alpha^{-1} < \alpha^{-1}$. При этом по групповому свойству решений $\|x(\omega, \lambda/\alpha^r, \alpha)\| > \alpha^{-1}$.

Так как $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^k \|\bar{\psi}_2(a/\alpha^r, \alpha)\| \equiv 0$, то найдется такое $\delta_3 \geq \delta_2$, что $\|\bar{\psi}_2(\lambda/\alpha^r, \alpha)\| \leq \alpha^k d/2$ для любых $\alpha < 1/\delta_3$, $a = \lambda/\alpha^r \in K(\delta_3)$. Тогда из неравенства (17) следует оценка $\|x(\omega, a, \alpha)\| \leq \|X_2 + \alpha^{1-k} \bar{P}_2(\lambda, 1)\| \alpha^{-1} + \|\bar{\psi}_2(\lambda/\alpha^r, \alpha)\| \leq (1 - \alpha^{1-k} d/2) \alpha^{-1}$.

Итак, при любом $\alpha < 1/\delta_3$ существует конусный отрезок $K_\alpha = \{a \geq 0_n : 0 < \Delta(\alpha) \leq \|a\| \leq \delta(\alpha)\}$, для которого $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \Delta(\alpha) = +\infty$ и $x(\omega, \lambda/\alpha^r, \alpha) : K_\alpha \rightarrow \text{int } K_\alpha$. Так как компактное множество K_α гомеоморфно выпуклому, то по теореме Брауэра о неподвижной точке существует значение $a^* = a(\alpha) \in \text{int } K_\alpha$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} a^* = +\infty$, для которого $x(\omega, a^*, \alpha) = a^*$. Итак, $x(t, a^*, \alpha)$ – большое ω -периодическое решение вида (2) для системы (1). Теорема 2 доказана.

Замечание 3. По условию (16) при $\alpha = 0$ для системы (1) решения с достаточно большими неотрицательными начальными значениями притягиваются к бесконечности. При $\alpha > 0$ с силу неравенства (17) возникает зона отталкивания решений от бесконечности. Таким образом от бесконечности отделяется область, содержащая начальное значение периодического решения.

Библиографический список

1. Абрамов, В.В. Устойчивость малого периодического решения / В.В. Абрамов // Вестник РАЕН. – 2013. – Т. 13. – № 4. – С. 3–5.
2. Абрамов, В.В. Ветвление периодического решения от бесконечности / В.В. Абрамов // Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2017. – Вып. 12. – С. 3–8.
3. Абрамов, В.В. Большое периодическое решение системы дифференциальных уравнений с параметром / В.В. Абрамов // Геометрические методы в теории управления и математической физике. – 2018. – С. 4–5.
4. Абрамов, В.В. Двусторонняя устойчивость малого периодического решения / В.В. Абрамов // Вестник РАЕН. – 2014. – Т. 14. – № 5. – С. 6–9.

УДК 621.39

О СОВМЕСТНОМ ОБНАРУЖЕНИИ И ОЦЕНИВАНИИ МАРКОВСКИХ СИГНАЛОВ

О.Н. Чемезов

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Российская Федерация, Рязань, oleg.chemezov.58@mail.ru

Аннотация. Получен алгоритм обнаружения и оценивания марковского сигнала на фоне марковской и некоррелированной помех.

Ключевые слова: обнаружение, оценка, сигнал, помеха.

ON JOINT DETECTION AND EVALUATION OF MARKOV SIGNALS

O.N. Chemezov

Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, oleg.chemezov.58@mail.ru

The summary. An algorithm for detecting and evaluating of the Markov signal against the background of Markov and uncorrelated interference is obtained.

Keywords: detection, evaluation, signal, interference.

Важное прикладное значение имеет проблема обнаружения и фильтрации многомерного марковского сигнала на фоне многомерной марковской помехи и аддитивного белого шума. Ниже рассматривается соответствующая задача в следующей постановке.

Пусть задана модель наблюдений

$$z_k = \theta G_1^T Y_k + G_2^T S_k + \xi_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где сигнал Y_k и помеха S_k – многомерные последовательности, получаемые путём дискретизации решений дифференциальных уравнений

$$\dot{Y}(t) = AT(t) + Bv(t), \quad \dot{S}(t) = CS(t) + Dn(t), \quad (2)$$

в составе которых:

$v(t)$, $n(t)$ – гауссовские порождающие белые шумы ($v(t) \in N(0, \sigma_y^2)$, $n(t) \in N(0, \sigma_s^2)$);

A , B , C , D – стационарные матрицы надлежащих размерностей;

G_1 , G_2 – векторы, выделяющие из состава векторов Y_k , S_k физически участвующие в формировании наблюдений z_k компоненты;

θ – параметр, принимающий значения 0 или 1 в соответствии с предполагаемой альтернативной ситуацией;

ξ_k – гауссовский белый шум ($\xi_k \in N(0, \sigma^2)$).

Дискретизация решений уравнений (2) привела к разностным уравнениям

$$\begin{aligned} Y_{k+1} &= \Phi_{k+1,k} Y_k + \Gamma_{k+1,k} v_{k+1}, \\ S_{k+1} &= F_{k+1,k} S_k + D_{k+1,k} n_{k+1}, \end{aligned} \quad (3)$$

в составе которых

$$\begin{aligned} \Phi_{k+1,k} &= e^{A\Delta t_k}, \quad \Gamma_{k+1,k} = A^{-1}(e^{A\Delta t_k} - E)B, \\ F_{k+1,k} &= e^{C\Delta t_k}, \quad D_{k+1,k} = C^{-1}(e^{C\Delta t_k} - E)D, \end{aligned} \quad (4)$$

где E – единичная матрица, $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$.

Требуется по наблюдениям (1) построить алгоритм обнаружения и фильтрации последовательности Y_k .

Прежде всего, введем блочный вектор $V_k^T = [Y_k^T S_k^T]$, для которого справедливо уравнение

$$V_{k+1} = L_{k+1,k} V_k + W_{k+1,k} \omega_{k+1}, \quad \omega_{k+1} \in N(0, D_\omega), \quad (5)$$

$$\text{где } \omega_{k+1}^T = [v_{k+1} n_{k+1}], \quad L_{k+1,k} = \begin{bmatrix} \Phi_{k+1,k} & 0 \\ 0 & F_{k+1,k} \end{bmatrix}, \quad W_{k+1,k} = \begin{bmatrix} \Gamma_{k+1,k} & 0 \\ 0 & D_{k+1,k} \end{bmatrix}, \quad D_\omega = \begin{bmatrix} \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & \sigma_s^2 \end{bmatrix}.$$

Тогда на основании (1) для гипотезы $\theta = 1$ можно записать

$$z_k = G^T V_k + \xi_k, \quad (6)$$

где $G^T = [G_1^T G_2^T]$.

Теперь для нахождения величин σ_{k+1}^2 , $\tilde{\sigma}_{k+1}^2$, m_{k+1} , $\tilde{m}_{k+1}$, необходимых для формирования отношения правдоподобия, воспользуемся калмановскими уравнениями фильтрации, дающими наилучшую среднеквадратическую оценку последовательности Y_k по данным наблюдений (1) при фиксированном значении параметра θ [1].

При гипотезе $\theta = 1$ имеем

$$\hat{V}_{k+1} = L_{k+1,k} \hat{V}_k + K_{k+1} (z_{k+1} - G^T L_{k+1,k} \hat{V}_k), \quad (7)$$

$$K_{k+1} = R_{k+1} G \sigma^{-2}, \quad (8)$$

$$R_{k+1} = R_{k+1|k} - R_{k+1|k} G (G^T R_{k+1|k} G + \sigma^2)^{-1} G^T R_{k+1|k} \quad (9)$$

$$R_{k+1|k} = L_{k+1,k} R_{k+1} L_{k+1,k}^T + W_{k+1,k} D_{\omega} W_{k+1,k}^T, \quad (10)$$

Где $\hat{V}_{k+1}$ – апостериорная оценка вектора V_{k+1} ;

$R_{k+1,k}$ и R_{k+1} – соответственно ковариационные матрицы прогноза и ошибки оценивания;

K_{k+1} – коэффициент усиления.

С учетом (5) и (6) находим искомые выражения для апостериорных среднего и дисперсии наблюдения z_{k+1} при $\theta = 1$:

$$\begin{aligned} m_{k+1} &= M\{z_{k+1} | z_1^k, \theta = 1\} = M\{G^T V_{k+1} + \xi_{k+1} | z_1^k, \theta = 1\} = \\ &= M\{G^T (L_{k+1,k} V_k + W_{k+1,k} \omega_k) + \xi_{k+1} | z_1^k, \theta = 1\} = G^T L_{k+1,k} \hat{V}_k \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sigma_{k+1}^2 = D\{z_{k+1} | z_1^k, \theta = 1\} = D\{G^T V_{k+1} + \xi_{k+1} | z_1^k, \theta = 1\} = G^T R_{k+1,k} G + \sigma^2, \quad (12)$$

где $z_1^k = z_1, z_2, \dots, z_k$.

Аналогично в предположении $\theta = 0$ имеем

$$\tilde{m}_{k+1} = G_2^T F_{k+1,k} \hat{S}_k, \quad (13)$$

$$\tilde{\sigma}_{k+1}^2 = G_2^T R_{k+1|k} G_2 + \sigma^2, \quad (14)$$

$$\hat{S}_{k+1} = F_{k+1,k} \hat{S}_k + \tilde{K}_{k+1} (z_{k+1} - G_2^T F_{k+1,k} \hat{S}_k), \quad (15)$$

$$\tilde{K}_{k+1} = P_{k+1} G_2 \sigma^{-2} \quad (16)$$

$$P_{k+1} = P_{k+1|k} - P_{k+1|k} G_2 (G_2^T P_{k+1|k} G_2 + \sigma^2)^{-1} G_2^T P_{k+1|k}, \quad (17)$$

$$P_{k+1|k} = F_{k+1,k} P_k F_{k+1,k}^T + D_{k+1,k} \sigma_s D_{k+1,k}^T. \quad (18)$$

Здесь $\tilde{m}_{k+1}$, $\tilde{\sigma}_{k+1}^2$, $\tilde{K}_{k+1}$, P_{k+1} , $P_{k+1|k}$ имеют смысл, аналогичный m_{k+1} , σ_{k+1}^2 , R_{k+1} , $R_{k+1|k}$.

Начальные условия, соответствующие уравнениям (7), (10), (15), (18), устанавливаются обычным при калмановской фильтрации образом и можно положить

$$\hat{S}_0 = 0, \quad \hat{V}_0 = 0, \quad R_{1/0} = W_{1,0} D_{\omega} W_{1,0}^T, \quad P_{1/0} = D_{1,0} \sigma_s^2 D_{1,0}^T. \quad (19)$$

Полученная совокупность выражений (7) – (18) формирует замкнутую систему обнаружения и фильтрации, позволяющую решить поставленную выше задачу.

Логарифм отношения правдоподобия, на основании которого принимаются решения о наличии или отсутствии сигнала, находится по формуле

$$\ln \Lambda_{k+1} = \ln \Lambda_k + \frac{1}{2} \ln \frac{\tilde{\sigma}_{k+1}^2}{\sigma_{k+1}^2} + \frac{1}{2} \left[\frac{(z_{k+1} - \tilde{m}_{k+1})^2}{\tilde{\sigma}_{k+1}^2} - \frac{(z_{k+1} - m_{k+1})^2}{\sigma_{k+1}^2} \right],$$

причем $\ln \Lambda_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{\tilde{\sigma}_1^2}{\sigma_1^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{z_1^2}{2\tilde{\sigma}_1^2} - \frac{z_1^2}{2\sigma_1^2} \right).$

Апостериорные оценки $\hat{V}_k$ выдаются потребителю в случае принятия на n -м шаге гипотезы $\theta = 1$.

Экспериментальные исследования полученного алгоритма показали его эффективность в различных ситуациях.

1. Фомин В.Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. – М.: Наука, 1984 – 286 с.

УДК 004

АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Т.А. Заяц, О.И. Еськова

Белорусский торгово-экономический университет,
Беларусь, Гомель, *za-t-a@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы использования компьютерных программ для реализации экспериментов на имитационной модели. Приводятся достоинства и недостатки имитационных моделей, а также примеры имитационных моделей, реализованных в программном пакете GPSSWorld

Ключевые слова: компьютерное моделирование, имитационная модель, GPSS World, эксперимент, процедура ANOVA.

ASPECTS OF COMPUTER MODELING SIMULATION MODELS

T.A. Zayats

Belarusian University of Trade and Economics,
Belarus, Gomel, , *za-t-a@yandex.ru*

The summary. The paper discusses the use of computer programs for the implementation of experiments on a simulation model. Advantages and disadvantages of simulation models are given, as well as examples of simulation models implemented in the GPSS World software package.

Keywords: computer simulation, simulation model, GPSS World, experiment, ANOVA procedure.

Современные экономические и социальные системы являются сложными системами. В них протекает огромное количество процессов, на систему воздействует большое количество факторов, часть из которых являются случайными. В большинстве систем одним из элементов являются люди, поведение которых сложно формализовать. Поэтому для исследования таких систем наиболее приемлемым является метод моделирования. Суть метода заключается в использовании модели для изучения самого объекта. Модель представляет собой описание исследуемого объекта. Однако, описывает не все, а только основные свойства объекта. Акцентирование не на всех, а только на существенных свойствах значительно упрощает процесс исследования.

Весь набор математических моделей условно разделяется на аналитические и имитационные. Аналитическая модель описывает исследуемый объект в виде алгебраических, ин-

тегральных, дифференциальных уравнений и логических условий, переменных и функций. Очень часто для получения результатов на исследуемой модели приходится прибегать к введению целого ряда упрощений. Такое упрощение описания процессов, протекающих в реальной системе, приводит к тому, что результаты, полученные в ходе исследования модели значительно отличаются от результатов, полученных в ходе эксперимента на реальном объекте. Имеет место несоответствие модели реальному объекту: модель оказывается слишком грубым приближением действительности и результаты моделирования не являются адекватными и не могут быть применены на практике. Для более эффективного исследования сложных систем, особенно тех, на функционирование которых оказывают существенное влияние случайные факторы, является метод имитационного моделирования.

Имитационное компьютерное моделирование заключается в исследовании системы с помощью компьютерных (вычислительных) экспериментов на имитационной модели. В качестве имитационной модели выступает программа или алгоритм, позволяющая имитировать на компьютере поведение отдельных элементов реальной системы и связи между ними в течение заданного интервала времени моделирования. Т.е. имитация рассматривается как наблюдение во времени за характеристиками системы.

Существует довольно большое количество систем имитационного моделирования. Известно порядка 500 различных систем. Это вызвано активным применением имитационного моделирования в различных предметных областях, ориентацией на различные типы систем (дискретные или непрерывные), использованием различных типов компьютеров и способов имитации.

Компьютерное имитационное моделирование является одним из самых мощных инструментов анализа и проектирования, которым располагают специалисты, ответственные за разработку и функционирование сложных технологий и производств. Компьютерное моделирование дает возможность экспериментировать с объектами в тех случаях, когда делать это на реальном объекте практически невозможно или нецелесообразно.

Сущность методологии компьютерного моделирования состоит в замене исследуемого объекта его «образом». Образ представляет собой некоторую математическую модель, которая в дальнейшем реализуется в программу (имитационную модель), написанную на специальном языке. И процесс исследования системы заключается в проведении компьютерных (вычислительных) экспериментов на имитационной модели. Этот метод наиболее эффективен для исследования сложных систем, на функционирование которых существенное влияние оказывают случайные факторы (стохастических систем).

К достоинствам компьютерного имитационного моделирования можно отнести:

- 1) многообразие классов решаемых задач;
- 2) наглядность;
- 3) исследование системы с различным уровнем детализации;
- 4) анализ характеристик системы в динамике.

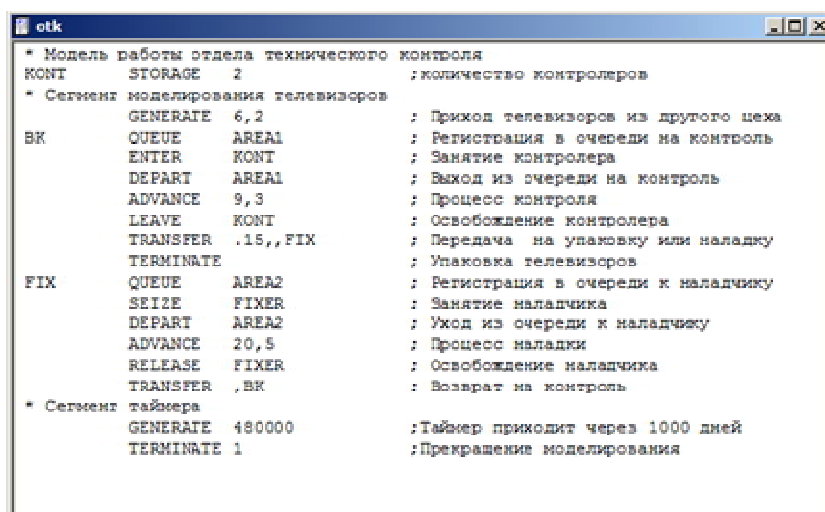
Имитационная модель может быть построена и реализована на алгоритмических языках высокого уровня и специальных языках моделирования. Применение универсальных языков программирования при реализации имитационных моделей позволяет исследователю достигнуть гибкости при разработке, отладке и испытании модели. Однако специализированные языки моделирования, ориентированные на определённую предметную область, являются языками более высокого уровня, поэтому дают возможность с меньшими затратами создавать программы моделей для исследования сложных систем. Специализированные языки моделирования делят на три группы, соответствующие видам имитации: для непрерывных, дискретных и комбинированных процессов [1].

Для имитационного моделирования сложных систем широкое распространение получил пакет моделирования дискретных систем GPSS World – General Purpose Simulation

System (общецелевая система моделирования). Разработчиком программного продукта является компания Minuteman (США).

Программный пакет GPSS World имеет оконный интерфейс. Программирование моделей выполняется на языке GPSS [2]. В пакете имеется полный набор средств для реализации всех этапов имитационного моделирования: редактор, шаблоны; управление таймером модельного времени; средства автоматического сбора статистики по проведенным экспериментам на модели с изменяемыми параметрами; средства отладки модели; средства визуального отображения процесса моделирования и представления результатов в виде таблиц и графиков.

На рисунке 1 представлен пример имитационной модели контроля качества производства телевизоров на предприятии, написанной на языке GPSS.



```

* Модель работы отдела технического контроля
KONT STORAGE 2 ; количество контролеров

* Сегмент моделирования телевизоров
BK GENERATE 6,2 ; Приход телевизоров из другого цеха
  QUEUE AREA1 ; Регистрация в очереди на контроль
  ENTER KONT ; Занятие контролера
  DEPART AREA1 ; Выход из очереди на контроль
  ADVANCE 9,3 ; Процесс контроля
  LEAVE KONT ; Освобождение контролера
  TRANSFER .15,,FIX ; Передача на упаковку или наладку
  TERMINATE ; Упаковка телевизоров

FIX QUEUE AREA2 ; Регистрация в очереди к наладчику
  SEIZE FIXER ; Занятие наладчика
  DEPART AREA2 ; Уход из очереди к наладчику
  ADVANCE 20,5 ; Процесс наладки
  RELEASE FIXER ; Освобождение наладчика
  TRANSFER ,BK ; Возврат на контроль

* Сегмент таймера
GENERATE 480000 ; Таймер приходит через 1000 дней
TERMINATE 1 ; Прекращение моделирования
  
```

Рис. 1. Модель работы отдела технического контроля

На рисунке 2 изображен отчет, полученный по итогам одного прогона в GPSS World.

otk16.1 - REPORT

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
BK	1	GENERATE	80050	0	0
	2	QUEUE	94374	0	0
	3	ENTER	94374	0	0
	4	DEPART	94374	0	0
	5	ADVANCE	94374	1	0
	6	LEAVE	94373	0	0
	7	TRANSFER	94373	0	0
	8	TERMINATE	80048	0	0
FIX	9	QUEUE	14325	0	0
	10	SEIZE	14325	0	0
	11	DEPART	14325	0	0
	12	ADVANCE	14325	1	0
	13	RELEASE	14324	0	0
	14	TRANSFER	14324	0	0
	15	GENERATE	1	0	0
	16	TERMINATE	1	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
FIXER	14325	0.596	19.982	1	80049	0	0	0	0

QUEUE	MAX CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY	
AREA1	7	0	94374	40831	0.412	2.09%	3.692	0
AREA2	8	0	14325	5994	0.412	13.790	23.711	0

STORAGE	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE. C.	UTIL.	RETRY	DELAY
KONT	2	1	0	2	94374	1	1.769	0.885	0	0

Рис. 2. Отчет по итогам моделирования

В моделях, написанных на языке GPSS, можно учесть большое количество факторов и отказаться от многих ограничений и допущений. Язык PLUS, встроенный в GPSS World, включает в себя не только набор стандартных процедур (например, процедуры-функции формирования случайных чисел с экспоненциальным или нормальным распределением), но и позволяет определять процедуры пользователя. Особый класс процедур пользователя называется Экспериментом (EXPERIMENT). Эксперимент позволяет записать на языке PLUS программу управления прогонами и обработки результатов экспериментов [3]. Программа Эксперимента может быть составлена как непосредственно программистом, так и автоматически – с помощью диалога через меню Edit/Insert Experiment. В GPSS можно автоматически сгенерировать программы экспериментов двух типов: скрининг-эксперимент связан с определением наиболее значимых факторов, влияющих на состояние системы, и оптимизационный эксперимент, который позволяет определить наилучшие значения влияющих факторов. Результаты эксперимента представляются в виде таблицы. Наблюдаемые значения критерия Фишера (F for only main Effects) рассчитываются только для главных факторов (не рассчитываются для взаимодействий). Их сравнивают с критическим значением (Critical value of F). Если наблюдаемое значение больше критического, то признается, что фактор оказывает влияние на результат.

Часто при моделировании недостаточно значений, выводимых в стандартном отчете. Необходимо фиксировать большие объемы информации. Для этого есть две возможности:

1) выводить результаты моделирования в файл, а затем обрабатывать их с помощью других программ (например, с помощью MS Excel или пакета программ для статистического анализа данных STATISTICA);

2) записывать результаты прогонов модели в матрицу сохраняемых величин, а затем обрабатывать эту матрицу с помощью процедуры ANOVA.

Процедура ANOVA входит в состав программного пакета GPSS World и предназначена для анализа результатов экспериментов. Она позволяет провести факторный анализ (причем можно использовать до 6 факторов и до 3 степеней взаимодействий) и позволяет оценить степень значимости каждого фактора или взаимодействия [4]. Кроме того, процедура ANOVA позволяет для каждого уровня фактора определить среднее значение по всем репликам и 95% доверительный интервал.

Написанные с помощью языка GPSS модели получаются более адекватными исследуемой системе, чем аналитические.

Библиографический список

1. Кобелев, Н.Б. Основы имитационного моделирования сложных экономических систем./Н.Б. Кобелев// М.: Дело, 2013.– 336 с.
2. Томашевский В. Имитационное моделирование в среде GPSS./В. Томашевский// М.: Бестселлер. - 2003. - 416 с.
3. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем./Е.М. Кудрявцев// М.: ДМК «Пресс». - 2004.- 320 с.
4. Заяц,Т.А.// Материалы Международной научно-практической конференции «Моделирование в технике и экономике», Витебск, 23-24 марта 2016.// Витебск, Витебский государственный технологический университет, 2016.– С. 72-74.

УДК 537.521; ГРНТИ 27.35.51

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ЧАСТИЦ

Ю.А. Юдаев

*Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева,
Российская Федерация, Рязань, yu.yudaev@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматривается математическая модель формирования низкотемпературной плазмы методом частиц.

Ключевые слова: математическая модель, плазма, частицы в ячейках, формирование заряженных частиц.

MODELING THE FORMATION PROCESS LOW-TEMPERATURE PLASMA BY PARTICLE METHOD

Y.A. Yudaev

*Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev,
Russia, Ryazan, yu.yudaev@mail.ru*

The summary. The paper considers a mathematical model for the formation of a low-temperature plasma by the particle method.

Keywords: mathematical model, plasma, particles in cells, formation of charged particles..

Вычислительные методы «частицы в ячейках» («particles in cells»), или методы «частиц», широко используются при моделировании случайных процессов с большой степенью детерминирования. Особенностью этих методов является дискретизация моделируемого объекта в виде конечного множества отдельных элементов-частиц, взаимодействующих друг с другом в пространстве координат, энергии и времени. В основу этих методов положены дифференциальные уравнения в частных производных и методы их решения [1-11].

Моделирование методом частиц проводилось для определения различных факторов влияющих на процесс формирования низкотемпературной плазмы газового разряда между двумя электродами. Давление наполняющего газа и расположение электродов, катода и анода, в пространстве позволяло сделать некоторые допущения. Во-первых, предполагалось, что длина свободного пробега электронов соизмерима с межэлектродным расстоянием. Во-вторых - концентрация атомов (молекул) газа и степень его ионизации не приводили к рекомбинации электронов и ионов в промежутке в момент образования плазмы. В некоторых типах плазменных приборов, например, в защитных газонаполненных разрядниках, расстояние между электродами составляет величину $d \approx 1$ мм, диаметр $D \approx 10 \div 30$ мм, давление находится в диапазоне $p = 1 \cdot 10^2 \div 3 \cdot 10^4$ Па. Межэлектродное расстояние $d_{ак}$ соответствует условию $d_{ак} < D$. Это позволило пренебречь рекомбинацией электронов и ионов на стенках камеры при моделировании формирования плазмы.

Математическое представление физической модели связано с учетом свойств симметрии. Моделирование проводилось в цилиндрической системе координат, в которой направленные скорости электронов $V_e(\mathbf{r})$ и ионов $V_i(\mathbf{r})$ совпадали с осью z .

Для полной постановки задачи к физической модели необходимо добавить начальные и краевые условия, определить область изменения переменных, входящих в систему уравнений. Решение задачи следует искать в пространстве Ω , ограниченном размерами электродов и разрядного канала:

$$0 \leq z \leq Z_a; \quad 0 \leq r \leq R_k; \quad R_k \leq Z_a,$$

где Z_a – межэлектродное расстояние катод-анод;

R_k - радиус катода.

Изменения направленных скоростей электронов, ионов и быстрых нейтралов, с учетом того, что заряженные частицы рассматриваются, как моноэнергетические группы и их концентрации $n_{n,e,i}$ находятся в диапазонах:

$$0 \leq |V_{n,e,i}| \leq \left(\frac{2eU_a}{m_{n,e,i}} \right)^{1/2}; \quad n_{0,e,i} \leq n_{n,e,i} \leq n_z,$$

где $V_{n,e,i}$ - направленные скорости нейтралов, электронов и ионов;

e - заряд электрона;

$m_{n,e,i}$ - масса нейтрала, электрона, иона;

$n_{0e,i}$ - начальная концентрация электронов и ионов в пространстве;

n_Γ - концентрация наполняющего газа.

Пространства координат z и энергий E разбивались на фиксированное количество зон z_i и E_j , которые создавали координатно-энергетическую сетку, показанную на рис. 1. Координатное пространство от катода до анода ($0 < z < d_{ka}$) и диапазон энергий от 0 до бесконечности ($0 < E < \infty$) разбиваются соответственно на N и M малых областей Z_i и E_j . Максимальный ток на участке падения потенциала соответствует нулевой напряженности поля у катода.

Область положительных энергий соответствует движению частиц в направлении поля. Попадание частиц в отрицательную энергетическую полуплоскость соответствовало изменению направления вектора скорости на противоположное.

В связи с тем, что невозможно проследить траекторию каждого отдельно взятого электрона или иона, то движение и взаимодействие всех частиц одного сорта в пределах координатно-энергетической ячейки описывалось с помощью одной модельной частицы, поведенческие характеристики которой усреднялись по всем вероятностным процессам.

Движение модельной частицы внутри ячейки учитывалось только при попадании внутрь нее некоторого количества электронов (ионов). В отсутствие этого условия частица находилась в «режиме ожидания», что соответствовало ее положению в левом нижнем углу координатно-энергетической ячейки.

Подобная схема строилась для всех участников процесса развития газового разряда. Рассмотрим ее на примере электронов. Движение модельной частицы в пределах своих координатно-энергетических ячеек носит циклический характер. При пересечении частицей-представителем границы ячейки по координате или по энергии, она занимает свое исходное положение в левом нижнем углу. Непрерывное перемещение по промежутку электронов с различными энергиями представляется дискретным движением отдельных групп электронов из одной координатно-энергетической ячейки в другую.

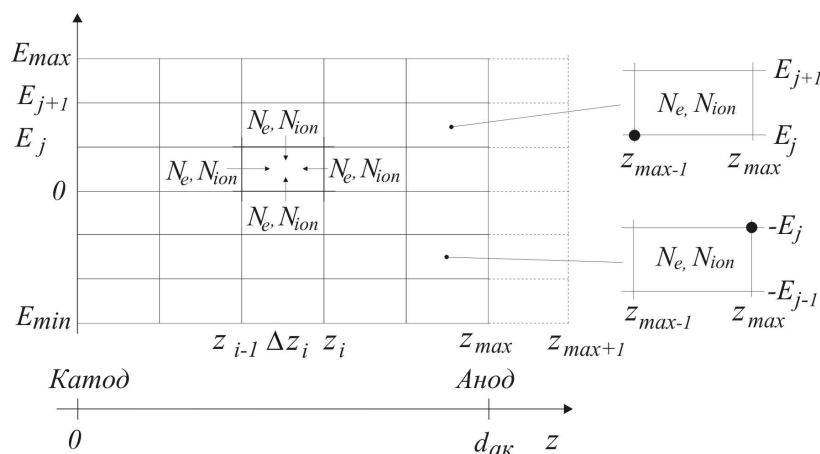


Рис. 1. Представление межэлектродного пространства в виде координатно-энергетических ячеек.
 N_e, N_i - количество электронов и ионов в k -ых координатно-энергетических ячейках

Траектории частиц внутри ячейки рассчитывались методами классической динамики на основании следующих допущений:

электроны и атомы газа представлялись в виде химически нейтральных частиц;

движение электрона в каждой точке поля определялось распределением электрического поля, создаваемого потенциалом на электродах и объемным зарядом компонентов формирующейся плазмы;

выбор нового направления вектора скорости после упругого столкновения с атомом вычислялся методом Монте-Карло в соответствии с известной функцией углового распределения для данного газа.

При отсутствии в промежутке частиц модельная частица, летящая со скоростью, соответствующей энергии ионизации газа v_{grj} , преодолевает расстояние, равное длине свободного пробега λ_e , за время t_λ :

$$t_\lambda = \frac{-V_j + \sqrt{V_j^2 + 2a\lambda_e}}{a},$$

$$a = \frac{eE}{m_e},$$

где a - ускорение модельной частицы;

E - напряженность электрического поля внутри промежутка.

Дискретизация расчетной схемы по времени задавалась целым числом N :

$$\Delta t = \frac{\tau}{N}.$$

Для каждого момента времени t_i известны значения координаты Z_i , скорости V_i и ускорения a_i , исходя из которых, можно найти новое значение координаты Z_{i+1} через интервал времени Δt :

$$Z_{i+1} = Z_i + V_i \Delta t + \frac{a_i (\Delta t)^2}{2}.$$

Новая координата используется для нахождения нового ускорения:

$$a_{i+1} = \frac{e[U(Z_{i+1}) - U(Z_i)]}{M_e(Z_{i+1} - Z_i)},$$

которое вместе с a_i используется для получения новой скорости V_{i+1}

$$V_{i+1} = V_i + \frac{a_{i+1} + a_i}{2} \Delta t.$$

Длины свободного пробега электронов и ионов определялись по экспериментальным сечениям ионизации и упругого соударения.

В момент соударения вычисляются все составляющие вектора скорости по рассматриваемым координатам и в дальнейшем все операции производятся с составляющей вектора скорости V_z .

Решение уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} = -\frac{\rho(z)}{\epsilon \epsilon_0}$$

на каждом временном интервала Δt осуществлялось численными методами. При этом конечно-разностная аппроксимация уравнения Пуассона для разработанной координатно-энергетической модели выглядит следующим образом:

$$U(z_i) = \frac{1}{2} \left(U(z_{i-1}) + U(z_{i+1}) + \left(\frac{\rho_{ion}(z_i) - \rho_e(z_i)}{\varepsilon_0} \right) \Delta z^2 \right),$$

$$\rho_e(z_i) = en_e(z_i) = \frac{e}{V_i} \sum_{j=E_{\min}+1}^{E_{\max}} N_e(z_i, E_j),$$

$$\rho_{ion}(z_i) = en_{ion}(z_i) = \frac{e}{V_i} \sum_{j=E_{\min}+1}^{E_{\max}} N_{ion}(z_i, E_j),$$

где $\rho_e(z_i)$, $\rho_{ion}(z_i)$ – плотность объемного заряда электронов и ионов в элементе объема V_i слоя z_i , $N_e(z_i, E_j)$ и $N_{ion}(z_i, E_j)$ – количество электронов и ионов в ячейке (z_i, E_j) .

Плотность объемного заряда в элементе объема V_i межэлектродного промежутка равна:

$$\rho(z_i) = \frac{e}{\Delta z_i S} \left(\sum_{j=E_{\min}+1}^{E_{\max}} [N_{ion}(z_i, E_j) + N_e(z_i, E_j)] \right).$$

Значения $N_e(z_i, E_j)$ и $N_{ion}(z_i, E_j)$ определяются процессами, описанными в предыдущем разделе. Перераспределением заряженных частиц в объеме находятся с использованием предлагаемой координатно-энергетической модели.

Концентрация ионов, образовавшихся за интервал времени Δt в результате ударной ионизации газа электронами, определяется по формуле:

$$n_{ion} = \frac{j \Delta t}{e} Q_{i0}(U) p,$$

где j – плотность тока;

e – заряд электрона;

p – давление газа в промежутке;

Δt – временной шаг;

$Q_{i0}(U)$ – сечение ионизации атомов или молекул наполняющего газа при единичном давлении.

Ионизация начиналась в момент времени, когда энергия частицы превышала энергию необходимую для ионизации газа. Предполагалось, что энергию ионизации одновременно набирают все находящиеся в ячейке электроны. Плотность тока в некоторой ячейке (z_i, E_j) определялась по формуле

$$j(z_i, E_j) = n_e(z_i, E_j) e V_e(z_i, E_j) = \frac{N_e(z_i, E_j)}{\Delta z_i S} e V_e(z_i, E_j),$$

где $n_e(z_i, E_j)$ – концентрация электронов в ячейке (z_i, E_j) ;

$V_e(z_i, E_j)$ – скорость модельной частицы электронов в момент ионизации;

Δz_i – длина ячейки по координате;

S – площадь поперечного сечения разряда.

В этом случае уравнение концентрации ионов преобразуется к виду:

$$n_{ion}(z_i, E_j) = \frac{N_e(z_i, E_j)}{\Delta z_i S} V_e(z_i, E_j) \Delta t Q_{i0}(U) p.$$

В результате ионизации газа возрастает концентрация положительных ионов. Движение ионов в межэлектродном пространстве описывалось с помощью модельных частиц ио-

нов, для которых строилась схема движения подобная электронам. Процесс развития разряда рассматривался и во времени. Начиная с момента первоначальной ионизации, на каждом временном шаге моделировались состояния электронной и ионной подсистем в координатно-энергетической сетке.

Моделирования методом частиц при анодных напряжениях до 1 кВ и межэлектродном расстоянии 1 мм проводилось при временном шаге, находящемся в интервале 10^{12} - 10^{14} с. Результаты моделирования показаны на рисунке 2.

Расчет продолжался до установления в промежутке постоянного значения тока, определяемого напряжением источника питания, концентрацией заряженных частиц и сопротивлением, ограничивающим электрический ток. Полученные расчеты согласуются с результатами лабораторного эксперимента, что подтверждает корректность построенной модели, реализованной по методике «частицы в ячейке».

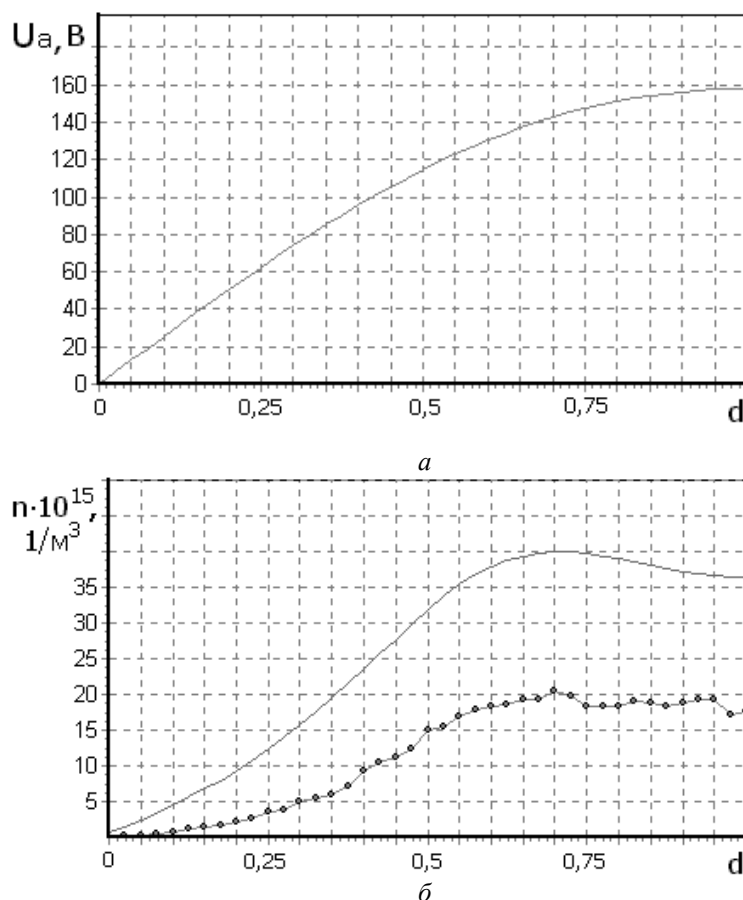


Рис. 2. Распределение потенциала (а) и концентрации ионов и электронов (б), соответствующие $t = 4,71 \cdot 10^{-8}$ с после подачи анодного напряжения

Библиографический список

1. Белоцерковский, О.М. Метод крупных частиц в газовой динамике: Вычислительный эксперимент [Текст]/О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов//М. Наука. 1982. 392 с.
2. Анисимов, В.Ф. Моделирование процесса формирования импульсного разряда в двухэлектродном промежутке с холодным катодом методом частиц [Текст]/ Н.П. Богданова, П. В. Сенин П.В., Ю.А. Юдаев Ю.А.//Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2003. Т. 67. № 9. С. 1322-1327.
3. Сенин, П.В. Метод моделирования процесса возникновения импульсного разряда в смесях газов [Текст]/ Ю.А. Юдаев//Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2003. Т. 67. № 9. С. 1328-1329.
4. Арёфьев, А.С. Способ увеличения плотности тока псевдоискрового разряда в приборах с холодным катодом [Текст]/ Н.П. Богданова, Ю.А. Юдаев//Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2003. Т. 67. № 9. С. 1291-1296.

5. Анисимов, В.Ф. Динамическое напряжение пробоя в неуправляемых разрядниках [Текст]/ Ю. В. Киселев, Ю.А. Юдаев//Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2003. Т. 67. № 9. С. 1302-1305.
6. Горохова, М.Н. Моделирование теплового процесса нанесения покрытий [Текст]/Ю.А. Юдаев, М.Л. Санникова, А.А. Горохов//Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 90. С. 397-407.
7. Юдаев, Ю.А. Механизм пробоя газоразрядных коммутаторов тока [Текст]/Ю.А. Юдаев//Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2003. Т. 67. № 9. С. 1279-1283.
8. Арефьев, А.С. Смесь газов для наполнения газоразрядных приборов [Текст]/А.С. Арефьев, Т.Н. Москвичева, П.В. Сенин, Ю.А. Юдаев//Патент на изобретение RUS № 2146405. Заявка № 98121250/09 от 23.11.1998. Оpubл. 10.03.2000.
9. Arefjev, A.S., Modelling of vacuum breakdown formation [Текст]/A.S. Arefjev, V.A. Antoshkin, Yu.A. Yudaev//C6: International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Xian, China, 2000. С. 37-38.
10. Arefjev, A.S. Advanced numerical simulation of low-pressure plasma formation in two-electrode gap with cold-cathode [Текст]/A.S. Arefjev, V.A. Antoshkin, P.V. Senin, Yu.A. Yudaev// Journal De Physique. IV : JP Scs99: The 1999 International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems. sponsors: European Science Foundation, CEADAM, Centre National de la Recherche Scientifique, Direction Generale de L'Armement. Saint-Malo, France, 2000.
11. Юдаев, Ю.А. Численные исследования процесса формирования разряда в управляемых газоразрядных коммутаторах тока низкого давления [Текст]/ Ю.А. Юдаев//Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2000. Т. 64. № 7. С. 1307.

УДК 519.957; ГРНТИ 27.31.21

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ СИНУС-ГОРДОНА С ГИСТЕРЕЗИСНЫМИ СВЯЗЯМИ

А.В. Толкачев*, А.В. Толкачев**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, alex82tol@yandex.ru,

**Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
Российская Федерация, Воронеж, tolkachev.akim@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается нелинейная динамическая система, представляющая собой набор нелинейных осцилляторов, связанных пружинами (система синус-Гордона) с гистерезисными блоками (гистерезисная нелинейность рассматривается в рамках модели Боука-Вена). В частности, исследуются волновые процессы (солитонные возбуждения) с учетом гистерезисной природы связи между отдельными элементами системы.

Ключевые слова: модифицированная система синус-Гордона, солитон, гистерезис.

SIMULATION OF A DISCRETE SINE-GORDON SYSTEM WITH HYSTERESIS CONNECTIONS

A.V. Tolkachev*, A.V. Tolkachev**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, alex82tol@yandex.ru,

**Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov,
Voronezh, Russian Federation, tolkachev.akim@mail.ru

Annotation. In this paper, we consider a nonlinear dynamic system that is a set of nonlinear oscillators connected by springs (the sine-Gordon system) with hysteresis blocks (the hysteresis nonlinearity is considered in the framework of the Boak-Wien model). In particular, wave processes (soliton excitations) are studied taking into account the hysteresis nature of the connection between individual elements of the system.

Keywords: modified sine-Gordon system, soliton, hysteresis.

Введение

До второй половины двадцатого века для описания различных физических явлений использовались в основном линейные или квазилинейные модели. Такой подход является достаточно простым и наглядным, но не всегда адекватным методом моделирования совре-

менных физических и технических систем. В рамках линейной парадигмы происходит декомпозиция исходной системы на ряд простых подсистем, влияние которых на совокупную динамику может быть учтено изолировано. Однако в дальнейшем стало понятно, что допущение о линейности модели приводит к потере важных качественных характеристик исследуемых явлений.

Известно, что в случае нелинейной системы совокупность ее частей не определяет в полной мере особенности динамики и эволюции такой системы. Нелинейность проявляется в образовании новых структур, которые являются временно или пространственно-когерентными. Эти новые структуры представляют собой достаточно большие объекты, обладающие уникальными свойствами. Одним из результативных выводов указанного подхода является концепция солитонов [1].

Начало исследований солитонов связано с изучением распределения энергии в нелинейных цепочках связанных осцилляторов более известной как проблема Ферми-Паста-Улама. Важную роль в решении этой проблемы внесло использование методов компьютерного моделирования.

Одной из базовых моделей для исследования нелинейных процессов является модель синус-Гордона (физическая реализация которой представляет собой цепочку нелинейных осцилляторов, связанных пружинами, работающими на кручение) [2,3].

Еще одним из примеров сильно нелинейных систем, играющих значительную роль в современных исследованиях, является гистерезис. Гистерезисное поведение свойственно как для характеристик веществ (сегнетоэлектрики, ферромагнетики и так далее), так и для динамики множества механических систем (люфт, упор и так далее). Причем в механических системах гистерезисные нелинейности возникают вследствие старения материала и должны быть учтены на уровне моделирования динамики соответствующих систем. Учет гистерезиса в таких системах приводит к исследованию нелинейных операторно-дифференциальных уравнений, что представляет отдельную, сложную задачу.

Целью настоящей работы является исследование динамики колебательной системы со многими степенями свободы в условиях гистерезисной связи между отдельными звеньями такой системы. Именно, рассматривается модель синус-Гордона в случае, когда связи между маятниками содержит гистерезисную нелинейность. На основе численного моделирования изучается динамика солитоноподобного образования.

Система синус-Гордона с гистерезисными связями

Ниже рассматривается механическая система с гистерезисными связями, физическая модель которой показана на рисунке 1. Она представляет собой цепочку одинаковых маятников, нанизанных на струну и связанных пружинами. Принципиальное отличие рассматриваемой механической системы состоит в том, что в связь между двумя соседними маятниками включена гистерезисная нелинейность типа люфт. Отметим, что указанная система представляет собой модификацию системы синус-Гордона [4].

Пусть μ – масса маятника, его момент инерции – μl^2 , длина – l , постоянная кручения пружины – κ . При отклонении m -го маятника из положения равновесия на угол θ_m на маятник действует момент силы тяжести $\mu g l \sin \theta_m$ и момент силы кручения со стороны соседних пружин $-\kappa(\theta_m - \theta_{m-1}) + \kappa(\theta_{m+1} - \theta_m)$. Поскольку в систему включена гистерезисная нелинейность, уравнение движения можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu l \ddot{\theta}_m = -\mu g l \sin \theta_m + \omega_m^{left} + \omega_m^{right}, \\ \omega_m^{left} = L[\omega_m^{left}(t_0); y_m^{left}(t_0)] y_m^{left}(t), \\ y_m^{left}(t) = -\kappa(\theta_m - \theta_{m-1}), \\ \omega_m^{right} = L[\omega_m^{right}(t_0); y_m^{right}(t_0)] y_m^{right}(t), \\ y_m^{right} = \kappa(\theta_{m+1} - \theta_m), \end{array} \right. \quad (1)$$

где зависящие от времени выходы ω_m^{left} , ω_m^{right} и входы y_m^{left} , y_m^{right} (эти входы являются соответствующими моментами, влияющими на один маятник с левой и правой сторон относительно соседнего маятника соответственно) являются соответствующими выходами и входами для физически реализуемого преобразователя $L[\cdot]$. Следуя известному подходу Красносельского-Покровского [5] к описанию гистерезисных операторов, указанные преобразователи посредством полугруппового тождества, а также специальной предельной конструкции могут быть доопределены на всех монотонных входах.

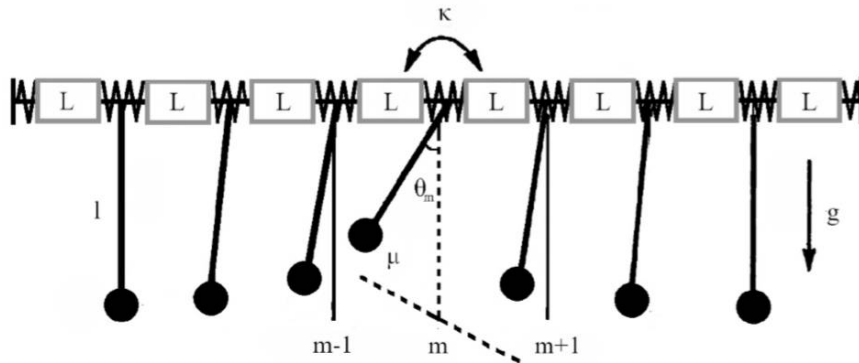


Рис. 1. Система синус-Гордона с гистерезисными связями

Численный эксперимент

Известно, что операторная трактовка гистерезисной нелинейности подразумевает негладкость соответствующего оператора. Поэтому для численного моделирования используем аппроксимацию люфта в рамках модели Боука-Вена [6,7,8,9]. В таком случае система синус-Гордона с гистерезисной нелинейностью примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu l \ddot{\theta}_m = -\mu g l \sin \theta_m - \alpha \kappa (\theta_m - \theta_{m-1}) + (1-\alpha) \kappa z_m^{left} + \alpha \kappa (\theta_{m+1} - \theta_m) + (1-\alpha) \kappa z_m^{right}, \\ \dot{z}_m^{left} = \left[A - |z_m^{left}|^n \left(\beta + \operatorname{sgn} \left(z_m^{left} (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_{m-1}) \right) \right) \gamma \right] (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_{m-1}) \\ \dot{z}_m^{right} = \left[A - |z_m^{right}|^n \left(\beta + \operatorname{sgn} \left(z_m^{right} (\dot{\theta}_{m+1} - \dot{\theta}_m) \right) \right) \gamma \right] (\dot{\theta}_{m+1} - \dot{\theta}_m) \end{array} \right. \quad (2)$$

где A , β и γ – безразмерные параметры, которые определяют форму и размер петли гистерезиса, а $n \geq 1$ – скалярная величина, регулирующая гладкость перехода от упругого отклика к пластическому отклику. Слагаемое $(1-\alpha)\kappa z_m^{\dots}$ является гистерезисной составляющей первого уравнения, где $0 < \alpha < 1$, $\kappa > 0$. Гистерезисная часть включает в себя безразмерную переменную $z_m^{\dots}$, которая является решением нелинейного дифференциального уравнения первого порядка (второе и третье уравнение в системе (2) соответственно).

Проведем численное моделирование динамики рассматриваемой механической системы, описываемой уравнениями (2). А именно, получим численные решения задачи Коши для (2) с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка.

Отметим, что в результате интегрирования такой системы ожидаемо появление солитоноподобных решений. Уединенные волны, являющейся решением для (2), рассматриваются как динамические объекты, которые в течение длительного времени моделирования сохраняют энергию. Цепочка имеет конечную длину $m=100$ (напомним, что рассматривается дискретная система), причем концы закреплены. Начальные условия для маятников

$$\theta_1(t_0), \dot{\theta}_1(t_0), \dots, \theta_{m-1}(t_0), \dot{\theta}_{m-1}(t_0), \theta_m(t_0), \dot{\theta}_m(t_0)$$

генерируют множество солитонных решений, движущихся с различными скоростями по (m, t) -плоскости с отражением на концах цепочки ($m=1, m=100$). Для параметров гистерезисных блоков, формализуемых посредством модели Боука-Вена, $z_m^{left}(t_0), z_m^{right}(t_0)$ начальные условия по умолчанию нулевые.

Чтобы изучить влияние гистерезисных связей в системе рассмотрим случай, когда возбуждаются колебания 25-го ($\theta_{25}(t_0) = 2\pi, \dot{\theta}_{25}(t_0) = 0$) и 75-го маятников ($\theta_{75}(t_0) = \pi, \dot{\theta}_{75}(t_0) = 0$) с соответствующими начальными условиями. При указанных начальных условиях в цепочке возбуждаются колебания соответствующих компонент (рис. 2, панель левая). В том случае, когда гистерезис в связях учитывается (рис. 2, правая панель), наблюдается пространственная локализация колебаний.

Рассмотрим более подробно эволюцию состояний $(\theta_m(t), \dot{\theta}_m(t))$ компонент цепочки в окрестности 25-го маятника. На рисунке 3 представлены фазовые портреты для 24-го, 25-го, 26-го маятника. Как следует из представленных результатов, в отсутствие гистерезисных связей ($\alpha=1$) динамика маятников демонстрирует сложную колебательную структуру. Однако в присутствии гистерезисных блоков в связях ($\alpha=0.5, \beta=0.1, \gamma=0.9$) динамика в окрестности 25-го маятника регуляризуется и имеет место предельный цикл. Для правой панели сверху на рисунке 3 показана соответствующая петля гистерезиса, полученные как решение второго уравнения в системе (2).

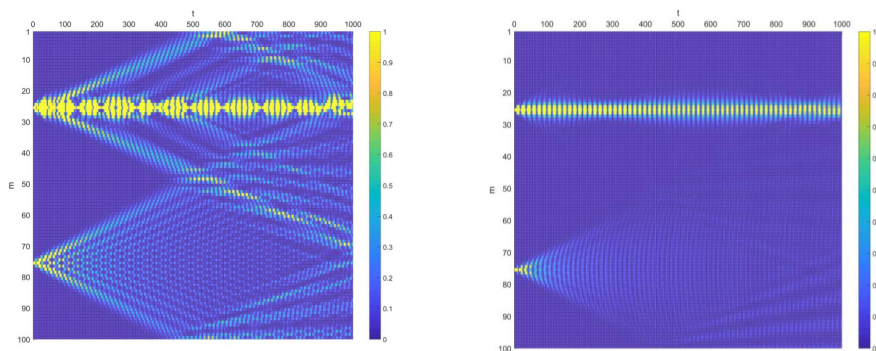


Рис. 2. Моделирование динамики локализованных (солитоноподобных) колебаний маятников в цепочке без гистерезиса (левая панель) и с гистерезисом (правая панель) в связях

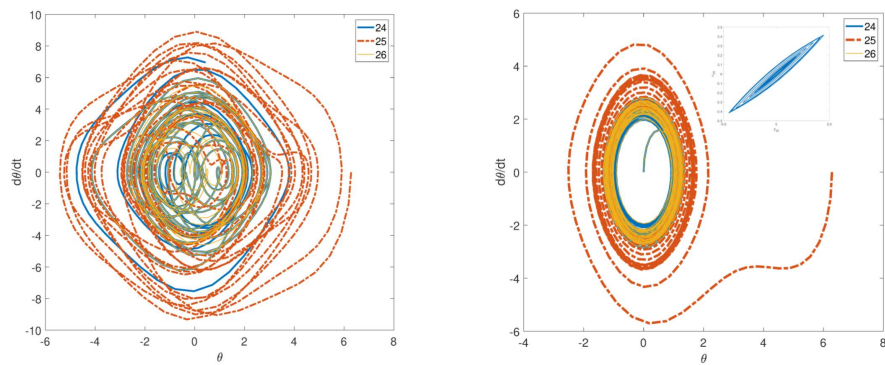


Рис. 3. Фазовые портреты маятников 24-го, 25-го, 26-го без гистерезиса (верхняя панель) и с гистерезисом (нижняя панель) в звеньях.

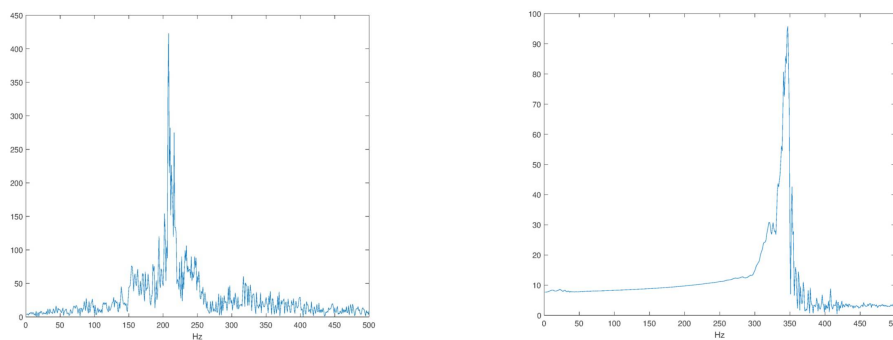


Рис. 4. Спектр колебаний 25-го маятника без гистерезиса (верхняя панель) и с гистерезисом (нижняя панель) в цепи

Кроме того, исследуем влияние гистерезисной природы связей между маятниками посредством методов спектрального анализа. Произведем преобразование Фурье для колебательных движений 25-го маятника с учетом гистерезиса ($\alpha = 0.5, \beta = 0.1, \gamma = 0.9$) и без ($\alpha = 1$), результаты чего представлены на рис. 4. Как следует из результатов, спектр колебаний 25-го маятника модифицируется при включении гистерезисных связей, именно, гистерезис в такой системе играет роль фильтра, гасящего частоты, отвечающие малоамплитудным колебаниям, при этом выделяя основную частоту.

Заключение

В настоящей работе исследована динамика колебательной системы со многими степенями свободы в условиях гистерезисной связи между отдельными звеньями. Рассматриваемая система может быть классифицирована как модифицированная механическая модель системы синус-Гордона в случае, когда связи между маятниками содержат гистерезисную нелинейность. Гистерезисная нелинейность формализовалась посредством модели Боука-Вена, допускающей достаточно простую численную реализацию решения системы дифференциальных уравнений, отвечающих моделируемой системе. На основе численного моделирования была исследована динамика солитонного решения в указанной системе с учетом гистерезисных связей. Кроме того, результаты численного моделирования демонстрируют регуляризующую роль гистерезисных связей в характере колебательных движений рассматриваемой системы. Отмечены фильтрующие свойства гистерезисных связей с точки зрения спектрального анализа колебательных движений отдельных компонент системы.

Библиографический список

1. Филипов А.Т. Многоликий солитон / А.Т. Филипов — Москва: Наука, 1990. — 288 с.

2. Заславский, Г.М. Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса/ Г.М. Заславский, Р.З. Сагеев. - Москва : Наука, 1988. - 368 с.
3. Скотт, Э. Нелинейная наука. Рождение и развитие когерентных структур / М. Скотт. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 560 с.
4. . Scott, A. C. A Nonlinear Kline-Gordon Equation / A. C. Scott // American Journal of Physics– 1969. – Vol. 37. – P. 53-61.
5. Красносельский М.А. Системы с гистерезисом/ М.А. Красносельский, А.В. Покровский — Москва: Наука, 1983. — 272 с
6. Charalampakis, A. E. The response and dissipated energy of Bouc-Wen hysteretic model revisited / A. E. Charalampakis // Archive of Applied Mechanics. – 2015. – Vol. 85. – P. 1209-1223.
7. Ikhouane, F. On the Hysteretic Bouc-Wen Model. Part I: Forced Limit Cycle Characterization / F. Ikhouane, J. Rodellar // Nonlinear Dynamics - 2005. - Vol. 42. - P. 63-78.
8. Tolkachev, A V. Sine-Gordon system with hysteretic links / A. V. Tolkachev, M E Semenov, P A Meleshenko, O OReshetova, A F Klinskikh, E A Karpov // Journal of Physics: Conf. Series – 2018 –Vol.-1096.
9. Meleshenko, P. A. Discrete hysteretic sine-Gordon model: soliton versus hysteresis / P A Meleshenko, A. V. Tolkachev, M E Semenov, A. V Perova, A. I. Barsukov, A F Klinskikh // MATEC Web of Conferences -2018- Vol. – 241.

УДК 537.634+53.06; ГРНТИ 27.33.17

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

М.Е. Ильин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, Ilyin.ime@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматривается математическая модель управляемой механической системы – проводник с током, помещенный в магнитное поле. Цель управления – получение закона движения системы с заданными динамическими и энергетическими характеристиками. Приводятся результаты синтеза управления на множестве кусочно-полиномиальных функций.

Ключевые слова: механическая система, интегро-дифференциальное уравнение, некорректная обратная задача, регуляризация, синтез управления.

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM CONTROL

M.E. Ilyin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, Ilyin.ime@yandex.ru*

The summary. The paper considers a mathematical model of a controlled mechanical system – a conductor with a current placed in a magnetic field. The purpose of the control is to obtain the law of motion of the system with the specified dynamic and energy characteristics. The results of control synthesis on a set of piecewise polynomial functions are presented.

Keywords: mechanical system, integro-differential equation, incorrect inverse problem, regularization, control synthesis.

В настоящей работе изучается принципиальная возможность управления механическим перемещением электромагнитной системы массой m , состоящей из проводника длиной l_Σ , включённого в состав замкнутой электрической цепи с активным сопротивлением R и индуктивностью L . Сам проводник помещён в магнитное поле с индукцией $\vec{B}$. В электрической цепи действует источник напряжения $U(t)$, посредством которого системе навязывается требуемый закон движения. Скорость перемещения проводника много меньше, чем собственные колебания электромагнитной системы. Поэтому будем придерживаться квазистационарного приближения. Это предполагает, что свободные колебания затухают достаточно быстро и движение полностью определяется внешним напряжением $U(t)$.

При пропускании тока $\bar{I}$ через проводник элементарной длины $d\bar{l}$ в магнитном поле на него действует сила Ампера $d\bar{F}_A \sim I[d\bar{l}, \bar{B}]$. С другой стороны, во всяком движущемся относительно магнитного поля проводнике возбуждается разность потенциалов (напряжённость электрического поля) $d\bar{F}_L \sim dl[\bar{v}, \bar{B}]$. Если электрический контур замкнут, то возникает и наведённый электрический ток, направление которого определяется правилом Ленца. Эти соображения позволяют записать два основных уравнения, объясняющих поведение такой системы в магнитном поле. Первое уравнение – правило Кирхгофа или закон сохранения заряда. В правой части уравнения сумма падений напряжений на всех участках замкнутой электрической цепи: индуктивности $L \frac{d\bar{I}}{dt}$ и активном сопротивлении $R\bar{I}$. В левой части – сумма напряжений, включённых в эту цепь: управляющего $\bar{E}_u = U(t)$ и наведённого $\bar{E}_L$

$$L \frac{d\bar{I}}{dt} + R\bar{I} = \bar{E}_u + \bar{E}_L.$$

Второе уравнение – второй закон Ньютона. В левой части уравнения – ускорение, приобретаемое системой и умноженное на массу. В правой – сумма всех сил, приложенных к рассматриваемой электромеханической системе – сила тяжести и сила Ампера. Силами трения пренебрегаем

$$m \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = m\bar{g} + l_\Sigma[\bar{I}, \bar{B}].$$

Доопределим неизвестные системы ещё одной величиной $\bar{v} = \frac{d\bar{r}}{dt}$ – скоростью поступательного движения. Выберем следующую геометрию изучаемой системы: прямолинейный проводник с током направим по оси Ox , напряжённость магнитного поля – по оси Oy , механическое перемещение по оси Oz . При таком выборе векторная система уравнений сводится к скалярному дифференциальному уравнению – к задаче Коши для линейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений при заданных начальных условиях

$$\frac{dY(t)}{dt} + AY(t) = F(t). \quad (1)$$

Неизвестной величиной в этой системе уравнения является векторная величина $Y(y) = (I(t) \ z(t) \ v(t))$, первая компонента $I(t)$ которой является током протекающим в обмотке, вторая компонента $z(t)$ определяет закон движения механической системы, а третья $v(t)$ – скорость перемещения этой же системы. Решение этой системы, зависящее от напряжения управляющего напряжения $U(t)$, имеет вид [1]

$$Y(t; U(t)) = \begin{pmatrix} I(t; U(t)) \\ z(t; U(t)) \\ v(t; U(t)) \end{pmatrix} = K(t, 0)Y^0 + \int_0^t K(t, \tau)F(\tau)d\tau,$$

с известной импульсной матрицей $K(t, \tau)$. Теперь, если $z_e(t)$ – искомый закон перемещения системы, то задача поиска управления $U(t)$ формулируется в виде, интегрального уравнения Вольтерра первого рода относительно неизвестного управления $U(t)$

$$K_{21}(t, 0)I^0 + K_{22}(t, 0)z^0 + K_{23}(t, 0)v^0 + \int_0^t \left(K_{21}(t, \tau) \frac{U(\tau)}{L} - K_{23}(t, \tau)g \right) d\tau = z_e(t), \quad (2)$$

или его операторного аналога $\mathcal{A}_z(U(t)) = z_e(t)$. Для остальных двух компонент (1), определяемых после решения (2), получаем $I(t) = \mathcal{A}_I(U(t))$ и $v(t) = \mathcal{A}_v(U(t))$. Трудности, возникающие в процессе решения уравнения (2) известны: отсутствие решения для произвольной правой части $z_e(t)$, его неустойчивость относительно параметров модели [2]. Существует и ещё одна особенность исследуемой модели, которая отличает её от традиционных моделей обратных задач: сам закон движения $z_e(t)$ только частично определён технологической формулировкой задачи.

Пусть один из законом перемещения (рабочий или прямой ход) описывается следующим образом. В начальный момент времени система находится в начале координат, имеет некоторую начальную скорость v^0 . Необходимо к фиксированному моменту времени t_0 переместить систему на заданное расстояние z_0 , таким образом, чтобы её скорость в этот момент времени $\frac{dz(t_0)}{dt}$ была наибольшей. Это приводит нас к экстремальной задаче

$$U: \mathcal{A}_z(U(t_0)) = z_0; \mathcal{A}_v(U(t_0)) \Rightarrow \max, \quad (3)$$

управления технологическим процессом. Эта система интегральных уравнений Фредгольма первого рода, которая требует привлечения методов решения обратных некорректных задач: сужение множества допустимых решений до компакта для выделения единственного решения $U(t)$ [3, 4].

Обратим внимание на структуру системы уравнений (1). Она такова, что удачный выбор закона перемещения позволяет определить и управляющее напряжение без решения уравнения. Если априори известен некоторый закон перемещения $z_e(t) = \varphi(t)$, то, подставив его во второе уравнение системы, определим величину тока

$$I(t) = \frac{m(\varphi''(t) + g)}{Bl_\Sigma}.$$

Теперь из первого уравнения системы получаем искомую величину управляющего напряжения в цепи

$$U(t) = \frac{m(L\varphi'''(t) + R(\varphi''(t) + g)) + (Bl_\Sigma)^2\varphi'(t)}{Bl_\Sigma}.$$

При таком подходе начальные условия дифференциального уравнения уже будут определяться только функцией $\varphi(t)$. Воспользуемся этим приёмом, чтобы подобрать требуемое управляющее напряжение. Функций, удовлетворяющих требуемым условиям, достаточно много. Выберем, например, такую - решение экстремальной задачи (3) ищется на множестве всех многочленов третьего порядка

$$\varphi(t) = -v_0 t - \frac{1}{2}at^2 - \frac{1}{6}bt^3, \quad (4)$$

в которой коэффициенты v_0, a, b – некоторые числовые величины, требующие своего уточнения (знаки выбраны, исходя из удобства истолкования результатов). Для ограничения множества поиска искомого управления (3) воспользуемся требованиями, которые налагаются на коэффициенты (4) прикладной постановкой задачи.

Исследуем свойства выбранной функции $z_e(t) = \varphi(t)$. Нетрудно убедиться, что $z_e(0) = \varphi(0) = 0$. Это означает, что начальное условие на перемещение заведомо выполняется. Производная перемещения в начальный момент времени равна $z'_e(0) = \varphi'(0) = -v_0$. Это значит, что и начальное условие на начальную скорость также выполнено. В первых, к моменту времени t_0 система сместится на расстояние $\varphi(t_0) = -z_0$.

Теперь определим требования и на параметры a и b функции (4). С прикладной точки зрения недопустимы возвратные движения и остановки системы в процессе прямого и обратного ходов. Такие режимы заведомо требуют большей величины подводимой мощности. С точки зрения функционального закона движения это означает, что функция $\varphi(t)$ должна быть на отрезке $[0, t_0]$ строго монотонной и возрастающей: монотонное возрастание скорости перемещения. Недопустимы интервалы не только изменения направления скорости, но и её уменьшения. С точки зрения свойств функции это означает, что функция $\varphi(t)$ на отрезке $[0, t_0]$ должна быть дифференцируемой, иметь дифференцируемую производную отрицательного знака, и эта производная убывает. Таким требованиям заведомо обладает функция (4) при $v_0 \geq 0, a \geq 0, a + bt_0 \geq 0$. Если начальная скорость $-v_0$ задана, то для определения двух величин a и b необходимы только два уравнения. Одно из них – это заданная величина перемещения в конечный момент времени. Условие минимизации (максимизации по модулю) скорости в конечной точке использовать нельзя, поскольку оно учтено при выборе параметров уравнения перемещения. Поэтому мы введём ограничение величину управляющего напряжения

$$U(t) = \frac{m(-Lb - R(a + bt) + Rg) + (Bl_\Sigma)^2 \left(-v_0 - at - \frac{1}{2}bt^2\right)}{Bl_\Sigma},$$

в момент времени t_0 (монотонность по времени гарантирует, что максимальное значение достигается именно в этот момент времени). Для определения неизвестных величин получим алгебраическую систему

$$\begin{cases} -v_0 t_0 - \frac{1}{2}at_0^2 - \frac{1}{6}bt_0^3 = -z_0, \\ \frac{m(-Lb - R(a + bt_0) + Rg) + (Bl_\Sigma)^2 \left(-v_0 - at_0 - \frac{1}{2}bt_0^2\right)}{Bl_\Sigma} > -U_m. \end{cases}$$

Из первого уравнения системы определяем параметр $b = \frac{6z_0 - 6v_0 t_0 - 3at_0^2}{t_0^3}$, подставляем его значение во второе уравнение, что приводит к неравенству

$$\begin{aligned} \left(\frac{(Bl_\Sigma)^2 t_0}{2} + 2Rm + \frac{3Lm}{t_0}\right)a + m\left(Rg + 6\frac{L(v_0 t_0 - z_0) + R(v_0 t_0 - z_0)t_0}{t_0^3}\right) \\ + (Bl_\Sigma)^2 \left(2v_0 - \frac{3z_0}{t_0}\right) > -U_m, \end{aligned}$$

из которого определяется допустимое множество изменения неизвестного параметра a , а затем и обратной подстановкой – и множество решение параметра b . С точки зрения технического приложения целесообразно выбрать то значение параметра a , на котором неравенство обращается в точное равенство. Тогда и параметр b определяется однозначно.

Рассмотрим численную реализацию приведённой методики расчёта механического перемещения. Для моделирования были использованы следующие параметры: масса пере-

мещаемой части составляет $m = 120\text{кг}$, индуктивность обмотки $L = 0.3\text{Гн}$, активное сопротивление обмотки равно $R = 8.125 \cdot 10^{-3}\text{ом}$, индуктивность магнитного поля в рабочей зоне равно $B = 0.3\text{Тл}$, длина проводника – длина обмотки магнитной катушки равна $l_2 = 1568.28\text{м}$, время прямого хода механической части системы $t_0 = 0.1\text{с}$, начальная скорость движения $v_0 = 0.09\text{м/с}$. Синтезированный закон движения, определяется выражением (см. рис. 1)

$$z(t) = -0.09 \cdot t - \frac{1}{2} 94.546 \cdot t^2 + \frac{1}{6} 490.364 \cdot t^3.$$

Из последнего выражения определяются и величины, представляющие интерес для промышленности. Это прежде всего максимальная скорость перемещаемой массы, достигаемая в конце траектории величины $v(t_0) = -7.093\text{м/с}$. Отсюда кинетическая энергия перемещаемой массы равна $W = 3018.41\text{Вт (Дж/с)}$. На последнем этапе синтезируется и управляющее напряжение, которое равно

$$U(t) = 97.80 - 14824.47 \cdot t + 38451.47 \cdot t^2.$$

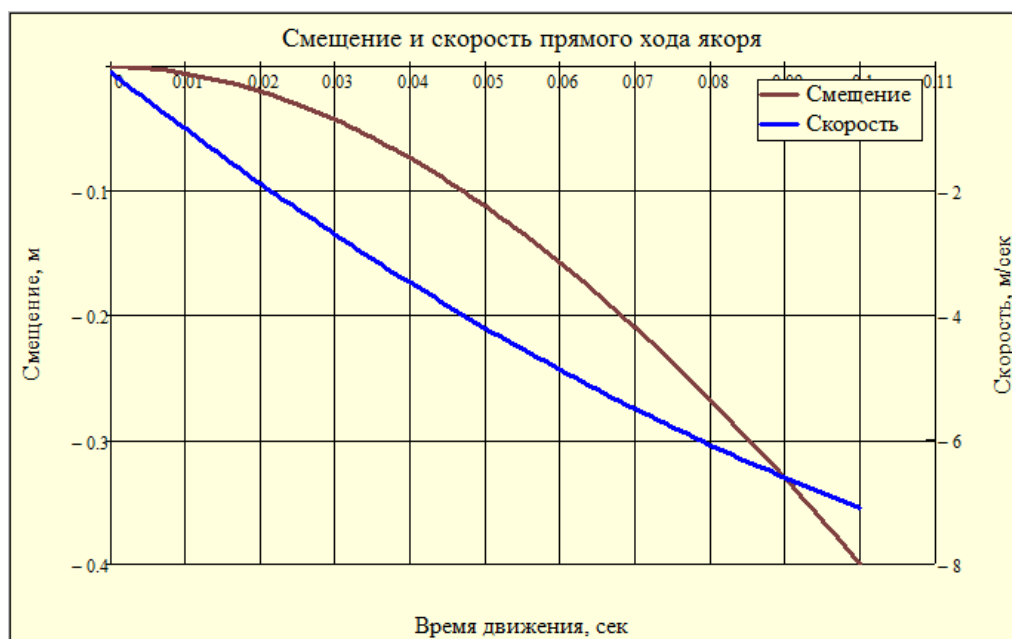


Рис. 1. Закон и скорость движения

Библиографический список

1. Тихонов А.Н., Васильева А.Б., Свешников А.Г. Дифференциальные уравнения: Учеб.: Для вузов. – 4-у изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 256с.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 285с.
3. О некоторых задачах оптимизации квазиравномерного нагрева крупногабаритных деталей В. Б. Гласко, А. В. Захаров, М. Е. Ильин, Ю. А. Повещенко, А. Н. Тихонов Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 24:5 (1984), 686–693.
4. Estimating the diffusion rate in porous media by means of a mathematical experiment Tikhonov A.N., Glasko V.B., Il'in M.E., Kovrigin V.A., Kulik N.I. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1985. Т. 48. № 5. С. 623-625.

УДК330.4(51-77)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**Н.Р. Енгальчева***Ташкентский филиал «РЭУ им. Г.В. Плеханова»
Республика Узбекистан, Ташкент, p-autin-a@mail.ru*

Аннотация. В статье рассмотрены основные проблемы в области количественных методов в экономике, понятие стратегии, функции полезности и отдачи, которые необходимы в современном описании экономических явлений, эволюция динамических систем и методов принятия решений.

Ключевые слова: динамические системы, теория игр, понятие «устойчивости», оптимизация принятого решения.

MATHEMATICAL METHODS FOR ECONOMIC ANALYSIS**N. R. Yengalicheva***Plekhanov Russian University of Economics in Tashkent
Republic of Uzbekistan, Tashkent, p-autin-a@mail.ru*

Abstract. The article considers main problems in the field of quantitative methods in the economy, concept of strategy, utility and return functions, which are necessary in modern description of economic phenomena, evolution of dynamic systems and decision-making methods.

Keywords: dynamic systems, game theory, concept of stability, optimization of the decision.

Ранние попытки количественно оценить экономические явления и предложить подходящие математические модели были основаны на аналитических и количественных методах, используемых в исследовании механики. Эти методы, которые оказались успешными в описании и изучении свойств физического мира, были затем резко адаптированы к изучению экономических явлений. Очевидно, что не было заявлено о том, что экономика связана с механикой. Действительно, ни один базовый принцип механики, и в частности динамики, никогда не показывался для экономических явлений, в которых участвует один или несколько лиц, принимающих решения. Вопреки ситуации в механике, ни один инвариантный закон сохранения или вариационный принцип, кажется, не выполняется для экономических систем.

Около 50 лет назад было наконец признано, что экономические явления имели определенные характеристики, которые полностью отличались от характеристик физического мира, что делало их в некоторых случаях совершенно непригодными для описания механической природы. Это связано с тем, что отдельный экономический агент ведет себя не только в соответствии с прошлыми и настоящими значениями определенных переменных, но, вопреки тому, что происходит в физическом мире, также в соответствии с его или ее собственными (возможно, неоправданными) ожиданиями относительно будущих ценностей этих величин. Это уникальное свойство сильно отличает явления, возникающие в экономике и социальных науках, не только от явлений, происходящих в математическом мире, но и от биологических явлений, поскольку живая клетка, похоже, не обладает упреждающими и обучающими свойствами.

Таким образом, трудности в описании экономических явлений можно лучше оценить, осознав, что в науках о жизни существующие модели, по-видимому, также не дают полностью удовлетворительного описания реальности и что в настоящее время предлагаются новые методы и подходы.

Первая специальная теория для описания и формализации конфликтных ситуаций в играх с неопределенными исходами была разработана фон Нейманом и Моргенштерном в их основополагающей работе [1]. Понятия стратегии, функции полезности и отдачи, которые необходимы в современном описании экономических явлений, получили первую унитарную систематизацию в этой работе. Рассматривая проблемы оптимизации только с одним лицом, принимающим решения, как частный случай игр, они показали, что базовая теория оптимизации в некотором смысле является частным случаем теории игр. В работе фон Неймана и

Моргенштерна вычислительные аспекты еще не были разработаны. Это было рассмотрено в работах Г. Данцига, Л. Канторовича и Т. Купманс, которые почти одновременно с фон Нейманом и Моргенштерном посвятили себя главным образом вычислительному аспекту очень важного класса задач статической оптимизации: задача линейного программирования.

С точки зрения достоверности модели, эти проблемы оптимизации могут быть вполне законно применены к классам (в основном микро) экономических проблем с одним лицом, принимающим решение, и простой, детерминированной, линейной целью. Однако может быть менее реалистичным попытаться распространить подход на более крупные агрегаты, поскольку в этом последнем случае существование линейной детерминированной целевой функции может быть трудно доказать.

Важным шагом к постановке динамических экономических проблем и их решению стало применение теории автоматического управления и, точнее, теории оптимального управления экономическими системами. Теперь, благодаря существованию общих методов численного решения и лучшему пониманию основополагающих принципов, теория управления и теория программирования существенно слились, происхождение, мотивация и предпосылки этих двух теорий кардинально различаются. Математическое программирование было, по сути, продуктом обширных исследований в области математики и информатики, направленных на решение четко определенных статических проблем, возникающих в науке управления; с другой стороны, теория управления - это формализация целого ряда инженерных проблем, связанных с автоматическим управлением ИТ-технологиями. В этом контексте потребовалось немало лет, чтобы достичь общепринятой постановки задачи синтеза в форме оптимизации функционала с учетом ограничений как в виде дифференциальных уравнений, так и алгебраических неравенств. Формализация динамических экономических задач в рамках методов оптимизации произошла только в конце 1960-х годов, примерно через 25 лет после постановки и решения задачи статического программирования. Таким образом, теория оптимального управления породила важный новый раздел экономической теории как в ее детерминистических, так и в стохастических рамках.

Теория динамической оптимизации была также применена к случаю, в котором участвует более одного лица, принимающего решения, то есть к случаю дифференциальных игр.

Несмотря на успешные новые теоретические разработки, последние годы стали свидетелями критики и переоценки ценностей среди ученых. Критика, в частности, подчеркнула проблемы валидности моделей как подходящих репрезентаций реального экономического мира и построения модели.

Основная критика, которая была выдвинута, касается необходимости подходящего метода учета разрывов и необратимостей, присутствующих во многих экономических явлениях. Необходимость включения этих двух нетрадиционных факторов в аналитические модели присутствует не только в экономической мысли, но и в других областях знаний, в частности в физике, химии и биологии.

Были предложены различные теории для преодоления этих трудностей. Среди них наиболее значительными, являются теория катастроф, разработанная Томом [2], и необратимая термодинамика, которая была создана Нобелевским лауреатом И. Пригожиным и его школой в Брюсселе.

Еще одна важная мысль, которая применима к случаю некоторых систем, характеризующихся довольно специфической математической структурой, - это эргодическая теория. Эта математическая теория имеет дело с некоторыми очень простыми детерминированными уравнениями, которые довольно неожиданно приводят к решениям, характеризующимся крайне ошибочным поведением. Таким образом, наиболее важный аспект эргодической теории, который также представляет интерес для экономических наук, обеспечивается статистическими методами для прогнозирования поведения системы независимо от того, является ли сама система детерминированной.

В дополнение к проблеме предоставления новых, более точных моделей, есть еще несколько основных вопросов, касающихся создания моделей, на которые необходимо ответить. В традиционном подходе сначала предлагается гипотеза о структуре модели, связывающей переменные, затем на втором этапе можно извлечь из данных коэффициенты модели и прийти к выводу о достоверности модели, определенной таким образом. Кальман указывает, что набор данных ввода-вывода, то есть значений экзогенных и эндогенных переменных, дает начало только одной канонической реализации, то есть модели, которая воспроизводит именно динамические отношения, связывающие данные. Хотя это утверждение совершенно правильно с математической точки зрения, его последствия для экономического моделирования должны быть тщательно взвешены. Если мы проанализируем процедуру более подробно, в традиционной экономической теории создание модели, по сути, является трехступенчатой процедурой. Первые два шага - это выбор переменных и предположения о структуре моделей: третий шаг - это идентификация параметров. Таким образом, первые два шага являются результатом чисто умозрительных гипотез, а третий шаг является результатом статистического анализа. Благодаря подходу Калмана три шага одинаковы, но только первый (выбор переменных) произвольно решается создателем модели, в то время как следующие два шага являются результатом математического метода, который из динамического развития выбранных переменных полностью идентифицирует каноническую реализацию. Единственное решение производителя модели - выбор переменных; ясно, что чем больше переменных включено в анализ, тем больше модель соответствует реальности в пределах числовой ошибки. Поэтому выбор переменных диктуется целью и окончательностью модели; ясно, что это не может быть процесс точного объективного метода, а скорее субъективный анализ.

Сделав это краткое изложение того, что считается основными проблемами в области количественных методов в экономике, мы перейдем в следующих разделах к более подробному обсуждению двух важных тем: синергетика и разработка и применение теории оптимального управления экономикой. Этот последний классический предмет не рассматривался нигде в этом томе. Мы чувствовали, что объем не будет полным без учета эволюции и развития этой важной области.

С точки зрения применения математических моделей должно быть ясно, что ни одна проблема не может считаться решенной, если найдено только локальное математической модели. Данные, используемые в математической задаче, почти всегда подвержены ошибкам. Поскольку математическое решение задачи варьируется в зависимости от значения параметров, в целом существует прямая зависимость между данными и решением. Значение целевой функции в окрестности оптимального решения на практике может значительно отличаться в зависимости от некоторых переменных, чем от других, и, если необходимо реализовать оптимальное решение, необходимо знать, какие переменные следует более точно измерять и постоянно наблюдать. Эти проблемы «устойчивости» оптимального решения имеют решающее значение при любом возможном применении теории оптимизации к математическим моделям социально-экономических систем.

Проблема устойчивости связана с проблемой стабильности. Всем известно, что традиционное определение устойчивости решения относительно возмущений может не идеально подходить для исследования экономических проблем. Основная трудность заключается в том, что он масштабируется по времени параметризации вдоль решения. Действительно, учитывая разность решения, развития между первым «принятым» решением и возмущенным решением, учитывая конечное время наблюдения, которое мало. Что касается времени решения, свойства устойчивости этого развития могут быть не распознаваемыми, и, в частности, может быть невозможно эмпирически отделить случай, когда решение устойчиво по отношению к возмущению, от случая, когда оно устойчиво. Таким образом, общее математическое определение устойчивости, которое применяется ко всем возможным возмущениям в окрестности и к случаю бесконечного времени наблюдения, даже если оно довольно строгое и не зависит от параметризации решений по времени, может не полностью соответствовать

актуальной задаче с другой стороны, использование специальных определений и критериев конечной устойчивости, в то время как это может помочь в формулировке более актуальных проблем, которые могут создавать неразрешимые проблемы при построении моделей.

Библиографический список

1. Теория игр и экономическое поведение. Дж. фон Нейман, О. Моргенштерн. Перев. с англ. под ред. и с доб. Н. Н. Воробьева. Главная редакция физико-математической литературы, изд-ва «Наука», 1970.
2. Николис Г. и Пригожин, Самоорганизация в неравновесных системах, Wiley-Interscience, Нью-Йорк. 1977,

УДК 51-76, 614.777; ГРНТИ 27.35.43, 87.01.81

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ НА ЧАСТОТУ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЖКТ (НА ПРИМЕРЕ НЕСКОЛЬКИХ РАЙОНОВ ЛИПЕЦКОЙ ОБЛАСТИ)

Н.И. Карасева*, М.Н. Дмитриева*, Р.П. Абрамова**, А.Л. Варакута*

*Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова,
Россия, Рязань, karaseva.18@mail.ru, dmitrm05@mail.ru, serikowa96@mail.ru

**Территориальный отдел Управления Роспотребнадзора по Липецкой области в Задонском,
Воловском, Хлебенском и Тербунском районах Липецкой области
Россия, Липецк, zadonsk_to@48.rospotrebnadzor.ru

Аннотация. В статье проведен анализ качества питьевой воды и случаев первичной заболеваемости болезнями желудочно-кишечного тракта среди населения области по данным за пять лет. Получены выводы о взаимосвязи этих данных.

Ключевые слова. Качество питьевой воды, болезни желудочно-кишечного тракта, регрессионный анализ, корреляция, предельно допустимая концентрация, водисточник.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE QUALITATIVE COMPOSITION OF DRINKING WATER ON THE FREQUENCY OF DISEASES OF THE GIT (ON THE EXAMPLE OF SEVERAL DISTRICTS OF LIPETSK REGION)

N.I. Karaseva*, M.N. Dmitrieva*, R.P. Abramova **, A.L. Varakuta*

*Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlov:
Russia, Ryazan, karaseva.18@mail.ru, dmitrm05@mail.ru, serikowa96@mail.ru

**The territorial department of the Office of Rosпотребнадзор in the Lipetsk region in the Zadonsky,
Volovsky, Khlevensky and Terbunsky districts of the Lipetsk region
Russia, Lipetsk, zadonsk_to@48.rospotrebnadzor.ru

Abstract. This paper describes the quality of drinking water and cases of the primary incidence of diseases of the gastrointestinal tract among the population of the region according to data for five years. Conclusions about the relationship of these data are obtained.

Keywords. The quality of drinking water, diseases of the gastrointestinal tract, regression analysis, correlation analysis, maximum permissible concentration, water source.

Сохранение здоровья населения, снижение уровня смертности, увеличение продолжительности жизни являются приоритетными задачами в рамках решения проблемы национальной безопасности страны. Одним из важнейших факторов, определяющих здоровье населения, является снабжение его доброкачественной питьевой водой. Но в настоящее время решение этого вопроса вызывает серьезную озабоченность в связи с возросшим антропогенным воздействием на источники питьевого водоснабжения, дефицитом водных ресурсов, полностью отвечающих гигиеническим требованиям, недостаточной эффективностью и надежностью работы водоочистных сооружений, неудовлетворительным санитарно-техническим состоянием разводящей сети и нарушением правил их эксплуатации [1].

Первостепенное значение при разработке и внедрении мероприятий, направленных на снижение степени опасности воздействия водного фактора, является выявление приоритет-

ных причин, определяющих качественный состав питьевой воды, и установление их связи со здоровьем населения [2, 3, 6].

Проблемы питьевого водопользования населения Липецкой области связаны в основном с антропогенным загрязнением водоисточников, неблагоприятным природным составом подземных вод, недостаточной санитарной надежностью систем хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Целью нашей работы явилось изучение особенностей хозяйственно-питьевого водоснабжения населения, проживающего в пределах Задонского Территориального отдела Управления Роспотребнадзора по Липецкой области объединяющего Хлевенский, Тербунский, Воловский и Задонский административные районы, а также выявление возможного влияния качественного состава питьевой воды на здоровье населения.

Все четыре муниципальных района надежно обеспечены запасами подземных вод трех водоносных горизонтов: задонско-елецкого, евлановско-ливенского и верхнефаменского. Подземные воды евлановско-ливенского водоносного горизонта в Задонском, Хлевенском, Воловском, Тербунском районах развиты повсеместно. Его питание осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, за счет перетока вод из задонско-елецкого водоносного горизонта, а также за счет инфильтрационного питания из реки Дон. Результаты опытных работ показали наличие взаимосвязи подземных вод евлановско-ливенского водоносного горизонта с водами Дона, а так же с подземными водами задонско-елецкого горизонта.

По химическому составу воды гидрокарбонатные натриево-кальциевые, гидрокарбонатно-кальциево-магниевые. Воды пресные с минерализацией 0,1 – 0,7 г/л. Жесткость изменяется от 0,8 до 8,4 мг-экв/л, т.е. умеренная. По мере погружения водовмещающих отложений в водах увеличивается содержание сульфатов и хлоридов, минерализация повышается до 1 г/л и выше. Практически для всех водоносных горизонтов характерна повышенная общая жесткость и значительные концентрации железа. Различные гидрогеологические условия формирования подземных вод, качественный состав которых напрямую связан с минералогическим составом водовмещающих пород, нередко способствуют обогащению природной воды большим многообразием микроэлементов, зачастую превышающим предельно допустимые концентрации (ПДК). При этом выделяется ряд площадей неясного генезиса, в пределах которых значительно повышено содержание бора, брома, свинца, бария, кадмия, лития. Эти аномалии требуют дополнительных исследований и уточнений.

В Задонском, Хлевенском, Тербунском, Воловском районах основной причиной снижения качества подземных вод по химическому составу следует считать изменение гидродинамического состояния подземных вод, обусловленное длительной и мощной их эксплуатацией, что привело к подтягиванию в основные водоносные горизонты некондиционных вод нижележащих водоносных горизонтов. Это свидетельствует о необходимости использования дополнительной обработки питьевой воды для доведения ее качественного состава до требований СанПиН 2.1.4.1074-01 *«Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения»*.

Большинство водопроводов Задонского ТО не оборудовано специальными сооружениями. В связи с этим качество подаваемой населению питьевой воды не соответствует гигиеническим требованиям. Удельный вес проб питьевой воды несоответствующих гигиеническим нормам по санитарно-химическим показателям в 2013-2018 годах характеризуется значительными колебаниями. Так, эти показатели в Задонском районе составили (3,2 - 21,4)%, Хлевенском (2,8 - 25,2)%.

Показатель нестандартных проб в Воловском и Тербунском районах превышает 80%, что существенно отличается от среднеобластных значений, которые составляют (14,5-25,2)% (Таблица 1). Среди санитарно-химических показателей качества питьевой воды следует вы-

делить приоритетные, такие, как содержание железа (более 0,3 мг/л), бора (более 0,5 мг/л), нитратов (более 45,0 мг/л), общая жесткость (более 7,0 мг-экв/л).

Таблица 1. Доля проб воды из источников централизованного водоснабжения, не отвечающих гигиеническим нормативам по санитарно-химическим показателям по Задонскому ТО Липецкой области (в %)

Районы/годы наблюдений	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Липецкая область	21,4	24,6	25,2	19,1	14,5	15,0
Задонский район	21,4	4,8	12,0	14,7	3,8	3,2
Воловский район	45	48,5	80	45,1	30,6	53,9
Хлевенский район	2,8	5,7	19,2	25,2	15,0	15,2
Тербунский район	40,3	41,5	80,9	45,9	81,3	56,1

На основании имеющихся лабораторных данных за 2017 год нами составлены карты гигиенического районирования [4], которые позволяют определить зоны повышенного риска здоровью населения, связанные с особенностями качественного состава питьевой воды.

На рисунке 1 представлена карта районов Задонского ТО с различной степенью риска по содержанию железа. Регулярное употребление питьевой воды с концентрацией железа превышающей гигиенический норматив повышает риск развития заболеваний внутренних органов и, в первую очередь, печени и почек, желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), неблагоприятно воздействует на кожу.

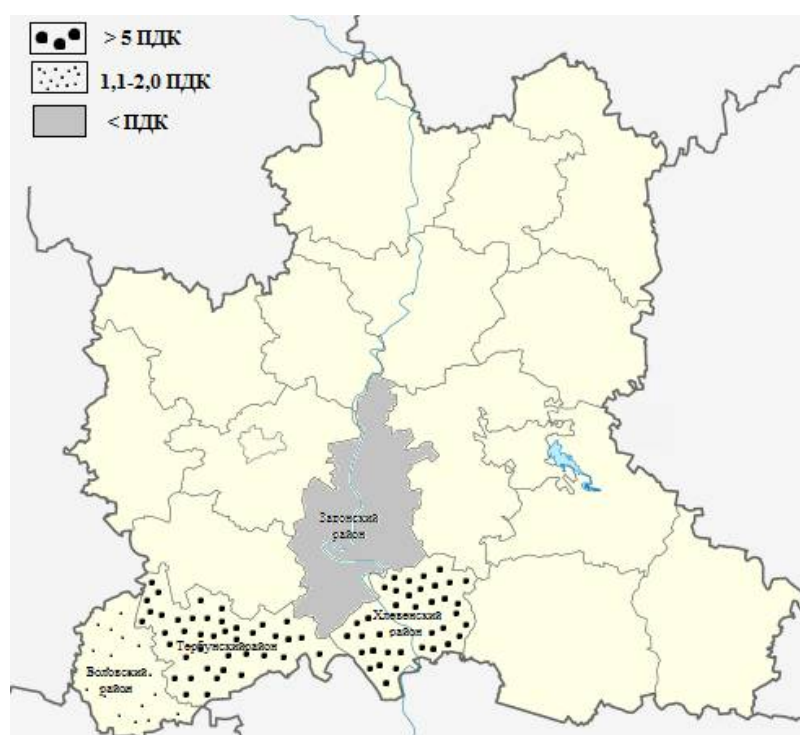


Рис. 1. Гигиеническая карта характеристики питьевой воды по содержанию железа в районах Задонского ТО Липецкой области

Метод гигиенического картографирования [4, 5, 6] позволил также выделить районы неблагополучные по содержанию нитратов в питьевой воде, являющихся канцерогенными веществами. На рисунке 2 выделен Задонский район, где концентрация нитратов в питьевой воде колеблется от 1,1 до 2,0 ПДК.

Для подземных источников районов Задонского ТО характерна высокая концентрация бора. Это элемент 2 класса опасности с санитарно-токсикологическим лимитирующим пока-

затем вредности, что требует особого внимания специалистов санитарно-эпидемиологической службы [3]. На рисунке 3 изображена гигиеническая карта с обозначенными территориями различной степени риска по содержанию бора в питьевой воде по результатам лабораторных исследований за 2017 год. Хлевенский и Тербунский район отличаются значительным превышением норматива.

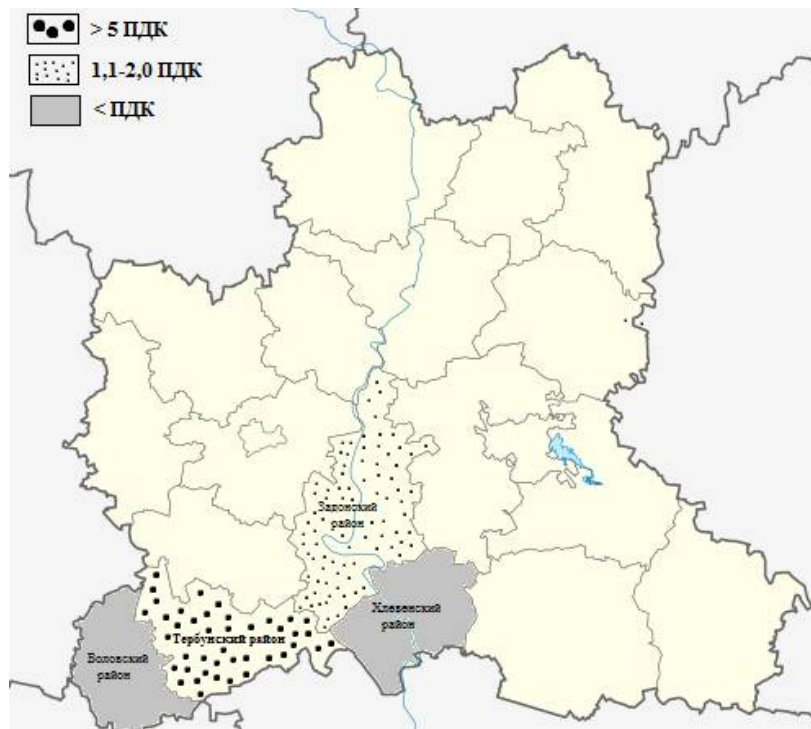


Рис. 2. Гигиеническая карта характеристики питьевой воды по содержанию нитратов в районах Задонского ТО Липецкой области

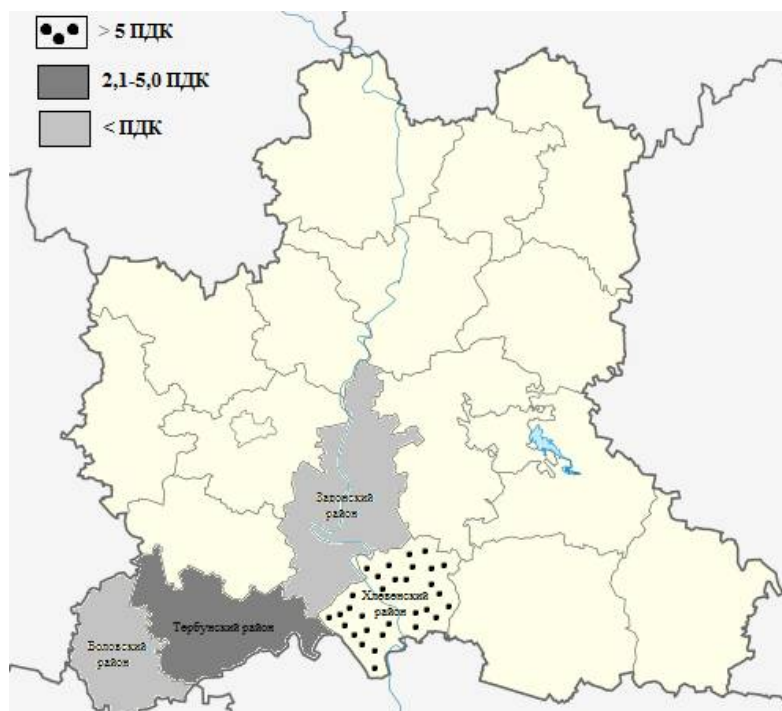


Рис. 3. Гигиеническая карта характеристики питьевой воды по содержанию бора в районах Задонского ТО Липецкой области

По литературным данным [3] избыточное количество бора в питьевой воде может оказывать неблагоприятное воздействие на желудочно-кишечный тракт, репродуктивную функцию организма, процессы остеогенеза. Нами проведена оценка заболеваемости населения в различных возрастных группах в Тербунском и Хлевенском районах в сравнении с Задонским районом. Данные представлены в таблицах 2, 3, 4.

Таблица 2. Динамика первичной заболеваемости болезнями желудочно-кишечного тракта среди детского населения (0-14 лет) в Хлевенском, Тербунском, Задонском районах Липецкой области (на 100000 населения)

Район/год наблюдения	2016	2017	2018
Тербунский район	195,3	567,9	341,4
Хлевенский район	280,4	210,1	208,8
Задонский район	245,9	189,3	113,4

Таблица 3. Динамика первичной заболеваемости болезнями желудочно-кишечного тракта среди подростков (15-17 лет) в Хлевенском, Тербунском, Задонском районах Липецкой области (на 100000 населения)

Район/год наблюдения	2016	2017	2018
Тербунский район	1424,0	1515,1	1547,1
Хлевенский район	366,3	1073,3	327,3
Задонский район	2649	1079	326,8

Таблица 4. Динамика первичной заболеваемости болезнями желудочно-кишечного тракта среди взрослых в Хлевенском, Тербунском, Задонском районах Липецкой области (на 100000 населения)

Район/год наблюдения	2016	2017	2018
Тербунский район	121,5	55,1	64,5
Хлевенский район	99,8	75,4	50,4
Задонский район	89,4	68,8	90,5

Наглядное изображение качественной характеристики подземных вод по приоритетным микроэлементам на гигиенических картах районов Задонского ТО показало крайне неудовлетворительное состояние питьевого водоснабжения в Хлевенском и Тербунском районах. Существенно превышены нормативные показатели по железу и бору, что позволяет выдвинуть гипотезу о предполагаемой корреляционной связи между качественным составом подземных вод и повышенной первичной заболеваемостью болезнями желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) среди различных возрастных групп населения [3, 7].

Для выявления взаимосвязи качественного состава подземных вод (качества питьевой воды) и первичной заболеваемостью болезнями ЖКТ были использованы методы анализа временных рядов и корреляционно-регрессионного анализа [3, 5, 7].

В результате проведенного анализа установлено, что наиболее «чувствительными» по отношению к качеству воды оказались случаи первичной заболеваемости болезнями ЖКТ среди детского населения. Так, в качестве примера на рисунке 4 представлена динамика сравниваемых показателей по Тербунскому району. Расчетные значения коэффициентов корреляции для детей от 0 до 14 лет составляет 0,99, а для группы от 15 до 17 лет составляет 0,53. Аналогичные значения получены по Хлевенскому району: для детей от 0 до 14 лет $r=0,99$. По Задонскому району соответственно для детей от 0 до 14 лет $r=0,84$ и для группы от 15 до 17 лет $r=0,96$, для группы взрослых $r=0,42$.

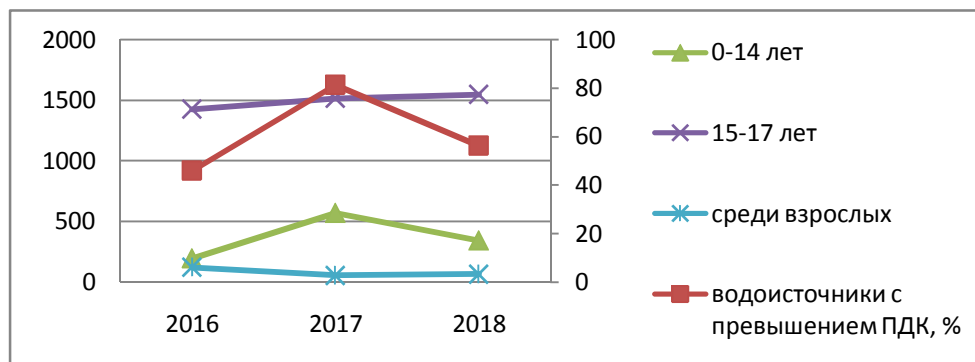


Рис. 4. Динамика качества питьевой воды и первичной заболеваемости болезнями желудочно-кишечного тракта среди населения различных возрастных групп в Тербунском районе Липецкой области (на 100000 населения)

Учитывая небольшие по количеству данных временные ряды, делаем вывод о варьировании значений коэффициентов корреляции, необходимости дальнейшей работы по сбору и анализу данных. Понимая факт зависимости заболеваемости болезнями ЖКТ от нескольких различных факторов, следует рассматривать фактор качества питьевой воды как один из них.

Заклучение о существовании умеренной по силе положительной корреляционной связи между исследуемыми показателями на примере нескольких районов позволит планировать дальнейшие исследования по определению степени и направленности связей между качеством питьевой воды и уровнем распространения неинфекционных заболеваний среди населения Липецкой области.

Библиографический список

1. Карасева, Н.И. Гигиенические аспекты обеспечения населения Коломенского района Московской области высококачественной питьевой водой / Н.И. Карасева, Т.В. Филатова, Т.А. Мурыгина // Материалы ежегодной научной конференции университета под общ.ред. проф. В.А.Кирюшина. Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова. - Рязань, 2012. - С.248-251.
2. Карасева, Н.И. Интегральная оценка качества воды реки Оки как основного источника хозяйственно-питьевого водоснабжения города Рязани (на примере Соколовского водозабора) / Н.И. Карасева, М.Н. Дмитриева, Д.В. Кулюкин // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2018.Сборник трудов международного научно-технического форума: в 11 томах под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязанский государственный радиотехнический университет. - Рязань, 2018. - С. 97-100.
- 3.Бакуменко, Л.П. Статистический анализ влияния качества питьевой воды на здоровье населения региона / Л.П. Бакуменко, П.А. Коротков // Прикладная эконометрика. - 2011, №2(22) - С.32-48.
4. Михайличенко, К.Ю. Интегральная оценка качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения / К.Ю. Михайличенко, А.Ю. Коршунова, А.И. Курбатова // Вестник Российского университета дружбы народов. - 2014, №4. - С. 99-107.
5. Карасева, Н.И. Технология комплексной оценки качества воды источника городского водоснабжения (на примере реки Оки) / Н.И. Карасева, М.Н. Дмитриева // Окружающая среда и здоровье населения: материалы XXX Всероссий.науч.-практ. конф. (Казань, 29 марта 2019г.) – Казань: Участок ротационной печати НБ КГМА, 2019. – С. 30-32.
6. Литвинова А.А. Сравнительная гигиеническая характеристика качества поверхностных вод в местах водозаборов областного центра / А.А. Литвинова, А.А. Дементьев, А.А. Ляпало, Н.И. Карасева, Д.А. Соловьев // Наука молодых (Eruditio Juvenium). – 2019, Т. 7, № 3. - С. 366-372.
7. Кабанов, А.Н. Статистический анализ данных и процессов с помощью программы MS EXCEL и аналитической платформы DEDUCTOR при обучении студентов медицинского вуза / А.Н. Кабанов, Н.В. Дорошина, М.Н. Дмитриева // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сборник трудов международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах. Рязанский государственный радиотехнический университет; Под общей редакцией О.В. Миловзорова. - Рязань, 2016. - С. 80-83.

УДК 539.3; ГРНТИ 30.19.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСЕВОГО ВРАЩЕНИЯ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЗАРЯДА В РАМКАХ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

И.В. Дунаева, Д.А. Дехтяр

*Тульский государственный университет,
Российская Федерация, Тула, i_w_d@mail.ru, javelin@bk.ru*

Аннотация. Рассматривается актуальность визуализации результатов вычислительных экспериментов в ходе учебного процесса; использование созданного на кафедре программного модуля для исследования деформаций источника рабочего тела тепловой машины; пример исследования деформаций и напряжений в заряде при осевом вращении ЛА.

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, деформация заряда, площадь поверхности горения, осевое вращение.

MODELING THE INFLUENCE OF AXIAL ROTATION ON CHARGE DEFORMATION WITHIN THE STUDY OF TECHNICAL DISCIPLINES

I.V. Dunaeva, D.A. Dekhtyar

*Tula State University
Russia, Tula, i_w_d@mail.ru, javelin@bk.ru*

The summary. The relevance of visualizing the results of computational experiments during the educational process is considered; using the software module created at the department for studying deformations of the source of the working fluid of a heat engine; An example of a study of deformations and stresses in a charge during axial rotation of an aircraft.

Keywords: computational experiment, charge deformation, combustion surface area, axial rotation.

Keywords: computational experiment, the deformation, the area of the charge, axial rotation.

Кафедра “Ракетное вооружение” ТулГУ производит один из самых больших наборов студентов в ВУЗе для обучения по специальностям: проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов; проектирование авиационных и ракетных двигателей; баллистика и гидроаэродинамика. Кафедра обладает хорошей лабораторной базой для проведения занятий по всем циклам дисциплин для указанных специальностей. В нее входят специализированные лаборатории с различными летательными аппаратами (ЛА) и экспериментальными стендами, компьютерные классы.

В рамках обучения ряду дисциплин студенты сталкиваются с необходимостью изучения внешних и внутренних процессов, протекающих в конструкциях ЛА при их функционировании.

Источником энергии и рабочего тела для работы ракетного двигателя на твердом топливе является само топливо, запас которого хранится в его камере сгорания. От правильно рассчитанной геометрии топливного заряда зависят все энергетические характеристики двигателя и возможность выполнения поставленной задачи всего комплекса ЛА в целом.

Механические характеристики топлива таковы, что возникающие при функционировании изделия силовые и температурные воздействия способны привести к недопустимым деформациям или разрушению. У гироскопически стабилизированных ЛА одним из таких факторов является центробежная сила, когда частоты вращения достигают значений свыше десяти тысяч оборотов в минуту. Действие силы может приводить к деформированию заряда, изменению его формы, и как следствие – площади поверхности горения. При превышении касательных напряжений предельно допустимых значений могут образоваться трещины. Все это приводит к увеличению площади свободной поверхности заряда, а, следовательно, к нерасчетному режиму работы или аварии.

Для моделирования напряженно-деформированного состояния заряда рабочего тела, в рамках проведения лабораторных занятий по сопряженным дисциплинам, на кафедре был разработан программный комплекс, способный моделировать неизотермическое напряженно-деформированное состояние, возникающее в рамках описанных процессов. Данная задача решается в осесимметричной постановке.

На рисунке 1 представлен алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния, применяемый в программном модуле.

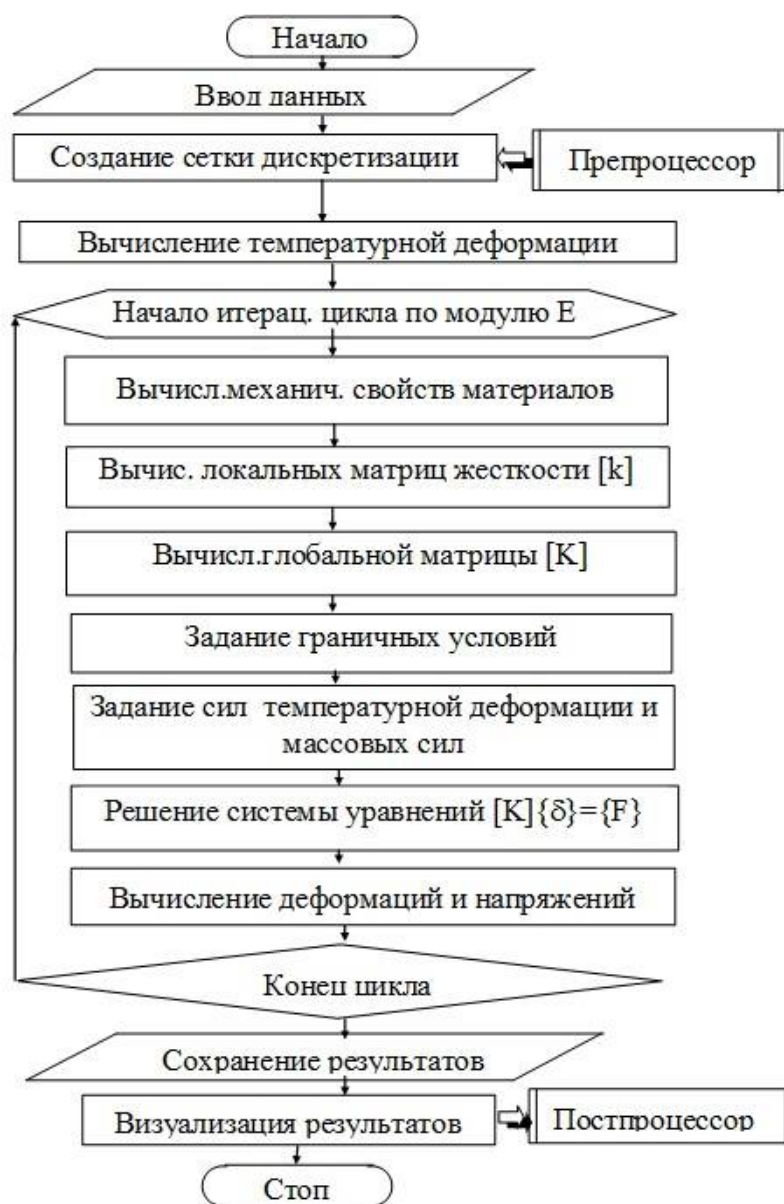


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета

Приведенные ниже рисунки являются примерами результатов вычислительного эксперимента, проводимого в процессе выполнения лабораторных работ на кафедре «Ракетное вооружение» в ТулГУ.

На рисунке 2 представлено деформированное состояние цилиндрического элемента, подверженного осевому вращению и продольной перегрузке.



Рис. 2. Вид исходного и деформированного под воздействием нагрузок контуров области

На рисунке 3 представлено распределение интенсивности напряжений, соответствующее данному состоянию.

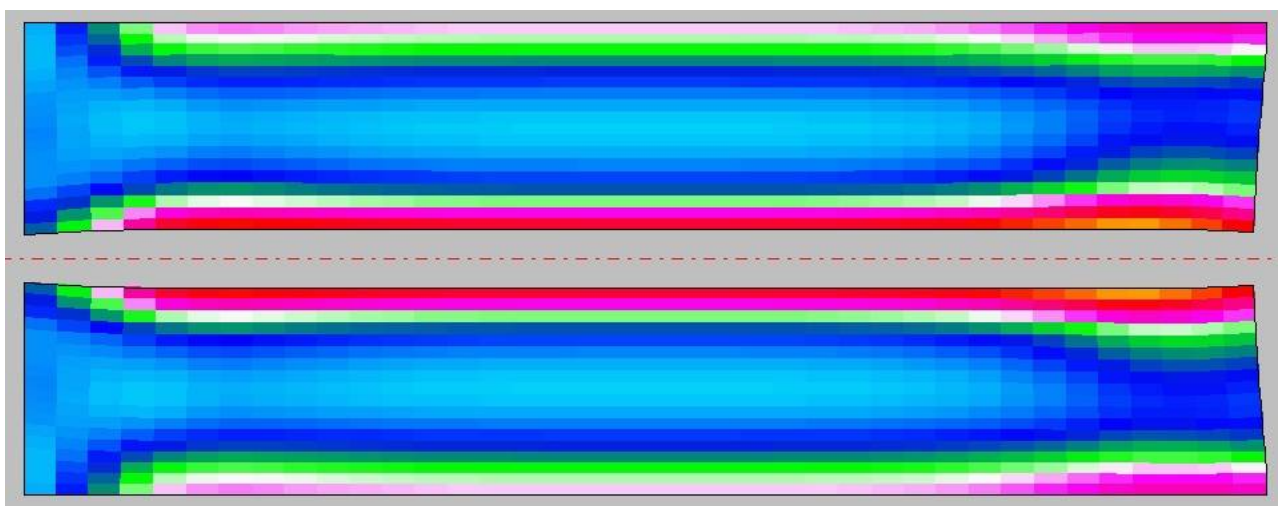


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений по сечению исследуемой области

Изучение вышеописанных объектов дополняется возможностью ознакомления студентов в ходе работы с математическим описанием, на котором базируется построение используемой виртуальной модели, а также методов численного интегрирования для решения входящих в него систем дифференциальных уравнений.

Названный программный модуль нашёл применение в курсах «Динамическая и термодинамическая прочность», «Прочность конструкций ЛА» и др., в процессе проведения лабораторных занятий, а также при выполнении студентами курсовых и квалификационных работ.

Библиографический список

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. - М.: Мир, 1975,-541с.
2. Термопрочность деталей машины / Под. ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Шорра. - М.: Машиностроение, 1975. – 456 с.

УДК 519.254; ГРНТИ 27.43.51

СКОРРИНГОВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ КОММЕРЧЕСКОГО БАНКА НА ОСНОВЕ НАИВНОГО БАЙЕСОВСКОГО КЛАССИФИКАТОРА

А.В. Тупицын, С.В. Тупицына

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, 62riven@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматривается разработка скорринговой модели для коммерческого банка на основе наивного байесовского классификатора. Целью разработки является повышение эффективности и производительности работы отдела по борьбе с мошенничеством, минимизация риска несанкционированных списаний с клиентских счетов, повышение удобства работы с онлайн-банкингом, снижение расходов на отправку СМС-сообщений.

Ключевые слова: скорринг, риск оценка, байесовский классификатор, наивный байесовский классификатор, интернет-банкинг, моделирование.

SCORING MODEL FOR A COMMERCIAL BANK ON THE BASIS OF A NAIVE BAYESIAN CLASSIFIER

A.V. Tupitsyn, S.V. Tupitsyna

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, 62riven@gmail.com*

The summary. The paper discusses the development of the scoring model of a commercial bank based on Naïve Bayes Classifier. The purpose of the development is to increase the efficiency and productivity of the anti-fraud department of the bank, minimize the risk of unauthorized money transfers from customer accounts, increase the convenience of working with online-banking and reduce total charges for sending SMS messages.

Keywords: scoring, risk assessment, Bayesian classifier, naive Bayesian classifier, Internet banking, modeling.

В настоящее время современные банки занимаются продвижением интернет-банкинга. Интернет-банкинг — комплекс средств для управления банковскими счетами через Интернет. Для того чтобы привлекать к обслуживанию новых клиентов и удерживать старых, банкам нужно постоянно развивать действующие возможности интернет-банкинга, давая клиентам все больше прав на использование своих счетов, не приходя в отделение банка.

Коммерческий банк предлагает клиентам управлять своими счетами через личный кабинет в интернет-банкинге. На каждую интернет операцию, за исключением денежного перевода между своими счетами, клиенту необходимо ввести одноразовый пароль из СМС-сообщения. Банк решает сократить расходы на оплату услуг операторов связи, рассылающих сообщения, и улучшить качество обслуживания клиентов, позволив совершать низкорисковые платежи и денежные переводы без дополнительно подтверждения, сохранив при этом высокий уровень защиты от мошеннических операций в интернет-банкинге.

В данной статье предлагается решение проблемы защиты средств банка и клиентов с помощью скорринговой системы, работа которой в режиме реального времени заключается в следующем:

- 1) Сбор данных о клиенте, его устройстве, с которого совершён денежный перевод, IP-адресе, деталей платежа или перевода: тип, сумма, «возраст» получателя (время с момента первого перевода или добавления в получатели).
- 2) Анализ скорринговой системой имеющихся данных и получение оценки, которая показывает насколько вероятно то, что данный денежный перевод был совершен не клиентом.
- 3) На основании оценки, банк:
 - проводит эту операцию без дополнительного подтверждения,

- просит сотрудника отдела по борьбе с мошенничеством оценить вероятность мошенничества и при необходимости связаться с клиентом для подтверждения операции,
- просит клиента ввести одноразовый пароль, присланный в СМС-сообщении на мобильный номер телефона,
- отклоняет операцию, и просит клиента самому позвонить в банк и подтвердить данный денежный перевод.

Скорринг (от англ. *scoring* – подсчет очков в игре) – это эвристический способ построения рейтингов и классификации различных объектов на группы.

В банковской системе используются множество различных видов скорринга:

- Кредитный скорринг – прогнозирование вероятности невозврата денежных средств по кредитным договорам.
- Скорринг для удержания клиентов – определение клиентов, заинтересованных в продолжении взаимоотношений с банком.
- Скорринг выпуска кредитных карт.
- Фрод-скорринг – оценка вероятности мошенничества. [1]

В основе модели лежит функция, в которой независимыми переменными будут информация о клиенте, его устройстве и денежном переводе, а зависимой – вероятность того, что данный перевод был совершен мошенниками. Программа скорринга будет рекомендоваться как дополнение к существующим системам. Данная модель является настраиваемой и адаптирующейся к существующим мошенническим тенденциям.

Для построения скорринговой модели был выбран наивный байесовский классификатор. Основными преимуществами данного метода являются высокая скорость обучения и возможность работы с большими наборами данных.

Наивный байесовский классификатор позволяет проводить обучение инкрементно, – каждая совершенная операция обновляет настройки системы. Поддержка инкрементного обучения очень важна для скорринговой системы, предназначенной для определения мошеннических операций, потому что это позволяет системе оперативно отреагировать и перестроиться под новые мошеннические тенденции, поддерживая тем самым высокий уровень обнаружения мошенничества. Еще одним преимуществом наивных байесовских классификаторов является возможность отображения того, чему классификатор обучился. В любой момент можно заглянуть в базу данных и посмотреть, какие характеристики являются значимыми при определении мошеннических операций. Эта информация может быть применена при установке дополнительных параметров системы.

Байесовский классификатор – метод классификации, позволяющий при заданном наборе классов и обучающей выборке прогнозировать вероятности принадлежности объекта к каждому из классов. Данный классификатор выбирает тот класс, для которого максимальна апостериорная вероятность принадлежности объекта к данному классу.

В основе байесовского классификатора используется теорема Байеса:

$$P(c | F_1, \dots, F_n) = \frac{P(c) * P(F_1, \dots, F_n | c)}{P(F_1, \dots, F_n)},$$

где F_i – значение i -ой входной переменной, $c \in C$ – классовая переменная.

Байесовский классификатор использует оценку апостериорного максимума для определения наиболее вероятного класса:

$$c_{map} = \arg \max_{c \in C} \frac{P(c) * P(F_1, \dots, F_n | c)}{P(F_1, \dots, F_n)}.$$

Заметим, что знаменатель является константой и никак не может повлиять на определение класса, поэтому можно его игнорировать.

$$c_{map} = \arg \max_{c \in C} \left[P(c) * P(F_1, \dots, F_n | c) \right].$$

Проблема заключается в том, что, когда количество свойств n очень велико или, когда свойства могут принимать большое количество значений, тогда становится невозможным построить такую модель на вероятностных таблицах. Чтобы решить данную проблему, была разработана следующая модель с предположением о том, что переменные $F_1, \dots, F_n$ являются взаимно независимыми.

Наивный байесовский классификатор – частный случай байесовского классификатора со строгим (наивным) предположением о независимости. [2]

Перепишем формулу $P(F_1, \dots, F_n | c)$, используя повторные приложения условной вероятности:

$$\begin{aligned} P(F_1, \dots, F_n | c) &= P(F_1 | c) P(F_2, \dots, F_n | c, F_1) = \\ &= P(F_1 | c) P(F_2 | c, F_1) P(F_3, \dots, F_n | c, F_1, F_2) = \\ &= P(F_1 | c) P(F_2 | c, F_1) \cdot \dots \cdot P(F_n | c, F_1, F_2, \dots, F_{n-1}). \end{aligned}$$

Предположим, что свойство F_i условно независимо от любого другого F_j при $i \neq j$, то есть используем «наивные» предположения условной независимости. Это означает:

$$P(F_i | c, F_j) = P(F_i | c).$$

Таким образом:

$$P(F_1, \dots, F_n | c) = P(F_1 | c) P(F_2 | c) \cdot \dots \cdot P(F_n | c) = \prod_{i=1}^n P(F_i | c).$$

Оценка апостериорной вероятности, используя наивный байесовский классификатор:

$$c_{map} = \arg \max_{c \in C} \left[P(c) * \prod_{i=1}^n P(F_i | c) \right].$$

Скорринговая оценка вероятности того, что операция является мошеннической или нет, будет рассчитана по формуле:

$$\begin{aligned}
 \text{Score}(C) &= \ln(P(C) \prod_{i=1}^n P(F_i|C)) \\
 &= \ln P(C) + \ln P(F_1|C) + \ln P(F_2|C) + \dots + \ln P(F_n|C). \text{Score}(\bar{C}) \\
 &= \ln(P(\bar{C}) \prod_{i=1}^n P(F_i|\bar{C})) = \ln P(\bar{C}) + \ln P(F_1|\bar{C}) + \ln P(F_2|\bar{C}) + \dots + \ln P(F_n|\bar{C}).
 \end{aligned}$$

Для выбора класса с большей апостериорной вероятностью необходимо сравнить полученные оценки и выбрать наибольшую.

Однако в этой формуле содержится одна проблема. При необходимости классифицировать операцию, один или несколько параметров которой не встречался ранее, значение $P(F_i|C)$ будет равно нулю. Это приведет к невозможности классифицирования, т.к. вероятности всех классов будут равны нулю. Типичным решением данной проблемы является аддитивное сглаживание (сглаживание Лапласа). Идея сглаживания заключается в том, будто каждый параметр встречался на m раз больше чем на самом деле. Прибавляем m к частоте каждого параметра. В итоге получается:

$$P(F_i|C) = \frac{F_{ic} + m}{\sum_{c \in C} F_{ic} + m},$$

где F_{ic} - количество объектов с данным параметром, встречающихся в классе C .

Чтобы перейти к апостериорной вероятности необходимо избавиться от логарифмов и нормировать сумму по единице:

$$P(C) = \frac{e^{\text{Score}(C)}}{e^{\text{Score}(C)} + e^{\text{Score}(\bar{C})}} = \frac{1}{1 + e^{\text{Score}(\bar{C}) - \text{Score}(C)}}.$$

Чтобы посчитать условную вероятность мошенничества, модель обрабатывает платежи и денежные переводы клиентов банка в режиме реального времени и возвращает риск-скор (risk-score), основываясь на предустановленных критериях.

Оценка риска прямо пропорциональна вероятности мошенничества – чем выше оценка, тем больше вероятность того, что данный денежный перевод совершается не клиентом.

Ниже приведены частоты переменной «Тип операции» и логарифмические оценки для каждого значения. Проведем небольшой анализ данных оценок.

Таблица №1.

Тип операции	Мошеннические C	Не мошеннические $\bar{C}$	Всего C + $\bar{C}$	$P(F_i C)$	$P(F_i \bar{C})$
Валютный перевод	2	40	42	-4,375	-4,366
Внутрибанковский перевод	5	305	310	-3,459	-2,335
Внутрибанковский перевод с добавлением получателя	1	14	15	-5,068	-5,416
Оплата услуг	35	1089	1124	-1,514	-1,062
Оплата услуг с добавлением получателя	46	34	80	-1,24	-4,529
Певовод ЮР лицам - партнерам банка	0	11	11	-11,977	-5,657
Перевод в другой банк	44	1615	1659	-1,285	-0,668
Перевод в другой банк с добавлением получателя	26	42	68	-1,811	-4,317
Общий итог	159	3150	3309	-3,0355	-0,0492

Из таблицы видно, что самыми рискованными операциями являются оплата услуг с добавлением получателя и перевод в другой банк с добавлением получателя.

Получив логарифмические оценки для всех входных параметров, для любой операции можно будет посчитать апостериорную вероятность того, что данный денежный перевод совершается не клиентом. В соответствии с выбранными настройками системы операция будет нуждаться в дополнительном подтверждении или нет.

В настоящее время скоринг является эффективным финансовым инструментом. Однако, не смотря на широкое применение, скоринг слабо освещен в российской литературе, хотя ему посвящено множество зарубежных работ. Скорринговые системы имеют большой потенциал для применения, поэтому стоит продолжать их изучать и совершенствовать.

Библиографический список

1. Скоринг, кредитный скоринг (scoring) - оценка кредитоспособности заемщика [Электронный ресурс]. - <http://www.banki.ru/wiki/bank/skoring/> (Дата обращения 28.01.2020).
2. Наивный байесовский классификатор [Электронный ресурс]. - <http://bazhenov.me/blog/2012/06/11/naive-bayes.html> (Дата обращения 02.02.2020).

УДК 004.94

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА В ПРОЦЕССЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СБАЛАНСИРОВАННОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Ю.А. Сафонова, А.В. Лемешкин, Д.Ю. Панарин, А.О. Рудыка

*Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Российская Федерация, Воронеж, kulakova7@yandex.ru*

Аннотация. Обогащение пищевого изделия необходимыми для организма человека компонентами возможно за счет применения методов проектирования составов продукта. Это позволяет создать изделие улучшенной пищевой ценности. Состав многокомпонентных продуктов возможно оптимизировать с использованием алгоритма нечеткого вывода Мамдани. *Ключевые слова:* состав продукта, проектирование рецептуры изделия, методы оптимизации, алгоритм нечеткого вывода.

USE OF THE FUZZY OUTPUT ALGORITHM IN THE PROCESS OF DETERMINING THE BALANCED COMPOSITION OF FOOD

Yu.A. Safonova, A.V. Lemeshkin, D.Yu. Panarin, A.O. Rudyka

*Voronezh State University of Engineering Technologies,
Russia, Voronezh, kulakova7@yandex.ru*

The summary. Enrichment of a food product with components necessary for the human body is possible through the application of methods for designing product compositions. This allows you to create a product of improved nutritional value. The composition of multicomponent products can be optimized using the Mamdani fuzzy inference algorithm.

Keywords: product composition, product formulation design, optimization methods, fuzzy inference algorithm.

Разработка, дизайн и оптимизация многокомпонентных продуктов питания основываются на принципах сбалансированного питания, комбинаторики и квалиметрического прогнозирования [1].

На рисунке 1 приведена структурная схема, отражающая порядок применения вышеуказанных принципов [2].

Назначение модели, формируемое в зависимости от прикладных задач ее применения в автоматизированных системах расчета и оптимизации рецептур для многокомпонентных пищевых систем, влияет на выбор методов и инструментов моделирования.

При анализе литературных источников было установлено, что задачи в области проектирования составов продуктов питания решаются по одному из выбранных направлений: общехимический, минеральный, витаминный составы, а также энергетическая и пищевая ценность. Особое внимание уделяется разработке и проектированию сложных по компонентам изделиям. Задача оптимизации рецептур этих продуктов упрощается, если свести ее к однокритериальной. Поэтому необходимо разработать программный продукт, который позволяет не только проектировать продукты со сложным сырьевым составом определенной пищевой и энергетической ценности, но также определять функциональную направленность этих изделий.

Для обоснования составов рецептуры многокомпонентных пищевых продуктов возможно использование методов математического моделирования. При этом предварительно подбираются необходимые сырьевые компоненты, прижающие готовому изделию заданную функциональность.

В работе рассматривали оптимизацию состава продовольственного продукта по показателю биологической ценности. Биологическая ценность представляет собой сложную характеристику, которая показывает качество белковых компонентов изделия или сырьевого ингредиента. Чем меньше КРАС, тем выше биологическая ценность белка продукта [3, 4].

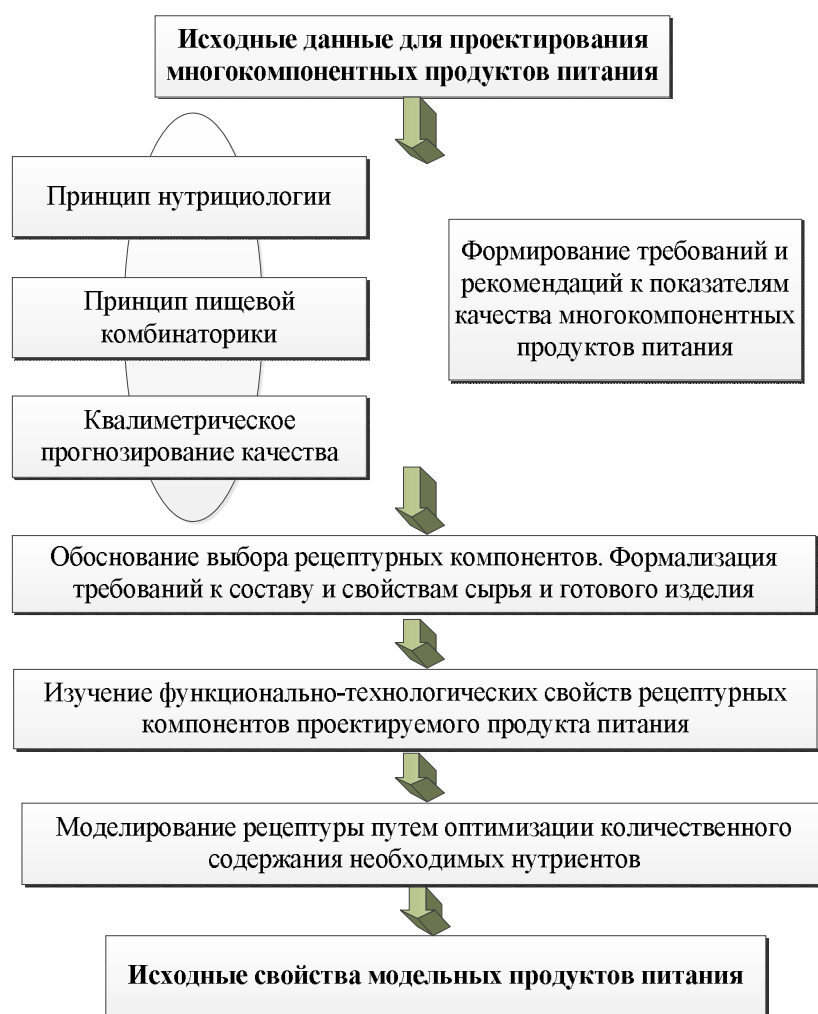


Рис. 1. Процесс разработки и проектирования многокомпонентных пищевых продуктов

Чтобы разработать точный и эффективный алгоритм для расчета состава продукта, необходимо проанализировать предметную область и поставленную задачу. В общем случае, проблему можно сформулировать следующим образом: моделирование состава компонентов пищевых продуктов функционального назначения с долей незаменимых аминокислот в готовом изделии не ниже заданного значения, с максимально возможным количеством белка без потери потребительских качеств конечного продукта, и с учетом соотношения белков и углеводов - 1: 4 [5]. Данная задача сведется к задаче программирования, в которой значение биологической ценности белка в конечном продукте является целевой функцией, а ограничения устанавливают минимальные значения аминокислот и микроэлементов. Определение метода решения поставленной задачи затрудняется вследствие присутствия динамических переменных. Поэтому сложно реализовать алгоритм, который рассчитывает коэффициенты и параметры системы при исходных ограничениях.

Данная задача состоит из двух этапов: задание необходимых начальных данных о рецептурных ингредиентах и аминокислотах и проведение необходимых расчетов. Компоненты были выбраны заранее на основе анализа литературных источников [6].

Задача может быть решена путем построения сложной аддитивной целевой функции с весовыми коэффициентами, значения которой должны определяться алгоритмом [7].

Нечеткая логика предлагает возможность моделирования условий, изначально определенных неточно. Нечеткие методы в форме приближенных рассуждений обеспечивают принятие решений. Система нечеткого вывода (FIS) по существу определяет нелинейное отображение входных данных вектора в скалярный выход с использованием нечетких правил. Процесс отображения включает в себя функции принадлежности ввода / вывода, операторы нечеткой логики, нечеткие правила «если-то», агрегацию выходных наборов и дефаззификацию. Система нечеткого вывода с несколькими выходами может рассматриваться как совокупность независимой системы с несколькими входами и одним выходом, содержащая четыре компонента: фаззификатор, механизм вывода, база правил и дефаззификатор. После того, как установят правила, систему нечеткого вывода можно рассматривать как систему, которая преобразует входной вектор в выходной вектор. Фаззификатор назначает номера записи для соответствующих нечетких членов. Это необходимо для активации правил, которые представлены в терминах лингвистических переменных. При этом принимаются входные значения и устанавливается степень их принадлежности каждому из нечетких множеств посредством функций принадлежности. Механизм вывода определяет набор нечетких входов во множества нечетких выходов, определяется уровень удовлетворенности антецедента для каждого правила. Если антецедент правила содержит более одного предложения, то нечеткие операторы применяются к одному числу, которое представляет результат антецедента для этого правила. Возможна ситуация, когда одно или несколько правил работают одновременно. Выходные данные для всех правил агрегируются, при этом нечеткие множества, которые представляют выходные данные каждого правила, объединяются в одно.

Нечеткие правила выполняются параллельно, что является одним из важных аспектов системы нечеткого вывода. При этом порядок выполнения правил не влияет на выходные данные.

Разработано программное обеспечение для определения биологической ценности проектируемого продукта функционального назначения, в основе которого алгоритм нечеткого вывода Мамдани.

На первом этапе определяется количество параметров и количество термов, используемых в расчете (рисунок 2).

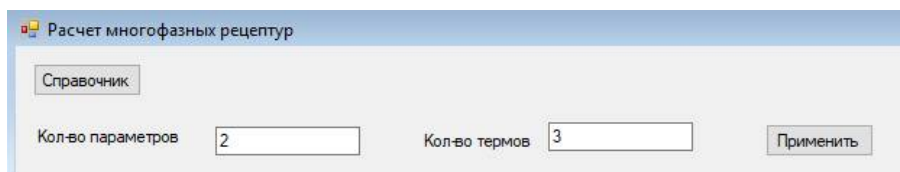


Рис. 2. Определение количества параметров и термов

Сведения о параметрах, минимальном и максимальном уровнях параметров содержатся в файле.xlsx, в котором определяются наименование параметра (белок, углеводы и т.д.) и значения параметра. Далее выбираются компоненты, участвующие в расчёте, а также вписываются в поля лингвистические переменные, обозначающие термы (рисунок 3).

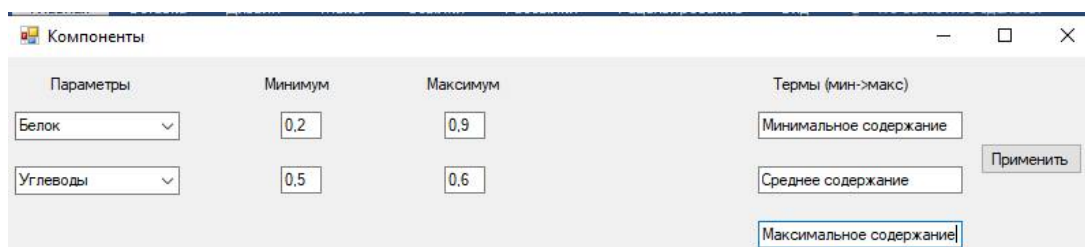


Рис. 3. Определение параметров и задание термов

Функции принадлежности используются на этапах фаззификации и дефаззификации нечеткой логики для назначения нечетких входных значений лингвистическим терминам и наоборот. Функция членства применяется для количественного определения лингвистического термина. Важной особенностью нечеткой логики является то, что числовое значение не должно размываться только одной функцией принадлежности, т.е. значение может принадлежать нескольким наборам одновременно. Для создания функций принадлежности были использованы трапециевидная кусочно-линейная, линейная Z-образная и линейная S-образная функции (рисунок 4).

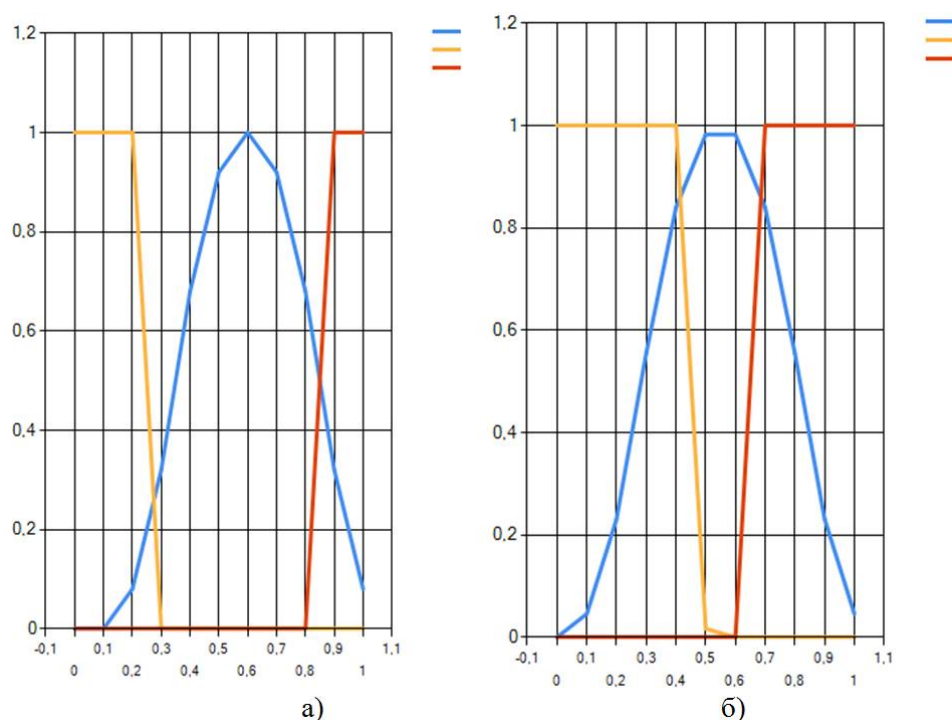


Рис. 4. Функции принадлежности кортежей лингвистических переменных,

которые соответствуют нечетким понятиям малого, среднего и большого уровнях: а - белок, б - углеводы

После определения компонентов определяется база правил, на основе которой производятся дальнейшие вычисления (рисунок 5).

Правила

Если Белок - Низкое содержание И Углеводы - Низкое содержание, тогда биологическая ценность Низкое содержание (0,2)
 Если Белок - Среднее содержание И Углеводы - Среднее содержание, тогда биологическая ценность Среднее содержание (0,5)
 Если Белок - Высокое содержание И Углеводы - Высокое содержание, тогда биологическая ценность Высокое содержание (1)
 Если Белок - Низкое содержание И Углеводы - Высокое содержание, тогда биологическая ценность Среднее содержание (0,3)
 Если Белок - Высокое содержание И Углеводы - Низкое содержание, тогда биологическая ценность Высокое содержание (0,8)

ЕСЛИ

Белок: Низкое содержание, Среднее содержание, Высокое содержание

Углеводы: Низкое содержание, Среднее содержание, Высокое содержание

☒ И
☐ или

Входные параметры: 0,7 0,55

Кэффициент: 0,8

Биологическая ценность: 0,65

Добавить

Рассчитать

Рис. 5. Формирование базы правил

Также устанавливаются входные параметры расчета и отображается результаты расчета: биологическая ценность продукта.

Таким образом, разработана программная реализация для оптимизации состава многокомпонентных пищевых продуктов функциональной направленности на основе алгоритма Мамдани. Полученный программный продукт позволяет спроектировать сбалансированную рецептуру изделия с учетом его основных качественных показателей (биологическая ценность и химический состав).

Библиографический список

1. Олейникова, А.Я. Технологические расчеты при производстве кондитерских изделий / А.Я. Олейникова, Г.О. Магомедов, И.В. Плотникова. -СПб.: Издательство РАПП, 2008, – 240с.
2. Донскова, Л.А. Концептуальные основы разработки комбинированных мясных продуктов / Л.А. Донскова // Известия УрГЭУ. 2013. - № 2(46). - С. 152-156.
3. Коробова, Л.А. Математическое моделирование. Практикум / Л.А. Коробова, Ю.В. Бугаев, С.Н. Черняева, Ю.А. Сафонова. - Воронеж: ВГУИТ, 2017. – 112 с.
4. Курчаева, Е.Е. Применение математических методов при составлении рациона животных / Е.Е. Курчаева, Ю.А. Сафонова, А.С. Баринов // Сборник статей по материалам VII междунар. науч.-практ.конф. «Инновации в науке и практике». - Уфа: Изд. Дендра, 2018. – С. 222-226.
5. Сафонова, Ю.А. Оптимизация состава продуктов функционального питания с применением алгоритма нечеткого вывода / Ю.А. Сафонова, А.О. Рудыка // Наука России: Цели и задачи .Сборник научных трудов по материалам XVI международной научной конференции. - 2019. - С. 47-51.
6. Курчаева, Е.Е. Моделирование процесса получения нового вида мясного продукта с применением функциональных смесей // Е.Е. Курчаева, Ю.А. Сафонова, А.В. Лемешкин, С.Н. Черняева // Сборник статей XVIII Междунар. науч.-практ.конф.«Worldscience: problemsandinnovations». Ч.1. - Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. – С. 57-60.
7. Муратова, Е.М. Автоматизированное проектирование сложных многокомпонентных систем // Е.М. Муратов и др. – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ». - 2011 – 80с.

УДК 664, 51-74

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПИЩЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ СО СБАЛАНСИРОВАННЫМ СОСТАВОМ

Ю.А. Сафонова, С.Н. Черняева, А.Н. Тимашов, И.А. Струненко
*Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Российская Федерация, Воронеж, kulakova7@yandex.ru*

Аннотация. При определении состава рецептурных компонентов пищевых изделий со сбалансированным составом используется нелинейная модель с задаваемыми ограничениями по нутриентам продукта. Решение такой модели позволяет выбирать оптимальные соотношения ингредиентов из множества возможных вариаций в составе композиций.

Ключевые слова: математическая модель, сбалансированный состав, пищевой продукт.

APPLICATION OF METHODS OF MATHEMATICAL MODELING IN THE DEVELOPMENT OF FOOD PRODUCTS WITH A BALANCED COMPOSITION

Yu.A. Safonova, S.N. Chernyaev, A.N. Timashov, I.A. Strunenکو
*Voronezh State University of Engineering Technologies,
Russia, Voronezh, kulakova7@yandex.ru*

The summary. When determining the composition of the recipe components of food products with a balanced composition, a nonlinear model is used with specified restrictions on the nutrients of the product. The solution to this model allows you to choose the optimal ratio of ingredients from the many possible variations in the composition.

Keywords: mathematical model, balanced composition, food product.

Процесс разработки функциональных рецептур пищевых продуктов с использованием математических вычислений обычно сводится к нахождению целевой функции, определению ограничений и граничных условий решаемой задачи. На этапе формирования композиции предписанных компонентов используются линейные модели, в которых математические зависимости являются линейными по отношению ко всем переменным, присутствующим в модели. Решение таких задач позволяет выбрать оптимальное количество ингредиентов из множества возможных вариантов рецептуры. Данный метод расчета основан на уравнениях материального баланса по каждому питательному веществу в продукте и условиях соответствия массовой доли питательного вещества его необходимой потребности для определенной группы населения.

Реализация задачи включает в себя следующие этапы:

- создание и наполнение базы данных с указанием согласно выбранной рецептуре типов компонентов, их химического состава, ограничений для каждой группы питательных веществ и качественных показателей для конечного продукта;
- составление уравнения целевой функции, введение ограничений на использование отдельных рецептурных компонентов в соответствии с технологической инструкцией на продукт;
- выбор метода решения полученной математической модели;
- анализ результатов вариантов рецептур разработанного многокомпонентного сбалансированного продукта и выбор окончательной рецептуры [1, 2].

Целевая функция - отклонение доли незаменимых аминокислот в белке проектируемого сбалансированного продукта питания от ее доли в идеальном белке. Ограничениями назначаются по доле белка, углеводов, пищевых волокон и кальция [3, 4].

Математическая формализация может задачи:

$$\sigma = \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^m (A_{jl} \cdot C_j^{\delta} \cdot x_j)}{A_l^{\text{эм}} \cdot \sum_{j=1}^m C_j^{\delta} \cdot x_j} \right)^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

где σ – отклонение между долей незаменимых аминокислот белка проектируемого продукта и их долей в идеальном белке, ед.;

$A_{jl}, A_l^{\text{эм}}$ – массовая доля l -ой незаменимой аминокислоты в белке j -го рецептурного ингредиента проектируемого изделия и белке-этalone, соответственно, мг/1 г белка;

C_j^{δ} – содержание белка в j -ом рецептурном компоненте, %; x_j – количество j -го сырья в рецептуре проектируемого изделия;

$j = \overline{1, m}, l = \overline{1, L}$.

$$\begin{cases} d_1' \leq \sum_{j=1}^m C_j^{\delta} \cdot x_j \leq d_1, \\ d_2' \leq \sum_{j=1}^m C_j^{ng} \cdot x_j \leq d_2, \\ d_3' \leq \sum_{j=1}^m C_j^{Ca} \cdot x_j \leq d_3, \\ d_4' \leq \sum_{j=1}^m C_j^Y \cdot x_j \leq d_4, \\ \sum_{j=1}^m x_j = 1, \\ x_i \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

где $C_j^{\delta}, C_j^{ng}, C_j^{Ca}, C_j^Y$ – количество белка, пищевых волокон, кальция и углеводов в j -ом сырьевом компоненте, соответственно, %;

d_1', d_2', d_3', d_4' – нижняя граница нормы потребления перечисленных нутриентов;

d_1, d_2, d_3, d_4 – верхняя граница данных нутриентов согласно нормам потребления для выбранной группы населения.

Процесс определения состава и количества рецептурных компонентов функциональных продуктов питания в виде функциональной модели, созданной в нотации IDEF0 [5].

На рисунке 1 представлена контекстная диаграмма анализируемого процесса.

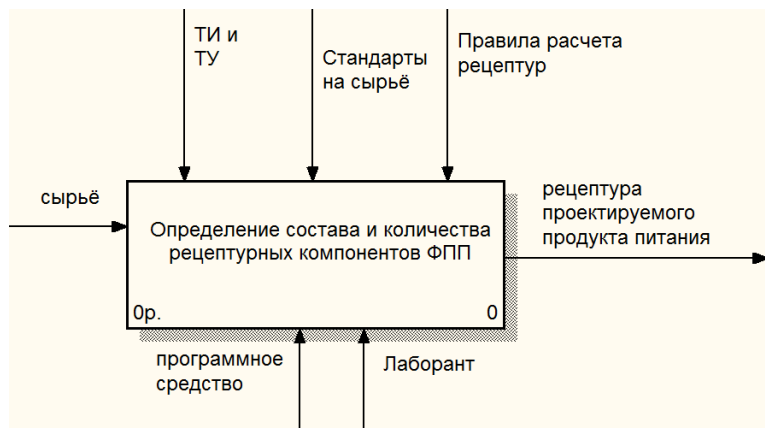


Рис. 1 Контекстная диаграмма IDEF0

Дальнейшая декомпозиция контекстной диаграммы представлена на рисунке 2.

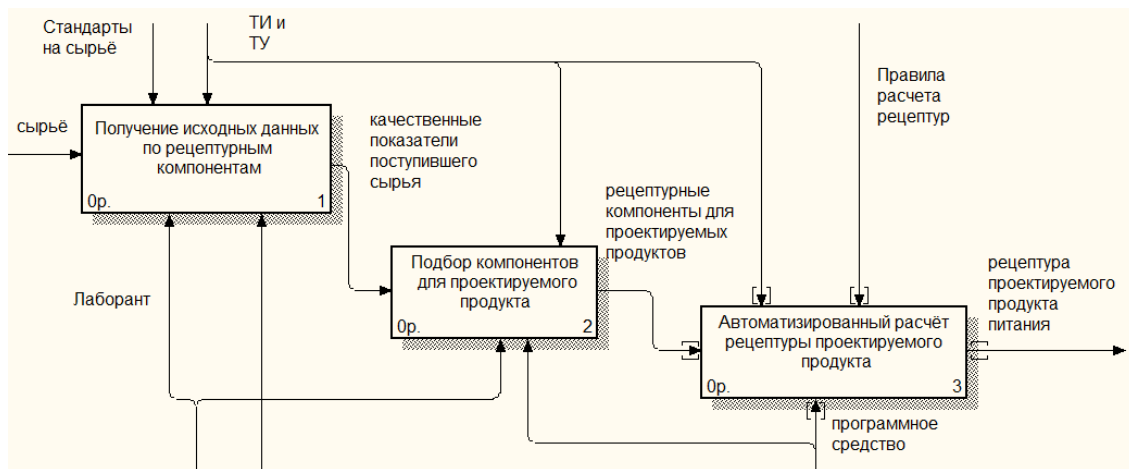


Рис. 2. Декомпозиция контекстной диаграммы
«Определение состава и количества рецептурных компонентов ФПП»

Рассматривая работу «Подбор компонентов для ПП» были выделены три действия, которые показаны на рисунке 3.

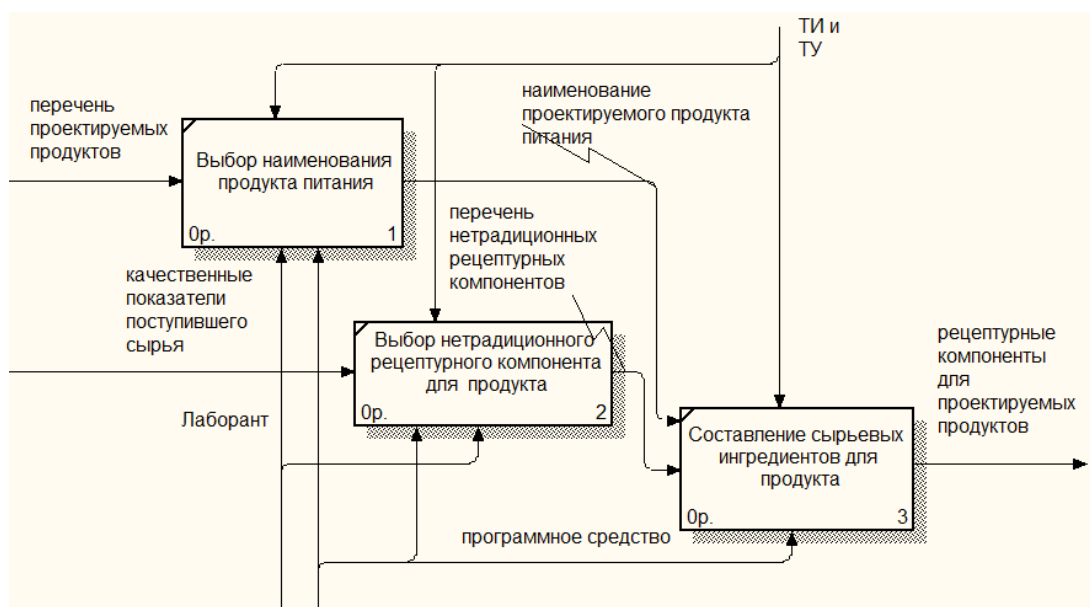


Рис. 3. Декомпозиция блока «Подбор компонентов для ПП»

Для моделирования информационной системы с точки зрения хранения, обработки и передачи данных была построена диаграмма-DFD, являющаяся декомпозицией функции «Автоматизированный расчёт рецептуры проектируемого продукта» (рисунок 4).

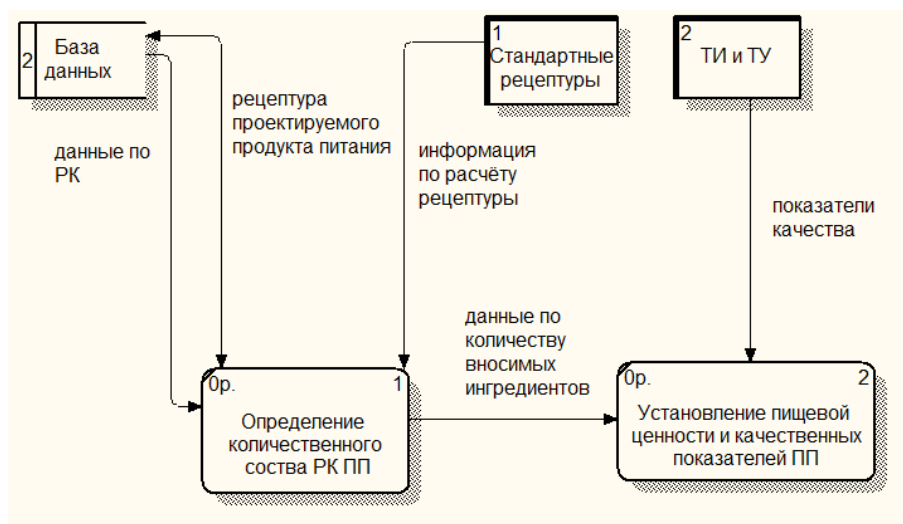


Рис. 4. DFD диаграмма

Разработка специализированного программного продукта на основе решения математической модели (1) – (2) позволит определить оптимальный состав проектируемого сбалансированного пищевого изделия.

Алгоритм реализуемого программного обеспечения включает следующие этапы:

- 1) задание исходных данных для расчета рецептурного состава проектируемого продукта;
- 2) определение интервалов и шагов изменения рецептурных ингредиентов;
- 3) выбор компонентов, используемых для изготовления продукта;
- 4) определение максимального отклонения по незаменимым аминокислотам белка проектируемого изделия от идеального белка;
- 5) проведение расчетов и оценка полученных результатов.

Оптимизацию состава рецептурных компонентов для проектируемых пищевых изделий сбалансированного состава возможно осуществить путем математической формализации задачи с учетом ограничений по содержанию незаменимых аминокислот, белков, углеводов и кальция. Это не только установит состав рецептурных ингредиентов, но и установит их такое соотношение в продукте, которое обеспечит максимальное приближение значений массовой доли нормированных питательных веществ к требуемым значениям.

Библиографический список

1. Сафонова, Ю.А. Оптимизация рецептурных компонентов с помощью математического планирования эксперимента / Ю.А. Сафонова, А.В. Лемешкин, А.А. Тарасов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Современные тенденции развития науки и технологий»: Сб. научных трудов междунар. науч.-практ. конф. - Белгород: Агентство перспективных научных исследований (АПНИ). - 2017. - Ч. II. - С. 152-154.
2. Сафонова, Ю.А. Моделирование рецептур функциональных пищевых продуктов / Ю.А. Сафонова, И.М. Жаркова, А.С. Барин // Тенденции развития науки и образования. - 2019, №49-12. - С. 14-17.
3. Курчаева, Е.Е. Применение математических методов при составлении рациона животных / Е.Е. Курчаева, Ю.А. Сафонова, А.С. Барин // Сборник статей по материалам VII междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в науке и практике». - Уфа: Изд. Дендра. - 2018. - С. 222-226.
4. Дерканосова, Н.М. Проектирование и обеспечение качества пищевых продуктов (на примере хлебобулочных изделий) / Н.М. Дерканосова, Л.А. Коробова, Е.Ю. Ухина // Воронеж: Научная книга. - 2016. - 140.
5. Скородумов, П.В. Моделирование бизнес-процессов: подходы, методы, средства / П.В. Скородумов // Вопросы территориального развития. - 2014, №5(15). - С. 5.

УДК 519.85

МЕТОДЫ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОЧИСТКИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД

Н.У. Утеулиев, Б.Н. Бегилев

*Нукусский филиал Ташкентского университета информационных технологий
имени Мухаммеда аль-Хорезми,
Республика Узбекистан, Нукус, utewlievn@mail.ru*

Аннотация. В данной работе с помощью методов качественного анализа исследуются модели очистки загрязненных вод и устанавливаются соотношения двойственности и условия оптимальности для них.

Ключевые слова: методы качественного анализа, модель, соотношения двойственности, условия оптимальности, очистка загрязненных вод, целевая функция.

QUALITY ANALYSIS METHODS FOR ECOLOGICAL AND ECONOMIC MODELS OF PURIFICATION OF POLLUTED WATERS

N.U. Uteuliev, B.N. Begilov

*Nukus branch of the Tashkent University of Information Technology
named after Mohammed al-Khwarizmi,
Republic of Uzbekistan, Nukus, utewlievn@mail.ru*

Annotation. In this paper, using the methods of qualitative analysis, we study the models for treating contaminated waters and establish the duality ratios and optimality conditions for them.

Keywords: methods of qualitative analysis, model, duality ratios, optimality conditions, purification of polluted waters, objective function.

В настоящее время дефицит пресной воды является актуальной проблемой многих стран. Все более возрастающие потребности промышленности и сельского хозяйства в воде заставляют ученых мира искать разнообразные средства для решения этой проблемы. Научно-технический прогресс во всех областях человеческой деятельности привел к необходимости комплексных эколого-экономических исследований при решении на первый взгляд чисто технических задач. Прежде всего, такие исследования оказались необходимыми при решении задач использования природных ресурсов, когда проявляется взаимодействие технических, экономических аспектов и окружающей среды. Поэтому велика актуальность решения задач рационального использования и охраны водных ресурсов. Эффективным инструментом исследований служит математическое моделирование на основе методологии системного анализа.

В данной работе рассматриваются эколого-экономические модели очистки загрязненных вод и на основе методов качественного анализа устанавливаются соотношения двойственности и условия оптимальности для них.

Задача состоит в выборе такой допустимой комбинации технологий очистки и такого распределения объема загрязненных вод между ними, чтобы затраты на очистку были минимальными и при этом концентрации примесей после очистки у контрольного створа не превышали заданных предельно допустимых значений [4].

Введем следующие обозначения:

q_k - объем загрязненных вод, поступающих на комплекс очистки на k -ом водосбросе;

x_{ki} - объем загрязненных вод, которая будет обрабатываться по i -ой технологической схеме очистки на k -ом водосбросе. Таким образом, $X_k = \{x_{ki}\}, i = \overline{1, N}$, вектор распределения всего объема загрязненных вод между технологиями очистки на k -ом водосбросе;

x_{ki}^- и x_{ki}^+ - величины, ограничивающие производственные мощности i -ой технологической схемы при очистке сброса объема q_k ;

C_{0kj}, C_{kj} - концентрации примесей j -го вида соответственно до очистки и предельно-допустимые концентрации (ПДК) после очистки;

P_{kij} - степень очистки j -ой примеси по i -ой технологии очистки на k -ом водосбросе;

A_{ki}, λ_{ki} - коэффициенты аппроксимации функции затрат на очистку загрязненных вод по i -ой технологической схеме на k -ом водосбросе.

Теперь рассмотрим следующую математическую постановку задачи очистки загрязненных вод, отражающую процесс поиска наилучшего способа очистки с минимальными затратами, которая имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} F(x) = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^N A_{ki} x_{ki}^{\lambda_{ki}} \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^N B_{kij} x_{ki} \leq C_{kj}, \quad k = \overline{1, L}; j = \overline{1, M}, \\ \sum_{i=1}^N x_{ki} = q_k, \quad k = \overline{1, L}; \\ x_{ki}^- \leq x_{ki} \leq x_{ki}^+, \quad k = \overline{1, L}; j = \overline{1, M}, \\ A_{ki} \geq 0, \quad 0 \leq \lambda_{ki} \leq 1, \quad k = \overline{1, L}; i = \overline{1, N} \end{array} \right. \quad (1) \quad (2) \quad (3) \quad (4)$$

Задача (1)-(4) является нелинейной задачей распределительного типа. Если в данной задаче (1)-(4), в целевой функции (1) принять $\lambda_{ki} = 1$, то задача (1)-(4) преобразуется в задачу линейного программирования.

Тогда задача (1)-(4) имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} F(x) = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^N A_{ki} x_{ki} \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^N B_{kij} x_{ki} \leq C_{kj}, \quad k = \overline{1, L}; j = \overline{1, M}, \\ \sum_{i=1}^N x_{ki} = q_k, \quad k = \overline{1, L}; \\ x_{ki}^- \leq x_{ki} \leq x_{ki}^+, \quad k = \overline{1, L}; j = \overline{1, M}, \quad A_{ki} \geq 0, \quad 0 \leq \lambda_{ki} \leq 1, \quad k = \overline{1, L}; i = \overline{1, N} \end{array} \right. \quad (5) \quad (6) \quad (7) \quad (8)$$

Здесь согласно работе [4], остановимся на экономическом содержании модели (5)-(8). Целевая функция (5) отражает суммарные затраты водопользователя на проведение водоочистных мероприятий. Очевидно, что зависимости, отражающие связь затрат на реализацию очистки с объемом загрузки технологий очистки являются линейными функциями. Ограничения (6)-(8) задают область поиска наилучшего решения. Ограничение (6) означает, что у контрольного створа концентрация j -го вида примеси не должна превышать допустимую.

Коэффициент "очищаемости", обозначенный B_{kij} вычисляется следующим образом:

$$B_{kij} = C_{0kj} (1 - P_{kij}) \quad (9)$$

Ограничение (7) требует, чтобы весь объем k -го сброса на том водосбросе был распределен по технологическим схемам.

Ограничение (8) означает, что объем загрязненных вод, направленных на очистку, не должен превышать производственной мощности технологических схем.

Для задачи (5)-(8) с помощью функции Лагранжа установим двойственную задачу следующего вида :

$$Z(u) = \sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^M u_{kj} C_{kj} + \sum_{k=1}^L u_k q_k \rightarrow \max \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^N A_{ki} - \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M u_{kj} B_{kij} - \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^N u_k \geq 0 \quad (11)$$

$$u_{kj} \geq 0, \quad u_k \geq 0 \quad (12)$$

Двойственная задача (9)-(11) состоит в максимизации из суммы оценок концентрации примесей j -го вида соответственно до очистки и предельно-допустимой концентрации после очистки, оценок объема загрязненных вод, которые удовлетворяют ограничениям (10), (11).

Задача (5)-(8) и (9)-(11) являются взаимодвойственными задачами линейного программирования. Поэтому для них справедливы первая и вторая теоремы двойственности [1].

Теорема 1. Если одна из задач двойственной пары (5)-(8), (9)-(11) имеет оптимальное решение, то другая задача разрешима. При этом для любых оптимальных решений (x_{ki}^*) и (u_{kj}^*, u_k^*) задач (5)-(8), (9)-(11) имеет место равенство:

$$F(x_{ki}^*) = Z(u_{kj}^*, u_k^*) \quad (13)$$

Теорема 2. Для того, чтобы допустимое решение (x_{ki}^*) задачи (5)-(8) было оптимальным, необходимо и достаточно, чтобы существовали такие величины (u_{kj}^*, u_k^*) , что

$$(C_{kj} - \sum_{i=1}^N B_{kij} x_{ki}^*) u_{kj} = 0 \quad k = \overline{1, L}; j = \overline{1, M}, \quad (14)$$

$$(q_k - \sum_{i=1}^N x_{ki}^*) u_k = 0, \quad k = \overline{1, L}; \quad (15)$$

$$(\sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^N A_{ki} - \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M u_{kj}^* B_{kij} - \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^N u_k^*) x_{ki}^* = 0 \quad (16)$$

Следовательно, x_{ki}^* и u_{kj}^*, u_k^* - оптимальные решения соответствующих двойственных задач (5)-(8), (9)-(11).

Библиографический список

1. Эрроу К., Гурвиц Дж. и Удзава. Исследования по линейному и нелинейному программированию. - М.: Мир, 1962. - 333 с.
2. Юдин Д.Б. Математические методы управления в условиях неполной информации. - М.: Сов. Рад., 1974. - 339 с.
3. Утеулиев Н.У. Стохастические модели и методы природопользования. - Ташкент - "Aloqachi" - 2019. - 127 с.
4. Утеулиев Н.У., Бурханов Ш.А., Омарова Х., Бегитов Б.Н. «О решении оптимизационной задачи выбора схем очистки загрязненных вод», Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики», №1-2, 2013, Ташкент, Узбекистан (стр 20-23).

СЕКЦИЯ «ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

УДК 303.732.4; ГРНТИ 50.41.23

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО РАСПОЗНАВАНИЮ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Н.А. Полковникова

*Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
Россия, г. Новороссийск, natalia-polkovnikova@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрены технологии компьютерного зрения на основе глубоких свёрточных нейронных сетей. Разработана программа в среде Matlab R2019b на основе свёрточной нейронной сети для обнаружения лица, определения возраста и эмоционального состояния человека в видеопотоке.

Ключевые слова: распознавание образов, алгоритм Виола-Джонса, признаки Хаара, свёрточные нейронные сети, эмоциональный искусственный интеллект.

DECISION SUPPORT SYSTEM BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR OBJECT DETECTION IN IMAGES

N.A. Polkovnikova

*Admiral Ushakov Maritime State University,
Russia, Novorossiysk, natalia-polkovnikova@mail.ru*

Abstract. Computer vision technologies based on deep convolutional neural networks is considered. The computer program based on convolutional neural network for marine objects recognition implemented in Matlab R2019b for face detection, determination of age and emotional human state in video stream.

Keywords: pattern recognition, Viola-Jones object detection, Haar-like features, convolutional neural networks, emotion artificial intelligence.

За последние годы компьютерное зрение стало ключевой технологией искусственного интеллекта во многих областях и разрабатывается для:

- беспилотных автомобилей (Tesla, Volvo, Audi, BMW, Mercedes-Benz, Google, Yandex, Alphabet Waymo, Baidu Apollo, Uber);
- безэкипажных морских судов (Kongsberg, Rolls-Royce, Hyundai, Transas);
- интеллектуальных диалоговых систем (Apple Siri, Amazon Alexa, Google Assistant, Яндекс Алиса, Samsung Bixby, Microsoft Cortana, Mail Group Маруся) и многих других направлений [1-3].

Распознавание лиц является классической задачей в компьютерном зрении и самый современный тренд в авторизации пользователей, например, Apple использует технологию Face ID, а компания OnePlus – технологию Face Unlock. В компании Baidu распознавание лиц используется вместо ID-карт для обеспечения доступа в офис, а при повторном пересечении границы в ОАЭ достаточно только посмотреть в веб-камеру. В медицинском научном журнале Nature Medicine сообщается, что в 2019 году учёными разработана система искусственного интеллекта, способная по фотографии человека диагностировать 216 редких наследственных заболеваний с высокой точностью.

Задачу распознавания лиц вполне успешно решали алгоритмом Виола-Джонса (Viola-Jones) – основополагающим алгоритмом для поиска объектов на изображении в реальном времени. Алгоритм разработан Паулом Виолой (Paul Viola) и Майклом Джонсом (Michael Jones) в 2001 году и основан на использовании техники «скользящего окна» и каскадов Хаара в качестве признаков. Перед идентификацией лица алгоритм преобразует изображение в градации серого цвета для сокращения данных и упрощения обработки. Однако, алгоритм

Виола-Джонса изначально разработан для идентификации лиц в положении анфас или под небольшим углом, примерно до 30° . Если угол наклона больше 30° или есть лица, смотрящие вверх, вниз или в сторону (положение профиль), то вероятность обнаружения резко падает. На рисунке 1 представлен результат распознавания лиц на изображении с помощью алгоритма Виолы-Джонса.

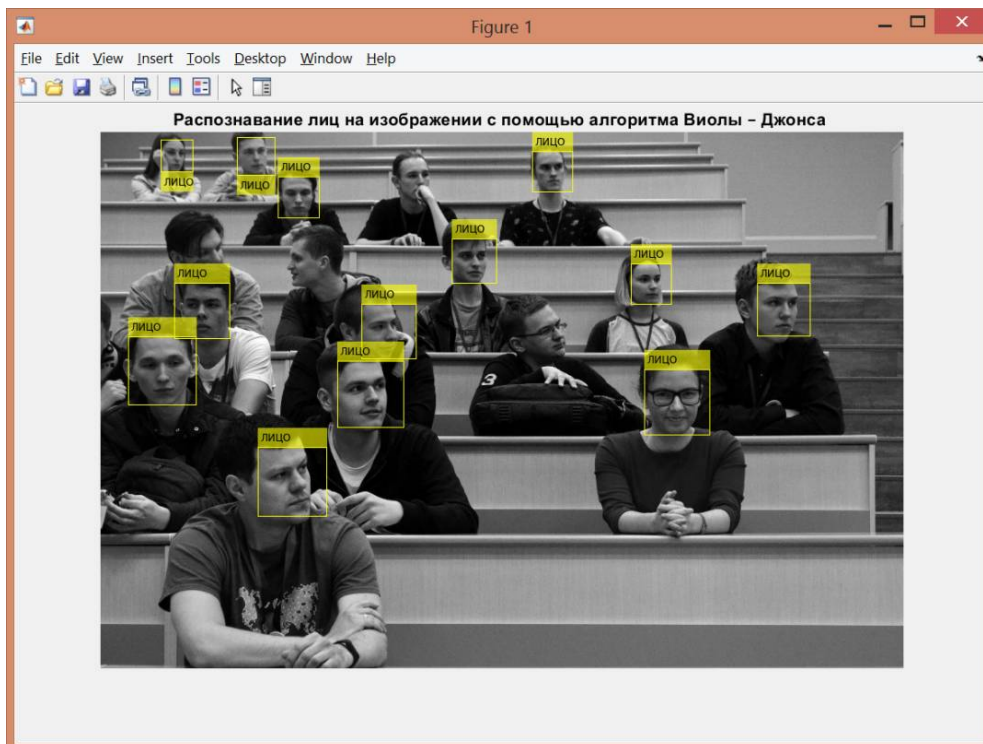


Рис. 1. Результат распознавания лиц с помощью алгоритма Виолы-Джонса

Указанная особенность метода не позволяет обнаружить лицо человека, повернутое под произвольным углом (на рисунке 1 лица без рамки), что в значительной мере затрудняет или делает невозможным использование алгоритма Виола-Джонса в современных производственных системах с учётом растущих потребностей. Поэтому в настоящее время данная задача решается с помощью технологий глубокого обучения и свёрточных нейронных сетей [4].

Алгоритм распознавания лиц свёрточной нейросетью

В отличие от признаков Хаара, которые используются в алгоритме Виолы-Джонса, нейросети обходятся без помощи человека и находят признаки в процессе обучения. Для этого необходимо обучить нейросеть на большой базе изображений (обучающей выборке), в которой имелись бы снимки самых разных лиц на различном фоне. В настоящее время разработано множество архитектур специализированных нейронных сетей для распознавания человеческих лиц. Например, сиамская нейронная сеть Google FaceNet, свёрточные нейросети Facebook DeepFace и VGG-Face (VGG-16) достигли точности распознавания лиц сравнимой с человеком [5]. На рисунке 2 представлена обобщённая схема распознавания лиц с помощью свёрточной нейросети.

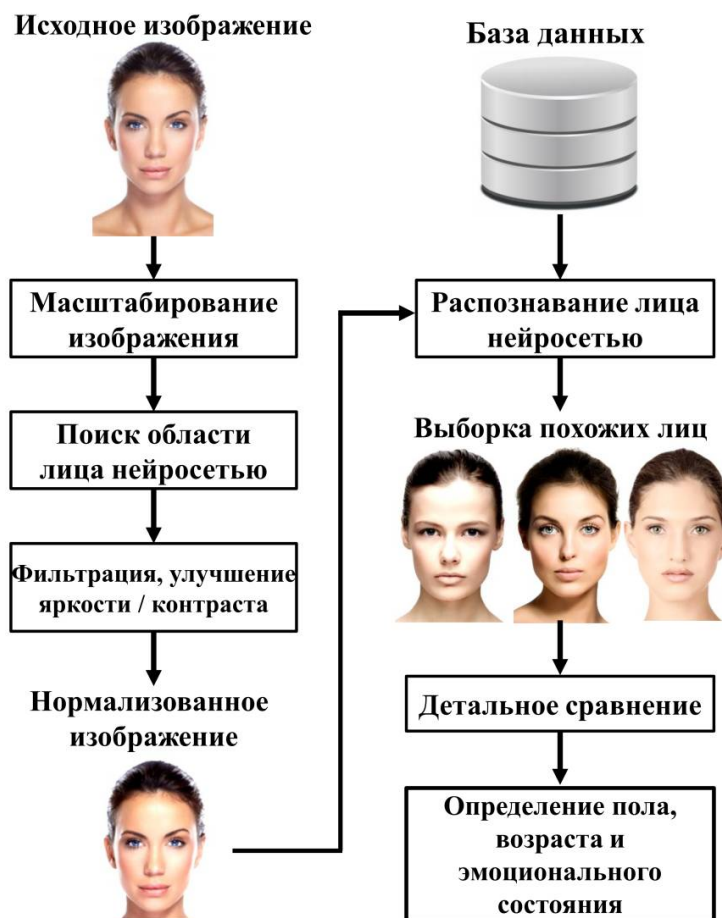


Рис. 2. Схема распознавания лица свёрточной нейронной сетью

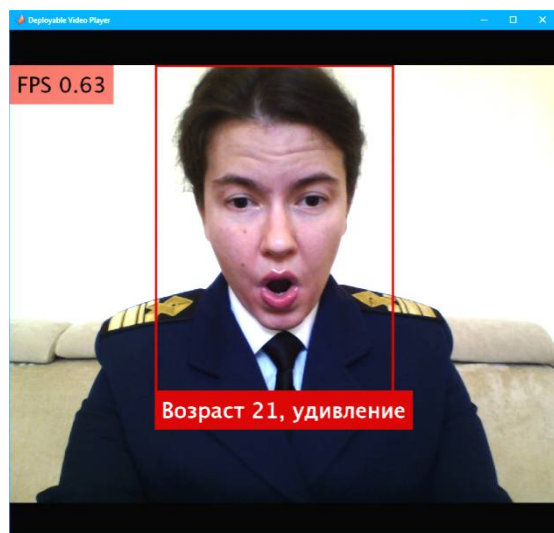
Для распознавания лица система наблюдения делает фотографию человека, затем нейронная сеть выполняет поиск области лица, полученная область выделяется, оптимизируется масштаб, корректируется яркость и контраст изображения [6]. При распознавании лица нейросетью происходит поиск из базы данных похожих лиц, детальное сравнение с выборкой похожих на него лиц по ключевым признакам: определяется пол, возраст и эмоциональное состояние человека на изображении. После этого нейронная сеть выводит полученные результаты на изображение.

Определение возраста и эмоционального состояния с помощью нейросети

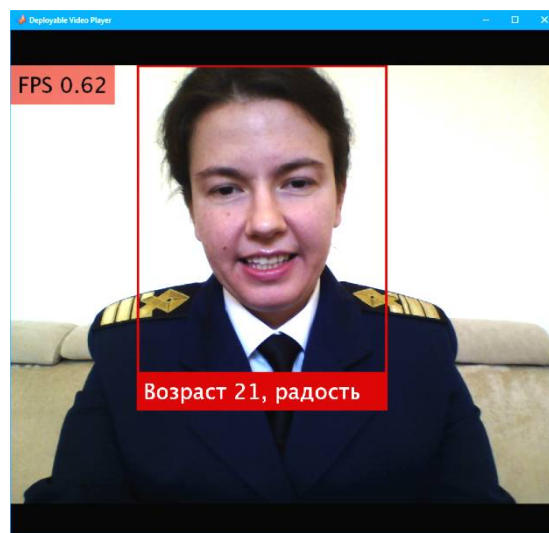
Современные нейронные сети способны идентифицировать пол людей на видео с 90% точностью, но при определении возраста задача усложняется. Из-за условий съёмки или даже при небольшом повороте головы определение возраста одного и того же человека на разных кадрах колеблется в диапазоне ± 5 лет. Традиционно берется промежуток от 1 до 100 лет: нейросеть по каждому видеокadresу оценивает степень уверенности в том, что человек на изображении соответствует определенному возрасту. Например, если на 30% кадров нейросеть определяет, что человеку 21 год, а на 10% – что 60 лет, то вывод будет таким: с 30% вероятностью возраст составляет 21 год, а с вероятностью 10% – 60 лет.

Эмоциональный искусственный интеллект (emotion artificial intelligence) и эмоциональные вычисления (affective computing) – это технология, которая позволяет компьютеру распознавать и интерпретировать человеческие эмоции и реагировать на них. Камера формирует видео-поток, затем из него выделяются отдельные изображения и обрабатываются. Черты лица (брови, глаза, губы и т. д.) размечаются маркерами (точками). Нейросеть опреде-

ляет положение маркеров, сопоставляет их с признаками эмоций из шаблона и делает вывод о том, какая эмоция отражена – злость, страх, удивление, грусть, радость или спокойствие. На рисунке 3 представлен результат работы свёрточной нейронной сети, распознающей лицо, возраст и эмоциональное состояние в режиме реального времени в среде Matlab R2019b.



а) возраст 21 и эмоция «удивление»



б) возраст 21 и эмоция «радость»

Рис. 3. Результат определения возраста и эмоции с помощью свёрточной нейронной сети в видеопотоке

Распознавание нейросеть производит в видеопотоке: на рис. 2а нейросеть определила возраст 21 год и эмоцию «удивление» при кадровой частоте 0,63 FPS (frames per second – кадров в секунду), а на рис. 2б возраст 21 год и эмоцию «радость» при кадровой частоте 0,62 FPS. Для обучения использовался набор заранее размеченных изображений лиц, каждому из которых поставлена в соответствие изображённая на нем эмоция. В процессе обучения нейронная сеть выявляет признаки, определяющие эмоцию человека. Чем точнее удаётся интерпретировать эмоции, намерения и мотивацию, тем выше уровень эмоционального интеллекта и эмпатии. Например, интеграция эмоционального интеллекта в голосовые помощники повысит способность определять эмоциональное состояние человека и скорректировать стратегию коммуникации, исходя из эмоционального состояния собеседника. Интеграция эмоционального искусственного интеллекта в автоматизированные системы управления (например, беспилотные автомобили) необходима для обеспечения безопасности и корректировки стратегии управления.

Заключение

Разработана программа, реализующая алгоритм распознавания лиц, возраста и эмоционального состояния с помощью свёрточной нейронной сети в видеопотоке в режиме реального времени в среде Matlab R2019b. Анализ результатов компьютерных экспериментов позволяет говорить об успешной работе созданного алгоритма и программы при распознавании лиц. Использование свёрточной нейронной сети обладает рядом преимуществ перед другими методами распознавания:

- 1) способность к обучению для выделения ключевых характеристик лица и высокий результат распознавания даже при искажении данных;
- 2) возможность получения классификатора, который хорошо моделирует сложную функцию распределения изображения лица, что позволяет увеличить точность распознавания.

Библиографический список

1. LeCun Y. Deep Learning Hardware: Past, Present, and Future. *IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC)*, 2019. – 12-19 pp.
2. Клетте Р. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / пер. с англ. А.А. Слинкин. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 506 с.
3. Полковникова Н.А., Полковников А.К. Система поддержки принятия решений для выбора режима и прогнозирования отказов главного судового двигателя // Эксплуатация морского транспорта. Гос. морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск. – 2019, №3(92). – С. 170-180.
4. Чанг Буй Тхи Тху, Хоанг Фан Нгок, Спицын В.Г. Распознавание лиц на основе применения метода Виолы–Джонса, вейвлет-преобразования и метода главных компонент // Известия Томского политехнического университета, т. 320, № 5, 2012. – С. 54-59.
5. Schroff F., Kalenichenko D., Philbin J. FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering <https://arxiv.org/abs/1503.03832> (Дата обращения 05.01.2020)
6. Слипенко О.О., Клименко С.В., Степанова А.Ю. Использование аппарата нейросетей при распознавании лица // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. том 21, 2017. – С. 143-151.

УДК 004.896; ГРНТИ 28.23.29

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДБОРА КРЕДИТНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

К.Г. Шитова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, kshitova@inbox.ru*

Аннотация. В работе приводятся основные задачи интеллектуального анализа данных. В ней рассматриваются способы подготовки модели машинного обучения к ее эксплуатации и применению к задаче принятия решения по одобрению кредита или его отказа, а также подбора кредитных продуктов для предприятий. А именно рассматривается процесс кросс-валидации модели и методы нормализации входных данных.

Ключевые слова: нейронные сети, входные данные, интеллектуальный анализ данных, кросс-валидация, нормализация.

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT RECOMMENDATION SYSTEM FOR SELECTING CREDIT PRODUCTS FOR ENTERPRISES BASED ON NEURAL NETWORKS

K.G. Shitova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, kshitova@inbox.ru*

The summary. The paper presents the main tasks of data mining. It discusses ways to prepare a machine learning model for its operation and application to the task of making a decision on loan approval or rejection, as well as selecting credit products for businesses. In particular, we consider the process of cross-validation of the model and methods of normalization of input data.

Keywords: neural networks, input data, data mining, cross-validation, normalization.

Некоторые банки стремятся получить как можно больше надежных заемщиков. Но на проверку каждого чаще всего уходит большое количество времени. Это связано с необходимостью осуществлять анализ данных заемщика различными сотрудниками банка, пока они не примут решение об одобрении кредита или отказе в нем. Но поскольку банки заинтересованы в том, чтобы заполучить себе как можно больше клиентов, то процесс выдачи кредита необходимо автоматизировать, ведь этот процесс занимает не только большое количество времени, но и в нем принимает участие человеческий фактор. В связи с этим оценка клиента может быть субъективной и даже ошибочной, на что может влиять физическое состояние сотрудника и даже его настроение. Интеллектуальная рекомендательная система подбора

кредитных продуктов для предприятий поможет банку быстро оценить заемщика и предложить ему оптимальный вариант кредитования. С ней сотрудник банка сможет обработать большее число обращений, чем при обычной процедуре, и допустить меньшее число ошибок [1].

Издержки банка можно сократить, если разработать такое программное средство, так как оно позволит снизить трудозатраты сотрудников, а, следовательно, и сэкономить на их зарплате.

Чтобы разработать такую программу необходимо решить ряд проблем. Нужно определить показатели предприятий, по которым программа будет их оценивать, и найти обучающие данные. В качестве входных данных были выбраны следующие характеристики предприятий:

- 1) рейтинг заемщика (числовой) – балльная оценка от 1 до 10;
- 2) кредитная история (категориальный) – параметр указывает на качество кредитной истории заемщика, т.е. показывает, как часто он брал кредит, вовремя ли его гасил;
- 3) результат верификации (категориальный);
- 4) голос кредитного инспектора (категориальный);
- 5) голос клиентского менеджера (категориальный);
- 6) сумма залога (числовой) – сумма, которая определяет текущие средства заемщика, которые могли бы пойти на погашение кредита;
- 7) запрашиваемая сумма кредита (числовой) – сумма, которую заемщик желает получить;
- 8) запрашиваемый срок кредита (числовой) – срок, в течение которого заемщик планирует погасить кредит.

Выбранные характеристики определяют качество заемщика и позволяют принять решение, одобрить кредит или нет.

Для разработки данной программы принято решение применять инновационные технологии машинного обучения.

DataMining или интеллектуальный анализ данных представляет собой процесс поиска неявных закономерностей в данных, имеющих большую размерность (BigData) [2, 5, 6]. Этот процесс используется в различных интеллектуальных системах для поддержки принятия решений и получения рекомендаций. Среди задач интеллектуального анализа данных обычно выделяют [6]:

- 1) кластеризацию;
- 2) регрессию;
- 3) классификацию;
- 4) прогнозирование.

Так как модель будет определять выдавать кредит или нет, то, следовательно, будет решаться задача бинарной классификации. В основу интеллектуальной программы будет положена модель машинного обучения, а именно нейронная сеть глубокого обучения.

Чтобы добиться требуемой точности модели, необходимо подобрать соответствующие параметры. Для определения качества подбора параметров модели машинного обучения (нейронной сети) чаще всего применяют кросс-валидацию модели.

Для выполнения кросс-валидации методом K-folds исходное множество разбивают на k частей. При решении практических задач обычно выбирают k , равное 5-ти или 10-ти. Если выбрать, например, $k = 5$, то на четырех частях ($k - 1$) выполняется обучение модели, а пятая часть применяется для тестирования. Такое обучение с тестированием производят k раз. На каждой итерации выбирается новая часть для проверки, а на остальных частях производится обучение.

Выполнение перекрестной проверки производится для того, чтобы избежать отрицательных особенностей проверки на одном множестве и получить более точную оценку качества модели. При этом полученная оценка будет более достоверной, если при каждом проходе оценить выходную ошибку модели и усреднить ее по всем итерациям; качество обучения будет улучшено за счет более равномерного распределения классов.

Если выбирают $k = 10$, то модель на 9/10 данных обучается и на 1/10 тестируется. Опытным путем установлено, что в этом случае оценка качества модели получается наиболее достоверной [3, 5].

Если кросс-валидация дает приблизительно одинаковый результат на всех участках данных, то можно считать подобранные характеристики и сами данные предприятия подходящими для обучения данной модели, иначе в данных могут быть зашумленные показатели или же параметры, напрямую определяющие результат работы модели. От таких параметров следует избавляться, чтобы дать возможность модели научиться выполнять обобщение всех данных, а не принимать решение на основе какого-то одного параметра сделки, не обращая внимания на другие. Если показатели на всех участках данных достаточно высоки, то это может говорить о хорошо подобранных параметрах модели.

Так как подобранные характеристики предприятия содержат в себе категориальные данные, перед процессом обучения модели выполняется приведение этих данных к числовым, а также нормализация всех данных.

Существуют различные способы нормализации входных данных модели.

1. Нормализация с использованием математического ожидания и дисперсии.

$$y_t (t = 1, \dots, N) \quad (1)$$

При использовании этого способа выполняется предобработка данных, т.е. происходит нормировка исходных данных, для чего следует воспользоваться формулой:

$$y'_t = \frac{y_t - M_y}{\sqrt{D_y}}, \quad (2)$$

$$M_y = \frac{1}{n} \sum_t y_t, \quad (3)$$

$$D_y = \frac{1}{n-1} \sum_t (y_t - M_y)^2, \quad (4)$$

где:

y'_t – новая переменная;

M_y – выборочная оценка математического ожидания;

D_y – выборочная оценка дисперсии.

Для того, чтобы полученные данные на выходе сети соответствовали реальным, используется формула (5).

$$yn_t = yn'_t \sqrt{D_y} + M_y \quad (5)$$

2. Нормализация с использованием минимаксной функции.

После определения минимального и максимального значений функции минимаксная функция осуществляет линейное преобразование так, чтобы получаемые значения находились в нужном диапазоне.

Формула нормализации в общем виде выглядит так [4]:

$$y = \frac{(x - x_{min})(d_2 - d_1)}{x_{max} - x_{min}} + d_1, \quad (6)$$

где:

x – значение, подлежащее нормализации;

$[x_{min}, x_{max}]$ – интервал значений x ;

$[d_1, d_2]$ – интервал, к которому будет приведено значение x .

3. Так же могут применяться методы аппроксимации.

Предполагается, что программа на основе данных клиента будет определять, возможно ли ему выдать кредит с требуемыми суммой и сроком, и в зависимости от полученного результата она будет предлагать скорректировать параметры кредитного продукта в установленных рамках. Это позволит предложить клиенту большую сумму при том же сроке, если будет получено одобрение, или же при отказе программа попытается подобрать более подходящие условия для этого клиента, например, увеличить срок кредита или уменьшить сумму.

В случае отказа по сделке программа будет выполнять подбор наиболее подходящих кредитных продуктов. Кредитный продукт включает такие основные характеристики как сумма кредита, срок и процентная ставка.

В случае одобрения программа так же пытается предложить варианты кредитных продуктов заемщику, которые его возможно заинтересуют.

Планируется дальнейшее улучшение модели за счет проведения дополнительных анализов параметров модели и подбора таких параметров, которые дадут наибольшую точность работы модели. В дальнейшем возможно будет проведено расширение спектра используемых характеристик предприятий для получения наибольшей способности модели к обобщению данных.

В результате данной работы можно сделать следующие выводы:

- 1) было обосновано, что решение задачи выдачи кредита необходимо автоматизировать;
- 2) решение задачи выдачи кредита необходимо автоматизировать с помощью разработки информационной системы;
- 3) для обработки данных выбраны методы машинного обучения, т.к. они позволяют выявить неявные закономерности в данных и благодаря их способности к обобщению принять решение в задаче выдачи кредита;
- 4) для определения качества подбора параметров модели машинного обучения следует применять кросс-валидацию;
- 5) для повышения качества обучения модели необходимо выполнять нормализацию входных данных.

Библиографический список

1. Шитова К.Г. Разработка интеллектуальной рекомендательной системы подбора кредитных продуктов для предприятий // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Том 1. – РГРТУ имени В.Ф. Уткина. 2019. – С. 172-173.
2. Интеллектуальный анализ данных. [Электронный ресурс]. URL: http://citforum.ru/seminars/cis99/sch_04.shtml (дата обращения: 17.12.2019).
3. Валидация моделей. [Электронный ресурс]. URL: <https://help.loginom.ru/userguide/processors/validation.html> (дата обращения: 18.02.2020).
4. Яхьяева Г.Э. Нечёткие множества и нейронные сети: Учебное пособие. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316с.
5. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. – 2-е изд. испр. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652с.
6. Лекция 1: Интеллектуальный анализ данных: базовые понятия [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/2312/612/lecture/13260> (дата обращения: 18.02.2020).

УДК 004.031.6; ГРНТИ 28.23.29

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ПЛАТФОРМЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КАМЕР

М.Д. Ершов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, ershov.m.d@rsreu.ru*

Аннотация. В работе рассмотрены технические и программные особенности реализации алгоритмов обработки и анализа изображений на платформе интеллектуальных видеокамер Axis. Сформулированы рекомендации к реализации алгоритмов с целью обеспечения встроенной обработки данных в режиме реального времени.

Ключевые слова: встроенные системы, анализ изображений, встроенная обработка данных, программная реализация алгоритмов.

FEATURES IN IMPLEMENTATION OF IMAGE ANALYSIS ALGORITHMS ON SMART CAMERA PLATFORM

M.D. Ershov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, ershov.m.d@rsreu.ru*

The summary. The paper discusses the technical and software features in implementation of image processing and analysis algorithms on the platform of Axis intelligent video cameras. Recommendations for implementation of algorithms in order to provide embedded data processing in real-time are formulated.

Keywords: embedded systems, image analysis, embedded data processing, software implementation of algorithms.

В настоящее время наметилась устойчивая тенденция, связанная с широким внедрением систем видеоаналитики в различные сферы жизни человека. С задачами обработки и анализа изображений и видео сталкиваются при разработке бортовых систем обработки информации и управления, в частности систем автоматического обнаружения и сопровождения объектов [1]. Также данные задачи присущи области транспортной аналитики, что связано с актуальной проблемой постоянно растущего числа автотранспорта на дорогах. Алгоритмы анализа изображений и видео позволяют получать информацию, которая может включать число объектов, движущихся в интересующих направлениях; плотность потока объектов; параметры объектов, а также определять возникновение внештатных ситуаций [2].

Необходимо учесть, что система видеоаналитики должна обеспечивать обработку больших массивов данных, представленных в виде последовательности изображений, в реальном или близком к реальному масштабе времени. Часто каналы связи не обладают необходимыми параметрами, что приводит к появлению искажений и шумов на изображениях, задержкам при получении нового кадра. Для примера рассмотрим систему транспортной аналитики, представленную на рисунке 1.

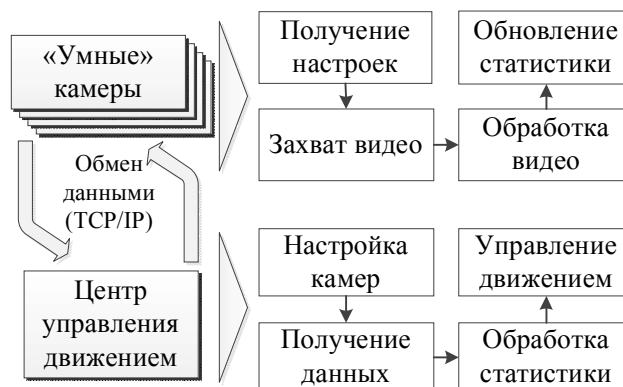


Рис. 1. Система транспортной аналитики

Для эффективного управления дорожным движением в городе возникает необходимость наблюдения за большим числом перекрестков и участков дорог. Решением является установка камер видеонаблюдения, однако требуются линии связи для передачи больших объемов данных (видео) и дальнейшая обработка с использованием вычислительных центров. Использование интеллектуальных камер позволяет уменьшить требования к каналам связи, т.к. для передачи статистических данных о транспортных потоках необходимо гораздо меньше ресурсов, чем для передачи изображений и видео. Возникает задача разработки соответствующих алгоритмов, которые в том числе должны работать в различных сложных условиях, но вычислительные возможности камер ограничены.

В данной работе в качестве конечной платформы для реализации алгоритмов рассматриваются продукты фирмы Axis с возможностью встроенной обработки видео. Существенной особенностью, которую необходимо учитывать при разработке алгоритмов, является ограниченность вычислительных ресурсов целевой платформы, что может также приводить к непостоянному значению частоты получения кадров видео. Основной проблемой является вычислительная сложность того или иного алгоритма, однако эффективность работы можно повысить, если учесть особенности целевой встроенной системы.

Характеристики камер и предоставляемые средства разработки

Интеллектуальные видеокamеры фирмы Axis подходят для городского видеонаблюдения и для контроля объектов инфраструктуры при различных условиях. Рассмотрим два устройства, на платформе которых выполнялась апробация алгоритмов анализа видео:

1. Сетевая камера AXIS P1365-E Mk II. Разрешение от 160×90 до 1920×1080 пикселей. 512 Мб ОЗУ. Процессор ARTPEC-5.

2. Сетевая камера AXIS M2026-LE Mk II. Разрешение от 320×240 до 2688×1520 пикселей. 512 Мб ОЗУ. Процессор ARM v7.

Разработка приложений видеоаналитики для описанных выше устройств выполняется с использованием специального комплекта средств разработки (SDK) – AXIS Camera Application Platform (ACAP) [3].

ACAP включает в себя документацию, интерфейс прикладного программирования (API), примеры проектов и соответствующие компиляторы для разных процессоров. Разработка приложений с использованием данной платформы осуществляется на языках программирования C и/или C++ и на базе операционной системы, основанной на ядре Linux и системных библиотеках GNU.

Также ACAP содержит следующие сторонние программные библиотеки:

1. RASter Processing Primitives library (RAPP) [4]. Библиотека для обработки изображений, ориентированная на приложения компьютерного зрения и видеоанализа. Содержит

эффективные реализации таких алгоритмов, как простейшая пороговая обработка, бинарная морфология, свертка, применение геометрических преобразований и т.д.

2. Fixed Point library (Fixmath) [5]. Библиотека для работы с числами с фиксированной точкой. Для используемой платформы на базе процессоров семейства ARTPEC операции умножения чисел с фиксированной точкой выполняются на два порядка быстрее, а деление и алгебраические функции – в 10-50 раз быстрее, чем соответствующие операции над числами с плавающей точкой.

Захват видеопотока

Средства захвата АСАР предоставляют функции для открытия и закрытия видеопотока и для считывания параметров кадра. При открытии потока, во-первых, задается тип потока. Это может быть поток в цветовом пространстве RGB, сжатый кодеком JPEG, или несжатый поток в цветовом пространстве YUV. Во-вторых, имеется возможность задать разрешение получаемого изображения. Для работы исследуемых алгоритмов достаточным разрешением является 640×360 пикселей либо 640×480 пикселей. Кроме того, для снижения вычислительных затрат в отдельных процедурах допускается уменьшение разрешения обрабатываемой области в 2 раза по каждой размерности.

Захват JPEG потока может рассматриваться для случаев обработки цветного изображения в реализуемых алгоритмах. Однако, с точки зрения вычислительных затрат нецелесообразно использовать данный тип потока. Для обработки изображения в этом случае необходимо предварительно его декодировать сторонними средствами. Таким образом, выполняется двойная работа, связанная с кодированием и декодированием потока. Вычислительные затраты оказываются значительно выше, чем при захвате несжатого потока.

В несжатом виде поток захватывается в цветовом пространстве YUV. Формат захвата несжатого потока зависит от архитектуры устройства. Для получения изображения в оттенках серого достаточно использовать универсальный формат Y800. Точки кадра в таком формате соответствуют компоненте Y (яркость). На каждую точку отводится 8 бит.

Родным форматом для архитектуры ARM является NV12. В данном формате информация о цвете хранится с более низким разрешением, чем информация о яркости. Так согласно формату NV12 для окрестности изображения размера 2×2 пикселя хранится 4 значения Y и по 1 значению для U и V. Т.е. яркостная компонента (Y) для одного пикселя занимает 8 бит, а цветоразностные компоненты (U и V) – 4 бита. При этом Y хранится в одной плоскости (массиве), значения U и V, как правило, чередуются в другой плоскости.

Родным форматом для ARTPEC-5 является I420. На один пиксель фактически отводится 12 бит: яркостная компонента (Y) занимает 8 бит, а цветоразностные компоненты (U и V) – 4 бита, т.е. для окрестности 2×2 пикселя хранится 4 значения Y и по 1 значению для U и V. При этом все три компоненты хранятся в разных плоскостях (размером $W \times H$ для Y и $(W/2) \times (H/2)$ для U и V).

Технические особенности платформы

В рассматриваемых устройствах установлены следующие версии чипов:

1. ARTPEC-5. Построен на основе двухъядерной многопроцессорной архитектуры, имеет большой размер кэша и большую пропускную способность памяти по сравнению с ARTPEC-4. Увеличенная вычислительная мощность и производительность предоставляют расширенные возможности для приложений обработки и анализа видео.

2. ARM. Процессоры на базе архитектуры ARM используются в сравнительно более новых устройствах Axis, позволяют получать видеопоток в самом высоком качестве с разрешением вплоть до 4К. С точки зрения встроенной обработки видео данные процессоры обладают весомым преимуществом – наличием модуля операций с плавающей точкой (FPU).

Большинство устройств, предоставленных для исследования и апробации разработанных алгоритмов, имели процессоры ARTPEC, поэтому особенности данной архитектуры рассматривались в большей мере. Процессоры ARTPEC были разработаны исключительно для сетевых устройств Axis и состоят из следующих частей:

1. Процессор обработки изображения при захвате. Обеспечивает обработку получаемой информации от видеодатчика: дебайеризация raw-изображения и повышение качества изображения.

2. Видеокодер. Обеспечивает параллельное сжатие (MJPEG и H.264) и передачу видеопотока для нескольких клиентов.

3. Центральный процессор. Представляет собой процессор общего назначения (CPU) для выполнения вспомогательных задач, а также для работы разрабатываемых с помощью АСАР приложений.

Таким образом, заявляемая производителем вычислительная мощность процессоров относится только к этапу первичной обработки видео, сжатия и передачи видеопотока. Для встроенной обработки видео отводятся сравнительно малые мощности центрального процессора, на котором и выполняются приложения обработки изображений и видеоаналитики, созданные с помощью АСАР. В случае реализации вычислительно сложных алгоритмов может возникнуть проблема с производительностью интеллектуальной камеры. Для встроенных приложений подходят хорошо оптимизированные алгоритмы со сравнительно невысокими вычислительными затратами.

Отдельно можно рассмотреть требования к оперативной памяти. С учетом того, что вычислительные возможности процессора не обеспечивают работу нескольких приложений видеоаналитики, то нецелесообразно развертывать и запускать одновременно несколько разных приложений. На рассматриваемых устройствах объем оперативной памяти равен 512 Мб, при этом опытным путем установлено, что при работе основных функций системы остаются свободными около 90 Мб.

Рассмотрим подробнее систему на базе ARTPEC-5. Данная система основана на многопроцессорной архитектуре с когерентным кэшем MIPS32 1004Кс, поддерживающей до четырех многопоточных ядер MIPS32 1004К (в ARTPEC-5 два ядра). Ядро процессора 1004К основано на 9-ступенчатом вычислительном конвейере с аппаратной поддержкой до двух потоков. Согласованность работы процессоров обеспечивается специальным модулем, называемым менеджером когерентности, который также может подключаться к дополнительному контроллеру кэша L2 с 256-битным каналом передачи данных.

Недостатком процессорной системы MIPS32 1004Кс является отсутствие встроенного модуля операций с плавающей точкой, поэтому при вычислениях используется программная эмуляция вещественных типов и операций с ними. Это требует дополнительной оптимизации программного кода с целью исключения максимального числа подобных операций в вычислениях алгоритмов, иначе возможно падение производительности в тысячи раз. При невозможности отказаться от арифметики с плавающей точкой следует использовать числа с фиксированной точкой, например, упомянутую библиотеку Fixmath.

Измерение времени работы алгоритмов

В таблице 1 приведено сравнение времени, затрачиваемого на обработку одного кадра разными реализациями алгоритма обнаружения и оценки параметров движущихся транспортных средств при использовании на интеллектуальных камерах с разными процессорами: ARTPEC-5 и ARM v7. Наблюдение осуществлялось за 1 или 4 полосами дороги, измерялось время обработки кадра без и с параллельной обработкой полос движения в потоках.

Базовым алгоритмом является алгоритм выделения движущегося объекта и оценки его параметров без использования слежения [6]. Данный алгоритм всегда работает на полно-

масштабном изображении. Для алгоритма слежения на основе оптического потока [7] также замерялось время обработки полномасштабного изображения с размером 640×360 пикселей и с уменьшением масштаба: 320×180 пикселей.

Таблица 1. Время обработки кадра для алгоритма обнаружения и оценки параметров движущихся объектов

Процессор	Алгоритм	Число полос	Параллельная обработка	Размер изобр.	Время, мс
ARTPEC-5	Базовый алгоритм	1	-	640×360	6
		4	-	640×360	20
			+		12
	+ оптический поток (30 точек)	1	-	640×360	250-1500
				320×180	150-400
ARM v7	Базовый алгоритм	4	-	640×360	8
	+ оптический поток (30 точек)	4	-	640×360	15

Как видно из таблицы, применение алгоритма слежения на основе оптического потока даже с малым числом отслеживаемых точек нецелесообразно на процессорах семейства ARTPEC из-за отсутствия модуля операций над числами с плавающей точкой. К тому же время, затрачиваемое на вычисление смещений одного и того же числа точек, на практике меняется в достаточно широком диапазоне, т.к. алгоритм оптического потока является итеративным и число итераций может меняться в зависимости от окрестности каждой точки. Реализация простого алгоритма обнаружения движущихся объектов позволяет решать задачу обнаружения и оценки параметров в режиме реального времени, значительный вклад в уменьшение времени обработки кадра вносят подход на основе уменьшения масштаба и распараллеливание обработки полос движения.

Заключение

Для реализации вычислительно сложных алгоритмов анализа изображений рекомендуется использовать устройства на базе более мощных процессоров, например, процессоров на основе архитектуры ARM, имеющих модуль операций с плавающей точкой. Также подобный модуль, совместимый со стандартом IEEE754 и поддерживающий вещественные типы данных одинарной и двойной точности, имеется в архитектуре MIPS32 1004Kf. Если же рассматриваемая система не имеет FPU, то желательно отказаться от арифметики с плавающей точкой либо же использовать числа с фиксированной точкой.

Вторым вариантом ускорения вычислений на архитектуре ARTPEC является использование параллельных вычислений, т.к. центральный процессор является многоядерным. Например, если алгоритм независимо обрабатывает несколько зон изображения, то данную обработку можно организовать в разных потоках.

Третий вариант является универсальным и заключается в уменьшении разрешения обрабатываемого изображения или обрабатываемой области. Уменьшение разрешения позволяет обеспечить обработку видео в режиме реального времени, но необходимо проведение оценки качества работы алгоритма.

В некоторых случаях следует обратить внимание на формат захватываемого видеопотока, т.к. разные архитектуры могут быть ориентированы под разные форматы, а захват сжатого видео приведет к еще большему росту накладных расходов вычислительных ресурсов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-2578.2018.5).

Библиографический список

1. Алпатов Б.А., Муравьев В.С., Муравьев С.И. Обработка и анализ изображений в системах автоматического обнаружения и сопровождения воздушных объектов. – Рязань: РИЦ РГРТУ, 2012. – 112 с.
2. Ершов М.Д., Шубин Н.Ю. Алгоритмы анализа дорожной обстановки // Доклады конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA2018». – М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2018. – Том 2. – С. 583-586.
3. Платформа для прикладных программ AXIS Camera Application Platform [Электронный ресурс]. – Axis Communications AB, 2020. – Режим доступа: <https://www.axis.com/ru-ru/support/developer-support/axis-camera-application-platform>.
4. Библиотека RAPP: руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Doxygen, 01.06.2016. – Режим доступа: <http://www.nongnu.org/rapp/doc/rapp>.
5. Библиотека Fixmath: руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Doxygen, 01.03.2014. – Режим доступа: <http://www.nongnu.org/fixmath/doc>.
6. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Ершов М.Д. Алгоритм обработки видеопоследовательности для обнаружения и подсчета автомобилей // Труды всероссийской науч.-техн. конф. «Техническое зрение в системах управления». – М.: ИКИ РАН, 2019. – С. 5-6.
7. Babayan P., Buiko S., Vdovkin L., Ershov M., Muraviev V., Sirenko A., Smirnov S. Real-time pyramidal Lukas-Kanade tracker performance estimation // Proc. SPIE, Real-Time Image Processing and Deep Learning 2019. – SPIE, 2019. – Vol. 10996. – 6 p.

УДК 621.3; ГРНТИ 47.49

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕГО ВИДЕНИЯ

В.К. Клочко, К.Х. Нгуен

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, klochkovk@mail.ru*

Аннотация. Предлагается подход к повышению точности и надежности многопозиционной пассивной системы видения, состоящей из нескольких оптических, радиометрических или радиотехнических приемников, при обнаружении нескольких объектов наблюдения. В соответствии с данным подходом в единой системе координат осуществляется обработка векторов направлений на объекты, соединенных в несколько стереопар. Дана сравнительная оценка эффективности работы такой системы.

Ключевые слова: многопозиционная пассивная система, точность и надежность.

IMPROVING ACCURACY AND RELIABILITY PASSIVE NEAR VISION SYSTEM

V.K. Klochko, C.H. Nguyen

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, klochkovk@mail.ru*

Abstract. An approach is proposed to increase accuracy and reliability of a multi-position passive vision system consisting of several optical, radiometric or radiotechnical receivers in case of detection of several observation objects. In accordance with this approach, vectors on objects connected in several stereopars are processed in a single coordinate system. A comparative assessment of the effectiveness of such a system is given.

Keywords: multi-position passive system, accuracy and reliability.

Введение

Рассматривается многопозиционная оптическая, тепловая или пассивная радиосистема видения для наблюдения за малоразмерными объектами на малой дальности. Система состоит из нескольких оптических, радиометрических или радиотехнических приемников, которые в пассивном режиме наблюдения определяют орты векторов направлений на объекты [1]. Полученные орты распределяются по принадлежности конкретным объектам, после чего

на основе сопряженных пар векторов вычисляются оценки дальностей до объектов и их пространственные координаты [2]. Точность определения положения объектов определяется числом приемников и их взаимным расположением, а надежность – способом резервирования приемников. Известен подход к повышению надежности и точности пассивной системы видения [3], который назовем первым подходом. Он заключается в следующем.

1. Размещаются N ($N > 2$) взаимно ориентированных приемников и параллельно выполняют N однотипных схем операций, причем при выполнении операций k -й схемы ($k = \overline{1, N}$) считается, что k -й приемник является основным, а остальные $N - 1$ приемников – вспомогательные, пересчитывающие свои координаты в систему координат k -го приемника.

2. В каждой из $N - 1$ пар основного и вспомогательного приемника находятся орты векторов направлений на объекты и выбираются неповторяющиеся варианты соединения ортов в сопряженные пары по критерию сопряжения.

3. Из всех $N - 1$ пар приемников выбирается одна пара с наилучшим показателем сопряжения и запоминаются значение показателя и вычисленные на основе сопряженных векторов пространственные координаты объектов.

4. Среди N параллельно выполненных схем операций выбирается схема с наилучшим показателем сопряжения и полученные для данной схемы оценки пространственных координат объектов передаются на сопровождение.

5. Если происходит отказ в работе одной схемы с основным приемником, то выбирается следующая в порядке улучшения показателя сопряжения параллельно работающая схема с другим основным приемником и передаются на сопровождение оценки координат, полученные в этой схеме. Продолжается подобный выбор схем в случае новых отказов.

Цель работы – улучшить первый подход путем сокращения в N раз вычислительных затрат при сохранении надежности и точности работы системы за счет выполнения операций в единой системе координат, что делает ненужным создание N параллельных схем выполнения операций с пересчетом координат в системы координат каждого приемника.

Второй подход к повышению точности и надежности системы

Подход заключается в следующем.

1. Из N приемников ($N \geq 3$), ориентированных относительно единой прямоугольной системе координат базовыми векторами b_k и матрицами S_k поворота осей координат ($k = \overline{1, N}$), составляются n пар ($2 \leq n \leq N$) так, чтобы орты $a_1(i)$ и $a_2(j)$ векторов i -х и j -х направлений на m объектов ($m \geq 1$) в каждой s -й паре приемников ($s = \overline{1, n}$) с номерами k_1 и k_2 ($k_1, k_2 \in \{1, 2, \dots, N\}$, $k_1 \neq k_2$) были близки к ортогональным. Это достигается расположением приемников на линии окружности или поверхности сферы с определенным радиусом, зависящим от рубежа дальности наблюдения. Центр единой системы координат может совпадать с центром окружности или сферы.

2. В каждой s -й паре приемников определяются орты $a_1(i)$ и $a_2(j)$ векторов i -х и j -х направлений на объекты ($i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, m}$) в местных системах координат, после чего координаты ортов пересчитываются в единую систему координат. Получаются векторы $a'_1(i) = S_{k_1} a_1(i)$ и $a'_2(j) = S_{k_2} a_2(j)$.

3. Для каждой i -й, j -й пары ортов $a'_1(i) = (a'_{1x}, a'_{1y}, a'_{1z})^T$ и $a'_2(j) = (a'_{2x}, a'_{2y}, a'_{2z})^T$ записывается условие сопряжения векторов $M_1(i) = r_{k_1}(i) a'_1(i)$ и $M_2(j) = r_{k_2}(j) a'_2(j)$, то есть их линейной зависимости в единой системе координат:

$$r_{k_1}(i) a'_1(i) - r_{k_2}(j) a'_2(j) - (b_{k_2} - b_{k_1}) = e(i, j), \quad (1)$$

где $r_{k1}(i)$ и $r_{k2}(j)$ – искомые дальности до объектов относительно k_1 -го и k_2 -го приемников;
 $e(i, j) = (e_x, e_y, e_z)^T$ – вектор ошибок сопряжения.

После представления (1) в координатно-матричной форме:

$$AR - (b_{k2} - b_{k1}) = e(i, j) \Leftrightarrow \begin{bmatrix} a'_{1x} & -a'_{2x} \\ a'_{1y} & -a'_{2y} \\ a'_{1z} & -a'_{2z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{k1}(i) \\ r_{k2}(j) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{k2x} - b_{k1x} \\ b_{k2y} - b_{k1y} \\ b_{k2z} - b_{k1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix}$$

находятся оценки $\hat{r}_k(i)$ и $\hat{r}_k(j)$ дальностей по критерию минимума квадрата нормы вектора ошибок сопряжения $J(i, j) = \|e(i, j)\|^2 = e^T(i, j)e(i, j)$:

$$\hat{R} = [\hat{r}_{k1}(i), \hat{r}_{k2}(j)]^T = (A^T A)^{-1} A^T (b_{k2} - b_{k1}). \quad (2)$$

4. Выбираются m неповторяющихся пар векторов $a_1(i)$ и $a_2(j_i)$, $i = \overline{1, m}$, где номер j_i поставлен в соответствие номеру i , с наименьшими значениями показателей сопряжения $\hat{J}(i) = \|\hat{e}(i, j_i)\|^2 = \hat{e}^T(i, j_i)\hat{e}(i, j_i)$. Тем самым обнаруживаются объекты. Для обнаруженных m объектов вычисляются векторы усредненных оценок пространственных координат в единой системе координат для s -й пары приемников на основе оценок дальностей (2):

$$M_s(i) = [\hat{r}_{k1}(i)a'_1(i) + \hat{r}_{k2}(j_i)a'_2(j_i) + b_{k1} + b_{k2}]/2, \quad i = \overline{1, m}.$$

Запоминается соответствующий $M_s(i)$, $i = \overline{1, m}$, суммарный показатель сопряжения

$$J_s = \sum_{i=1}^m \hat{J}(i). \quad (3)$$

5. Из всех s -х пар приемников ($s = \overline{1, n}$) выбирается одна s_1 -я пара с наилучшим (наименьшим) показателем сопряжения $J_{s1} = \min_s J_s$ и ее оценки координат $M_{s1}(i)$, $i = \overline{1, m}$.

6. Если происходит отказ в работе отдельного приемника в какой-либо паре, то оставшийся в этой паре рабочий приемник соединяется с другим приемником из состава работающих пар с учетом ортогональности направлений на объекты и образуется новая пара, в которой один приемник работает в составе двух пар. Подобным образом продолжается образование новых пар в случае новых отказов.

Точность и надежность системы

Повышение точности оценок координат в системе N приемников ($N > 2$) по сравнению с $N = 2$ достигается выбором пары с наилучшим суммарным показателем сопряжения векторов направлений на объекты. Надежность системы N приемников ($N > 2$) определяется вероятностью того, что при вероятности p безотказной работы каждого приемника хотя бы 2 из N приемников будут работать надежно. С применением формулы Бернулли получается вероятность p_N безотказной работы системы:

$$p_N = \sum_{k=2}^N p_N(k) = 1 - p_N(0) - p_N(1) = 1 - (1-p)^N - Np(1-p)^{N-1},$$

что в сравнении с $N=2$ дает очевидное преимущество: $p_N > p^2$ при $N > 2$.

Точность оценок дальностей (2) характеризуется ковариационной матрицей $K_{\Delta R} = \sigma_e^2 (A^T A)^{-1}$ ошибок оценивания ΔR , где σ_e^2 – дисперсия координат вектора ошибок сопряжения. Из анализа $K_{\Delta R}$ следует, что наименьшие дисперсии ошибок оценок дальностей получаются при взаимном ортогональном положении векторов направлений на объекты в сопряженных парах. При ортогональности $a_k(i)$ и $a_q(j)$ показатели $J(i, j)$, вычисленные в (3) с учетом оценок дальностей, также принимают наименьшие значения. Отсюда следует, что парные приемники надо располагать на окружности или сфере радиуса, равного дальности наблюдения. Тем самым обеспечиваются направления линий визирования приемников, близкие к ортогональным. Так, при ортогональном взаимном положении двух сопряженных векторов $a_k(i)$ и $a_q(j)$ ковариационная матрица ошибок принимает следующий вид:

$$K_{\Delta R} = \frac{\sigma_e^2}{\sin^2 \alpha_{i,j}} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha_{i,j} \\ \cos \alpha_{i,j} & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow K_{\Delta R} = \sigma_e^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \alpha_{i,j} = 90^\circ.$$

где $\alpha_{i,j}$ – угол между векторами $a_k(i)$ и $a_q(j)$ в сопряженной паре.

Заметим, что увеличение числа q -х приемников по отношению к k -му приводит к увеличению числа уравнений в (1) и изменению структуры матрицы A в (2), соответственно повышается точность оценок дальности. Однако при этом увеличивается перебор q -х векторов.

Целесообразно при оценивании дальностей выбирать те пары приемников в системе N приемников, которые дают наибольшую точность оценок за счет ортогональности.

Сравнение подходов

Точность и надежность системы с последовательной обработкой не отличается от точности и надежности системы с параллельной обработкой. Однако понижение вычислительных затрат при последовательной обработке в N раз по сравнению с параллельной обработкой сопровождается определенным проигрышем – усложнением алгоритма в части образования новых пар приемников в случаях отказов, что требует адаптивности и управления в системе наблюдения. Также вводится ограничение на общую зону обзора всех приемников, чего не было при параллельной обработке. Таким образом, второй подход по сравнению с первым позволяет сократить в N раз вычислительные затраты за счет выполнения операций в единой системе координат при сохранении надежности и точности работы пассивной системы видения, присущих первому подходу. Заметим, что ортогональность направлений в первом подходе обеспечивается автоматически выбором наилучшей схемы обработки, но за счет параллельных вычислений.

Заключение

Предложен подход к повышению точности и надежности пассивной системы ближнего видения, предназначенной для обнаружения группы объектов. Подход отличается предложенной структурой системы наблюдения, состоящей из нескольких приемников, и организацией вычислительных операций. Это позволяет повысить точность определения пространственных координат объектов и вероятность безотказной работы системы по сравнению с обычной стереопарой, состоящей из двух приемников. Предложенный подход может найти

применение в пассивных оптических, радиометрических или радиотехнических системах слежения за объектами [4].

Библиографический список

1. Ключко В.К., Гудков С.М., Нгуен К.Х. Сравнительный анализ методов оценивания координат объектов в пассивной системе радиовидения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 2. Вып. 64. С. 23 – 28.
2. Ключко В.К., Нгуен К.Х. Обнаружение движущихся объектов в многопозиционной системе радиоприемников // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 11 (18). С. 47 – 56.
3. Ключко В.К., Гудков С.М. Пространственно-временная обработка изображений объектов в пассивных системах радиовидения // Автометрия. 2018. Т. 54, № 4. С. 35 – 42.
4. Ключко В. К., Нгуен К. Х. Алгоритмы траекторного сопровождения нескольких объектов в пассивных системах радиовидения // Радиотехника. 2019. № 6. С. 168 – 173.

УДК 004.62; ГРНТИ 20.19.01

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ПОИСКА АССОЦИАТИВНЫХ ПРАВИЛ

Е.О. Храмшина

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, evgenia.khramshina@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматриваются программные средства поиска ассоциативных правил. Приводятся их особенности, описания их использования, выявленные достоинства и недостатки.

Ключевые слова: data mining, statistica, deductor, loginom, поиск ассоциативных правил.

SOFTWARE FOR ASSOCIATION RULES MINING

E.O. Khramshina

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, evgenia.khramshina@gmail.com*

The summary. This paper is about software for association rules mining. Their features, descriptions of their use, identified advantages and disadvantages are given in it.

Keywords: data mining, statistica, deductor, loginom, association rules mining.

В современном мире каждую минуту проводится огромное количество операций. Информация о них хранится в различных местах и разных форматах. Каждая компания хочет получать аналитические сведения для улучшения ведения своего бизнеса: повышение продаж и спроса у покупателей на те или иные товары, услуги. Помочь в этом может интеллектуальный анализ данных [4]. *Интеллектуальный анализ данных* – это направление информационных технологий, охватывающее всю область проблем, связанных с извлечением знаний из массивов данных. Под этим понятием понимают такие направления, как кластеризация, классификация, поиск ассоциативных правил и другие [9]. Для задач бизнеса, продаж, анализа интернет активности пользователей лучше всего подходит поиск ассоциативных правил [5]. *Поиск ассоциативных правил* – нахождение неочевидных логических закономерностей между связанными элементами (событиями или объектами) [8].

Но часто у компаний нет возможности содержать целый отдел программистов, которые будут писать программные средства под каждый запрос. На помощь таким предприятиям приходят аналитики, роль которых, при правильном выборе программного продукта, может выполнять рядовой сотрудник.

Интеллектуальный анализ данных может осуществляться с помощью фреймворков (Hadoop, Spark, Storm), специализированных баз данных (Hive, Impala, Drill), аналитических платформ (Loginom, Deductor, STATISTICA Data Miner) и прочих инструментов, которые в

большинстве своем основаны на перечисленных ранее продуктах (Zookeeper, Flume, Oracle Big Data Preparation). Фреймворки могут работать в автономном режиме и подходят для разработки новых приложений. Они исполняют роль простого хранилища данных. Специализированные базы данных позволяют организовать данные и содержат необходимые инструменты для аналитики. Платформы обеспечивают интегрированную среду для интеллектуального анализа данных и управления решениями для оптимизации процессов. Следовательно, интуитивно более понятными, не требующими дополнительного вмешательства разработчиков, можно считать аналитические платформы.

Целью данной работы является изучение возможностей аналитических платформ, связанных с поиском ассоциативных правил.

Прежде, чем приступить к анализу выбранных программных средств, необходимо ввести некоторые определения терминов, используемых при поиске ассоциативных правил – это размер набора, поддержка набора, достоверность правила, лифт правила [7].

Размер набора – размер определяемого набора одновременно покупаемых товаров.

Поддержка набора – число транзакций, входящих в набор, разделенное на общее количество транзакций.

Достоверность правила – условная вероятность определенного товара оказаться в корзине с другими товарами.

Лифт правила – значимость правила. Если больше 1, то подтверждает значимость правила и говорит о положительной связи двух предметных наборов (условия и следствия правила). Значение лифта, равное или меньшее 1, говорит об отсутствии или отрицательной связи. Задавая минимальную величину лифта, можно отсеять наименее значимые правила.

Система Deductor

Deductor — аналитическая платформа, разработанная компанией BaseGroup Labs. В Deductor встроены самые востребованные алгоритмы анализа, такие как деревья решений, нейронные сети, поиск ассоциативных правил и другие, предусмотрены различные способы визуализации и поддержка множества источников/приемников данных. Стоит отметить, что данная разработка является отечественной.

Благодаря современным технологиям, система позволяет на базе единой архитектуры пройти все этапы построения аналитической платформы: от создания хранилища данных до автоматического подбора моделей и визуализации полученных результатов.

В Deductor используется сценарный подход, который предполагает визуальное проектирование логики обработки при помощи мастеров, то есть без использования программирования. Кроме того поддерживается очистка данных, обогащение данных и другие действия над исходными данными.

В качестве используемого алгоритма поиска ассоциативных правил выбран алгоритм Apriori. Подробное описание его работы представлено в работе [6].

Для поиска ассоциативных правил в программе необходимо выбрать файл с данными, и выполнить настройки с помощью мастера для поиска ассоциаций. Мастер позволяет задать минимальную поддержку в процентах, максимальную поддержку в процентах, максимальное количество элементов в исходных часто встречающихся множествах (мощность), минимальную и максимальную достоверность в процентах. После выполнения анализа у пользователя появляется возможность выбора вида визуализации результатов: дерево правил, популярные наборы, правила, таблица, диаграмма, пиктограмма, статистика и другие.

Одно из достоинств системы – наличие бесплатной версии платформы для обучения и продуктов для корпоративного использования. Особенно хочется отметить большой выбор инструментов для визуализации результатов. Поскольку в основе работы программы положен такой алгоритм поиска ассоциативных правил, как Apriori, возникает ряд недостатков, связанных с ним. В частности, алгоритм для выполнения требует больших мощностей при

определенных исходных параметрах, таких как количество обрабатываемых записей, количество уникальных элементов и при малом значении минимальной поддержки, что может вызывать зависание системы.

Система Loginom

Loginom – это low-code платформа для реализации всех аналитических процессов: от интеграции и подготовки данных до моделирования, развертывания и визуализации. Стала развитием системы Deductor в 2011 году. Данная система является платной, однако для ознакомления и в целях обучения можно скачать пробные версии.

В функционале платформы, так же как и в предыдущей версии, реализован алгоритм поиска ассоциативных правил. Но в качестве основополагающего алгоритма выбран алгоритм FP-Growth [10, 11]. Главной его особенностью является построение дерева для нахождения популярных наборов.

Для поиска ассоциативных правил в программе необходимо выбрать элементы из подгруппы «Импорт» с исходными данными. В качестве исходных данных система принимает данные из базы данных, результаты 1С запроса, текстовый файл, Excel файл, собственный формат файлов Loginom Data и XML файлы. Для каждого конкретного типа данных задаются правила его обработки (символы разделения строк и элементов в строке, количество обрабатываемых строк и другие). После того, как данные загружены, можно приступить к их обработке. Для этого из подгруппы «Data Mining» выберем элемент «Ассоциативные правила», расположим его на форме и настроим. В качестве настроек предусмотрена фильтрация значений, указание минимальной поддержки в процентах, возможно исключение одиночных наборов и ограничение размера популярного набора, а так же анализ только тех наборов, которые содержат указанные пользователем элементы. Кроме того, пользователь может задать максимальную достоверность правила в процентах, минимальный лифт правила и максимальное число следствий. Перед выполнением можно настроить визуальное представление полученных данных в виде диаграммы, куба, статистических данных или таблицы для популярных наборов, ассоциативных правил и применения правил.

Среди достоинств системы можно отметить визуальную составляющую аналитики, поддержку метода Drug and drop, что облегчает работу пользователей. Однако система имеет и недостатки, главным образом связанные с финансовым вопросом, как было сказано ранее, бесплатные ограниченные версии доступны для некоммерческого использования и в рамках образовательного процесса. Неподготовленному пользователю сложно разобраться в функционале системы, поскольку раздел справки отсутствует, однако на сайте предлагают пройти платное обучение, а так же есть сайт user guide [3], содержащий полное описание платформы. Кроме того, поскольку в основу положен алгоритм FP-Growth, существуют недостатки, связанные с его использованием. Несмотря на то, что он признан более эффективным, чем используемый в предыдущей версии платформы – Apriori, и позволяет избежать затратной процедуры генерации кандидатов и многократного сканирования входного набора, все же построение дерева – затратная по времени операция, а для случаев с большим числом узлов и связей и размер дерева может намного превышать размер входного набора данных.

STATISTICA Data Miner

STATISTICA Data Miner – это платформа российской разработки. Система предоставляет наиболее полный набор методов для Data Mining. В частности, реализованы инструменты предварительной обработки, фильтрации и чистки данных. Система так же поддерживает возможность чтения из баз данных, всех стандартных файлов [2].

Мастер Data Mining позволяет в автоматическом режиме выполнить построение моделей, без применения языков программирования. Широкий набор методов анализа, среди

которых есть и поиск ассоциативных правил, делает платформу мощным инструментом для обработки данных [1].

Поиск ассоциативных правил в STATISTICA Data Miner основан на алгоритме поиска ассоциативных правил Apriori [6].

Для анализа данных необходимо выполнить следующие действия. В меню выбрать иконку New Data Source и затем указать расположение файла с исходными данными. Чтобы построить ассоциативные правила в этой системе, необходимо выбрать Data Mining, а затем подпункт Association Rules. В качестве параметров можно задать минимальную поддержку, минимальную достоверность, минимальную корреляцию и максимальное количество элементов в популярном наборе. После задания параметров можно запустить поиск на выполнение. Результат выполнения можно изучить в виде таблицы, графика правил ассоциации.

Главным достоинством платформы можно отметить то, что некоторые версии поддерживают масштабируемость данных, а, следовательно, могут использоваться, например, с Map Reduce для выполнения анализа большого объема данных. Поскольку в основе лежит алгоритм Apriori, то системе свойственны недостатки, перечисленные для него выше. По сравнению с ранее перечисленными платформами, STATISTICA Data Miner имеет более скудный набор инструментов для визуализации результатов.

Таким образом, было выяснено, что в основе наиболее популярных средств анализа больших объемов данных лежат такие алгоритмы, как Apriori и FP-Growth.

В рамках выпускной квалификационной работы магистра были программно реализованы данные алгоритмы. Работа выполнялась на языке Java. Все приведенные ниже параметры получены в результате запуска программы на устройстве со следующими параметрами: процессор Intel(R) Core(TM) i3-2310M (2.1GHz); оперативная память 4ГБ; видеокарта Radeon(TM) HD 6770M и Mobile Intel(TM) HD Graphics; жесткий диск TOSHIBA MK5061GSYN; система Windows 7 Домашняя расширенная 64-разрядная.

В качестве предметной области выбрана «покупательская корзина». Алгоритмы усовершенствованы: обработка происходит только для заранее определенных программным способом популярных товаров, что существенно сокращает время работы и занимаемый во время обработки объем памяти. Ниже приведены основные характеристики и результаты, полученные в ходе тестирования работы алгоритмов.

Например, для набора retail.dat, который представляет собой данные, собранные в бельгийском супермаркете, были получены следующие зависимости, изображенные на рисунках ниже (рисунок 1 – рисунок 3). Набор обладает следующими параметрами: количество транзакций равно 88162, количество уникальных товаров – 16470. На всех перечисленных рисунках по оси X – значение минимальной поддержки. На 1 рисунке по оси Y – время выполнения обработки, на втором – объем занимаемой во время выполнения обработки памяти, на третьем – количество уникальных товаров в каждом опыте.

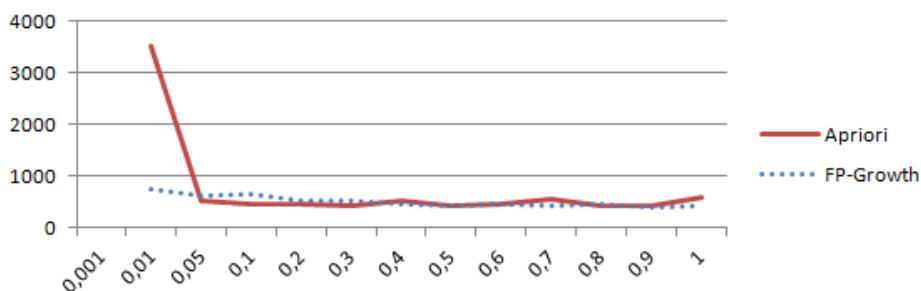


Рис. 1. Зависимость времени выполнения обработки от величины минимальной поддержки

товар. На 5 и 6 рисунках по оси X – модификация алгоритма, по оси Y – объем занимаемой во время выполнения обработки памяти и время выполнения обработки соответственно.

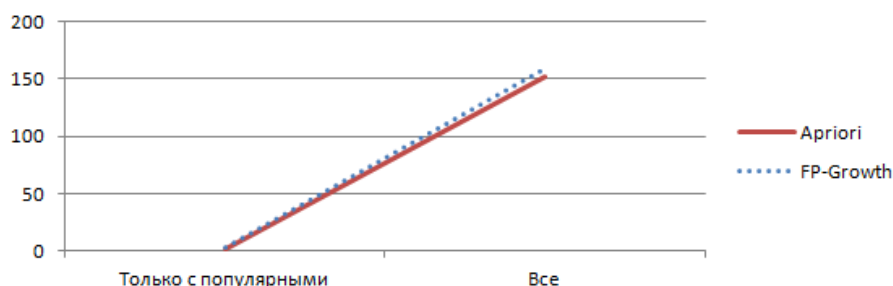


Рис. 5. Зависимость объема занимаемой во время выполнения памяти от выбранного алгоритма

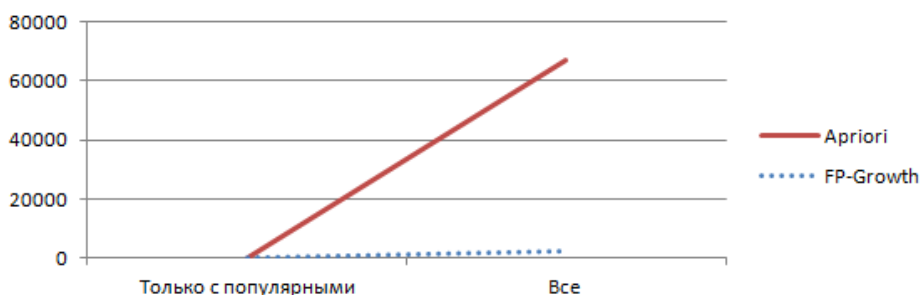


Рис. 6. Зависимость времени выполнения обработки от выбранного алгоритма

Кроме того, ведется разработка собственного алгоритма поиска ассоциативных правил, учитывающего достоинства и недостатки существующих алгоритмов. В настоящее время проводится его тестирование и отладка.

Среди рассмотренных программных средств от известных отечественных производителей решений для интеллектуального анализа данных сложно выделить лучшее, ввиду отмеченных достоинств и недостатков. Однако для выбора подходящего программного средства стоит проанализировать цели и задачи, для которых оно будет использоваться, объем данных, их способ представления и хранения, желаемый вид визуализации результатов. Кроме того существуют случаи, когда есть необходимость в использовании нескольких средств. В рамках выпускной квалификационной работы магистра разработанная программа будет дополнена графическим представлением получаемых результатов.

Библиографический список

1. Боровиков В.П. STATISTICA, искусство анализа данных на компьютере. – Санкт-Петербург, «Питер», 2001.
2. Боровиков В.П. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks. – Москва, «Горячая линия – Телеком», 2008.
3. Главная // Loginom help [Сайт] URL: <https://clck.ru/M3RhM> (Дата обращения: 25.01.2020)
4. Фрэнкс Б. Укрощение больших данных: Как извлекать знания из массивов информации с помощью глубокой аналитики. – Москва, «Манн, Иванов и Фербер», 2014.
5. Фрэнкс Б. Революция в аналитике: Как в эпоху BigData улучшить ваш бизнес с помощью операционной аналитики. – М, Альпина Паблицер, 2017. – 320 с.
6. Храмина, Е.О. АЛГОРИТМ APRIORI [Текст] Современные технологии в науке и образовании СТНО-2019: сб.тр. международного научно-технического форума. Том 3. – Рязань: РГРТУ, 2019.
7. Ын А., Су К. Теоретический минимум по Big Data. Всё что нужно знать о больших данных. – Санкт-Петербург, «Питер», 2019.

8. Agrawal R., Imielinski T., Swami A. Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases. SIGMOD Conference, 1993.
9. Piatetsky-Shapiro G. Discovery, analysis and presentation of strong rules. Knowledge Discovery in Databases. «AAAI Press», 1991.
10. Srikant R., Agrawal R., Fast algorithms for Mining Association rules in large database. In VLDB '94 Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases, 1994.
11. Yen S.-J., Lee Y.-S. The studies of mining frequent patterns based on frequent pattern tree. Advances in Knowledge Discovery and Data Mining: 13th Pacific-Asia Conference, PAKDD 2009 Bangkok, Thailand, April 27-30, 2009.

УДК 004.93; ГРНТИ 28.23.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ LBP И HOG ДЕСКРИПТОРОВ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ

К.И. Маканов, В.С. Муравьев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, vad.muraviev@rsreu.ru*

Аннотация. Приводится описание LBP и HOG дескрипторов, которые получили распространение в алгоритмах распознавания. В работе оценивалась частота правильного распознавания изображений лиц на открытых базах данных. В качестве подхода к классификации применяется известный метод опорных векторов.

Ключевые слова: распознавание лиц, признак изображения, дескриптор, HOG, LBP.

EFFICIENCY OF LBP AND HOG DESCRIPTORS APPLICATION TO FACE RECOGNITION

K.I. Makanov, V.S. Muraviev

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, vad.muraviev@rsreu.ru*

The summary. The description of LBP and HOG histogram features, which are widely used in recognition algorithms, is given. The true positive of recognition of facial images on open databases is estimated. As an approach to feature classification the well-known SVM algorithm is used.

Keywords: face recognition, image feature, descriptor, HOG, LBP.

В последнее время широкое распространение получают технологии видеоаналитики, использующие методы компьютерного зрения для автоматизированного сбора и анализа фотографий и последовательностей изображений. Данные технологии могут применяться для обеспечения прозрачности торговых операций, контроля и мониторинга дорожного движения, оценки числа людей в очередях, персонализации рекламных предложений, авторизации пользователей.

По оценкам [1] в ближайшие годы рынок таких технологий продолжит активно расти, а к 2023 году объем мировых вложений составит 8,55 миллиарда долларов. Данное направление активно развивается, в том числе, и на российском рынке. Примером могут служить решения, которые уже сейчас поставляются компаниями Синезис, Элвис-НеоТек, Сателлит Инновация и др.

Одной из задач, решаемых с помощью технологий фото- и видеоаналитики, является распознавание лиц на изображениях. Решение данной задачи актуально и востребовано в системах безопасности, контроля доступа и идентификации личности человека.

Ранее для распознавания людей на предприятиях и в организациях устанавливали электронные турникеты со считывателями карт или отпечатков пальцев, но сегодня, в связи с бурным развитием биометрических технологий, компании все чаще переходят на другие методы распознавания, более точные и удобные. Одними из наиболее востребованных являются методы локализации и распознавания лиц на изображениях, формируемых видеокамерами.

Целью данной работы является исследование эффективности применения признаков изображений в методе опорных векторов для распознавания лиц на натуральных изображениях из открытых баз данных. В качестве признаков изображений используются HOG и LBP-дескрипторы.

LBP-дескриптор

Локальный бинарный шаблон (LBP, Local Binary Pattern) – является пространственным оператором, описывающим локальную текстуру изображения, и широко применяется для решения задач распознавания образов в компьютерном зрении. Впервые этот подход был предложен Т. Ojala с соавторами в [2]. Он является достаточно простым и одновременно эффективным признаком, инвариантным к монотонным изменениям яркости изображения. Суть оператора заключается в формировании локальной окрестности, в которой к пикселям изображения применяется пороговое преобразование. Порогом является значение яркости центра окрестности. Если значение яркости соседних пикселей превышает порог, то устанавливается единичное значение, иначе – нулевое. Полученные значения объединяются в бинарный код, который определяется направлением обхода и размерами окрестности.

В самом простом случае задается квадратное окно размерностью 3x3 пикселя. Пример применения LBP в такой окрестности приведен на рисунке 1.

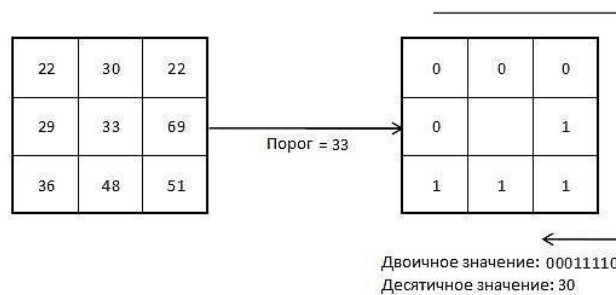


Рис. 1. Применение LBP оператора в окне 3x3

Можно привести выражение для расчета LBP (1):

$$LBP_P = \sum_{p=0}^{P-1} s(f_p - f_c) 2^p, \quad (1)$$

где s – принимает значение 1, если разность значений яркости больше 0, иначе – нулю;

f_p – значение яркости соседей в окрестности центрального пикселя;

f_c – значение яркости центрального пикселя окрестности;

P – количество точек в окрестности.

Так как размеры окрестности 3x3 соответствует $P = 8$, то для полученного 8-битного бинарного кода соответствующее значение яркости обработанного изображения лежит в диапазоне от 0 до 255.

После применения LBP оператора полученное изображение $l(x, y)$ делится на участки заданного размера, в каждом из которых рассчитывается гистограмма, описывающая частоту встречаемости значений яркости. Значения элементов гистограммы могут быть описаны выражением (2):

$$H_{lbp\ n} = \sum_x \sum_y I\{l(x, y) = n\}, n = \overline{0, 255}, \quad (2)$$

где $l(x, y)$ – изображение после выполнения LBP, значение $I\{\} = 1$, если выражение в скобках верно, иначе $I\{\} = 0$.

Полученные гистограммы нормализуются и объединяются путем последовательного добавления в единый дескриптор, который используется в качестве признака в алгоритме классификации.

Для сокращения избыточности признаковой информации на практике используются только равномерные LBP, в которых кодовые комбинации не содержат более двух переходов между нулем и единицей. Это позволяет экономить память, так как для представления изображения требуется $P(P-1)+2$ значений. При вычислении гистограммы значения яркости, соответствующие оставшимся кодовым комбинациям, объединяются в один отсчет, что существенно сокращает размерность дескриптора и увеличивает скорость классификации. Существуют подходы к формированию LBP дескрипторов, инвариантных к повороту изображения [3].

Пример разбиения изображения на участки квадратного размера и формирование дескриптора представлен на рисунке 2.

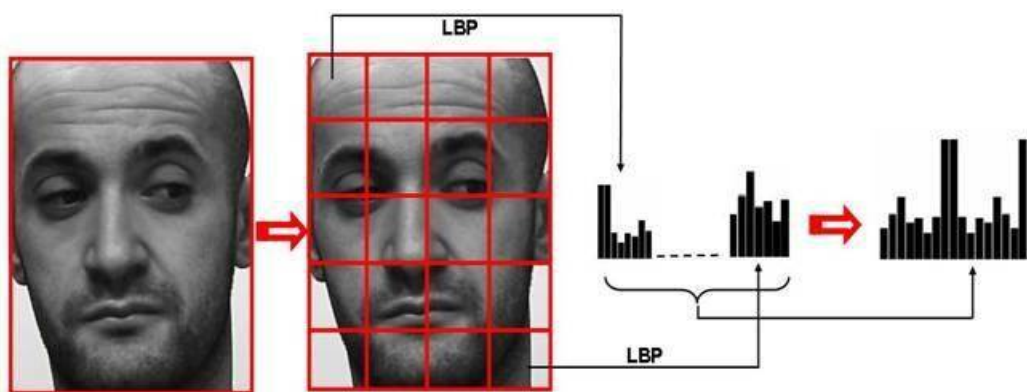


Рис. 2. Разбиение изображения на блоки и формирование дескриптора

НОГ-дескриптор

Яркостные признаки обладают большой степенью избыточности и чувствительны к изменению освещенности сцены. Поэтому необходимо использовать более релевантную признаковую информацию. В качестве таких признаков могут рассматриваться гистограммы ориентированных градиентов и дескрипторы, построенные на их основе (НОГ-дескрипторы).

Метод построения признаков изображений на основе гистограмм ориентированных градиентов был впервые представлен в [4]. Изначально данный подход к построению признака был предназначен для решения задачи обнаружения фигур людей на изображениях, однако дальнейшие исследования продемонстрировали его эффективность в других задачах классификации.

Приведем описание основных шагов при построении дескриптора на основе гистограммы ориентированных градиентов:

1. Исходное изображение разбивается на участки заданного размера.
2. В каждом участке вычисляется градиент от исходного изображения. Для аппроксимации градиента могут применяться различные масочные дифференциальные операторы (Собеля, Превитта, Щарра).

3. Для каждого пикселя (x, y) в участке изображения находится направление $\theta_g(x, y)$ и модуль $m_g(x, y)$ градиента.

4. Все возможные угловые направления векторов градиента, лежащие на отрезке $[0; 2\pi)$, разбиваются на N_g интервалов. Если обозначить через $M_g(n)$ множество всех точек, в которых направление градиента попадает на интервал разбиения n , тогда гистограмму можно построить следующим образом:

$$H_{hog\ n} = \sum_{(x,y) \in M_g(n)} m_g(x, y), n = \overline{1, N_g}. \quad (3)$$

5. Для обеспечения большей устойчивости к изменениям яркости гистограммы, вычисленные в локальных участках изображения, нормируются.

6. Формируется итоговый дескриптор путем последовательного объединения всех гистограмм в единый массив.

Среди основных преимуществ HOG дескриптора можно выделить вычислительную простоту, эффективность и универсальность.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования признаков изображений в задаче распознавания лиц применялись с использованием изображений из баз данных Yale Face, Калифорнийский университет, США и LFWCropped20, Индийский институт информационных технологий, Индия.

База данных Yale Face содержит 110 полутоновых изображений размерностью 320x243 пикселей и включает 10 классов. Изображения, относящиеся к одному классу, отличаются эмоциональным выражением, наличием дополнительных аксессуаров, положением источника освещения.

База данных LFWCropped20 содержит 150 цветных изображений, размерностью 80x80 пикселей и включает 10 классов. Изображения одного класса отличаются эмоциональным выражением, наличием разных аксессуаров, уровнем освещенности, положением лица и углами его наклона, положением глаз. Базы изображений разделялись на обучающую и тестовую выборки в процентном соотношении 2 к 3. В качестве алгоритма классификации был выбран метод опорных векторов [5], так как является известным подходом к машинному обучению и широко используется для решения практических задач.

При проведении экспериментальных исследований оценивалась количественная характеристика эффективности распознавания лица. В качестве такой характеристики выступала частота правильного распознавания, оцениваемая как отношение числа правильно распознанных изображений заданного класса к общему числу изображений этого класса.

Значение частоты правильного распознавания при увеличении участка изображения при формировании LBP дескриптора для базы данных Yale Face приведены в таблице 1.

Таблица 1. Частота правильного распознавания лиц при использовании LBP дескриптора для базы данных Yale Face

Размер участка изображения	4x4	6x6	8x8	12x12	16x16	24x24	32x32	48x48	64x64
Частота правильного распознавания	85%	86%	90%	88%	87%	83%	82%	85%	77%

Значение частоты правильного распознавания при увеличении участка изображения при формировании LBP дескриптора для базы данных LFWCropped20 приведены в таблице 2.

Таблица 2. Частота правильного распознавания лиц при использовании LBP дескриптора для базы данных LFWCropped20

Размер участка изображения	4x4	6x6	8x8	12x12	16x16	24x24	32x32	48x48	64x64
Частота правильного распознавания	76%	78%	70%	70%	56%	56%	46 %	36%	28%

Значения частот правильного распознавания для HOG дескрипторов сведены в таблицы 3 и 4.

Таблица 3. Частота правильного распознавания лиц при использовании HOG дескриптора для базы данных Yale Face

Размер участка изображения	4x4	6x6	8x8	12x12	16x16	24x24	32x32
Частота правильного распознавания	87%	87%	92%	92%	90%	86%	80%

Значение частоты правильного распознавания при увеличении участка изображения при формировании HOG дескриптора для базы данных LFWCropped20 приведены в таблице 4.

Таблица 4. Частота правильного распознавания лиц при использовании HOG дескриптора для базы данных LFWCropped20

Размер участка изображения	4x4	6x6	8x8	12x12	16x16	24x24	32x32
Частота правильного распознавания	72%	70%	76%	66%	68%	44%	30%

При анализе результатов, полученных при исследовании на двух базах изображений можно сделать вывод, что изменение ракурса съемки, уровня шума на изображении и освещения приводят к ухудшению результата. Признаки не чувствительны (до определенного предела) к изменению размеров блока. Частота правильного распознавания лиц на базе данных Yale Face достигает значения 90% и объясняется тем, что изображения лиц получены при схожем ракурсе съемки и уровне освещенности сцены. Однако при тестировании на изо-

бражениях из другой базы значение этого показателя заметно снижается. Применение дескрипторов обеспечивает примерно одинаковые показатели качества, без явного преимущества того и другого варианта.

Оба признака в задаче распознавания лиц обеспечивают приемлемый результат для изображений, полученных при одинаковом ракурсе съемки и уровне освещенности, схожих выражений лица. Целесообразно LBP и HOG дескрипторы использовать совместно, объединяя их в один признак и выполнять классификацию в пространстве большей размерности.

Библиографический список

1. Video Analytics Market worth 8.55 Billion USD by 2023 // Market and Markets, URL: <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/iva.asp> (дата обращения: 05.02.2020).
2. T. Ojala, M. Pietikäinen, D. Harwood . A Comparative Study of Texture Measures with Classification Based on Feature Distributions // Pattern Recognition, vol. 29. – 1996. – pp. 51–59.
3. Krig S. Computer vision metrics. – Berlin: Springer, 2016.– 637p.
4. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego. – 2005. – vol.1.– pp. 886 – 893.
5. Wang L. (ed.). Support vector machines: theory and applications. – Springer Science & Business Media, 2005. – vol.177. – 431p.

УДК 519.872.6; ГРНТИ 73.01

ПРИМЕНЕНИЕ PTV VISSMA ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕКРЕСТКА НА УЛ. ДЗЕРЖИНСКОГО - ПЕРВОМАЙСКИЙ ПРОСПЕКТ

Д.С. Савин

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Российская Федерация, Рязань, d.savin2010@yandex.ru*

Аннотация. В работе приведен анализ перекрестка на улице Дзержинского- Проспект первомайского в PTV Vissim. Собраны данные перекрестка на конец 2019 года, на основе которых проводилось моделирование. Сформированы предложения по улучшению дорожной ситуации.

Ключевые слова: транспортное моделирование, анализ, транспортный поток, среда разработки, PTV VISSIM, интенсивность движения

APPLICATION OF PTV VISSM FOR MODELING THE INTERSECTION ON DZERZHINSKY STREET-PERVOMAIISKY PROSPEKT

D.S.Savin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, d.savin2010@yandex.ru*

The Abstract. This paper provides the analysis of the intersection on Dzerzhinsky street-Pervomaisky Avenue in PTV Vissim. The data of the intersection at the end of 2019 have been collected, on the basis of which the simulation was carried out. Proposals for improving the road situation have been formed.

Keywords: transport modelling, analysis, transport flow, development environment, PTV VISSIM, traffic volume

Одной из обсуждаемых тем сегодня является транспортное движение на городских улицах. Автомобилизация растет неуклонными темпами. Согласно последним данным «Автостата», на 2018 год в Рязани автомобилизация (количество автомобилей на тысячу человек) составила 333 единицы. Можно ли считать подобное явление положительным? Какие последствия влечет за собой увеличение количества автомобилей в нашем городе? Что изменится в жизни горожан Рязани? Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо проанализировать транспортную ситуацию в нашем городе. Это требует и время, и много ресурсов. Мно-

гие сферы связаны прямо или косвенно с автомобилями. Это и экономика, и политика, культура и экология. Социальную сферу автомобили так же не обошли.

Ежедневно на улицах нашего города на транспорте перемещаются тысячи людей. Поэтому транспорт можно разделить на три большие категории: личный, общественный и грузовой. Но так как тематика данной статьи касается больше вопросов социального характера, большее внимание в ней будет уделено первым двум категориям.

Итак, отчего же зависит выбор транспортного средства у человека? Первое, о чем думают люди, ежедневно ожидающие общественного транспорта на остановках, - это сократить время поездки от дома до места назначения, будь то работа или университет, место отдыха или больница. Второе – мнимое удешевление поездки. Казалось бы, мы ежедневно тратим, как минимум, 46 рублей на дорогу туда и обратно. И, покупая автомобиль, человек предполагает сократить свои прямые расходы [1]. Это расходы, выплачиваемые из кармана горожанина. Также не малую роль играют затраты на ремонт технического обслуживание автомобиля. Это более долговременные решения, которые затрагивают вопрос о выборе транспортного средства. И принимаются они на основе текущих и условно-постоянных расходов горожанина. А вот за непосредственные экологические издержки, социальные – о них мало кто задумывается. Таким образом, в большинстве случаев решение о способе совершения поездки в большей степени определяется структурой расходов, чем их полной совокупностью.

Именно поэтому данный вопрос сегодня является злободневным, актуальным и обсуждаемым. Увеличение трафика на дорогах города, ухудшение экологии, выделение огромного количества бюджетных средств на ремонт дорог, а также личных расходов на автомобиль – все это оказывает прямое влияние на городскую среду, ее комфортность и удобность для жизни.

Одной из эффективных мер по улучшению дорожной ситуации в городе является уменьшение трафика, а значит, и времени, затрачиваемого на передвижение по городу и расходов. Для этого необходимо выбрать загруженный участок сети Рязани. Сегодня их достаточно много. Поэтому в качестве примера возьмем перекресток в центре города, где проезжает большое количество транспортных средств из разных уголков города. Это перекресток на пересечении улиц Дзержинского и Первомайского проспекта.

Моделирование будет проводиться в среде PTV Vissim. О его особенностях рассказано в статье [2]. Для этого необходимо было собрать данные об интенсивности движения транспортных средств в час-пик. Они были собраны за декабрь 2019 года с 7:00 до 8:00. Перекресток представлен на рисунке 1. Собранные данные об интенсивности - в таблице 1.



Рис. 6. Перекресток на пересечении улиц Дзержинского Первомайского проспекта

Таблица 1. Данные об интенсивности движения

	Вид ТС										
		1	2	3	4	5	6	7	Итого	Всего (вх.поток)	Всего (вых.поток)
1	1-2	13	7	33	581	-	1	25	660	1227	840
	1-3	4	10	62	479	-	-	12	567		
2	2-1	12	15	35	417	-	-	10	489	2155	2107
	2-3	18	26	145	730	-	1	16	1666		
3	3-1	4	10	33	302	-	-	2	351	1798	2233
	3-2	16	21	88	1299	-	2	21	1447		
ИТОГО										5180	

Где 1-Автобус (из встроенных моделей PTV VISSIM), 2-Троллейбус (из архива русских моделей), 3-Ком. автобус (из архива русских моделей) Маршрутное такси (из архива русских моделей), 4- Легковые ТС (из архива русских моделей), 6-Большие грузовые (из встроенных моделей PTV VISSIM), 7-Малые грузовые (из встроенных моделей PTV VISSIM).

Также необходимо задать светофорный цикл в программе. Они представлены в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные светофорного цикла

группы	фаза	т.фазы	т.пром	%
1,2,7	1	23	6	11,86%
1,2,4	2	63	3	32,47%
3,4,9	3	17	6	8,76%
3,4,5	4	33	3	17,01%
5,6,8	5	17	3	8,76%
2,5,6	6	14	6	7,22%

Здесь 7,8,9 – сигнальные группы для пешеходных переходов,
1-6 – сигнальные группы для автомобилей.

Основные показатели оптимизации движения на перекрестке – скорость движения (V), Время в заторе (Тзатор), Длина в заторе (М), Остановки в затор (О). Время в пути ТС (Тпуть), количество проезжающих автомобилей за время моделирования (N). Записав в программу данные и запустив первый цикл имитации, получаем следующие результаты (суммарное по 3 перекресткам):

- время в заторе общее – 423,6 сек;
- скорость арифметическая – 46,7 км/ч;
- длина затора – 300 м;
- остановок в заторе – 977;
- кол-во ТС, проехавших за время моделирования 3600 ед. модельного времени – 334;
- время в пути – 1244,8 сек.

Как видно по показателям, заторы есть. Проведем следующие мероприятия для улучшения ситуации на перекрестке. Разделим их на 2 группы. Группа 1 – изменение светофор-

ного цикла. Группа 2 – изменение схемы дорожного движения путем переноса пешеходных переходов под землю. Достоинства и недостатки каждого мероприятия будут описаны далее.

Согласно авторам [3], светофорный цикл необходимо сокращать для увеличения оборачиваемости. Также предпочтительно организация отдельных схем сигнализации для часов пик и для остального времени. На данный момент на перекрестке действует сигнализация общая. Поэтому для моделирования можно предложить, как создание дополнительной сигнализации в часы пик, так и изменить текущую на более оптимизационную.

Вариант 1 - 1.1. Сокращение времени 2 фазы на 30 секунд, увеличение 3,5 и 6 на 10 секунд каждую, не изменяя текущее время цикла, при этом некоторые сигналы не должны пересекаться, например, 5 и 7, 8 и 2. Поэтому для 5 светофорной группы конец действия сигнала будет на 194 секунде, а для 8 – на 171. В таблице 3 представлены следующие изменения в светофорном цикле.

Таблица 3. Изменение светофорного цикла по варианту 1

группы	фаза	т.фазы	т.пром	%
1,2,7	1	23	6	11,86%
1,2,4	2	33	3	17,01%
3,4,9	3	27	6	13,92%
3,4,5	4	33	3	17,01%
5,6,8	5	27	3	13,92%
2,5,6	6	24	6	12,37%

Запускаем новый цикл имитационной модели в PTV Vissim. Получаем следующие результаты:

- время в заторе общее – 443,7 сек;
- скорость арифметическая – 43,05 км/ч;
- длина затора – 336 м;
- остановок в заторе – 1195;
- кол-во ТС, проехавших за время моделирования 3600 ед. модельного времени – 325;
- время в пути – 1036,8 сек.

Из результатов видно, что время в заторе увеличилось на 20 секунд модельного времени суммарное. Уменьшилось время в пути на 17 минут суммарно. Однако такие показатели, как уменьшилась скорость (на 3,6 км/ч), длина затора (на 36 м) увеличилась, количество остановок (на 218) уменьшилось. А общее количество ТС, успевших завершить движение по перекрестку осталось неизменным. Показатель количество остановок в заторе – немного спорный. В идеале их не должно быть или должно быть минимальное количество. Но при сокращении фаз, движение машин на перекрестке может быть динамичным, а показатели оптимизированы. Поэтому попробуем следующий вариант.

Вариант 2 - 1.2. Уменьшение светофорного цикла на 30 секунд. При этом время каждой сигнальной фазы будет следующим:

- 1 с.ф. – 72 секунды+6 сек пром такта;
- 2 с.ф. – 89 секунд + 6 сек пром такта;
- 3 с.ф. – 43 секунды + 6 сек пром такта;
- 4 с.ф. - 95 секунд + 3 сек пром такта;
- 5 с.ф. – 46 секунд + 3 секунды пром такта;

- 6 с.ф. – 27 секунд + 3 сек. пром такта;
- 7 с.ф – 10 секунд + 3 секунды пром. такта;
- 8 с.ф. - 10 секунд + 3 секунды пром. такта;
- 9 с.ф. – 17 сек + 3 сек пром такта.

Изменив светофорный цикл и запустив модель, получаем следующие результаты:

- время в заторе общее – 403,2 сек;
- скорость арифметическая – 43,08 км/ч;
- длина затора – 303 м;
- остановок в заторе – 949;
- кол-во ТС, проехавших за время моделирования 3600 ед. модельного времени – 330;
- время в пути – 997,4 сек.

При моделировании этого варианта значительно улучшились следующие показатели:

- время в заторе сократилось на 20,34 секунд;
- количество остановок сократилось на 28;
- время в пути сократилось на 16,62 минуты.

Однако некоторые показатели ухудшились:

- скорость уменьшилась на 3,62 км/ч;
- длина затора увеличилась на 3,4 м.

Количество транспортных средств, пересекающих перекресток, значительно не изменилось. Вариант достаточно оптимальный для часа-пика. Недостатки можно считать допустимыми, а вот преимущества значительные.

Вариант 3. Попробуем теперь изменить порядок действия сигнальных групп в варианте 2. Сделаем пешеходные сигналы 7-9 отдельно действующими ото всех. 1 сигнал не должен пересекаться с 3,5,6. 2 – с 3. 3 с 1,2,6. 4 с 6. 5 с 1,3,4. И 6 с 1. Получим, что 1 и 2 сигнальный группы действуют 50 секунд + 6 секунд промежуточного такта 3 – 46 секунд и 6 секунд промежуточного такта. 4 группа – 71 секунду + 3 секунды промежуточного такта. 5 и 6 – 41 секунду и 3 секунды промежуточно такта. А 7 – 9 группы – 17 секунд + 3 секунды промежуточного такта. Получим следующие результаты и сравним их с вариантом 2:

- время в заторе общее – 398,34 сек;
- скорость арифметическая – 41,73 км/ч;
- длина затора – 333,308 м;
- остановок в заторе – 997;
- кол-во ТС, проехавших за время моделирования 3600 ед. модельного времени – 284;
- время в пути – 1019,24 сек.

Как видно, многие показатели ухудшились. Вариант не улучшил большинство параметров, а некоторые даже ухудшил. Только 1 параметр – время в заторе – уменьшился на 5 секунд по сравнению с 1.2. и на 25 секунд с исходным вариантом.

Итог: Вариант 2 показал наилучшие результаты. Также можно рассмотреть вариант, когда пешеходные переходы станут подземными на данном перекрестке. Но следует учитывать то, что это трудоемкий и затратный процесс в современных реалиях, который может быть не удобен для многих категорий граждан: инвалиды, пожилые люди, дети. Однако в целях оптимизации движения рассмотрим и его.

Варианты моделирования группы 2. Вариант 1 - светофорный цикл не будет включать в себя 7,8 и 9 сигнальные группы. Оставим светофорный цикл в 194 секундами. Однако нам необходимо изменить порядок и время других фаз, т.к. убрав пешеходные переходы, в целом ничего не изменится, потому что они действуют одновременно с другими фазами. Получим, что 1 и 2 сигнальный группы действуют 59 секунд + 6 секунд промежуточного такта 3 – 59

секунд и 6 секунд промежуточного такта. 4 группа – 62 секунды + 3 секунды промежуточного такта. 5 и 6 – 55 секунду и 3 секунды промежуточно такта. Результаты получились следующие:

- время в заторе общее – 433,3 сек
- скорость арифметическая – 40,71 км/ч
- длина затора – 368,9 м
- остановок в заторе – 1143
- кол-во ТС, проехавших за время моделирования 3600 ед. модельного времени – 267
- время в пути – 1055,56 сек

Сравним данные результаты с исходными и с результатами варианта 2 группы. Вариант в основном не улучшил показатели как исходной модели, так и модели варианта 2 группы. Многие показатели стали хуже.

Вариант 2 – увеличение светофорного цикла до 210 секунд. Получим, что 1 и 2 сигнальный группы действуют 74 секунд + 6 секунд промежуточного такта 3 – 56 секунд и 6 секунд промежуточного такта. 4 группа – 63 секунду + 3 секунды промежуточного такта. 5 и 6 – 55 секунду и 3 секунды промежуточно такта. Результаты получились следующие:

- время в заторе общее – 440,5 сек;
- скорость арифметическая – 42,96 км/ч;
- длина затора – 356,97 м;
- остановок в заторе – 1009;
- кол-во ТС, проехавших за время моделирования 3600 ед. модельного времени – 271;
- время в пути – 1050,56 сек.

Как видно, результаты оказались не лучше предыдущего варианта. Ликвидация пешеходных переходов не дала значимых улучшений. Вариант 2 группы 1 наиболее оптимален в данной ситуации. Именно его можно рекомендовать как вариант для оптимизации дорожного движения на перекрестке улиц Дзержинского и Первомайского проспекта.

Библиографический список

1. Вукан Р. Вучик. Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина под научн. ред. М. Блинкина.: Территория будущего; Москва; 2011 ISBN 978-5-91129-058-0
2. Савин Д.С. Сравнительный анализ сред разработки по транспортному моделированию / Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019 [текст]: сб. тр. II междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.3./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019; Рязань. – 140 с.; ил.
3. Проектирование городских улиц /Коллектив авторов НАСТО ; Пер. с англ. — М.: Альпина нон-фикшн, 2015. — 192 с.

УДК 523.682-852; ГРНТИ 89.15.35

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА И ОРГАНИЗАЦИЯ МЕТЕОРНОГО МОНИТОРИНГА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СРЕДСТВАМИ

А.К. Муртазов

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, a.murtazov@365.rsu.edu.ru*

Аннотация. Оптико-электронные средства позволяют проводить мониторинг метеорных явлений с высокой степенью информативности. Проведено сравнение качества оптических и радиолокационных измерений в астрономии. Оценены разрешающая и проникающая способность, а также дисторсия и точность регистрации ярких и предельно слабых объектов ПЗС-камерами, используемыми в метеорной астрономии. Показано, что в оптическом диапазоне большое влияние на точность фотометрических измерений оказывает качество изображения на приемной ПЗС-матрице.

Ключевые слова: оптический диапазон спектра, мониторинг, оптико-электронные средства.

PECULIARITIES OF THE OPTICAL SPECTRAL BAND AND ARRANGEMENTS FOR THE METEOR CCD-MONITORING

A.K. Murtazov

*Ryazan State University named for S. Yesenin,
Russia, Ryazan, a.murtazov@365.rsu.edu.ru*

Summary. Optical electronic equipment allows for the highly informative meteor monitoring. The quality of optical and radio-locating measurements in astronomy have been compared. The resolution capability and optical resolving power have been assessed, as well as the distortion and accuracy of registering bright and extremely faint objects by means of CCDs used in the meteor astronomy. It has been shown, that within the optical range, the accuracy of optical measurements is influenced by the quality of the matrix image.

Keywords: spectrum optical range; monitoring; optronic equipment.

Введение

Как известно, одним из основных диапазонов электромагнитного излучения, в котором астрономы получают наибольшую информацию о наблюдаемых объектах, является оптический диапазон.

В настоящее время системы регистрации оптического изображения на основе приборов с зарядовой связью являются наиболее удобным и распространенным инструментом в астрономии.

Малогабаритные ПЗС-камеры широко применяются во всем мире при проведении метеорных исследований.

1. Особенности оптического диапазона

Оптический мониторинг в астрономии имеет некоторые особенности получения информации посредством регистрации коротковолнового солнечного электромагнитного излучения, отраженного планетами, а также излученного при сгорании в атмосфере метеорных частиц космического мусора. Эти особенности, с одной стороны, обеспечивают большую информативность передачи и скорости обработки информации в оптике. С другой стороны, оптика до сих пор остается средством, обеспечивающим получение информации от далеких объектов, недоступных радиолокационным методам.

1.1. Широкополосность

При передаче и приеме информации с использованием сигналов электромагнитных волн нередко требуется выполнение условия квазимонохроматичности, согласно которому

ширина $B = \Delta\nu$ спектра передаваемого сигнала (полосы частот передачи) должна быть, по крайней мере, на 1-2 порядка меньше, чем среднее значение несущей частоты ν_0 этого сигнала:

$$\Delta\nu \ll \nu_0 \quad (1)$$

Частоты ν_0 в оптическом диапазоне имеют величину порядка $6 \cdot 10^{14}$ Гц, следовательно, ширина полосы частот передачи сигналов здесь может достигать $10^{12} - 10^{13}$ Гц, что недостижимо средствами, например, техники СВЧ ($\nu_0 = 3 \cdot 10^{8+11}$ Гц).

Согласно теореме Шеннона скорость передачи информации (бит/с) зависит от технических характеристик системы передачи – ширины B (Гц) полосы передаваемых частот и отношения сигнал/шум S/N в конечном устройстве этой системы как

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right). \quad (2)$$

То есть, пропускающая способность системы передачи информации прямо пропорциональна ширине B полосы частот передачи.

Скорость передачи информации в цифровых ПЗС-камерах начинается от значений 500 Мбит/с.

Такая высокая широкополосность, а в итоге большая скорость передачи информации, является несомненным достоинством оптического диапазона.

1.2. Дальность действия

Особенности приема информации добавляют еще ряд различий в возможности мониторинга объектов в различных участках спектра электромагнитных волн.

В общем случае при радиолокационном мониторинге одной антенной космического объекта мощность P_0 принятого от него излучения выражается как (Бронштэн, 1979)

$$P_0 = P * \frac{G A g \rho \pi R^2}{(4\pi d^2)^2}, \quad (3)$$

где P – излучаемая мощность;

A – эффективная площадь антенны;

R – эффективный радиус объекта;

d – топоцентрическое расстояние объекта;

G – коэффициент усиления передающей антенны;

λ – длина волны излучения;

ρ и g – коэффициент отражения объекта на этой длине волны и коэффициент направленности отраженного излучения. Для $\lambda = 12,5$ см $\rho g = 0,1$.

Минимальный размер наблюдаемых объектов при радиолокации с использованием двух антенн оценивается из основного уравнения радиолокации (Ржигза, Зайцев А.Л., 1998) для мощности отраженного сигнала на входе приемника

$$S_{ax} = \frac{P * A_1 * \sigma * A_2}{4 * \pi * d_1^2 * d_2^2 * \lambda^2}, \quad (4)$$

где A_1 и A_2 – эффективные площади излучающей и приемной антенн;

d_1 и d_2 – соответственно их топоцентрические расстояния до наблюдаемого объекта.

То есть, мощность принятого от объекта сигнала в радиолокации обратно пропорциональна четвертой степени его топоцентрического расстояния.

В то же время, освещенность, создаваемый КО на поверхности Земли (*Murtazov, 2006*), обратно пропорционален только квадрату его топоцентрического расстояния, а основное ограничение на видимость КО накладывает атмосфера:

$$E_{\lambda}^{iso} = E_{\lambda}^s \cdot \frac{a_{\lambda} \cdot F(\phi) \cdot S}{d^2} \cdot P_{\lambda}^{M(z)} \cdot \eta_{\lambda}^{-1}(z). \quad (5)$$

Кроме того, для больших антенн радиолокационных станций отношение $\frac{\lambda}{\sqrt{A}} = (3-5) \cdot 10^{-3}$ (*Козлов, 1996*), тогда как в оптике даже для 1-см объектива оно не превышает 10^{-5} , что дает возможность обнаруживать и отслеживать в оптическом диапазоне объекты значительно меньшего размера.

Поэтому обладающие всепогодной и круглосуточной работоспособностью радиолокационные средства ККП эффективно используются для обнаружения и контроля КО на низких высотах (до 2,5-3,5 тыс. км), а для обнаружения и контроля КО в зоне GEO используются, в основном, оптико-электронные средства.

2. Квантовые свойства излучения

Другая особенность оптического диапазона связи – необходимость учета квантовых свойств излучения, которые проявляются как при генерации излучения, так и при его регистрации фотоприемниками, в частности, приборами с зарядовой связью (ПЗС).

Фотоны в квантовой электродинамике описываются симметричными волновыми функциями, и как частицы с целым спином подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна (*Физика космоса, 1986*). В этой статистике среднее число фотонов $\bar{n}$ в некотором квантовом состоянии определяется как

$$\bar{n} = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (6)$$

где h - постоянная Планка, k - постоянная Больцмана и T – абсолютная температура среды.

В диапазоне СВЧ энергия квантов существенно меньше тепловой энергии на одну степень свободы, $h\nu \ll kT$, при этом среднее число фотонов в квантовом состоянии велико, $\bar{n} \gg 1$. Наоборот, в оптическом диапазоне выполняется $h\nu \geq kT$ и $\bar{n} \leq 1$.

Средние квадраты флуктуаций числа фотонов, равные, по определению,

$$\Delta n^2 = (n - \bar{n})^2 \quad (7)$$

(здесь предполагается усреднение по времени) существенно различны для СВЧ- и оптического диапазона.

Поскольку в диапазоне СВЧ преобладают тепловые шумы и

$$\Delta n^2 \approx (\bar{n})^2, \quad (8)$$

а относительная величина флуктуаций числа фотонов

$$\frac{\Delta n}{\bar{n}} \ll 1, \quad (9)$$

то флуктуации числа фотонов соответствуют классической статистике Пуассона и энергия ε шума на один квант излучения равна

$$\varepsilon = h\nu\sqrt{(\Delta n)^2} = h\nu\bar{n} = kT. \quad (10)$$

В оптическом диапазоне выполняется условие

$$\Delta n^2 \approx (\bar{n})^2 + \bar{n}, \quad (11)$$

при этом относительная величина флуктуаций числа фотонов существенно выше,

$$\frac{\Delta n}{\bar{n}} \approx 1. \quad (12)$$

Энергия шума на один квант излучения

$$\varepsilon = h\nu\sqrt{\Delta n^2} = h\nu\sqrt{\bar{n}}\sqrt{1 + \bar{n}}, \quad (13)$$

что намного больше величины kT .

Это показывает, что в оптическом диапазоне длин волн заметную роль играют квантовые шумы, превышающие тепловые. Сравнительно сильные флуктуации числа фотонов в отдельном квантовом состоянии вызывают и флуктуации числа фотоэлектронов в приемнике излучения, обуславливая, в свою очередь, квантовый (дробовый) шум фототока.

3. Точность фотометрических измерений

За время экспозиции телескоп собирает фотоны, идущие как от источника, так и фоновые фотоны (рассеяние света в атмосфере, свечение атмосферы, фотоны из межзвездной среды и т.д.). Фон неба S [квантов/см²/с/стер] за время экспозиции можно считать постоянным. Типичное его значение в сине-зеленой (B) области – 21,5 звездная величина с кв. секунды дуги, что соответствует $n_{\phi} \sim 2,5 \cdot 10^{-6}$ квантов/см²/с/А/кв. сек. Фон неба увеличивается в красной области из-за свечения атмосферных молекул ОН.

Пусть имеется идеальный ($\eta=1$) приемник. Если t - время экспозиции, β - угловой размер изображения (обычно атмосферное), D - апертура телескопа, S - яркость фона неба [квантов/см²/с/стер], n_* - поток от источника [квантов/см²/с], то количество фоновых квантов, попавших на детектор за время экспозиции

$$N_{\phi} = D^2 \beta^2 S t, \quad (14)$$

а от источника + фон

$$N_{*+\phi} = D^2 t (n_* + \beta^2 S). \quad (15)$$

Если считать, что за время экспозиции фон не меняется и флуктуации числа квантов носят пуассоновский характер, то дисперсия отсчетов определится как $\sigma = \sqrt{N_{*+\phi} + N_{\phi}}$. Точность измерения будет характеризоваться относительной флуктуацией числа отсчетов $\varepsilon = \frac{\sqrt{N_{*+\phi} + N_{\phi}}}{N_*}$.

Отсюда получается два случая фотометрических измерений:

- 1) случай яркого объекта $N_* \gg N_\phi$, $\varepsilon \cong \frac{\sqrt{N_*}}{N_*} = \frac{1}{\sqrt{N_*}} = \frac{1}{D\sqrt{n_*t}}$;
- 2) случай слабого объекта $N_* < N_\phi$, $\varepsilon = \frac{\sqrt{2N_\phi}}{N_*} = \frac{\sqrt{2D^2\beta^2St}}{D^2n_*t} = \frac{\beta}{Dn_*} \sqrt{\frac{2S}{t}}$.

То есть, кроме электронных шумов большую роль в оптическом ПЗС-мониторинге (в особенности слабых объектов) играет качество изображения (обусловленное, главным образом, состоянием атмосферы).

4. Параметры приемных устройств для метеорной астрономии

Основным детектором оптического излучения в астрономии в настоящее время являются ПЗС-камеры, не имеющие инерционности и достаточно чувствительные к предельным световым потокам.

Основные параметры приемных устройств: диаметр и относительное отверстие оптики, чувствительность и разрешающая способность светочувствительного элемента приемного устройства.

Разрешающая способность

Физический размер ПЗС-ячеек является основным параметром, определяющим требования к разрешающей способности объектива. Другим таким параметром может явиться требование по обеспечению работы матрицы в условиях световой перегрузки, которое будет рассмотрено ниже. Для 1/2 дюймовой матрицы SONY размер пиксела составляет 8,6 мкм*8,3 мкм (типичное значение для 1/2 дюймовых матриц – 8,5 мкм*8,5 мкм.). Следовательно, объектив должен иметь разрешение лучше, чем $1/8,3 * 10^{-3} = 120$ линий (60 пар) на мм. Для объективов, сделанных под 1/3-дюймовые матрицы, это значение должно быть еще выше.

Высокая чувствительность делает ПЗС-камеры особенно подходящими для формирования изображений с высоким разрешением, которое в общем случае является функцией фокусного расстояния объектива и размеров пиксела матрицы.

Для малой оптики (телескопы с диаметром до 10 см) размер пиксела должен соответствовать размеру пятна, которое для совершенной оптической системы является диаметром пятна Эйри, т.е. изображения, созданного совершенным точечным источником (звездой). Размер R пятна для $\lambda=550$ нм

$$R = \frac{1,38 * K}{t}, \quad (16)$$

где R - диаметр пятна Эйри, мкм; K - диафрагменное число; t - коэффициент подгонки.

Адекватная выборка соответствует размеру изображения звезды вдвое большему размеру пиксела.

Согласно теореме Найквиста-Котельникова: аналоговый сигнал может быть без потерь восстановлен (передан) дискретным сигналом с вдвое меньшей частотой (Малинин, 2006), для оптимальной работы нужно иметь, по крайней мере, два пиксела поперек полуширины изображения звезды (для практических целей - от 2,5 до 3 пиксел).

На рисунке 1 представлены результаты измерения распределения яркости изображений звезд различного блеска на единичных фреймах, полученных системой «ПЗС-камера КРС-650ВН» с объективом SSE0612NI F1.2. в сравнении с распределением фона (Миронов, Муртазов, Усовик, 2018).

Распределение яркости здесь близко к гауссову и уверенно аппроксимируется полиномами (относительная дисперсия колеблется в пределах 3%, коэффициент корреляции достаточно близок к 1) и удовлетворяет теореме Найквиста (Муртазов, 2010).

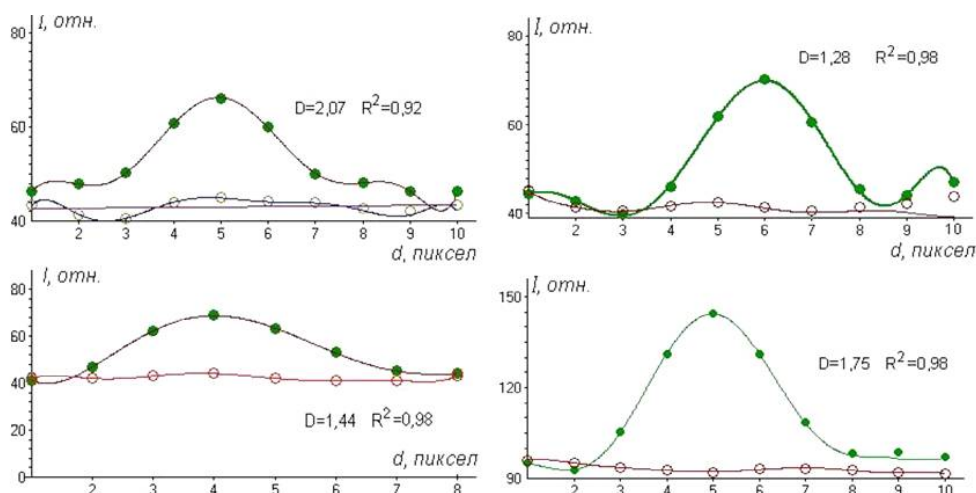


Рис .1. Профиль изображений звезд различного блеска в сравнении с фоном для системы «камера КРС-650ВН - объектив SSE0612NI F1.2.»

Для большой оптики в случае наблюдений телескопических метеоров или геостационарных объектов сбои при наблюдении, случайное движение звезд, вызванное турбулентностью атмосферы, увеличивают практический размер пятна. Его идеальные размеры для случая ПЗС-приемника можно определить как

$$r = \frac{206,265 * R}{F}, \quad (17)$$

где r – размер изображения звезды, угловые секунды, R – размер пиксела, мкм, F - фокусное расстояние инструмента, мм.

Для 25-см Кассегрена астрономической обсерватории Рязанского госуниверситета эта величина составляет $r=0,7''$.

В реальных условиях для небольших телескопов чаще регистрируется масштаб изображения в $1 \div 2''$ на пиксел.

Дисторсия

Все широкоугольные объективы в той или иной степени имеют, главным образом, отрицательную (подушкообразную) дисторсию, причем, с уменьшением фокусного расстояния объектива искажения возрастают. По исследованиям автора 8-мм объектив имеет дисторсию до $1,5^\circ$ при радиусе поля зрения 60° с 1/2-дюймовой камерой, дисторсия 12-мм объектива составляет $0,5^\circ$ на поле зрения 30° (Муртазов, 2010, 2011).

На рисунке 2б приведены результаты определения дисторсии для системы с широкоугольным 12-мм объективом. На нем R - идеальное расстояние звезд от центра снимка, D - расстояние по небесной сфере от центра снимка (Муртазов, 2010, 2011). Для сравнения на рисунке 2а показана дисторсия для 6-мм объектива по данным (Yrjölä I. , 2003).

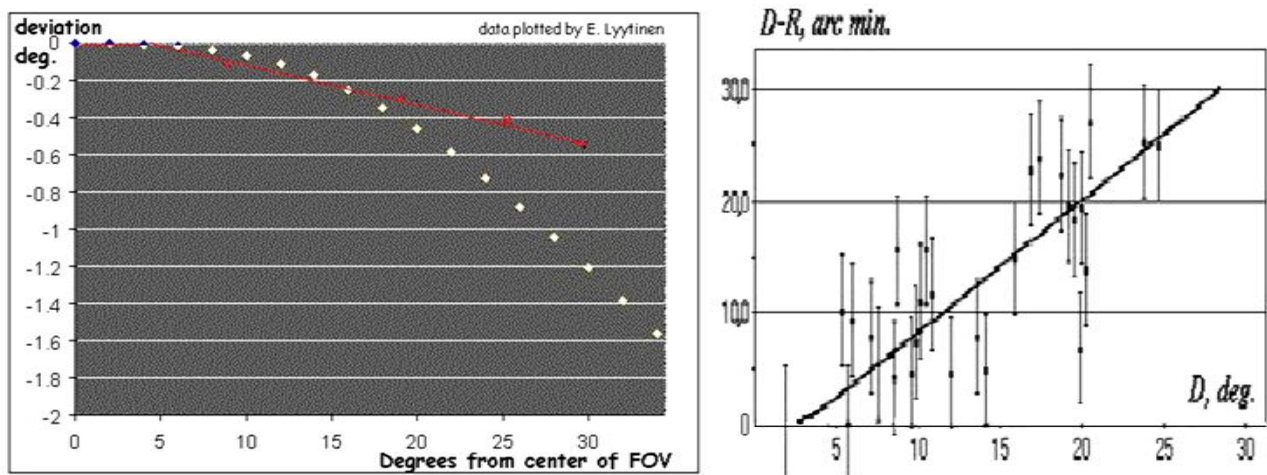


Рис. 2. а - дисторсия ПЗС-системы «объектив Елео 0608NDDC-560 + камера Wat-902Н» (Yrjölä I., 2003);
 б - оптические искажения системы «камера КРС-650Н-объектив SSE0612NI F1.2» (Муртазов и др., 2007).
 R - идеальное расстояние звезд от центра снимка, D - расстояние по небесной сфере от центра снимка

Чувствительность для большинства промышленных и бытовых камер определяется при отношении «сигнал-шум» $S/N \approx 50$ дБ и в наилучшем случае, по данным фирм-изготовителей, составляет величину порядка 10^{-3} лк.

В астрономии основными параметрами любого приемного устройства являются время накопления сигнала, отношение «сигнал-шум», возможность быстрой обработки полученных результатов. При использовании ПЗС-приемников, состоящих из большого числа пикселей, имеются некоторые особенности, позволяющие использовать их в широком диапазоне падающих световых потоков. Здесь сигнал от наблюдаемого объекта, проецируемого оптической системой на единичный пиксель за минимальное время накопления τ одного кадра, составляет $I(t) * Q * \tau$ электронов, где $I(t)$ – поток от объекта, Q – квантовый выход ПЗС-приемника. К нему добавляется сигнал, образованный аддитивным сложением тока от фона неба $I_{фон}$, теплового шума (иначе, темнового тока) $I_{ТТ}$, шумов считывания $I_{сч}$:

$$I_{ТТ} * \tau + I_{фон} * Q * \tau + I_{сч} . \quad (18)$$

Поскольку аппаратные шумы и фон неба являются дискретными и подчиняются закону нормального распределения, уровень шума на выходе ПЗС-приемника составляет $\sqrt{I_{ТТ} * \tau} + \sqrt{I_{фон} * Q * \tau} + \sqrt{I_{сч}}$, а отношение «сигнал-шум» без учета шумов считывания

$$\frac{S}{N} = \frac{I(t) * \tau}{\sqrt{I_{ТТ} * \tau} + \sqrt{I_{фон} * Q * \tau}} . \quad (19)$$

Таким образом, чем ярче объект и чем больше время накопления сигнала, тем больше отношение «сигнал-шум» и выше вероятность его обнаружения. То есть при наблюдении слабых источников существенным фактором является время накопления сигнала или количество сложенных кадров (до насыщения канала измерения). Динамический диапазон между минимальным и максимальным значениями измеряемого сигнала, в котором сохраняется линейность световой характеристики, для ПЗС-матриц оценивается до 10^2 (Муртазов, 2008; Murtazov, Efimov, 2016). Тепловые шумы снижаются охлаждением. В результате время единичной экспозиции может составлять от нескольких минут до нескольких часов. Этот случай

реализуется в большинстве астрономических наблюдений и используется при ПЗС-наблюдениях астрономических объектов, имеющих достаточно малые собственные движения, включая астероиды, геостационарные спутники и мусор на геостационарных орбитах.

ПЗС-мониторинг метеоров проводится в непрерывном режиме, когда фотометрия проводится на единичных фреймах.

На рис. 3 представлены отношения сигнал-шум (signal-noise-ratio, SNR), измеренные для звезд сравнения на 30 единичных фреймах и на сложённом из них изображении системы «камера Wat-902H+ объектив HG0808» при температуре матрицы 20°C (Murtazov, Efimov, 2016).

Для звезд сравнения, находящихся на пределе обнаружения единичных фреймов, когда $SNR = 20 \lg(F_{\text{объект+фон}}/F_{\text{фон}})$, дБ, близок к нулю (объект почти неразличим на фоне помех) и до $SNR \approx 4$ дБ зависимость блеска звезд сравнения от SNR нелинейна (рис. 3а), что не позволяет проводить качественной фотометрии. На сложённом кадре (рис. 3б) различие между сигналом от звезды и фоном резко возрастает: сигнал возрастает пропорционально количеству кадров, а фон – пропорционально корню из числа кадров, что способствует повышению проникающей способности оптической системы. Световая характеристика оптической системы становится линейной, точность фотометрических измерений повышается. Средние ошибки составляют $\approx 0,05^m$, что близко к точности фотографической фотометрии.

При реализации системы оптического мониторинга для случая широкоугольных наблюдений низких техногенных объектов и метеоров неподвижной камерой в непрерывном телевизионном режиме на отношение «сигнал-шум» накладываются еще большие ограничения, что требует наличия большого динамического диапазона приемной матрицы.

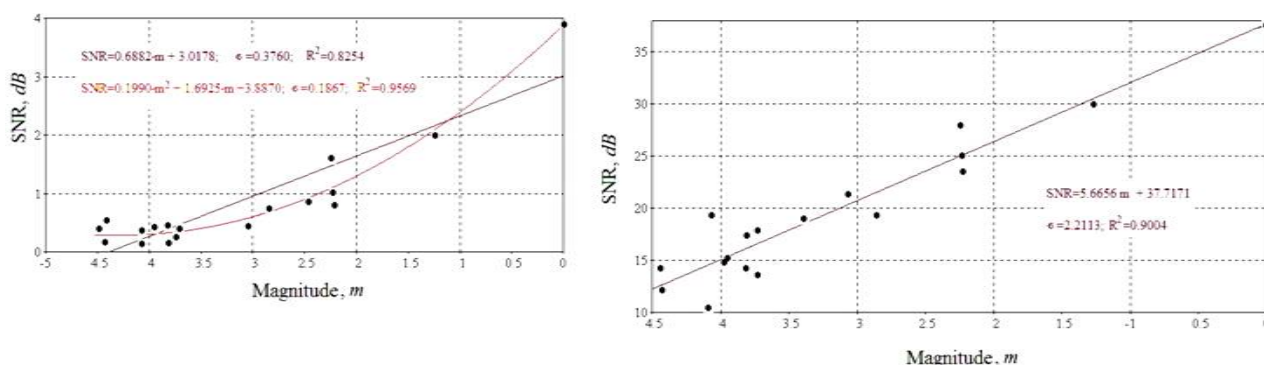


Рис. 3. Сравнение линейности фотометрических характеристик на отдельном фрейме и сложённом кадре для системы «камера Wat-902H+ объектив HG0808»

В итоге (Murtazov, 2008, 2010):

- лучшее значение S/N достигается, если сохранять размеры звезды как точечного объекта по критерию Найквиста (не менее 2,5 пикселей по диагонали кадра);
- при очень коротких экспозициях или последовательности коротких экспозиций влияние шума считывания может быть ограничивающим фактором;
- в большинстве случаев фон неба является ограничивающим фактором для продолжительных экспозиций при работе, даже на темных участках неба;
- если снимок должным образом откалиброван, то учет темнового тока важен только при формировании узкополосного изображения (спектроскопия, узкополосный интерференционный фильтр и т.д.).

Проницающая способность

Предельная звездная величина $m_{пред.}$ регистрируемых объектов зависит от эффективного диаметра телескопа D , квантовой эффективности приемника Q , размеров изображения звезды на матрице r , времени накопления t , принятого значения отношения сигнала к шуму S/N , а также от яркости фона неба m_{ϕ} (Harris, 1994)

$$m_{пред.} = m_{\phi} + 2.5 \lg \frac{D \sqrt{Qt}}{(S/N)r} \quad (20)$$

где r определяется стороной квадрата из целого числа пикселей, покрываемых изображением звезды, и выражается в секундах дуги.

Ожидаемые параметры блеска объектов в ОКП определяют возможности их обнаружения оптическими средствами и, соответственно, определяют технические параметры систем оптического мониторинга и средств регистрации излучения.

К примеру, реальная проницающая способность телескопа Шмидта (17/20 см) астрономической обсерватории Одесского университета с камерой Watec LCL-902K в телевизионном режиме (25 кадров в секунду) составляет 11,8^m в области V (Горбанев и др., 2008).

Проницающая способность оптической метеорной системы «камера Wat-902H+ объектив HG0808» в телевизионном режиме составляет 4,5^m и ~6,6^m при ошибке ~5% на сложенных фреймах, что, в общем, соответствует расчетам.

Выводы

В оптическом диапазоне длин волн заметную роль играют квантовые шумы, превышающие тепловые. Сравнительно сильные флуктуации числа фотонов в отдельном квантовом состоянии вызывают и флуктуации числа фотоэлектронов в приемнике излучения. Здесь большое влияние на точность фотометрических измерений оказывает качество изображения, определяющееся, главным образом, состоянием атмосферы.

При ПЗС-наблюдении слабых источников существенным фактором является время накопления сигнала или количество сложенных кадров (до насыщения канала измерения).

Фотометрия отдельных кадров из avi-файла показывает отсутствие линейности между звездными величинами звезд и их измеренными яркостями на кадре, что повышает ошибки при фотометрическом мониторинге метеорных явлений.

Библиографический список

1. Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. - М.: Наука, 1981. - 416 с.
2. Горбанёв Ю.М. и др. Методика и статистика телевизионных наблюдений телескопических метеоров // Астрономический вестник. - 2006. Т. 40. № 5. - С. 449-464.
3. Козлов А.И. Радиолокация. Физические основы и проблемы // СОЖ. - 1996. № 5. - С. 70-78.
4. Малинин В.В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами. - Новосибирск: Наука, 2006.
5. Миронов В.В., Муртазов А.К., Усовик И.В. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. - Рязань: Изд. Коняхин А.В. (Book Jet), 2018. - 312 с.
6. Муртазов А.К. Мониторинг естественного загрязнения околоземного пространства опасными метеорными телами // Экологические системы и приборы. - 2008. № 6. - С. 8-10.
7. Муртазов А.К. Мониторинг околоземного пространства оптическими средствами. Монография. - Рязань: РГУ имени С.А. Есенина, 2010. - 248 с.
8. Муртазов А.К. Организация комплексных телевизионных метеорных наблюдений на астрономической обсерватории Рязанского госуниверситета // Вестник СибГАУ. - 2011. № 6(39). - С. 109-113.
9. Ржига О.Н., Зайцев О.Л. Возможности радиолокационного комплекса Центра дальней космической связи под Евпаторией по исследованию загрязнения космического пространства // Околоземная астрономия (космический мусор). - М.: 1998. - С. 118-127.

10. Физика космоса. Маленькая энциклопедия / Под ред. Р.А. Сюняева. - М.: Советская энциклопедия, 1986. - 783 с.
11. Harris A. W. Evaluation of CCD systems for Near-Earth-Object surveys. - In: Report of Near-Earth Object Survey Working Group (Ed. E. M. Shoemaker), appendix III. 1995.
12. Murtazov A.K. Direct photometric problem of optical monitoring of objects in circumterrestrial space. Russian Physics Journal. - NY: Springer, 2006. V. 49, N 11. - PP. 1224-1229.
13. Murtazov A.K., Efimov A.V. Measurements of CCD optical linearity for magnitude determination during meteor observations. In: Proceedings of International Meteor Conference. Egmond, the Netherlands, June 2-5, 2016 / Ed. by Adriana and Paul Roggemans. - PP. 202-204.
14. Murtazov A.K. Assessing the meteoroid risk in near earth space. Open Astronomy. 2018. Vol. 27, issue 1, PP. 144-149.
15. Yrjölä I. Meteor video camera. www.kolumbus.fi/oh5iy/astro/Ccd.html. Nov. 2003.

References

1. Bronshten V.A. Physics of Meteors. Moscow, Nauka, 1981. - 416 p.
2. Gorbanev Yu.M. et al. Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors. Solar System Research. 2006. V. 40, n. 5.
3. Kozlov A.I. Radio location. Principal physics and problems. Soros Educational Journal. - 1996. n 5. - PP. 70-78.
4. Malinin V.V. Simulation and optimization of optoelectronic CCD devices. - Novosibirsk, Nauka, 2006.
5. Mirinov V.V., Murtazov A.K., Usovskiy I.V. System approach of near Earth monitoring. - Ryazan, Book Jet, 2018, 312 p.
6. Murtazov A.K. The monitoring of circumterrestrial space contamination by natural space bodies. The ecological systems and equipment. 2008. n. 6. - pp. 8-10.
7. Murtazov A.K. Optical monitoring of Near Earth space. Ryazan, 2010. - 248 p.
8. Murtazov A.K. Arrangement of integrated meteor TV-observations at the Ryazan State University Astronomical Observatory". Vestnik of the Siberian State Aerospace University, n39, pages 109-113.
9. Rzhiga O.N., Zaitsev A.L. Possibility to Study Space Debris by the Radar-Space-Complex in Evpatoria. Near-Earth Astronomy. 1998. PP. 118-128.
10. Space physics. Small encyclopedia. (1986) / Ed. by R.A. Sunyaev. Moscow, 783 p.
11. Harris A. W. Evaluation of CCD systems for Near-Earth-Object surveys. - In: Report of Near-Earth Object Survey Working Group (Ed. E. M. Shoemaker), appendix III. 1995.
12. Murtazov A.K. Direct photometric problem of optical monitoring of objects in circumterrestrial space. Russian Physics Journal. - NY: Springer, 2006. V. 49, N 11. - PP. 1224-1229.
13. Murtazov A.K., Efimov A.V. Measurements of CCD optical linearity for magnitude determination during meteor observations. In: Proceedings of International Meteor Conference. Egmond, the Netherlands, June 2-5, 2016 / Ed. by Adriana and Paul Roggemans. - PP. 202-204.
14. Murtazov A.K. Assessing the meteoroid risk in near earth space. Open Astronomy. 2018. Vol. 27, issue 1, PP. 144-149.
15. Yrjölä I. Meteor video camera. www.kolumbus.fi/oh5iy/astro/Ccd.html. Nov. 2003.

УДК 004.8; ГРНТИ 28.23

НОВЫЕ МЕТОДЫ В ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЙ АНАЛИТИКЕ

Е.В. Селиванов

ПАО «Сбербанк»,

Россия, Рязань, selivanov.ev.v@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы, используемые в предсказательной аналитике. Обозначены существующие методы интеллектуального анализа данных. Обсуждаются новые подходы к получению предсказаний, основанные на моделировании мыслительного процесса человека и представляющие собой передний край исследований в области искусственного интеллекта. Предлагается иерархическое древовидное представление последовательных данных.

Ключевые слова: предсказательная аналитика, искусственный интеллект, моделирование, данные, иерархическое представление.

NEW METHODS IN PREDICTIVE ANALYTICS

E.V. Selivanov

PJSC Sberbank,

Russia, Ryazan, selivanov.ev.v@gmail.com

The summary. The article discusses modern methods used in predictive analytics. Designated the existing methods of data mining. Discussed the new approaches to making predictions, based on modeling of the human thought process and representing the cutting edge of research in the field of artificial intelligence. A hierarchical tree representation of sequential data is proposed.

Keywords: predictive analytics, artificial intelligence, modeling, data, hierarchical representation.

Прогнозирование с достаточной точностью на необходимый временной интервал является базовой задачей для всех живых организмов. От способности к решению этой задачи напрямую зависит успех взаимодействия с внешним миром и как следствие выживаемость, условия жизни и пр. Задача предсказания будущего настолько глобальна, что её решение порой принимается как само собой разумеющееся или вовсе остаётся незамеченным, так как предсказание происходит подсознательно или на уровне инстинктов, безусловных реакций. Конечно, перед современным человеком стоят новые задачи предсказания, решение которых помогает существенно расширить его горизонт планирования.

Это такие задачи как прогнозирование погоды, спроса, цен на продукцию, рост или падение акций, кредитный скоринг, моделирование языка, предсказание развития заболевания или отдельных параметров его протекания, таких как, например, уровень сахара в крови. Все эти проблемы принадлежат области предсказательной аналитики.

Предсказательная аналитика или предиктивная аналитика (от английского словосочетания predictive analytics) представляет собой "класс методов анализа данных, концентрирующийся на прогнозировании будущего поведения объектов и субъектов с целью принятия оптимальных решений" [1].

В области информатики для решения таких задач сейчас используются различные модели, относящиеся к классу слабого искусственного интеллекта. Это нейросетевые модели, деревья решений, модели на основе n-грамм [2] и Bag of Words и др. Применяются также и простейшие методы, такие как скользящее среднее, регрессия, авторегрессия и т.д. Механизм работы этих моделей, реализующих аналитику данных с целью предсказания, одинаков: это поиск в массиве исторических данных шаблонов, которые можно было бы экстраполировать на текущую ситуацию.

Однако, существующие методы анализа, хотя и эффективны для локальных ситуаций, имеют свои ограничения [3,4]. Это, например, "проклятие размерности". В задачах машинного обучения каждый признак исследуемого объекта представляет собой одно измерение. Большое количество измерений делает задачу машинного обучения сложной: требуется

очень большое количество обучающих данных и время обучения становится нецелесообразно большим [5].

Для качественного рывка в области предсказательной аналитики необходимы новые подходы, учитывающие опыт развития когнитивных процессов человека, мозга как самого совершенного инструмента анализа. Задачу предсказания следует рассматривать именно с точки зрения анализа временных рядов, так как любую ситуацию или даже статичный объект можно представить некоторой последовательностью.

Например, большое и сложное для распознавания изображение с большим количеством деталей можно анализировать по частям. Человек делает это подобным образом, перемещая взгляд и получая последовательность простых образов, которые складываются затем в полную картину. Более того, со временем вырабатываются "управляющие паттерны" перемещения взгляда, позволяющие быстрее выделить суть рассматриваемого образа. Человек обладает универсальной способностью анализировать и предсказывать, будь то чтение текста, прогулка или совершение покупок [6].

В настоящее время на этой основе выработана парадигма "память-предсказание" и разработана частная модель мозга, имеющая название "Иерархическая Временная Память" (англ. Hierarchical temporal memory, HTM), разработанная Джеффом Хокинсом и Дилипом Джоржом из компании Numenta [7]. В ней нашли отражение некоторые алгоритмические и структурные особенности новой коры человеческого мозга. Разработка подобных моделей является шагом на пути к сильному или универсальному искусственному интеллекту и составляет передовой край исследований в этой области.

Несмотря на то, что на вход модели можно подавать различные данные, тексты на естественном языке являются наиболее выгодным источником информации. С помощью текста можно описать практически любое явление, изображение, ряд событий. Большая часть знаний, накопленных человечеством, записана в текстовой форме. Алгоритм, работающий со смысловыми конструкциями, заключёнными в текстах, будет иметь преимущество над существующими моделями как более универсальный и имеющий доступ к самому большому массиву значимых, структурированных данных.

Однако, именно в задачах анализа и моделирования текста "проклятие размерности" проявляется в полный рост. Если рассмотреть задачу предсказания следующего слова w_t в тексте $\{w_1, w_2, \dots, w_{t-1}\}$, учитывая все предыдущие слова, то его вероятность будет описываться следующей формулой:

$$P(w_1, \dots, w_t) = \prod_{i=1}^t P(w_i | w_1, \dots, w_{i-1})$$

Таким образом, для больших текстов потребуется огромная вычислительная мощность. А если учитывать то, что не каждое слово может присутствовать в словаре и мы бы предсказывали не следующее слово, а следующую букву, то задача становится практически неразрешимой. Конечно, существующие методы на основе n-грамм, Bag of Words и др. решают эту проблему, приняв за основу утверждение, что слова, наиболее близко расположенные в тексте имеют большую статистическую зависимость. Таким образом, слова расположенные далеко просто отбрасываются как незначимые, и для предсказания используется скользящее окно, редко превышающее 4 слова [5].

Однако, на наш взгляд было бы не правильным отбросить большую часть текста, делая осмысленное предсказание. Смысл текста, как правило выходит за рамки не только нескольких слов, но и предложений. Для человека не составляет труда выделить суть из текста, тогда как существующие технологии не всегда и не достаточно точно справляются с этим.

Таким образом, необходимо развивать новые подходы к решению этой проблемы, основанные на изучении когнитивных процессов человека.

Паттерны, организованные в иерархию являются удобным инструментом для анализа и прогнозирования. Известный футуролог и изобретатель многочисленных систем распознавания речи, Рэймонд Курцвейл в своей работе «Эволюция разума» отмечает высокую перспективность иерархических цепей Маркова в области построения сильного искусственного интеллекта [8]. Его выводы пересекаются с работами Джеффа Хокинса. Оба исследователя говорят об одной и той же идее – оперировании иерархическими последовательностями. Теоретически, анализ таких последовательностей позволяет находить устойчивые паттерны в потоках данных, абстрагируясь от их структуры и конкретного представления, так как это делает человек. Так, например, мы можем узнавать один и тот же объект внешнего мира независимо от того, видим ли мы его, смотрим на картину с изображением этого объекта или просто читаем о нём.

Объединяя всё изложенное ранее в этой статье, предложим иерархическое древовидное представление последовательностей (в данном случае - текста). Формально такое представление является связанным ациклическим графом, в котором связи родительского узла с потомками упорядочены. На рисунке 1 схематично изображено это представление $\{p_1, \dots, p_{12}\} \in P$ для фразы «memento mei» (в переводе с латинского – запомни меня).

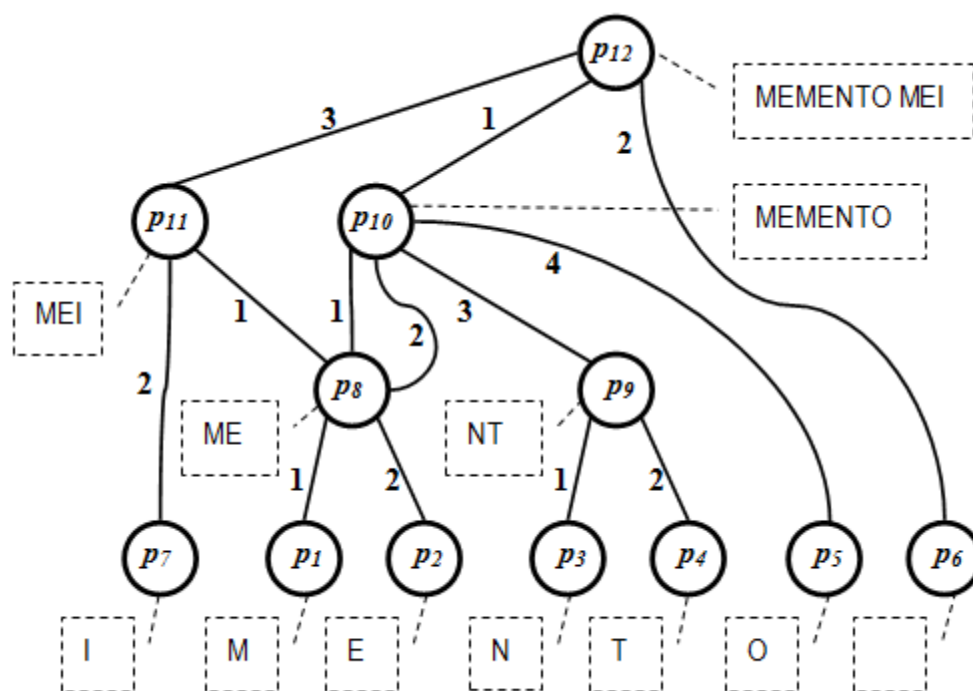


Рис. 1. Иерархическое древовидное представление последовательностей

Не будем рассматривать оптимальность объединений слогов и лексических единиц для латинского языка, так как иерархическое представление должно быть универсально для любых последовательностей, в том числе и на других языках.

Паттерны $p_i \in P$ располагаются по уровням. Движение от нижнего уровня к верхнему здесь представляет из себя движение от частного к общему. Каждое ребро имеет порядковый номер. Таким образом, более высокоуровневые паттерны полностью эквивалентны некоторым кортежам, состоящим из низкоуровневых паттернов. Например, символы объединяются в слоги: $p_8 = \langle p_1, p_2 \rangle$, $p_9 = \langle p_3, p_4 \rangle$. Слоги объединяются в слова: $p_{10} = \langle p_8, p_9, p_5 \rangle$,

$p_{11} = \langle p_8, p_7 \rangle$. Наконец, фраза «memento mei» может быть представлена одним паттерном $p_{12} = \langle p_{10}, p_6, p_{11} \rangle = \langle p_8, p_8, p_9, p_5, p_6, p_8, p_7 \rangle$. В итоге, любая последовательность паттернов может быть представлена единственным паттерном.

Предложенное представление позволяет уменьшить избыточность при хранении последовательностей при достаточном их количестве. Например, тексты на естественном языке состоят из повторяющихся конструкций, которые по мере накопления объединяются и могут быть использованы повторно в составе новых последовательностей «по ссылке», как это происходит со слогом «те» на рисунке 1.

Также, предложенное представление позволяет избежать «проклятия размерности» при оперировании паттернами на необходимом уровне. Например, последовательность из 11 паттернов эквивалентна одному паттерну p_{12} в рассматриваемом примере. Аналогично, последовательность любой длины кодируется единственным паттерном. Таким образом, можно охватить практически неограниченное количество контекста при анализе текста.

Иерархическое древовидное представление последовательностей можно использовать для разработки алгоритмов машинного обучения, которые смогут накапливать данные и предсказывать следующие значения последовательностей на их основе, анализируя узлы графа и связи между ними.

К отрицательным сторонам предлагаемого решения можно отнести сложность разработки алгоритмов для работы с данным представлением. Также при малом объёме данных на первоначальном этапе их накопления для хранения потребуется больше места: необходимо дополнительно хранить информацию о связях и узлах на высоких уровнях. Однако, с ростом количества данных, всё больше повторяющихся последовательностей может быть закодировано малым количеством паттернов и, как следствие, потребует гораздо меньшего места для хранения.

В заключении отметим, что предложенное представление необходимо усовершенствовать в области эквивалентности паттернов – один и тот же смысл в тексте может быть выражен разными наборами символов. Также следует рассмотреть возможность присвоения весов узлам и рёбрам графа для упрощения анализа в алгоритмах. В целом, рассматриваемое направление является новым и перспективным для предсказательной аналитики. Дальнейшие исследования помогут сделать уверенный шаг к разработке сильного искусственного интеллекта.

Библиографический список

1. Эрик Сигель. Просчитать будущее: Кто кликнет, купит, соврёт или умрёт = Predictive Analytics. – М.: Альпина Паблишер, 2014. – 374 с. – ISBN 978-5-9614-4541-1.
2. Jurafsky, D. and Martin, J.H. Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition. – Pearson Prentice Hall, 2009. – 988 p. – ISBN 9780131873216.
3. Селиванов Е.В. Проблематика нейронных сетей [Текст] / Е.В. Селиванов // Новое слово в науке: стратегии развития : материалы III Междунар. науч.–практ. конф. (Чебоксары, 31 дек. 2017 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.] – Чебоксары: ЦИНС «Интерактив плюс», 2017. – С. 147-149.
4. Селиванов Е.В., Стружанцев А.И. Технологии искусственного интеллекта // Центральный научный вестник. – 2018. – № 6. – С. 44-47.
5. Selivanov E.V. Curse of dimensionality, 2019 [Электронный ресурс] URL: <https://sev.site/blog/note/Curse-of-dimensionality>
6. Hawkins, J., Blakeslee, S. On Intelligence. – New York : Times Books, 2004. – 272 p. – ISBN 0805074562.
7. Хокинс Дж., Дайлип Дж. Временная Иерархическая Память. Концепции, Теория и Терминология. Numenta Inc., 2006 [Электронный ресурс] URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/72f5/4a24137796bb9d57f6bb64b1d37f4bb14c34.pdf>
8. Kurzweil, R. How to Create a Mind: The Secret of Human Thought Revealed. – New York: Viking Books, 2012. – 336 p. – ISBN 0670025291.

УДК 004.855.5; ГРНТИ 20.23.21

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ

А.В. Ломаков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, lomakov97@mail.ru

Аннотация. В работе описывается актуальность визуализации данных, рассматриваются современные языки программирования, используемые для решения данной задачи. Приводятся их основные особенности, достоинства и недостатки, а также примеры визуализации с использованием языка Python.

Ключевые слова: визуализация данных, Java, JavaScript, R, Python.

MODERN DATA VISUALIZATION TECHNOLOGIES

A.V. Lomakov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, lomakov97@mail.ru

The summary. The paper describes the relevance of data visualization and considers modern programming languages used to solve this problem. Their main features, advantages and disadvantages, as well as examples of visualization using the Python language are given.

Keywords: data visualization, Java, JavaScript, R, Python.

В настоящее время визуализация данных и инфографика стали неотъемлемой частью современной науки, т.к. они позволяют обеспечивать представление данных в виде, наиболее обеспечивающем результативную работу пользователей [1]. Заметная потребность в визуальном представлении информации стала возникать в эпоху Возрождения, с появлением большого количества данных и визуальной информации из таких областей наук, как геометрия, статистика, география, астрономии и др. [2].

Одной из первых успешных попыток визуализировать данные является составление британским врачом Джоном Сноу подробной карты с очагом заражения смертельной болезнью - холерой, когда в 1854 году в Лондоне в районе Сохо вспыхнула эпидемия. Он предположил, что распространение холеры связано с водой. Для доказательства своей теории правительству, ему пришлось обойти все дома в районе пандемии и составить статистику количества зараженных в каждом доме, а также сопоставить ее с расположением общественных водокачек (рис. 1). В своей карте Дж. Сноу обозначил столбики внутри здания как число зараженных людей, круги характеризовали области вокруг водокачек, а точки - непосредственно водокачки.

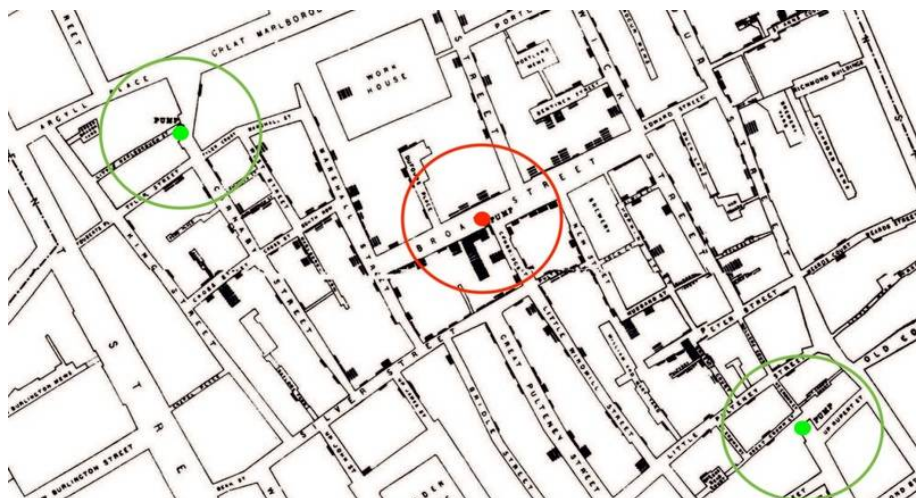


Рис. 1. Карта с очагом заражения холерой

Проанализировав карту, он заметил, что основной очаг заражения расположен вокруг центрального насоса, при этом в домах, находящихся рядом с насосами на юго-востоке и северо-западе случаев заражения значительно меньше. Таким образом, рукоять центрального насоса была сломана и эпидемия вскоре остановилась. В дальнейшем исследования и метод Дж. Сноу использовались для обнаружения очагов заболевания в других странах при возникновении вспышек холеры.

От характера исследуемых данных, задачи анализа и предпочтений пользователя зависит выбор способа визуализации. На практике в процессе анализа данных пользователи непрерывно работают с различными визуализаторами. На разных этапах аналитического процесса визуализация имеет цели и задачи, отраженные на рисунке 2.

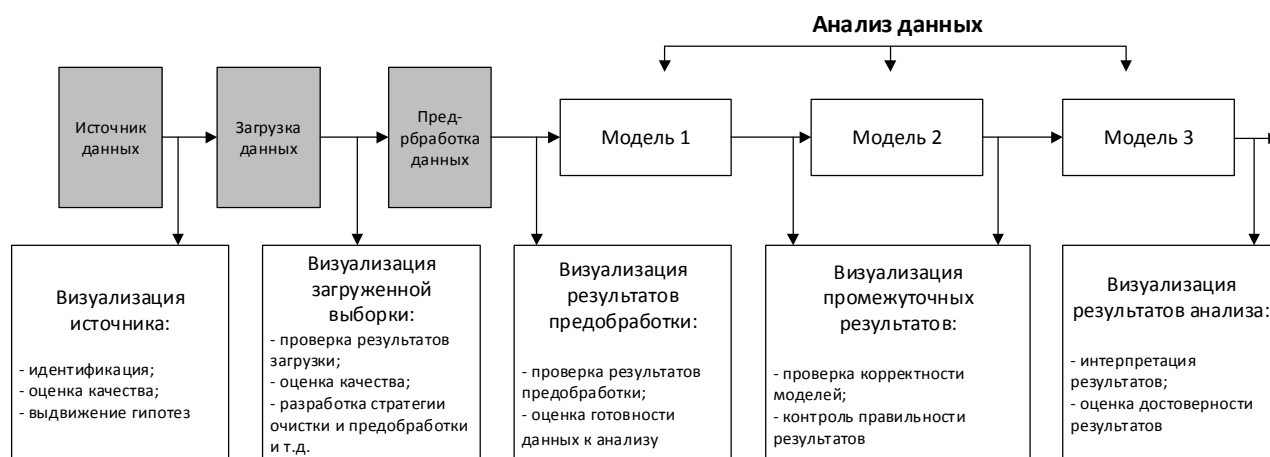


Рис. 2. Цели и задачи визуализации данных

Все большую актуальность визуализация приобретает для анализа, обработки и интерпретации данных [3]. В настоящее время используется несколько десятков методов визуализации, основными из которых являются:

1. Табличные и графические. Таблицы используются в случае, когда пользователям необходимо работать с отдельными значениями данных, контролировать их форматы, пропуски, а также вносить изменения. Графические же методы позволяют данные сопоставлять.

2. Одномерные и многомерные. Одномерные визуализаторы обеспечивают представление информации только об одном измерении данных, а многомерные - о двух и более.

3. Общего назначения и специализированные. Методы визуализации общего назначения представляют собой такие визуализаторы, как графики, гистограммы, диаграммы, графы и т.д. Второй тип метода характеризуется применением специализированных визуализаторов, например, карты Кохонена (визуализация результатов кластеризации), матрицы классификации и др.

Визуализация данных возможна на множестве языков программирования. Каждый язык имеет свои достоинства и недостатки и выбирается исходя из потребностей пользователей. Рассмотрим наиболее популярные языки программирования, используемые для визуализации данных.

Java

Java является одним из самых популярных языков программирования общего назначения, работающий на вычислительной системе Java Virtual Machine, позволяющей обеспечивать переносимость между платформами. К основным преимуществам Java следует отнести:

1) Бесплатная лицензия, начиная с 8-й версии;

2) Высокая производительность, которая дает возможность программистам использовать язык для написания алгоритмов машинного обучения с использованием вычислительных средств;

3) Строгая типизация, особенно важная при разработке приложений для работы с большими данными.

Недостатками Java являются:

1) Сравнительно большое количество кода, необходимого для визуализации данных;

2) Небольшое количество библиотек для реализации прогрессивных статистических методов.

Наиболее популярные библиотеки для визуализации данных:

1) yFiles - это обширная библиотека классов для Java, содержащая элементы управления пользовательского интерфейса для рисования, просмотра и редактирования диаграмм;

2) Piccolo2D - структурированная 2D-графическая платформа, позволяющая создавать надежные полнофункциональные графические приложения без написания кода с нуля;

3) Prefuse - расширяемая программная платформа, используемая для создания интерактивных приложений визуализации данных. Она позволяет составлять табличные, графические и древовидные структуры данных и имеет простые и удобные для программистов интерфейсы прикладного программирования, используемые для создания пользовательских компонентов обработки и визуализации данных.

Таким образом, Java является достойным кроссплатформенным языком программирования, который можно использовать для анализа и визуализации данных. Однако ввиду скромного количества библиотек и необходимости написания большого кода является не самым лучшим вариантом для визуализации данных с точки зрения удобства и времени, необходимого на написание программного кода.

JavaScript

JavaScript является прототипно-ориентированным языком программирования, являющимся реализацией языка ECMAScript. Как правило, он используется в качестве языка для программного доступа к объектам приложений. JavaScript наиболее широко используется в браузерах как язык сценариев для придания интерактивности Web-страницам [4].

Основным достоинством данного языка является использование написанных скриптов и плагинов пользователями, не являющимися программистами, а недостатком - проблема работы с типами данных, характеризующаяся тем, что программист может совершить опечатку при использовании переменной, которая приведет к ошибке только при выполнении программы.

JavaScript имеет множество библиотек для визуализации данных, наибольшую популярность из которых приобрели:

1) amCharts, имеющая большое количество разнообразных типов графиков, в том числе интерактивные карты и диаграммы. Библиотека имеет полную техподдержку пользователей и является бесплатной при использовании фирменной маркировки со ссылкой на официальный сайт авторов;

2) D3.js, имеющая открытый исходный код. С её помощью можно создавать с нуля оригинальную визуализацию и любую графику. Она абсолютно бесплатна для использования в любых целях, имеет множество примеров и подробную документацию, но на ее освоение требуется больше времени, чем на коммерческие библиотеки.

3) Google Charts, больше ориентированная для проектов, в которых простота и стабильность графиков предпочтительнее сложных и подробных пользовательских настроек. Библиотека характеризуется такими преимуществами, как наличие полноценной документации, поддержка старых версий браузеров, при этом все графики являются интерактивными.

Можно сделать вывод, что JavaScript обладает мощными инструментами для визуализации данных, тем не менее, он в большей степени предназначен для работы в Web-браузерах.

R

Язык программирования R, представляющий собой свободную программную среду вычислений с открытым исходным кодом, предназначен для статистической обработки данных и работы с графикой. Основными преимуществами данного языка являются:

- 1) Бесплатная лицензия;
- 2) Широкий набор библиотек с открытым исходным кодом, представляющий собой пакеты практически для любого количественного и статистического применения.

Недостатками R являются:

- 1) Низкая производительность. Она объясняется тем, что язык создавался для облегчения работы статистикам;
- 2) Сложность в изучении. Особенную критичность данный недостаток принимает при реализации статистического анализа, опирающегося на графический интерфейс.

Язык R является одним из наилучших решений для визуализации данных. Он имеет множество пакетов для графического представления данных, наибольшую популярность из которых приобрели:

- 1) ggplot2, представляющий собой расширение языка R. Среди всех R-расширений является одним из самых скачиваемых пользователями. Он имеет хорошо спланированную структуру, включает в себя множество категорий, такие как: корреляция, отклонение, рейтинг, распределение, композиция и др.;
- 2) ggvis - один из самых молодых пакетов для визуализации данных. По сравнению с ggplot2, реализующий статические изображения, ggvis предназначен для визуализации интерактивных изображений;
- 3) rCharts применяется для создания, настройки и представления интерактивных визуализаций с поддержкой некоторых библиотек для JavaScript (Polychart, MorrisJS и др.) с использованием интерфейса построения графиков в стиле решетки.

Язык программирования R отличается наличием огромного выбора расширений для сбора и визуализации статистических данных и, таким образом, его можно считать идеальным вариантом для первоначальных целей, однако, ввиду серьезных недостатков, является не самым лучшим инструментом, когда дело доходит до программирования для общих целей.

Python

Python является высокоуровневым языком программирования, который ориентирован на повышение производительности программиста и отличается удобочитаемостью кода. Он поддерживает структурное, функциональное, императивное и объектно-ориентированное программирование, что говорит об универсальности данного языка.

Python активно используется для анализа и визуализации данных, машинного обучения и все большую популярность приобретает в Web-разработке. Он характеризуется такими преимуществами, как:

- 1) Бесплатная лицензия;
- 2) Наличие широкого набора разработанных модулей и библиотек;
- 3) Простота обучения, что делает его идеальным первым языком для начинающих программистов;
- 4) Универсальность языка;

5) Многоцелевое направление, позволяющее использовать Python в качестве языка программирования общего назначения, анализа и визуализации данных, машинного обучения и др.

Основным недостатком Python является проблема несоответствия типов, т.к. он является динамически типизированным языком, что может приводить к ошибкам.

В отличие от языка программирования R, в Python имеется меньший набор пакетов для визуализации данных, тем не менее, ввиду простоты и удобочитаемости кода, он отличается в лучшую сторону. Рассмотрим наиболее популярные библиотеки для решения данной задачи.

1) Matplotlib. Она представляет собой 2D библиотеку построения графиков, которая обеспечивает качество представления данных в различных форматах;

2) Seaborn, представляющая собой более высокоуровневый программный интерфейс приложения (API) на базе библиотеки matplotlib. В ней имеются достаточно сложные типы визуализации. С ее помощью можно избежать большого количества кода, чем при использовании библиотеки matplotlib;

3) plotly - модуль построения графиков. Он поддерживает множество типов диаграмм и графиков, включая линейные диаграммы, гистограммы, пузырьковые диаграммы и др. и позволяет реализовывать визуализацию интерактивных изображений.

Таким образом, Python является хорошим вариантом для анализа и визуализации данных, причем как для первоначальных целей, так и на продвинутом уровне работы с данными.

Рассмотрим примеры визуализации данных с использованием языка программирования Python в Jupyter Notebook, который обеспечивает быстрый, последовательный процесс разработки, поскольку вывод для каждого блока программного кода показывается сразу.

Для примера возьмем набор данных потребления алкоголя учениками средней школы, который был получен в системе организации конкурсов по исследованию данных Kaggle корпорации Google. Данные были получены в ходе анкетирования учащихся математических курсов в средней школе и содержат социальную, гендерную и учебную информацию об учениках, представленные в виде 33 атрибутов.

Для работы понадобится импорт некоторых библиотек и загрузка набора данных:

```
import pandas as pd # импорт библиотеки pandas с псевдонимом pd
import matplotlib.pyplot as plt # импорт библиотеки с псевдонимом plt
import seaborn as sns # импорт надстройки для matplotlib с псевдонимом sns
st = pd.read_csv('student-mat.csv') # загрузка набора данных с использованием pd
```

Выведем гистограмму возрастов (age) учеников (рис. 3) с использованием библиотеки matplotlib, причем известно, что возрастная группа опрошенных находится в рамках 15-22 года:

```
st[['age']].plot(kind='hist', bins=[15,16,17,18,19,20,21,22,23], rwidth=0.5) # гистограмма возрастов
plt.show() # вывод на экран
```

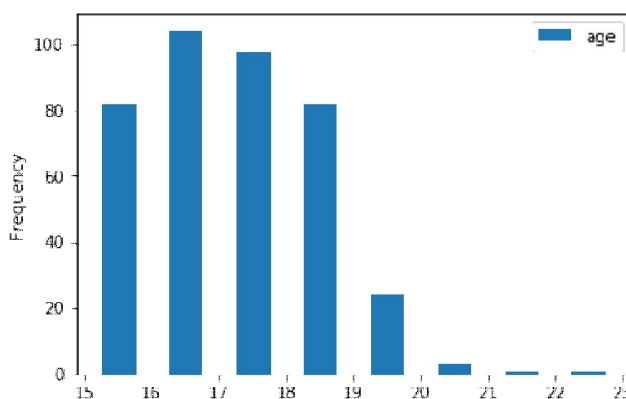



Рис. 3. Гистограмма возрастов опрошенных учеников

По полученной гистограмме можно сделать вывод, что самое большое количество опрошенных учащихся находится в возрасте 16 лет, а наименьшее - 21 и 22 года.

Теперь покажем плотность распределения учащихся по времени (studytime), затрачиваемому на обучение (числовой атрибут: 1 - <2 часов, 2 - от 2 до 5 часов, 3 - от 5 до 10 часов, 4 - >10 часов) и потреблению алкоголя (Dalc) в рабочие дни (числовой атрибут: 1 - очень низкое, 5 - очень высокое), позволяющую получить градиент (рис. 4). Для решения данной задачи используется функция `kdeplot()` библиотеки `seaborn`.

```
sns.kdeplot(st['studytime'], st['Dalc'])
```

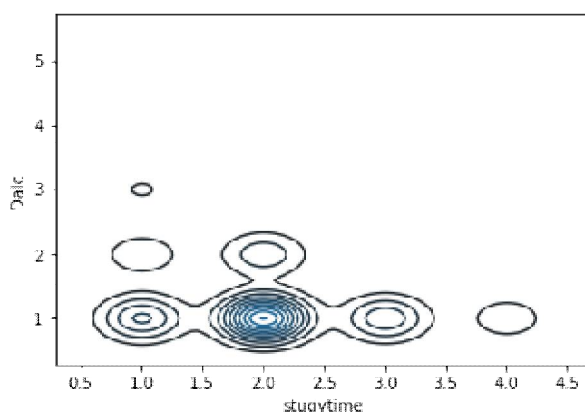


Рис. 4. Плотность распределения учащихся по времени, затрачиваемому на обучение, и потреблению алкоголя в рабочие дни

Видно, что наибольшее количество учащихся тратит на обучение от 2 до 5 часов в день, при этом большая часть из них предпочитает практически не пить алкоголь в рабочие дни, а прибегают к нему в основном те ученики, которые тратят сравнительно мало времени на учебу.

Таким образом, было продемонстрировано, что при весьма малом количестве программного кода можно визуализировать данные различной сложности. При этом Python имеет множество других способов графически представлять данные, в том числе функция `boxplot()` - ящик с усами или диаграмма размаха, библиотеки `seaborn`, показывающая медиану, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки и выбросы. Эти ящики также можно рисовать бок о бок, чтобы визуально сравнивать одно распределение с другим.

Подводя итог, следует отметить, что каждый из рассмотренных языков программирования имеет свои достоинства и недостатки и выбирается исходя из потребностей пользователей, а также в зависимости от их уровня овладения конкретным языком и/или желанием и возможностью овладеть новым.

Библиографический список

1. Паклин Н. Б., Орешков В. И. Визуализация данных // Бизнес-аналитика. От данных к знаниям. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2013. — с. 173—210.
2. Friendly M. (2009-08-24). "Milestones in the history of thematic cartography, statistical graphics, and data visualization", York University.
3. Ефремова О.А. Применение системного подхода к анализу проблемы использования пространственной информации для поддержки принятия решений региональными органами исполнительной власти // Инженерный вестник Дона, 2014, № 1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/nly2012/628/.
4. Флэнаган Д. JavaScript. Карманный справочник. Сделайте веб-страницы интерактивными! / Перевод А.Г. Сысонок. — Москва.: Издательский дом "Вильямс", 2015. — с. 320.

УДК 681.518

ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Б.С. Дмитриевский, А.А. Терехова, И.А. Канавалов, С.Н.А. Аль-Кифер

*Тамбовский государственный технический университет,
Российская Федерация, Тамбов, terehova.aa@mail.tstu.ru*

Аннотация. В работе рассматривается один из способов решения задачи планирования и управления производством изделий с заданными характеристиками и технологическими ограничениями. Предложенный алгоритм может применяться на любом предприятии, которое стремится повысить эффективность производства.

Ключевые слова: планирование, изделие, деталь, партия деталей, конечный продукт, управление.

OPERATIONAL PLANNING AND MANAGEMENT OF COMPLEX OBJECTS

B.S. Dmitrievsky, A.A. Terekhova, I.A. Konovalov, S.N.A. Al-Kufar

*Tambov State Technical University,
Russian Federation, Tambov, terehova.aa@mail.tstu.ru*

The summary. This paper considers one of the ways to solve the problem of planning and managing the production of products with specified characteristics and technological limitations. The proposed algorithm can be used in any enterprise that seeks to improve production efficiency.

Keywords: planning, product, part, part batch, end product, management.

В настоящее время необходимо учитывать особые требования к управлению сложными объектами. Рассмотрим процесс алгоритмизации оперативного планирования и управления как поиск наилучшего варианта. Основной его целью является удовлетворение некоторых производственных требований, учет определенных ограничений, при этом необходимо учитывать множество факторов [1-5].

Пусть на предприятии производят N_u наименований изделий (g_m) и N_d количество деталей (d_i), детали могут использоваться как ресурсы (полуфабрикаты) для производства других деталей, либо являться конечными изделиями. Т.е. для каждой m -ого изделия ставится в соответствие i -я деталь, которая на данном предприятии рассматривается как конечный продукт. Количество деталей i -того типа необходимого для производства деталей j -го типа определяется матрицей $S = \{s_{ij}\}$. Каждая деталь характеризуется временем t_i в течение, которого производится единица детали i -го типа.

Месячный план состоит из $N_{пл}$ заказов – партий. Каждая партия определяет количество изделий m -го типа (P_m^a), которое необходимо произвести до конца планового периода. Для составления производственного расписания необходимо определить объёмы партий деталей (P_i^a), которые используются для изготовления изделия m -го типа:

$$P_j^a = \begin{cases} P_m^a, & \text{если } i\text{-ая, деталь является изделием } m\text{-го типа;} \\ s_{ij} \cdot P_j^a, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

Совокупность всех партий деталей, необходимых для изготовления a -ой, составляет поддетальный план производства. Расчёт поддетального плана осуществляется последовательно для каждой детали d_i . Сначала определяется объём партии для детали, которая является конечным изделием. Затем рассчитывается количество деталей, необходимых для изготовления данной партии, и так далее.

Таким образом, создаётся множество партий, ожидающих обработки, условием запуска партии деталей i -го типа является наличие необходимого объёма материалов для изготовления этой партии (здесь и далее под материалами понимаются детали (узлы, полуфабрикаты), которые создаются на предприятии). Запустить партию в производство можно при наличии части необходимых материалов для производства V_i деталей в течение времени t , с тем условием, что за время t , будет произведено необходимое количество материалов. Данную схему работы можно наблюдать на предприятиях с серийным типом производства. На предприятиях с дискретным производством, детали, как правило, передаются в дальнейшую обработку в конце смены. Даже если передача деталей может осуществляться в течение смены, необходимо определить минимальный размер таких партий. Кроме того, часто не возможно произвести весь объём партии за одну смену. Таким образом, встаёт задача разделения партий поддетального плана на "мини-партии". В этом случае, задача составления сводится к задаче нахождения времени запуска каждой мини-партии.

Для разбиваемых на партии деталей установим заданный размер мини-партий, для которых установим максимальный и минимальный размер, а действительное значение определим при составлении расписания. Существует ограничение, что объём партии не должен быть больше, чем производимый за всю смену, т.е.

$$P_{i \max}^a = \frac{T_{см}}{t_i}, \quad (2)$$

где $T_{см}$ – длительность смены.

Производя за смену однотипные детали время на переналадку оборудования сокращается, при этом качество работы становится лучше и объём брака сокращается. Отсюда при расчете примем объём партии максимальным, выполняемый за эту смену, если только он не устанавливается пользователем. Задавая в мини-партиях минимальный объём материала, учтем его потребность на следующих производственных стадиях. Таким образом, объём партии, которая запускается, должен находиться в пределах не меньше объёма, который нужен при производстве наименьшей партии, которая идет за этой. Так как мы устанавливаем наибольший размер партии, который возможен, то

$$P_{i \min}^a = \begin{cases} P_{i \max}^a, & \text{если } i\text{-ая, деталь является изделием } m\text{-го типа;} \\ s_{ij} \cdot P_{j \min}^a, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

Будем задавать минимальный и максимальный объём произвольно.

Если для всех деталей $P_{i \min}^a = P_{i \max}^a$, то размер партий фиксирован.

Выход за пределы минимального допустимого объёма мини-партий возможен только при отсутствии альтернативных мини-партий для запуска, или при запуске в производство остатка партии деталей.

Изменим методику выбора партии на обработку из множества конкурирующих. При использовании обычного эвристического алгоритма правила применяются в порядке их расположения; каждое следующее правило применяется, только если не удалось определить лидирующую партию с помощью предыдущего правила. При этом может сложиться ситуация, когда мини-партия оказывается лидирующей только по одному из критериев, а по остальным заметно уступает другим мини-партиям. Но поскольку эвристика, учитывающая этот критерий, имеет более высокий приоритетом, то на обработку будет установлена именно эта мини-партия. Предлагается проводить оценку по всем выбранным критерием, и количественно определять насколько данная мини-партия подходит под каждое правило выбора, а важность эвристических правил учитывать с помощью весовых коэффициентов.

Если правило использует количественно измеряемые характеристики, (например, длительность обработки партии), то для каждой партии оценка рассчитывается следующим образом:

$$q_{nv} = \frac{r_{nv}}{r_{n \max}} \times k_v \quad (4)$$

где q_{nv} – оценка n -ой исследуемой партии по v -му правилом;
 r_{nv} – количественное значение характеристики, оцениваемой v -ым правилом;
 k_v – весовой коэффициент для v -го правила

$$r_{n \max} = \max_{N_{исл}} [r_{nv}]; \quad (5)$$

Для правил, которые оперируют булевыми значениями, оценка принимается равной весовому коэффициенту, если партия удовлетворяет условию, в противном случае оценка равняется нулю.

После оценивания мини-партий по каждому эвристическому правилу, рассчитывается общая оценка мини-партий по всем правилам:

$$Q_n = \sum_{N_{np}} q_{nv} \quad (6)$$

Из всех претендентов выбирается мини-партия с максимальным значением общей оценки.

Для учёта критериев, разработан набор эвристических правил.

1) Выбрать мини-партию, обработка которой максимально заполняет остаток интервала.

Для этого правила необходимо рассчитывать следующие значения:

$$T_{mост} = T_{mзав} - T_{mтек}, \quad (7)$$

где $T_{mост}$ – остаток интервала рабочего времени m -го обрабатывающего центра;
 $T_{mзав}$ – время завершения текущего интервала работы m -го обрабатывающего центра;
 $T_{mтек}$ – текущее время.

$$T_{n\text{гот}} = P_n \times t_n, \quad (8)$$

где $T_{n\text{гот}}$ – время обработки партии готовой к запуску для n -ой исследуемой партии, p_n – объём партии готовой к запуску, t_n – время обработки одной единицы детали n -ой.

$$P_n = \begin{cases} P_{n\text{гот}}, & \text{если } P_{n\text{гот}} \leq P_{n\text{инт}} \text{ и } P_{n\text{гот}} \leq P_{n\text{мах}}; \\ P_{n\text{инт}}, & \text{если } P_{n\text{гот}} > P_{n\text{инт}} \text{ и } P_{n\text{гот}} \leq P_{n\text{мах}}; \\ P_{n\text{мах}}, & \text{если } P_{n\text{гот}} > P_{n\text{мах}} \end{cases} \quad (9)$$

где $P_{n\text{гот}}$ – объём партии, который возможно запустить в производство, при текущем обеспечении ресурсами;

$P_{n\text{инт}} = T_{n\text{ост}} / t_n$ – объём партии, который можно произвести в текущий интервал;

$P_{n\text{мах}}$ – максимально возможный объём установленный пользователем.

$$P_{n\text{гот}} = \min \left[\frac{V_{nj}}{s_{nj}} \right], \quad (10)$$

где V_{nj} – произведённый объём j -го ресурса, необходимый для изготовления деталей n -ой партии,

s_{nj} – количество деталей j -того типа необходимого для производства деталей n -ой партии.

2) Выбрать партию с максимальным общим временем обработки.

Общее время выполнения партии определяется следующим образом:

$$T_{n\text{общ}} = P_{n\text{общ}} \times t_n, \quad (11)$$

где $P_{n\text{общ}}$ – общий объём n -ой партии.

3) Выбрать операцию с максимальным значением приоритета, при учете деталей, для которых приоритет должен быть максимально возможным. Приоритет задаётся пользователем при формировании поддетального плана.

4) Выбрать партию с минимальным ожиданием её следующей стадии.

Для этого необходимо определить начало следующей стадии производства, т.е. стадии на которой детали данного типа будут использованы.

$$T_{n\text{зан}} = \max \left[T_{nj\text{зав}} \right] \quad (12)$$

где $T_{nj\text{зав}}$ – время завершения обработки j -ой партии деталей, являющихся ресурсами для n -ой партии деталей.

Данный набор эвристик является базовым и может расширяться, в зависимости от требований реального предприятия.

Библиографический список

1. Матвейкин, В.Г. Системы диспетчеризации и управления: учебное пособие / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, И.С. Панченко, М.В. Кокорева - Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. - 96 с.
2. Дмитриевский, Б.С. Интегрированная система управления планированием сельскохозяйственного производства / Б.С. Дмитриевский, И.А. Канавалов // Цифровизация агропромышленного комплекса [Электронный

ресурс] : сборник научных статей I Международной научно-практической конференции. В 2-х т. Тамбов, 10 – 12 октября 2018 г. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018.-Т.1-С. 123-125.

3. Матвейкин, В.Г. Оперативное планирование и управление сложными производствами / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, М. Н. М. Саиф, С.Г. Семержинский, М.В. Лемкина // Вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения: Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции: №6. г. Екатеринбург, – НН: ИЦРОН, 2019.- С. 5-7.

4. Дмитриевский, Б.С. Система управления расписанием производства / Б.С. Дмитриевский, И.А. Канавалов, М.В. Лемкина, Н.А. Нестеров // Рецензируемый научный журнал "Тенденции развития науки и образования". Март 2019 г. - № 48, Часть 7. - Изд. НИЦ "Л-Журнал, 2019. - С. 38-40.

5. Дмитриевский, Б.С. Решение задачи составления производственного расписания / Б.С. Дмитриевский, М.В. Лемкина, Н.А. Нестеров, И.А. Канавалов // Рецензируемый научный журнал "Тенденции развития науки и образования". Апрель 2019 г. - № 49, Часть 11. - Изд. НИЦ "Л-Журнал, 2019. - С. 34-36.

УДК 004.627; ГРНТИ 28.23.01

ОБЗОР МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ

М.С. Ивкина, Д.В. Марчев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Россия, Рязань, maria.ivkina996@gmail.com, d.marchev90@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрено два современных метода визуализации многомерных данных и произведено их сравнение.

Ключевые слова: визуализация данных, t-SNE, UMAP.

REVIEW OF VISUALIZATION METHODS OF MULTIDIMENSIONAL DATA

M.S. Ivkina, D.V. Marchev

*Ryazan State Radio Engineering University named V.F. Ytkina,
Russia, Ryazan, maria.ivkina996@gmail.com, d.marchev90@yandex.ru*

Abstract. Two modern methods of visualization of multidimensional data are considered and their comparison is made..

Keywords: data visualization, t-SNE, UMAP.

Введение

Визуализация данных — проектирование выборки на двух-/трехмерное пространство, позволяющее графически представить выборку [1]. Традиционные инструменты в этой области (графики и диаграммы) плохо справляются с этой задачей, когда возникает необходимость изобразить более трех взаимосвязанных величин. Следовательно, возникает дополнительная задача сокращения или понижения размерности данных.

Под понижением размерности данных понимается процесс преобразования в форму, наиболее удобную для анализа и интерпретации. Обычно оно достигается за счёт уменьшения их объема, сокращения количества используемых признаков и разнообразия их значений.

Помимо визуализации сокращение размерности данных может преследовать множество целей [2].

1. Сокращение вычислительных затрат при обработке данных;
2. Борьба с переобучением. Чем меньше количество признаков, тем меньше требуется объектов для уверенного восстановления скрытых зависимостей в данных и тем выше качество восстановления подобных зависимостей;
3. Сжатие данных для более эффективного хранения информации.
4. Извлечение новых признаков. Новые признаки, полученные в результате преобразования, могут оказывать значимый вклад при последующем решении задач.

Далее будут рассматриваться наиболее современные и распространённые методы визуализации данных.

Пусть на обработку алгоритму поступает выборка $X = \{x_1, \dots, x_n\}$.

t-SNE

t-SNE (t-distributed stochastic neighbor embedding) — техника нелинейного снижения размерности и визуализации многомерных переменных. Этот алгоритм может свернуть сотни измерений к меньшему количеству, сохраняя при этом важные отношения между данными: чем ближе объекты располагаются в исходном пространстве, тем меньше расстояние между этими объектами в пространстве сокращенной размерности [3].

Алгоритм t-SNE состоит из трех главных шагов.

Сначала алгоритм создаёт распределение вероятностей по парам объектов x_i и x_j высокой размерности таким образом: объекты близкие будут иметь большую вероятность, а вероятность непохожих точек будет мала. То есть метод преобразует многомерное евклидово расстояние между точками в условные вероятности, отражающие сходство точек:

$$p_{j|i} = \frac{\exp(-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma_i^2)}{\sum_{k \neq i} \exp(-\|x_i - x_k\|^2 / 2\sigma_i^2)},$$

где x_i, x_j, x_k — точки в евклидовом пространстве, σ — отклонение (выбирается с помощью оценки перплексии так, чтобы точки в областях с большей плотностью имели меньшую дисперсию).

Затем алгоритм определяет похожее распределение вероятностей по точкам в пространстве y_i и y_j малой размерности.

$$q_{j|i} = \frac{\exp(-\|y_i - y_j\|^2)}{\sum_{k \neq i} \exp(-\|y_i - y_k\|^2)},$$

где y_i, y_j, y_k — точки отображения.

Если точки y_i и y_j малой размерности корректно моделируют сходство между исходными точками высокой размерности x_i и x_j , то соответствующие условные вероятности будут эквивалентны $p_{j|i} \equiv q_{j|i}$.

Далее минимизируется расстояние Кульбака — Лейблера между двумя распределениями с учётом положения точек. T-SNE минимизирует сумму таких расстояний для всех точек отображения при помощи градиентного спуска и функции потерь.

$$C = \sum_i \sum_j p_{j|i} \log \frac{p_{j|i}}{q_{j|i}},$$

$$\frac{\partial C}{\partial y_i} = 2 \sum_j (p_{j|i} - q_{j|i} + p_{i|j} - q_{i|j})(y_i - y_j),$$

где y_i, y_j — точки отображения;

$p_{j|i}$ и $p_{i|j}$ — условная вероятность схожести точек большой размерности;

$q_{j|i}$ и $q_{i|j}$ — условная вероятность схожести точек отображения.

UMAP

Uniform Approximation and Projection (UMAP) — алгоритм машинного обучения, выполняющий нелинейное снижение размерности [4].

Алгоритм UMAP состоит из двух главных шагов.

UMAP сначала выполняет построение взвешенного графа, соединяя ребрами только те объекты, которые являются ближайшими соседями.

UMAP рассчитывает расстояние ρ_i между объектами по заданной метрике и для каждого объекта x_i определяет список из его k ближайших соседей $Y = \{y_1, \dots, y_k\}$. Под метрикой понимается тип расстояния, по которому будет проходить интерпретация объектов и их типов.

$$\rho = d(x_i, y_j),$$

где $d(x_i, y_j)$ — правило вычисления расстояния между объектами ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}$).

Так как строится взвешенный граф, вес ребра интерпретируется как вероятность существования данного ребра от одного объекта x_i к другому объекту x_j . Следовательно, ребра между двумя вершинами объединяются в одно с весом, равным вероятности существования хотя бы одного ребра.

$$\begin{aligned} \omega(x_i, y_j) &= \omega(x_i \rightarrow y_j) + \omega(x_i \rightarrow y_j) - \omega(x_i \rightarrow y_j)\omega(x_i \rightarrow y_j), \\ \omega(x_i \rightarrow y_j) &= \exp\left(-\frac{d(x_i, y_j) - \rho_i}{\sigma_i}\right), \end{aligned}$$

где x_i, y_j — объекты в вершинах графа ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}$), ρ_i — расстояние до ближайшего соседа, σ_i — величина, нормирующая сумму весов, задается уравнением для каждого x_i :

$$\sum_{y \in Y} \exp\left(-\frac{d(x_i, y_j) - \rho_i}{\sigma_i}\right) = \log_2 k,$$

где k — количество ближайших соседей.

Далее алгоритм новый граф в низкоразмерном пространстве и приближает множество его ребер к исходному. Для этого он минимизирует сумму дивергенций Кульбака-Лейблера для каждого ребра e из исходного E и нового графов нечетких множеств [5]:

$$\sum_{e \in E} \omega_h(e) \log \frac{\omega_h(e)}{\omega_l(e)} + (1 - \omega_h(e)) \log \frac{1 - \omega_h(e)}{1 - \omega_l(e)} \rightarrow \min_{\omega_l},$$

где $\omega_h(e)$ — функция принадлежности нечеткого множества из ребер в высокоразмерном пространстве;

$\omega_l(e)$ — функция принадлежности нечеткого множества из ребер в низкоразмерном пространстве.

Сравнение методов

Сравнение описанных методов было реализовано на языке программирования Python, так как этот язык имеет мощные инструменты для работы с данными, а так же уже существуют реализации методов визуализации данных в качестве дополнительных библиотек: `sklearn.manifold.TSNE` и `umap`.

Были взяты 5 выборки данных, характеристики, которых представлены в таблице 1.

Таблица 4. Характеристика выборок данных

Название	Количество классов	Количество признаков	Количество объектов	Краткое описание
Digits	10	64	1797	Классификация рукописных цифр в картинке 8x8
Bank-additional	2	20	41188	Определить, будет ли клиент подписывать срочный депозит
Connect	3	42	67557	Определить, выиграет ли первый игрок в следующем ходе
Coverttype	7	56	116203	Определение типа лесного покрова только по картографическим переменным
Localization Data for Person Activity	11	6	164860	Определение позы человека по датчикам

Каждая из этих выборок была визуализирована обоими методами. Помимо графиков визуализации, было измерено время в секундах, за которое алгоритм снижал размерность исходных данных (таблица 2). Также были учтены возможности методов к параллельному вычислению: UMAP в реализации на Python не имеет возможности к распараллеливанию вычислений в отличие от t-SNE. Следовательно, снижение размерности при различном количестве потоков было выполнено только для t-SNE.

Таблица 5. Время, затраченное на снижение размерности.

	Digits	Bank-additional	Connect	Coverttype	Localization Data for Person Activity
UMAP	5.890	44.969	95.906	4073.656	220.422
t-SNE	1 поток				
	5.844	227.000	562.875	11057.203	698.172
	2 потока				
	5.827	197.453	432.250	8416.781	693.641
	3 потока				
	5.782	186.172	405.313	7490.297	678.217
	4 потока				
	5.750	186.625	380.468	6938.961	686.235

Вывод

Соотнеся характеристики выборок из таблицы 1 и результаты из таблицы 2 можно сделать выводы:

- при визуализации выборок с малым количеством объектов время работы методов слабо отличается друг от друга;
- количество признаков и множество уникальных значений в них сильно влияет на время работы методов.

Из таблицы 2 видно, что алгоритм UMAP работает быстрее не зависимо от количества потоков. Следовательно, в ситуациях, когда скорость работы метода необходимо минимизировать, лучше использовать алгоритм UMAP.

Библиографический список

1. Зиновьев А.Ю. Визуализация многомерных данных //Изд. КГТУ - 2000. 180 с
2. Конспект лекции «Уменьшение размерности описания данных: метод главных компонент» по курсу «Математические основы теории прогнозирования» 2011 [сайт] – URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/a/a4/MOTP11_5.pdf (дата посещения 10.02.2020).

3. van der Maaten, G.E. Hinton. Visualizing High-Dimensional Data Using t-SNE. Journal of Machine Learning Research 9(Nov):2579-2605, 2008.
4. Leland McInnes, John Healy, James Melville. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction // arXiv. — 2018. — 7 December.
5. Jakob Hansen. UMAP [сайт] – URL: <https://www.math.upenn.edu/~jhansen/2018/05/04/UMAP/> (дата посещения 10.02.2020).

УДК 519.711; ГРНТИ 28.15

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБРАТНОГО ШАГА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СЛЕЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ИЗ ДВУХ СПАРЕННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

А.И. Бобиков, А.А. Барина, Н.А. Назаркин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, bobikov.35@mail.ru, alice515053@yandex.ru, n.nikita.a98@gmail.com*

Аннотация. В статье рассмотрено использование метода динамического обратного шага для решения задачи слежения для нелинейной системы с чистой формой обратной связи в виде двух спаренных резервуаров. Приведены полученные законы управления и результаты моделирования.

Ключевые слова: спаренные резервуары, динамический метод обратного шага, нелинейные системы, чистая форма обратной связи.

DESIGNING THE CONTROL LAW USING THE DYNAMIC BACKSTEPPING METHOD FOR SOLVING THE TRACKING PROBLEM IN A SYSTEM OF TWO COUPLED TANKS

A.I. Bobikov, A.A. Barinova, N.A. Nazarkin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, bobikov.35@mail.ru, alice515053@yandex.ru, n.nikita.a98@gmail.com*

The summary. The paper discusses the use of the dynamic backstepping method for solving the tracking problem for nonlinear systems with pure-feedback in the form of two coupled tanks. Given the obtained control laws and simulation results.

Keywords: coupled tanks, dynamic backstepping nonlinear system, pure-feedback.

Введение

Классический метод обратного шага (МОШ) [1,2], называемый также как бэкстеппинг, является одним из эффективных инструментов проектирования регуляторов для большого класса нелинейных систем. Регуляторы, проектируемые при помощи классического МОШ, достаточно эффективны, но использование классического бэкстеппинга ограничено системами, описываемыми моделями со строгой формой обратной связи. В последнее время был предложен динамический метод обратного шага (ДМОШ)[2], который применим для систем с чистой формой обратной связи. К таким системам относится объект из двух спаренных резервуаров, в котором требуется поддерживать заданный уровень жидкости. До появления метода ДМОШ в рамках классического метода МОШ было затруднительно решить задачу регулирования применительно ко второму резервуару.

В данной статье при помощи ДМОШ спроектирован такой закон управления, который решает задачу слежения для объекта из двух связанных резервуаров.

Описание объекта из двух спаренных баков

На рисунке 1 представлено схематическое изображение исследуемого объекта – два резервуара, соединенных при помощи трубы с клапаном, где S_1 и S_2 – площади поперечного сечения каждого из резервуаров.

Вода течет в первый резервуар через насос со скоростью u , что влияет на уровень воды в первом баке h_1 . Из первого резервуара вода вытекает во второй со скоростью q_1 , воздействуя на уровни воды h_1 и h_2 , из резервуара 2 вода вытекает со скоростью q_2 .

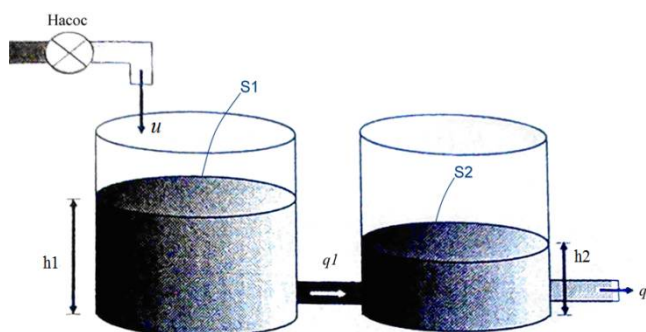


Рис. 1. Система из двух спаренных баков

Уравнения состояния для резервуаров получены с использованием уравнения Бернулли и уравнения баланса потоков. Дифференциальные уравнения для первого и второго резервуара имеют вид (1) и (2) соответственно:

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{S_1}(u - q_1), \quad (1)$$

$$\dot{h}_2 = \frac{1}{S_2}(q_1 - q_2), \quad (2)$$

где q_1 и q_2 определены в [3] как:

$$q_1 = s_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}, \text{ если } h_1 > h_2, \quad (3)$$

$$q_2 = s_2 \sqrt{2gh_2}, \text{ если } h_2 > 0. \quad (4)$$

В (3) и (4) s_1 и s_2 – площади поперечного сечения соединительной и выходной трубы соответственно. Подставляя (1) и (2) в дифференциальные уравнения, описывающие объект и полагая, что $S_1 = S_2 = S$, получаем:

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{S}u - \frac{1}{S}c_1 \sqrt{|h_1 - h_2|} \text{sign}(h_1 - h_2), \quad (5)$$

$$\dot{h}_2 = \frac{1}{S}c_1 \sqrt{|h_1 - h_2|} \text{sign}(h_1 - h_2) - \frac{1}{S}c_2 \sqrt{h_2}, \quad (6)$$

где введены пропорциональные константы между первым и вторым резервуаром $c_1 = s_1 \sqrt{2g}$ и $c_2 = s_2 \sqrt{2g}$, которые зависят от площади поперечного сечения соединительных труб и гравитационной постоянной.

Задача управления заключается в изменении и последующем поддержании заданного уровня жидкости в 2 резервуаре - наиболее удаленном от управляющего сигнала.

ДМШ для объекта из двух спаренных резервуаров

Для того чтобы спроектировать закон управления, используя метод динамического обратного шага, введем новые переменные состояния:

$$x_1 = h_2, x_2 = h_1.$$

Дифференциальные уравнения, описывающие объект, примут вид:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{S} c_1 \sqrt{|x_2 - x_1|} \text{sign}(x_2 - x_1) - \frac{1}{S} c_2 \sqrt{x_1}, \quad (7)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{S} u - \frac{1}{S} c_1 \sqrt{|x_2 - x_1|} \text{sign}(x_2 - x_1). \quad (8)$$

Используя значения постоянных $c_1 = c_2 = 1.0121 \cdot 10^{-4}$ и $S = 0.0154 \text{ м}^2$ пересчитаем коэффициенты в уравнениях (7-8), получим:

$$\dot{x}_1 = K \sqrt{|x_2 - x_1|} \text{sign}(x_2 - x_1) - K \sqrt{x_1}, \quad (9)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{A} u - K \sqrt{|x_2 - x_1|} \text{sign}(x_2 - x_1), \quad (10)$$

Опираясь на материал изложенный в статье [5], где представлено отличие в методах классического МОШ и ДМОШ, проектируем виртуальное управление a_1 , которое позволит стабилизировать первую подсистему (9), получаем, уравнение для ошибки:

$$e_1(x_1, a_1) = f_1(x_1, a_1) + K_1 x_1 = K \sqrt{a_1 - x_1} - K \sqrt{x_1} + K_1 x_1, \quad (11)$$

и уравнение, описывающее первую производную по времени от виртуального управления a_1 :

$$\dot{a}_1 = \frac{-K_{v1} \cdot K}{2\sqrt{a_1 - x_1}} e_1 - \frac{2\sqrt{a_1 - x_1}}{K} \left(\left(K_1 - \frac{K}{2\sqrt{a_1 - x_1}} \right) \cdot (K \sqrt{a_1 - x_1} - K \sqrt{x_1}) + x_1 \right), \quad (12)$$

Результирующий закону управления предстает в аффинной форме (13):

$$u = K \sqrt{x_2 - x_1} - K_2 (x_2 - a_1) + \frac{K K_{v1} (K_1 x_1 + K \sqrt{a_1 - x_1} - K \sqrt{x_1})}{2\sqrt{a_1 - x_1}}. \quad (13)$$

С использованием выкладок в [2] и [4] было получено, что для того, чтобы модифицировать закон управления из задачи регулирования, что описано в [5], в задачу слежения, для данной системы из двух связанных резервуаров достаточно внести лишь небольшие изменения.

При рассмотрении первого виртуального управления вида (9) вместо переменной состояния x_1 использовать разность данной переменной состояния и задающего воздействия, т.е. вместо x_1 использовать $x_1 - v$.

Таким образом, первая производная для первого виртуального управления принимает вид:

$$a_1 = \frac{-K_{v1} \cdot K}{2\sqrt{a_1 - x_1 + v}} [K\sqrt{a_1 - x_1 + v} - K\sqrt{x_1 - v} + K_1(x_1 - v)]. \quad (14)$$

Результирующее управление будет выглядеть как:

$$u = K\sqrt{x_2 - x_1} - K_2(x_2 - a_1) + \frac{KK_{v1}(K_1(x_1 - v) + K\sqrt{a_1 - x_1 + v} - K\sqrt{x_1 - v})}{2\sqrt{a_1 - x_1 + v}} + v. \quad (15)$$

Результаты моделирования

Положим все параметры проектирования K_1, K_2, K_{v1} равными 0.505 и проведем моделирование созданной системы. На рис. 2-3 представлены графики изменения уровня жидкости во втором баке при различных начальных условиях.

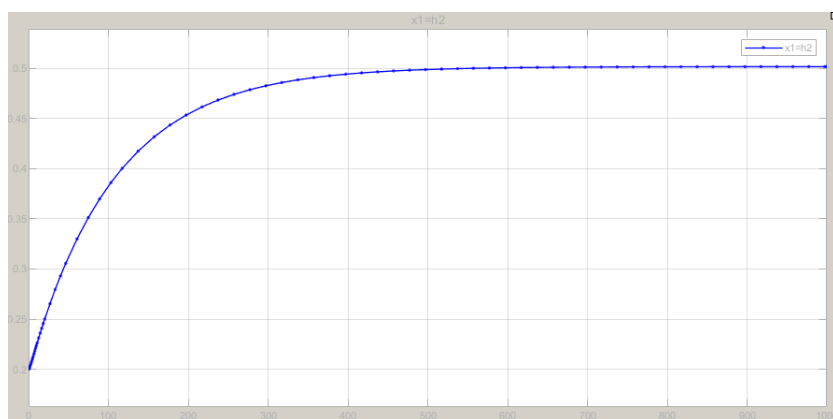


Рис. 2. График изменения уровня жидкости во 2 резервуаре при $x_1|_{t=0} = x_{1_0} = 0.2, x_2|_{t=0} = x_{2_0} = 0.5$ и $v = 0.5$

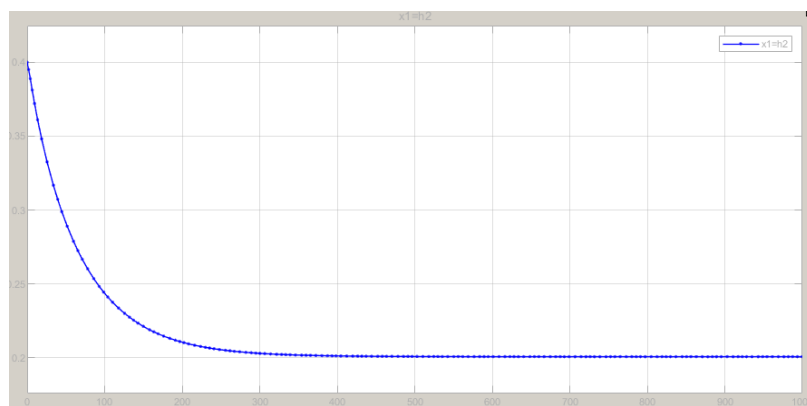


Рис. 3. График изменения уровня жидкости во 2 резервуаре при $x_1|_{t=0} = x_{1_0} = 0.4, x_2|_{t=0} = x_{2_0} = 0.5$ и $v = 0.2$

Заключение

В статье рассмотрено использование метода динамического обратного шага для системы из двух спаренных резервуаров. Разработанный закон управления позволяет решить задачу слежения. Моделирование проведено с использованием системы MATLAB.

Библиографический список

1. Krstic M, Kanellakopoulos I, and Kokotovic P. Nonlinear and adaptive control design. New York: Wiley, 1995.
2. Бобиков А.И. Анализ и проектирование нелинейных систем управления. Рязан. гос. радиотех. ун-т. Рязань, 2013.
3. Fayiz Abu Khadra and Jaber Abu Qudeiri, "Second Order Sliding Mode Control of the Coupled Tanks System", Hindawi publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2015.
4. Zhang, Sheng & Qian, Wei-qi. Dynamic backstepping control for pure-feedback nonlinear systems. 2017.
5. А.И. Бобиков, А.А. Барина. Проектирование регулятора методом динамического обратного шага для объекта из двух спаренных резервуаров // Современные технологии в науке и образовании: Сб. тр. II Междунар. Науч. - техн. форума. Т5. Рязань, 2019 - С. 158-164.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Ю.И. Баранова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, yulya.baranova.14@bk.ru*

Аннотация. В данной статье рассматривается разработка алгоритма локализации дорожных знаков для систем технического зрения. Алгоритм состоит из двух основных этапов – пороговая сегментация цветного изображения в пространстве HSV, применение преобразования Хафа для выделения контуров знака.

Ключевые слова: система технического зрения, сегментация в пространстве HSV, преобразование Хафа.

ROAD SIGN DETECTION IN IMAGES BASED ON CONTOURS METHODS

Yu.I. Baranova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, yulya.baranova.14@bk.ru*

The summary. This article discusses the development of an algorithm for localization of road signs for technical vision systems. The algorithm consists of two main stages: threshold segmentation of the color image in the HSV space and application of the Hough transform to select the contours of the sign.

Keywords: technical vision systems, segmentation in the HSV space, the Hough transform.

Современные системы технического зрения (СТЗ) нашли огромное применение в разных отраслях – медицине, контроле качества на производстве, в охранных и транспортных системах и др. В данной статье, как наиболее важное направление, рассматривается использование СТЗ в транспортных системах. Пополнение и обновление базы дорожных знаков и повсеместная установка новых являются динамической информацией, которая требует постоянного и своевременного донесения до водителя. Ежегодно из-за увеличения числа владельцев автотранспортных средств уплотняется транспортный поток, поэтому для предотвращения ДТП возникла идея снабжения транспорта СТЗ, чтобы они проецировали информацию дорожных знаков на лобовое стекло или специально установленный дисплей.

Локализация дорожных знаков является сложной задачей, т.к. на изображениях помимо самих знаков могут присутствовать другие схожие по форме и цвету объекты – автомобили, светофоры, рекламные вывески и т.п. Для локализации знаков могут применяться различные методы: пороговая сегментация, методы выделения границ, преобразование Хафа, корреляционные алгоритмы и др. Недостатком пороговой сегментацией является возможное выделение посторонних объектов на изображении. Использование методов выделения границ, например, наиболее популярного Кенни [1], применяется к сложным изображениям. Главный недостаток метода Кенни – пропуск границы с малыми перепадами яркости или обозначение как границ детали объектов с высокими перепадами яркостей. Часто используется метод Отсу, построенный на математическом аппарате дискриминантного анализа [1]. Но данный метод недостаточно устойчив к воздействию шума. Преобразование Хафа позволяет решать задачу детектирования объектов произвольной формы, не имеющих аналитического описания [2]. Метод Хафа использует аккумуляторное пространство, в котором при наложении большого числа точек формируется отклик, соответствующий прямой линии. Классический корреляционный алгоритм основан на критерии сходства изображений объекта и эталона [3]. Основной недостаток корреляционного метода – большой объем вычислений, получаемых в результате перемножения элементов эталонного изображения и изображения объекта. Проблему вычислительных затрат можно решить с помощью разностных критериальных функций, но они слабо устойчивы к шуму, и точность сравнительно меньше, чем у классического метода [4]. Кроме того, дорожные знаки согласно ГОСТ Р 52289-2004 имеют строго определенную форму, поэтому для поиска объектов можно применять некоторые характеристики геометрической формы – коэффициент округлости и коэффициент заполнения [5].

Локализацию дорожного знака с красной окантовкой, представленного на рисунке 1, можно разделить на два этапа. На первом этапе выполняется пороговая сегментация в HSV пространстве, на втором – осуществляется преобразование Хафа к сегментированному бинарному изображению.



Рис. 1. Изображение дорожного знака с красной окантовкой

Пространство HSV состоит из трех составляющих – оттенка H, насыщенности S и значения цвета V. Составляющие пространства HSV можно связать с пространством RGB по следующим формулам [6]:

$$H = \arccos \frac{\frac{1}{2}((R - G) + (R - B))}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - G)(G - B)}}, \quad (1)$$

$$S = 1 - 3 \frac{\min(R, G, B)}{R + G + B}, \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{3}(R + G + B), \quad (3)$$

где R – составляющая красного цвета;

G – составляющая синего цвета;

B – составляющая зеленого цвета.

На рисунке 2(а) представлен результат пороговой сегментации по поиску дорожных знаков с красной окантовкой в виде сегментированного бинарного изображения. На полученном изображении могут присутствовать мелкие детали от посторонних объектов, для их устранения можно воспользоваться комбинациями морфологических функций, что представлено на рисунке 2(б).

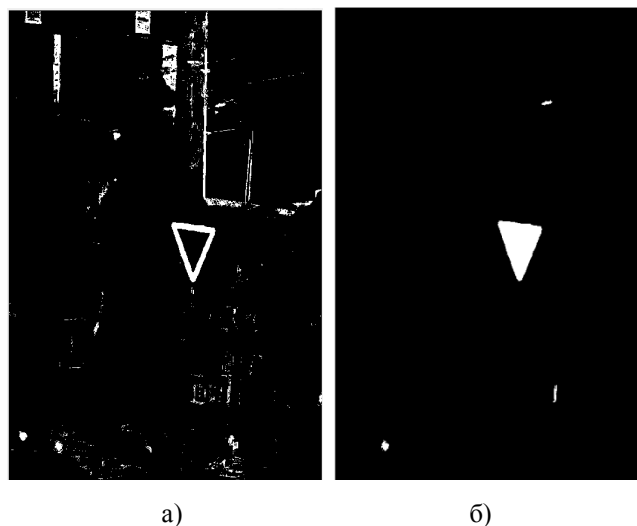


Рис. 2. Результаты применения: а) пороговой обработки в пространстве HSV; б) фильтрации сегментированного изображения

Для выделения контуров треугольного дорожного знака на сегментированном бинарном изображении можно применить преобразование Хафа. По построенным в аккумуляторном пространстве откликам определяются максимумы, соответствующие сторонам треугольного знака. Максимум образуется, когда наибольшее количество точек, лежащих на одной прямой, накладываются друг на друга. Чем ярче в этом максимуме отклик, тем длиннее будет линия. На примере на рисунке 3 приведено аккумуляторное пространство с тремя максимумами, соответствующими трем сторонам объекта треугольной формы.

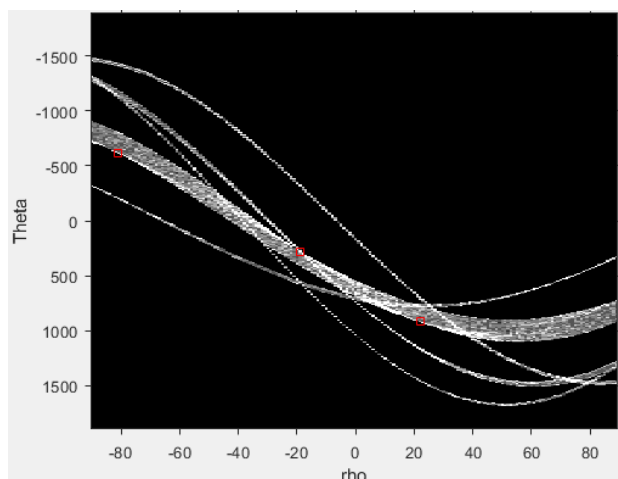


Рис. 3. Отклики в аккумуляторном пространстве для дорожного знака треугольной формы

Для визуализации обнаруженных прямых линий по полученным максимумам определяется количество точек для каждой линии. Исходя из этой информации по точкам цветом построим контуры локализованного дорожного знака. Визуальное применение преобразования Хафа представлено на рисунке 4. Аналогично метод может применяться и для круглых знаков.

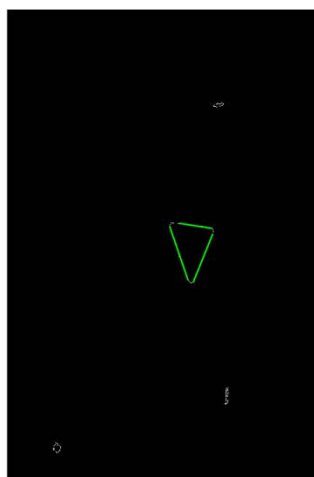


Рис. 4. Результат применения преобразования Хафа для выделения контура дорожного знака

Для проверки эффективности разработанного алгоритма рассматривается критерий частоты правильной локализации, рассчитанный по следующей формуле:

$$N_{\text{чпл}} = \frac{N_{\text{лок}}}{N_{\text{общ}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $N_{\text{чпл}}$ – частота правильной локализации;

$N_{\text{лок}}$ – количество локализованных дорожных знаков;

$N_{\text{общ}}$ – общее количество дорожных знаков.

Качество работы алгоритма оценивалось визуально. В случаях, когда встречается сложное изображение, появляются ложно локализованные линии. Это возникает в результате схожести ярких красных объектов на фоне с цветом дорожного знака, поэтому существует вероятность возникновения таких линий на изображении. После последовательного приме-

нения двух этапов в 92 % случаев из 74 изображений треугольные знаки локализируются точно, локализация круглых дорожных знаков составляет 78% от 55 изображений в выборке.

Библиографический список

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – Техносфера, 2012.
2. Фурсов В. А., Бибииков С. А., Якимов П. Ю. Локализация контуров объектов на изображениях при вариациях масштаба с использованием преобразования Хафа // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37. – №. 4.
3. Исследование методов обработки изображений с помощью пакета IMAGE PROCESSING TOOLBOX: Методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. акад.; Сост. Б.А. Алпатов, О.Е. Балашов, К.А. Бохан, А.А. Катаев, В.С. Муравьев, С.И. Муравьев, А.А. Селяев, В.В. Строгов; Под ред. Б.А. Алпатова. Рязань, 2005. 72 с.
4. Алпатов Б. А. и др. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление //М.: Радиотехника. – 2008. – С. 176.
5. Хотилин М. И. и др. Разработка и анализ методов выделения объектов изображения //Информационные технологии и нанотехнологии. – 2018. – С. 2581-2589.
6. Якимов П. Ю. Предварительная обработка цифровых изображений в системах локализации и распознавания дорожных знаков //Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37. – №. 3.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

АВТОМАТИЧЕСКОЕ СЛЕЖЕНИЕ ЗА ОБЪЕКТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА

А.Ю. Овчинников, С.Е. Корепанов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, aleksovchinn@gmail.com*

Аннотация. Работа посвящена обзору корреляционных алгоритмов слежения за объектом, основанных на сопоставлении с эталоном. Приводятся их основные особенности, достоинства и недостатки, а также подробно рассмотрены способы их улучшения.

Ключевые слова: слежение за объектом, корреляционный метод, корреляционные алгоритмы.

AUTOMATIC OBJECT TRACKING USING CORRELATION METHOD

A.Y. Ovchinnikov, S.E. Korepanov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, aleksovchinn@gmail.com*

The summary. The paper is devoted to a survey of correlation algorithms for tracking objects based on template matching. Their main features, advantages and disadvantages, and ways to improve it are given.

Keywords: object tracking, correlation method, correlation algorithms.

Задача слежения за объектами в последовательности изображений (видеопоследовательности) возникает во многих областях современной науки и техники: в различных охраняемых системах, в приложениях, связанных с военной техникой, например, при создании беспилотных аппаратов, и т. д. Решение задачи слежения за объектом состоит в определении координат объекта слежения на каждом кадре наблюдаемой видеопоследовательности, при этом не ставится задача управления перемещением датчика изображений [1]. Для многих приложений требуется реализация алгоритма, обладающего достаточно малыми вычислительными затратами, такими, чтобы была возможна работа в реальном масштабе времени.

Чтобы решить задачу слежения за объектом, сначала его необходимо обнаружить на изображении. Один из способов обнаружения объектов состоит в сопоставлении с эталоном. Под эталоном понимается известное изображение обнаруживаемого объекта. При работе эталон последовательно перемещается по изображению и исследуется его сходство с различ-

ными участками изображения. Если сходство между неизвестным объектом и эталоном достаточно велико, то этот объект помечается как соответствующий эталону. Полное совпадение эталона с какой-либо частью изображения бывает редко из-за действия шумов и искажений, вызванных пространственной дискретизацией и квантованием яркости, а также вследствие отсутствия априорной информации относительно точной формы и структуры объекта обнаружения. Поэтому используется функция сходства, т.е. мера, с помощью которой принимается решение о степени сходства изображений, и используются операции поиска экстремума этой функции. Наибольшее распространение в качестве функции сходства получила взаимная корреляционная функция [1].

К алгоритмам слежения, основанным на корреляционном методе относятся такие алгоритмы, как классический корреляционный алгоритм, разностные корреляционные алгоритмы, корреляционные алгоритмы, использующие преобразования Фурье и другие.

Классический корреляционный алгоритм

Алгоритм использует классический корреляционный критерий [2, 3], основанный на свертке эталонного и текущего изображений для различных возможных положений объекта на изображении. Критерий имеет вид:

$$F_K(\lambda_x, \lambda_y) = l_{\lambda_x, \lambda_y} * E = \sum_{(v, \mu) \in E} l(\lambda_x + v, \lambda_y + \mu) e(v, \mu), \quad (1)$$

где λ_x, λ_y — координаты центра объекта в системе координат изображения L;

l_{λ_x, λ_y} — часть наблюдаемого изображения с центром в координатах λ_x, λ_y с размерами, соответствующими размерам E;

$e(v, \mu)$ — элементы эталонного изображения объекта E;

v, μ — координаты точек, составляющих изображение объекта, в системе координат изображения объекта E (см. рисунок 1).

Критерий (1) также имеет название критериальной функции [1].

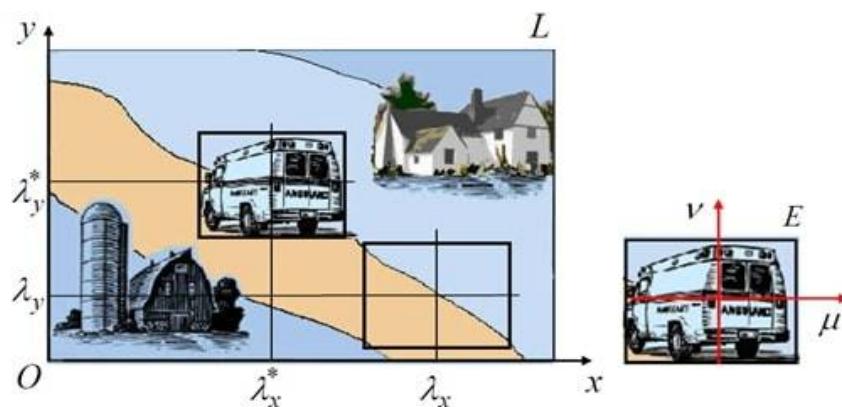


Рис. 1. Системы координат изображения L и объекта E

Недостатками классического корреляционно-экстремального алгоритма являются большое количество операций умножения, а также то, что он может давать грубые ошибки при наличии неоднородного фона на изображении.

Разностные корреляционные алгоритмы

Для снижения требуемого объема вычислений при поиске объектов на изображении, что особенно важно при работе в реальном масштабе времени, было предложено использо-

вать вместо корреляционных критериальных функций так называемые разностные критериальные функции вида (2) и (3), для которых необходимо отыскивать глобальный минимум [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

$$F_{p1}(\lambda_x, \lambda_y) = \sum_{(v, \mu) \in E} |l(\lambda_x + v, \lambda_y + \mu) - e(v, \mu)|, \quad (2)$$

$$F_{p2}(\lambda_x, \lambda_y) = \sum_{(v, \mu) \in E} (l(\lambda_x + v, \lambda_y + \mu) - e(v, \mu))^2. \quad (3)$$

Преимуществом разностных функций перед корреляционными функциями является отсутствие в них операции умножения. В то же время при малых отношениях сигнал-шум (менее трех) точностные характеристики разностных функций уступают корреляционным [2,3]. Под отношением сигнал-шум понимается отношение контраста объекта относительно фона к среднеквадратическому отклонению шума, присутствующего на изображении [3].

К недостаткам классического корреляционного алгоритма и разностных корреляционных алгоритмов можно отнести: большое количество априорной информации, описывающей объекты; высокая вычислительная сложность. Также алгоритмы неустойчивы к возможным преобразованиям изображения эталонного объекта. Текущее изображение объекта с течением времени может изменяться из-за поворотов в пространстве, удаления, приближения и через некоторое время может стать не похоже на эталон. Много работ посвящено поиску способов устранения этих недостатков. С целью адаптации эталона к изменениям, происходящим с изображением объекта в [3] предлагается кадровое обновление эталона, однако это может приводить к частым срывам слежения ввиду быстрого накопления ошибки в определении координат, вызванной ошибками дискретизации и шумами видеотракта, которые вносятся в новый эталон [4]. Согласно результатам эксперимента [3] эффективным методом обновления эталона и компенсации влияния эффектов дискретизации на точность определения координат является экспоненциальное сглаживание, определяемое выражением:

$$h_n(i, j) = k_h h_{n-1}(i, j) + (1 - k_h) h_{n-1}^*(i, j), \quad (4)$$

где $h_n(i, j), (i, j) \in H$ – сглаженное эталонное изображение объекта для n-го кадра;

k_h – подбираемый коэффициент (в пределах от 0 до 1);

$h_{n-1}(i, j)$ – сглаженное эталонное изображение объекта, которое используется для нахождения объекта в (n-1)-м кадре;

$h_{n-1}^*(i, j)$ – выделенное из (n-1)-го кадра изображение объекта.

Возможно сократить объем вычислений, если вычислять взаимную корреляцию с помощью преобразования Фурье [5].

Алгоритм корреляционного совмещения с эталонным изображением объекта, основанный на преобразовании Фурье

Пусть известно эталонное изображение $e(v, \mu), (v, \mu) \in E$, которое является частью наблюдаемого изображения $l_{\lambda_x, \lambda_y}, (\lambda_x, \lambda_y) \in L$ (рис. 1). Пусть центр эталонного изображения смещён относительно центра наблюдаемого изображения. Используя прямое и обратное дискретное преобразование Фурье (ДПФ), можно вычислить взаимную корреляцию изображений, прибегая к меньшему количеству операций, чем при прямом способе вычислений, как в классическом корреляционном алгоритме. Для этого используют выражение (5) [6].

$$F[e * l] = (F[e])^* * (F[l]), \quad (5)$$

где F - ДПФ, $(F[e])^*$ - комплексно-сопряженные значения преобразования Фурье изображения e , $[e * l]$ - значения взаимнокорреляционной функции изображений e и l .

Формула (5) позволяет найти Фурье-образ взаимнокорреляционной функции. Чтобы в дальнейшем использовать полученный результат для оценки параметров смещения двух изображений, нужно использовать обратное ДПФ (F^{-1}). Для нахождения самих значений взаимной корреляционной функции используется формула [6]:

$$e * l = F^{-1}(F[e * l]). \quad (6)$$

К достоинствам алгоритма можно отнести сравнительно небольшие вычислительные затраты на вычисление взаимной корреляции эталона и исходного изображения. Однако в присутствии шума на видеопоследовательности классический и разностный алгоритмы проявляют себя лучше.

Другим способом адаптации эталона к изменениям изображения объекта является применение математически синтезированных адаптивных корреляционных фильтров [7-15], содержащие информацию, как об эталонном объекте, так и об его возможных искажениях.

Адаптивные корреляционные фильтры

Адаптивные корреляционные фильтры могут использоваться для слежения за объектами в сложных условиях при наличии геометрических преобразований изображения объекта (изменение масштаба, ракурса, сдвига и поворота, других преобразований).

Недостаток простого сопоставления с эталоном – это то, что отклик на эталон всегда будет высоким, однако в реальности изображение объекта меняется от кадра к кадру. Под откликом понимается сумма произведений коэффициентов фильтра и соответствующих пикселей изображения.

Адаптивным фильтром называют фильтр с изменяемыми в процессе работы параметрами, набор которых зависит от критерия работы адаптивного фильтра.

Примерами адаптивных корреляционных фильтров являются: фильтр с минимальной средней энергией корреляции MACE (Minimum Average Correlation Energy Filter) [7,8], фильтры с синтезируемой дискриминационной функцией SDF (Synthetic Discrimination Function) [9,10], фильтр с минимальной выходной суммой квадратичной ошибки MOSSE (Minimizing the Output Sum of Squared Error) [10], фильтр с усредненным результирующим значением, ASEF (Average of Synthetic Exact Filters)[10,11] и др.

SDF фильтры были первым типом составных корреляционных фильтров. SDF фильтры используют набор обучающих изображений для создания эталона, при согласованной корреляции с которым получают заданные значения корреляционных пиков для данного набора изображений. Применение SDF фильтра накладывает жесткие требования к локализации объекта во входной сцене, т.к. единственным анализируемым параметром является центр результирующего корреляционного поля. Однако, положительное свойство корреляционного метода совмещения - независимость к смещению объекта во входной сцене [9].

Для фильтра MACE минимизируется энергия в области корреляции, поэтому результатом его применения являются острые корреляционные пики [7,8]. MACE фильтры обычно выделяют высокие частоты. Результатом их применения являются резкие пики, что делает фильтр более чувствительным к шуму [7]. Каждое обучающее изображение дает одно "синтетическое значение корреляции", которое является значением фильтра, которое должно быть возвращено, когда фильтр отцентрирован на изображении. Адаптация корреляционных фильтров к текущим изменениям сцены производится с помощью их итеративного обучения. Фильтры обучены на центрированных изображениях с одним корреляционным пиком, а зна-

чит, при незначительном изменении входного изображения фильтр может дать неожиданный результат.

Для улучшения характеристик распознавания, в КФ может быть добавлена сглаживающая функция. Например, при добавлении при синтезе КФ МАСЕ функции Гаусса [13] получается его модификация – фильтр МАСЕ со сглаживающей функцией Гаусса - GMACE (Gaussian MACE filter). За счёт манипуляции формой сглаживающей функции можно добиться желаемой формы корреляционного пика. Если характеристики шума известны заранее, то можно синтезировать КФ с их учётом, таким образом строятся КФ с минимумом шума и энергии корреляции MINACE (Minimum Noise and Correlation Energy Filter) [14,15].

Фильтр для MOSSE – это искусственно создаваемый шаблон, корреляция которого с исходным кадром позволяет получить заранее заданную желаемую реакцию(желаемый отклик) при обнаружении объекта слежения.

В качестве пространственного фильтра в [10] выступает низкочастотный фильтр Гаусса. Фильтры, основанные на гауссовой функции, важны, поскольку прямое и обратное фурье-преобразования этой функции также являются гауссовыми функциями.

Так как фильтр MOSSE применяется для обработки сигналов в частотной области, то корреляцию можно записать в виде (7).

$$G = H \odot F^*, \quad (7)$$

где F – фурье-образ входного изображения;

G – фурье-образ выходного изображения (отклика);

H – фурье-образ фильтра;

$\odot$ – поэлементное умножение;

$*$ – комплексное сопряжение.

Поскольку видеопоследовательность содержит в себе не один кадр, то необходимо вычислять фильтр H для каждого i -го кадра – H_i .

$$H_i = \frac{G}{F_i} = \frac{\sum_i G \odot F_i^*}{(\sum_i F_i \odot F_i^* + \varepsilon)}. \quad (8)$$

где ε – показатель регуляризации. С помощью такой регуляризации фильтр обращает больше внимания на низкие частоты, что улучшает стабильность процесса слежения [10].

Формально постановка задачи минимизации суммы квадратов будет выглядеть так [10]:

$$\min \sum_i |F_i \odot H_i^* - G|^2. \quad (9)$$

При обработке видеопоследовательности для сохранения информации об отслеживаемом объекте, полученную с предыдущих кадров, можно не вычислять фильтр заново, а обновить предыдущий. Чтобы учесть поворот изображения объекта к исходному изображению объекта применяют преобразования поворота. Тогда выражение (6) может быть расписано подробнее:

$$H_i = \frac{A_i}{B_i}, \quad (10)$$

$$A_i = nG \odot F_i^* + (1 - n)A_{i-1}, \quad (11)$$

$$B_i = nF_i \odot F_i^* + (1 - n)B_{i-1}, \quad (12)$$

где n – параметр скорости обучения, рекомендуемое значение $n=0.125$ [10].

После нахождения MOSSE фильтра H_i , рассчитывается отклик g_i для кадра видеопоследовательности по формуле:

$$g_i = F^{-1}[H_i \odot F(f)], \quad (13)$$

где F – прямое ДПФ, F^{-1} – обратное ДПФ, f – изображение объекта.

Если полученный в (10) фильтр усреднить по количеству преобразований поворота изображения объекта, получится фильтр ASEF:

$$H_\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i, \quad (14)$$

где i – количество преобразований поворота изображения объекта на видеопоследовательности.

Таким образом в данной работе представлен обзор корреляционных алгоритмов слежения за объектом. Рассмотрены преимущества и недостатки различных алгоритмов. Подходы к слежению за объектом, основанные на использовании разностных корреляционных алгоритмов наиболее полезны, когда требуется обеспечить работу в реальном времени и при этом изображения объектов не подвергаются значительным искажениям (изменение поворота, масштаба, ракурса). Проведенные исследования [16] подтверждают, что алгоритмы слежения, основанные на фильтрах ASEF/MOSSE, позволяют улучшить слежение за объектом с точки зрения точности и быстродействия в более сложных условиях наблюдения.

Библиографический список

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
2. Алпатов Б. А. Методы и алгоритмы обработки изображений в системах управления //Рязань: РГРТА. – 1999.
3. Алпатов Б. А., Селяев А. А. Алгоритм оценки местоположения объекта на двумерном изображении //Изв. вузов. Приборостроение. – 1988. – Т. 31. – №. 5. – С. 3.
4. Алпатов Б. А., Селяев А. А., Степашкин А.И. Цифровая обработка изображений в задаче отслеживания движущегося объекта // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1985. – №2. – С. 39-43
5. Гудмен Д. У. Введение в фурье-оптику: Пер. с англ. – Мир, 1970
6. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник. – Высшая школа, 1983.
7. Kumar B. V. K. V., Mahalanobis A., Juday R. D. Correlation pattern recognition. – Cambridge University Press, 2005.
8. Mahalanobis A. et al. Unconstrained correlation filters //Applied Optics. – 1994. – Т. 33. – №. 17. – С. 3751-3759.
9. Hester C. F., Casasent D. Multivariant technique for multiclass pattern recognition //Applied Optics. – 1980. – Т. 19. – №. 11. – С. 1758-1761.
10. Bolme D. S. et al. Visual object tracking using adaptive correlation filters //2010 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, 2010. – С. 2544-2550.
11. Bolme D. S., Draper B. A., Beveridge J. R. Average of synthetic exact filters //2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2009. – С. 2105-2112.
12. B. V. K. V. Kumar "Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators" // Appl.Opt., v31, pp. 4773-4801, 1992

13. Casasent D., Ravichandran G., Bollapragada S. Gaussian–minimum average correlation energy filters //Applied optics. – 1991. – Т. 30. – №. 35. – С. 5176-5181.
14. Ravichandran G., Casasent D. Minimum noise and correlation energy optical correlation filter //Applied Optics. – 1992. – Т. 31. – №. 11. – С. 1823-1833.
15. Mahalanobis A., Kumar B. V. K. V., Casasent D. Minimum average correlation energy filters //Applied Optics. – 1987. – Т. 26. – №. 17. – С. 3633-3640.
16. Овчинников А. Ю., Корепанов С. Е. Слежение за объектом с использованием алгоритма адаптивной фильтрации эталона MOSSE //Новые информационные технологии в научных исследованиях. – 2019. – С. 252-254.

УДК 004.932; ГРНТИ 47.51.39

АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА НА ИЗОБРАЖЕНИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА ЭТАЛОНА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ СОПРОВОЖДЕНИИ ОБЪЕКТОВ

П.В. Бабаян*, П.Н. Сконников, Д.В. Трофимов****

**Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина*

***АО «РИФ»,*

Российская Федерация, Рязань, skonnikovpn@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема выбора размера эталона при автоматическом сопровождении объектов на изображении. Для решения данной проблемы предложен алгоритм сегментации объекта, основанный на многоуровневой пороговой обработке изображения.

Ключевые слова: корреляционные алгоритмы сопровождения объектов, сегментация изображений.

ALGORITHM OF OBJECT SEGMENTATION IN THE IMAGE FOR REFERENCE SIZE DEFINITION WHILE AUTOMATIC OBJECT TRACKING

P.V. Babayan*, P.N. Skonnikov, D.V. Trofimov****

**Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,*

***RIF Corporation*

Russia, Ryazan, skonnikovpn@yandex.ru

The summary. The problem of choosing the reference size in the automatic tracking of objects in the image is considered. To solve this problem, the object segmentation algorithm based on multi-level threshold image processing is proposed.

Keywords: correlation-based tracking algorithms, image segmentation.

Проблема выбора размера эталона при автоматическом сопровождении объекта

Для автоматического сопровождения объектов на изображениях видеопоследовательности применяются корреляционные алгоритмы [1,2]. В таких алгоритмах производится по-пиксельное сравнение области поиска и эталонного изображения, заданного непосредственно перед началом сопровождения, которое перемещается по данной области. При этом для обеспечения требуемого качества сопровождения эталонное изображение должно включать по возможности большее количество пикселей, соответствующих сопровождаемому объекту, и меньшее количество пикселей фона. Для решения данной задачи необходимо правильно выбрать размеры эталона по вертикали и горизонтали, причём выполнить эти операции необходимо за ограниченный временной интервал.

Для ручного выбора размеров эталонного изображения оператором существует несколько подходов.

Первый подход предусматривает выбор некоторых табулированных размеров эталона из таблицы, составленной заранее. Преимуществом данного подхода является быстрота вы-

бора размеров эталона при небольшом количестве возможных вариантов. Однако, в этом случае шаг изменения указанных размеров является чрезмерно большим для обеспечения точного выбора размеров эталона. Уменьшение этого шага приводит к увеличению количества возможных вариантов, и, как следствие, к усложнению выбора необходимых оператору размеров.

Согласно второму подходу, горизонтальный и вертикальный размеры эталона изменяются вручную. Такой способ позволяет более точно выбрать размеры эталона, но он сопряжён с большими временными затратами.

Третий подход применим в условиях, когда известны реальные физические размеры сопровождаемого объекта и присутствует возможность измерения дальности для этого объекта. В этом случае размеры эталонного изображения определяются исходя из данных размеров и дальности автоматически, что существенно сокращает время на подготовку к сопровождению. Однако, данный подход обладает несколькими недостатками, которые препятствуют применению данного подхода. К этим недостаткам относится, во-первых, проблема работы с целями нетипичных или не предусмотренных заранее размеров. Во-вторых, даже типовые объекты могут иметь различные размеры на изображении в силу различных углов наблюдения. Третий недостаток связан с особенностью корреляционных алгоритмов сопровождения объектов: в некоторых случаях целесообразно производить сопровождение не всего объекта, а лишь некоторой его части, наиболее контрастной на изображении. Рассматриваемый подход не предусматривает такой возможности.

Анализ рассмотренных подходов приводит к необходимости применения автоматического выбора размеров эталонного изображения, не обладающего указанными недостатками.

Использование сегментации изображения для выбора размеров эталона

Предлагаемый алгоритм выбора размера эталона основан на сегментации области анализа: квадратного участка изображения, в центре которой расположен объект, подлежащий сопровождению. При этом предполагается, что данный объект обладает высокой контрастностью относительно фона, то есть производится сегментация объекта определённой яркости, отличной от яркости фона. Данному предположению в наибольшей мере соответствуют тепловизионные изображения, на которых объекты значительно выделяются относительно фона.

Определение размера эталона производится по результатам сегментации объекта в области анализа методом многоуровневой пороговой обработки [3,4]. Согласно данному методу, диапазон яркостей пикселей области анализа делится на четыре равные части. В случае достаточно контрастного объекта все или большинство пикселей данного объекта будут принадлежать к одной из этих областей, притом что пиксели фона преимущественно не попадут в данную область. При этом необходимо, чтобы диапазон яркостей пикселей области анализа был полным (то есть от 0 до 255 для восьмибитных изображений), так как в противном случае эффективность использования крайних частей диапазона яркостей снижается. Если данное условие не выполняется, для увеличения контрастности необходимо выполнить линейное преобразование, приводящее значения яркостей пикселей области анализа к полному динамическому диапазону.

В зависимости от того, в какую из четырёх частей яркостного диапазона попадает тот или иной пиксель, все пиксели области анализа делятся на четыре соответствующих слоя. Каждый слой представляет собой бинарное изображение, элементы которого принимают значения 1, если соответствующие им пиксели принадлежат определённой части яркостного диапазона, и 0 в противном случае. Исходя из указанных выше предположений, один из слоёв будет представлять собой результат выделения объекта, подлежащего сопровождению. По

результатам выбора такого слоя из четырёх возможных вариантов получаем бинарную маску объекта. Размеры эталона выбираются исходя из горизонтального и вертикального размеров данной маски.

Для увеличения эффективности предлагаемого алгоритма целесообразно в ряде случаев произвести предварительную обработку области анализа, включающую, во-первых, вычисление градиента яркости и, во-вторых, сглаживание исходного изображения [4]. Использование градиента яркости вместо исходного изображения актуально, в первую очередь, для телевизионных изображений, поскольку зачастую градиент яркости имеет более высокую контрастность, чем исходное изображение. Сглаживание области анализа производится для получения более целостных бинарных масок объекта. В качестве дополнения или альтернативы сглаживания области анализа можно рассматривать применение морфологических операторов к бинарной маске [5], а также параметрическую обработку полученных сегментов.

Принцип работы алгоритма сегментации объекта на изображении

На вход предлагаемого алгоритма сегментации поступает область анализа размером 128×128 пикселей, в центре которой располагается объект, подлежащий сопровождению. Типичный пример такой области анализа показан на рисунке 1, (а).

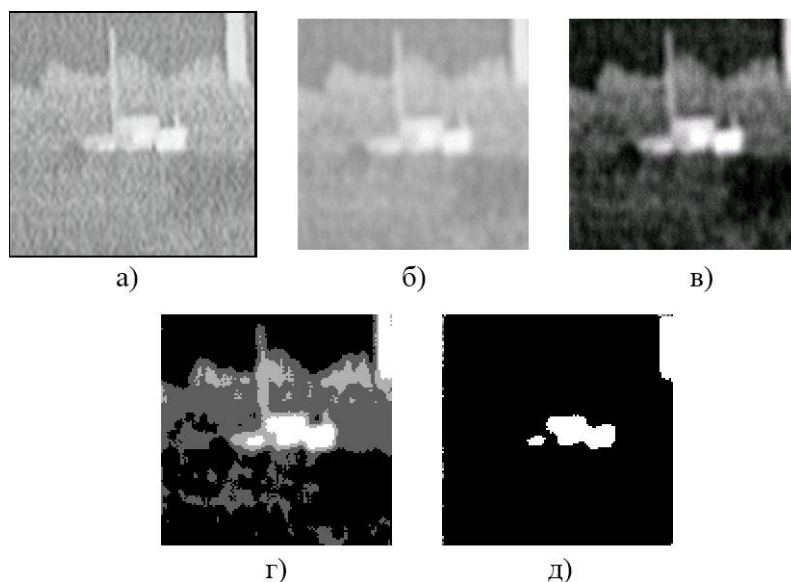


Рис. 1. Пример области анализа на различных этапах алгоритма сегментации

Как было отмечено ранее, в первую очередь производится предварительная обработка области анализа. На рисунке 1, (б) показан результат сглаживания данной области, а на рисунке 1, (в) – результат последующего контрастирования. Как видно на рисунке 1, (в), диапазон яркостей на данном этапе является полным, то есть пиксели соответствующего изображения принимают значения от 0 до 255.

Далее производится пороговая обработка. На рисунке 1, (г) четырьмя различными уровнями яркости показаны слои, соответствующие четырём диапазонам яркости пикселей: от 0 до 63, от 64 до 127, от 128 до 191, от 192 до 256.

На следующем этапе выполняется морфологическая обработка каждого из четырёх полученных слоёв. На рисунке 1, (д) показан один из слоёв после выполнения процедур зачистки и восстановления.

Далее в каждом слое производится параметризация выделенных сегментов. Выбор областей, соответствующих объекту, подлежащему сопровождению, производится методом исключения заведомо неподходящих областей по нескольким критериям. При этом накладыв-

ваются верхнее и нижнее ограничения на площадь сегмента, линейные размеры и положение центра сегмента.

На последнем этапе производится выбор одного из оставшихся сегментов. Данный выбор основан на предположении, что центр искомого сегмента наиболее близок к центру области анализа, так как при захвате объекта на сопровождение оператор наводит фотоприёмник таким образом, чтобы интересующий его объект располагался в центральной области изображения.

Размеры и координаты эталонного изображения, вырезаемого из области анализа, определяются по крайним верхним, нижним, левым и правым пикселям выбранного сегмента.

Выводы

Предложенный алгоритм сегментации объекта позволяет автоматически захватить эталонное изображение для последующего сопровождения. При этом оператору не требуется задавать размеры эталона. Применение данного алгоритма существенно сокращает время, требуемое для захвата объекта. Испытания алгоритма показали устойчивую работу при неточном наведении оптической оси фотоприёмника на объект.

Библиографический список

1. Алпатов Б.А., Селяев А.А. Алгоритм оценки местоположения объекта на двумерном изображении // Изв. вузов. Приборостроение. 1988. № 5. С. 3-5.
2. Можейко В.И., Обухова Н.А., Тимофеев Б.С., Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Телевизионные методы сопровождения объектов в сложных условиях наблюдения // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 8. С. 20-29.
3. Papamarkos N, Gatos B. A new approach for multilevel threshold selection. Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Graphical Models and Image Processing. 1994. Vol. 56, No. 5, pp. 357-370.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
5. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Осоков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

СЛЕЖЕНИЕ ЗА ОБЪЕКТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОЦЕНКИ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА

Д.В. Ловкин, С.Е. Корепанов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, demu2552@mail.ru*

Аннотация. В работе представлено описание алгоритма слежения за объектами на видео-последовательности, основанного на оценке оптического потока. Проведены экспериментальные исследования алгоритма и сделан вывод об их результатах.

Ключевые слова: слежение за объектом, оптический поток, оценка параметров.

OBJECT TRACKING USING THE OPTICAL FLOW EVALUATION METHOD

D.V. Lovkin, S.E. Korepanov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, demu2552@mail.ru*

The summary. This paper describes an algorithm for tracking objects on video sequences based on the estimation of the optical flow. Experimental studies of the algorithm are carried out and a conclusion is made.

Keywords: object tracking, optical flow, parameter estimation.

Задача слежения за объектом на видеопоследовательности представляет значительный интерес в области компьютерного зрения. Суть задачи заключается в определении местоположения объекта на каждом кадре при неподвижном видеодатчике. Один из существующих методов решения задачи слежения за объектом основан на оценке оптического потока. Оптический поток — это изображение видимого движения, представляющее собой сдвиг каждой точки между двумя изображениями. По сути, он представляет собой поле скоростей (т.к. сдвиг с точностью до масштаба эквивалентен мгновенной скорости) [1-3]. Методы вычисления оптического потока делят на глобальные (оценка оптического потока производится по всему изображению) и локальные (оценка оптического потока производится в локальной области изображения). Поскольку глобальные методы требуют значительно больше вычислительных затрат по сравнению с локальными, то для слежения за объектом, ориентированном на решение задачи в реальном масштабе времени, предлагается использовать последние. В настоящее время среди алгоритмов оценки оптического потока локальным методом выделяют алгоритм Лукаса–Канаде, Horn–Schunck, Farneback и другие [4].

В данной работе ставится задача слежения за автомобилем, движущимся по дороге при отсутствии заслонений объекта и при незначительных изменениях яркости объекта. Для решения данной задачи на высокоуровневом языке MATLAB был разработан алгоритм, основанный на оценке оптического потока с использованием метода Лукаса–Канаде.

Метод Лукаса–Канаде

Данный метод позволяет найти смещение каждого конкретного пикселя изображения в определенной области [5]. Допустим, что яркость пикселей относительно соседних кадров неизменна. Запишем это допущение в виде уравнения:

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t), \quad (1)$$

где $I(x, y, t)$ — значение яркости точки изображения с пространственными координатами (x, y) в момент времени t и значение яркости точки изображения с пространственными координатами $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ в момент времени $(t + \Delta t)$ соответственно;

$\Delta x, \Delta y$ — смещения точки изображения рассматриваемой последовательности с координатами (x, y) за время Δt вдоль горизонтальной и вертикальной осей координат, соответственно.

Предполагая, что смещение соседних пикселей осуществляется на равное расстояние, будем считать, что оптический поток одинаков для всех пикселей, находящихся в некоторой области. Тогда вектор оптического потока (x', y') в центральной точке окна должен быть решением системы уравнений:

$$\begin{cases} I'_x(h_1) \cdot x' + I'_y(h_1) \cdot y' = -I'_t(h_1); \\ I'_x(h_2) \cdot x' + I'_y(h_2) \cdot y' = -I'_t(h_2); \\ \dots \\ I'_x(h_g) \cdot x' + I'_y(h_g) \cdot y' = -I'_t(h_g). \end{cases}, \quad (2)$$

где x' и y' — производные от пространственных координат x и y по времени t (компоненты скорости оптического потока);

$h_1, h_2, \dots, h_g$ — координаты точек внутри заданной области;

$I'_x(h_g), I'_y(h_g), I'_t(h_g)$ — частные производные изображения I по координатам x, y и времени t , вычисленные в точке с координатами h_g ;

g — число точек рассматриваемой области.

После записи уравнения (2) в матричной форме и его решения по методу наименьших квадратов, получаем решение оптического потока:

$$u' = b \cdot M^{-1}, \quad (3)$$

$$\text{где } u' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} -\sum_{j=1}^n I'_x(h_j) \cdot I'_t(h_j) \\ -\sum_{j=1}^n I'_y(h_j) \cdot I'_t(h_j) \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n [I'_x]^2 & \sum_{j=1}^n I'_x(h_j) \cdot I'_y(h_j) \\ \sum_{j=1}^n I'_x(h_j) \cdot I'_y(h_j) & \sum_{j=1}^n [I'_y(h_j)]^2 \end{bmatrix}.$$

Описание алгоритма

Разработанный алгоритм слежения за объектом состоит из следующих этапов, выполняемых на каждом кадре видеопоследовательности, кроме первого:

1. Формирование зоны поиска.
2. Вычисление оптического потока в области поиска.
3. Выполнение пороговой обработки матрицы скоростей.
4. Использование двумерной медианной фильтрации и морфологической обработки.
5. Разметка и параметризация сегментов
6. Обнаружение объекта.
7. Обновление зоны поиска.

На первом кадре положение объекта известно и задается соответствующими координатами его центра и размерами или целеуказанием оператора. Также формируется область поиска объекта относительно его центра на изображении.

Рассмотрим подробнее работу алгоритма на остальных кадрах видеопоследовательности.

На первом этапе формируется зона поиска объекта на текущем изображении, положение которой соответствует положению зоны на предыдущем кадре.

На втором этапе происходит вычисление оптического потока на соседних кадрах в соответствующих зонах поиска объекта с использованием метода Лукаса–Канаде. Решив уравнения (3) для соседних пикселей в области поиска объекта, формируется карта скоростей. Для решения поставленной задачи использовался существующий в MATLAB объект `opticalFlowLK` класса `opticalFlow`, предназначенный для построения векторов оптического потока с использованием метода Лукаса–Канаде. Векторы оптического потока хранятся в виде комплексных чисел: вещественная часть – это проекция скорости на ось Y, а мнимая – проекция на ось X.

На третьем этапе происходит сегментация изображения зоны поиска с использованием пороговой обработки [6]. Для того чтобы отделить точки объекта от точек фона необходимо выбрать пороговое значение для скорости объекта. В данном алгоритме в качестве порога выбирается среднее значение модулей векторов на карте скоростей.

В результате пороговой обработки будут иметь место ошибки. Часть точек может ошибочно рассматриваться как объект, другая – ошибочно рассматриваться как фон. Поэтому, для устранения ошибок, на четвертом этапе алгоритма используется морфологическая обработка. Вначале применяется двумерная медианная фильтрация (рисунок 1). Далее применяется морфологическая эрозия для удаления малых шумовых сегментов и морфологическое закрытие, которое заполняет внутренние дыры и сглаживает края выделенных областей.

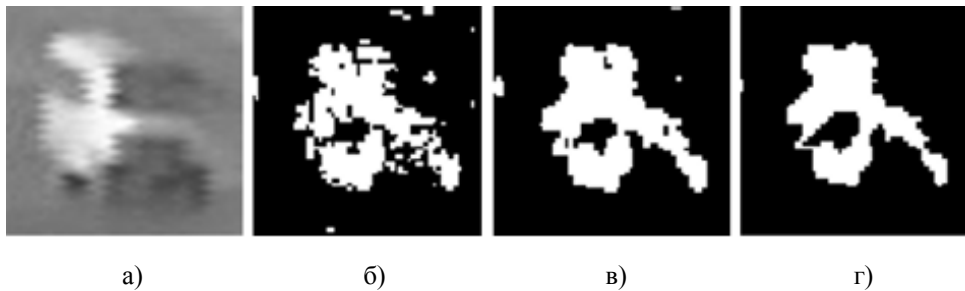


Рис. 1. Изображение объекта: а) полутоновое изображение объекта; б) бинарное изображение; в) бинарное изображение после добавления медианного фильтра; г) бинарное изображение после морфологических преобразований

На пятом этапе алгоритма производится разметка и параметризация сегментов в рассматриваемой области. В результате формируется список параметров сегментов (координаты и размеры).

На шестом этапе осуществляется поиск объекта. В качестве объекта выбирается сегмент с наибольшей площадью. Вычисляются координаты объекта на изображении.

На седьмом этапе происходит обновление зоны поиска в соответствии с вычисленными координатами объекта.

Экспериментальные исследования

Для тестирования алгоритма выбраны 5 натуральных видеосюжетов, на которых объект интереса не заслонен другими объектами или препятствиями. Составляющие видеосюжетов – автомобили, движущиеся по дороге.

Целью экспериментальных исследований являлась проверка работоспособности алгоритма при наличии аддитивного нормального шума с различной дисперсией. Для оценки качества слежения использовалась ошибка среднеквадратического отклонения (СКО) измеренных координат объекта от эталонных. Эталонные координаты были предварительно сформированы с использованием специального программного обеспечения. В результате была получена зависимость СКО ошибки измерения координат объекта от СКО шума (рисунок 2). Значения СКО ошибки измерения усреднены по всем сюжетам.

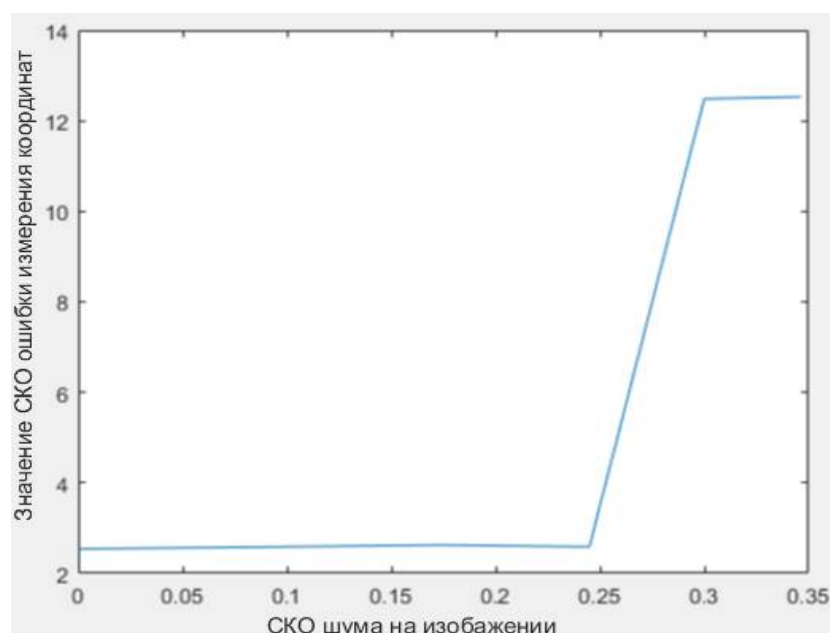


Рис. 2. Иллюстрация усредненных значений зависимости среднеквадратического отклонения ошибки измерения координат от значений СКО шума для пяти видеосюжетов

На графике видно, что алгоритм работоспособен (СКО ошибки не больше 3 пикселей) при наличии шума с СКО, не превышающими 0,25. При превышении данной величины происходит срыв слежения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанный алгоритм слежения работоспособен в достаточно простых условиях наблюдения. Для снижения вычислительной сложности алгоритма можно использовать не все точки объекта, а только некоторые, чему будет посвящена дальнейшая работа.

Библиографический список

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В. Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов // Цифровая обработка сигналов. – 2006. - №2. – С. 45-51.
2. Казаков Б.Б. Эффективные методы выделения движения объектов в последовательности изображений / Б.Б. Казаков // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – Вып. 5. – С. 55-60.
3. Лукьяница А.А. Цифровая обработка видеоизображений / А.А. Лукьяница, А.Г. Шишкин. – М.: Ай-Эс-Си Пресс, 2009. – 518 с.
4. Barron J.L., Fleet D.J. Beauchemin S.S. Performance of Optical Flow Techniques // International Journal of Computer Vision. 1994. No 12. P. 43–77.
5. Bruce D. Lucas, and Takeo Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision// IJCAI, 1981, P. 674–679.
6. Ловкин Д.В., Корепанов С.Е. Слежение за объектом с использованием метода оценки оптического потока // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2019. – С. 46-47.

УДК 004.932; ГРНТИ 47.51.39

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ И СЛЕЖЕНИЯ ЗА ОБЪЕКТАМИ

Ю.Р. Алланазарова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, chernichka66.yulia@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе рассматриваются корреляционно-экстремальные алгоритмы измерения координат объектов на изображениях, получившие широкое применение в бортовых системах видеослежения. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие возможность повышения точности измерения координат объекта в корреляционно-экстремальных алгоритмах за счет интерполяции массива значений целевой функции и последующего субпиксельного оценивания местоположения точки наилучшего совмещения.

Ключевые слова: последовательность изображений, слежение, корреляционно-экстремальный алгоритм, двумерная интерполяция.

THE IMAGE PROCESSING ALGORITHMS FOR ONBOARD OBJECT DETECTION AND TRACKING SYSTEMS

Y.R. Allanazarova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, chernichka66.yulia@yandex.ru*

The summary. This paper deals with the image processing algorithms based on spatial correlation filtering, which are widely used in onboard systems for the object tracking. It is shown the possibilities to increase precision of the object tracking by switching to subpixel measurements using 2D-interpolation of the similarity function values.

Keywords: image sequences, object tracking, correlation filter, 2D-interpolation.

Введение

В современном мире все чаще для решения различных прикладных задач, таких, как, например, автоматическое обнаружение и оценка параметров объектов [1, 2], распознавание жестов, управление дорожным движением, контроль на производстве и т.п., используют методы компьютерного зрения. В большинстве случаев, прежде чем переходить к высокоуровневому анализу видеопотока, необходимо получить информацию о наблюдаемых в нем объектах и характере их движения. Другими словами, необходимо решить задачи обнаружения и прослеживания движущихся объектов. Обнаружением в данном случае называют процесс установления самого факта присутствия в определенном месте на изображении объекта-интереса. Слежением называют процесс последовательного определения и уточнения координат заданного объекта в каждом следующем кадре. В зависимости от задач и условий применения техническое исполнение решений в области компьютерного зрения может осуществляться на разных платформах: на выделенных серверах, на базе специализированных вычислителей и даже непосредственно на видеокамере [3, 4].

Среди различных задач компьютерного зрения особое место занимают задачи, связанные с бортовыми системами видеослежения. В таких системах датчик изображений и средства организации вычислений устанавливаются на борту летательного аппарата. Сложность решения задач обнаружения и прослеживания объектов в бортовых системах определяется многообразием объектов-интереса и фонов, быстрой сменой ракурсов и освещенности сцены, изменчивостью погодных условий. Установка системы на борту летательного аппарата накладывает, как правило, значительные ограничения на допустимую вычислительную сложность используемых алгоритмов обработки изображений, а быстрое перемещение носителя в пространстве требует минимизации задержек в выдаче результатов обработки.

В данной работе рассматриваются корреляционно-экстремальные алгоритмы измерения координат объектов на изображениях, получившие широкое распространение в бортовых системах видеослежения благодаря своей высокой помехоустойчивости [1, 2]. Более конкретно – решается задача повышения точности измерения координат объектов в корреляционно-экстремальных алгоритмах за счет интерполяции массива значений критериальной функции.

Корреляционно-экстремальные алгоритмы измерения координат объектов на изображениях

Корреляционно-экстремальные алгоритмы реализуют принцип сопоставления наблюдаемого изображения с изображением объекта-интереса, которое называют эталонным изображением, или короче – эталоном [2]. Для измерения местоположения объекта эталон последовательно помещают в каждую точку наблюдаемого изображения (или какой-либо его части, именуемой зоной поиска). Для каждого положения эталона вычисляется числовая характеристика, отражающая, в зависимости от выбора критерия сопоставления, величину сходства или различия фрагмента наблюдаемого изображения и эталона. Точка наилучшего совмещения, определяемая как минимум или максимум выбранного критерия, принимается в качестве местоположения объекта в текущем кадре.

Известны достоинства и недостатки корреляционно-экстремальных алгоритмов [2]. Из достоинств можно отметить хорошую помехоустойчивость. Требования к наличию априорной информации (задание эталона), а также достаточно высокую вычислительную сложность обычно относят к недостаткам.

Следует отметить, что корреляционно-экстремальные алгоритмы используются в бортовых системах видеослежения довольно давно, однако добиться их устойчивой работы во многом удалось за счет разработки эффективных моделей, позволяющих обеспе-

чить своевременную адаптацию эталона к изменениям изображения объекта и условий его наблюдения [2]. Следует учесть, что в независимости от выбранной модели эффективности обновления эталона определяется точностью измерения местоположения объекта в кадре, на которую негативно могут влиять шумы и эффекты пространственной дискретизации.

Способы обновления эталона

При наблюдении объекта-интереса в течении некоторого времени его изображение претерпевает изменения, обусловленные как собственным движением объекта, так и перемещением в пространстве системы наблюдения. Если не прибегать к специальным мерам, то через какое-то время текущее изображение объекта будет существенно отличаться от эталона, что может привести к потере объекта. Другими словами, необходимо своевременно учитывать все изменения условий наблюдения и соответственно им обновлять эталонное изображение объекта.

Простейшим способом обновления эталона является его покадровая смена. После обработки очередного кадра текущий эталон заменяют на фрагмент наблюдаемого изображения, взятый относительно точки наилучшего совмещения [2]. Однако такой способ на практике не слишком эффективен из-за того, что процесс измерения координат путем вычисления экстремума целевой функции неизбежно сопровождается ошибками, обусловленными наличием шума и эффектами пространственной дискретизации. При покадровой смене эталона ошибки имеют свойство накапливаться, что приводит к случайным блужданиям объекта в эталоне, а в некоторых случаях – к постепенному уходу объекта из эталона.

Существуют несколько подходов для борьбы с этим явлением. Первый подход заключается в сравнении глобального экстремума целевой функции с некоторой пороговой величиной для проверки целесообразности смены эталонного изображения, благодаря этому появляется возможность сокращения числа смен эталонного изображения.

Более эффективным методом является усреднение во времени изображений объекта, что может быть реализовано, например, при помощи экспоненциального сглаживания эталона [2]. Параметр экспоненциального фильтра позволяет управлять скоростью обновления в зависимости от изменчивости объекта и условий наблюдения. Из достоинств этого метода отметим малую чувствительность к ошибкам дискретизации, в отличие от алгоритмов с покадровой сменой эталона.

Модификация корреляционно-экстремальных алгоритмов для обеспечения субпиксельной точности измерения координат

В данной работе ставится задача улучшения точности корреляционно-экстремальных алгоритмов измерения координат объектов на изображении за счет двумерной интерполяции массива значений целевой функции. В рамках данного подхода, как и в случае базового, выполняется поиск точки наилучшего совмещения текущего изображения и эталона, соответствующей экстремуму целевой функции. Затем в окрестности этого экстремума осуществляется переход к более точной пространственной сетке, и уже на этой новой сетке выполняется уточнение местоположения экстремума [5].

В рамках проделанной работы проведены эксперименты, направленные на оценку влияния способа и параметров интерполяции на точность измерения координат объекта-интереса в корреляционно-экстремальных алгоритмах. Экспериментальные исследования проводились с использованием реальных видеосюжетов, сформированных при помощи датчика с узким полем зрения в условиях наблюдения объектов интереса на удалении 3-

5 км. Объекты-интереса (автомобили) наблюдались на сложном фоне (пересеченная местность, городской ландшафт) в присутствии посторонних (мешающих) объектов.

Для оценки точности измерения координат объектов были выполнены промеры, в ходе которых для каждого кадра вручную отмечалось положение центра объекта. В дальнейшем эти данные использовались для оценки таких параметров, характеризующих точность алгоритма измерения координат, как среднее значение Intersect of Union (IoU) и СКО ошибок измерения координат.

Критерий IoU представляет собой отношение площади пересечения этих прямоугольников к площади их объединения:

$$IoU = \frac{Area(A \cap B)}{Area(A \cup B)}. \quad (1)$$

Понятно, что в идеальном случае IoU должен быть близок к 1. На практике, значения близкие к 1 считаются отличными, значения порядка 0,7-0,8 – хорошими, и значения <0,4 считаются неудовлетворительными.

Также подсчитывалось число срывов слежения за объектами, обусловленное грубыми ошибками алгоритмов.

Результаты экспериментов показывают, что применение двумерной интерполяции массива значений целевой функции повышает точность измерения координат объектов и положительно сказывается на предотвращении срывов слежения. При этом рост вычислительных затрат в сравнении с базовым вариантом алгоритма, не предусматривающим интерполяции, оказывается несущественным.

Библиографический список

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В. Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов. // Цифровая обработка сигналов. – 2006. – №2. – С. 45-51.
2. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.: ил.
3. Алпатов Б.А., Ерохин Д.Ю., Ершов М.Д. Обработка изображений в задачах видеоаналитики // К.Э.Циолковский - 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика: 7-я Международ. науч.-техн. конф. – Рязань: РГРТУ, 2017. – С. 360-362.
4. Ерохин Д.Ю. Ершов М.Д. Алгоритмы компьютерного зрения для автоматического подсчета пешеходов на базе интеллектуальной видеокамеры // Новые информационные технологии в научных исследованиях: Материалы XXII Всеросс. науч.-техн. конф. студ., молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2017. – С.212-213.
5. Деренченко Л.П., Троицкий В.И. Повышение точности корреляционно-экстремальных систем методом интерполяции целевой функции // Вопросы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – М., 1992. – С. 16-18.

УДК 004.932; ГРНТИ 47.51.39

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ПАССИВНОЙ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

М.А. Смирнов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, mishasm213@gmail.com

Аннотация. В работе рассматриваются методы определения дальности до объекта для пассивной стереоскопической системы. Приводятся их основные особенности, достоинства и недостатки. Исследуется разработанный алгоритм, позволяющий определить диспаратность на основе разностной корреляционной функцией и на основе применения особых точек.

Ключевые слова: стереопара, диспаратность, корреляционная функция, особые точки.

THE OBJECT DISTANCE ESTIMATION ALGORITHM FOR A PASSIVE STEREO SCOPIC SYSTEM

M.A. Smirnov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, mishasm213@gmail.com

The summary. The paper discusses methods for determining the distance to an object for a passive stereoscopic system. Their main features, advantages and disadvantages are given. The developed the object distance estimation algorithm is researched.

Keywords: stereopair, disparity, template matching, feature detection.

На сегодняшний день системы технического зрения в задачах определения пространственных параметров объектов наблюдения получают все большее распространение. Они используются в различной специализированной технике, находят свое применение в задачах определения параметров искусственных объектов в наземном, воздушном и космическом пространстве, могут применяться для борьбы с разными стихийными бедствиями, а также незаменимы в техническом зрении роботизированных систем и т.д. Комплексные стереоскопические системы можно подразделить на системы, работающие в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазоне оптического излучения. Системы работающие в видимом диапазоне с точки зрения конструктивной реализации являются простыми и недорогими, но светотехническая обстановка системы может значительно влиять на их работоспособность. К этому классу обычно относят телевизионные видеосистемы. Задачу определения параметров объектов, находящихся на обширной территории, можно решить на базе оптико-электронной стереосистемы [1]. Расстояние от объекта до стереосистемы, состоящей из двух разнесенных на определенное расстояние цифровых камер, работающих в синхронном режиме, определяется величиной смещения объекта на изображениях, полученных с этих камер [2].

Существуют два основных метода получения стереопары изображений – параллельный и направленный методы фотосъемки. Пример параллельной стереосистемы приведен на рисунке 1. Стереосистемы такого типа позволяют определить дальность до объекта наблюдения, а также дают возможность построить карту глубины всей наблюдаемой сцены.

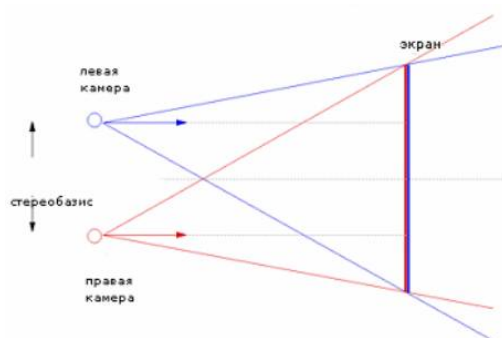


Рис. 1. Параллельное расположение камер стереосистемы

Левая и правая камера одновременно формируют два изображения $l_1(i, j, n)$ и $l_2(i, j, n)$ одинакового размера. На основании этих изображений на n -м кадре вычисляется дальность до объекта по формуле [2]:

$$D(n) = \frac{B * Z}{2 * Q(n) * \operatorname{tg}\left(\frac{f}{2}\right)}, \quad (1)$$

где B – база стереосистемы в метрах;

Z – разрешение изображения по горизонтали в пикселях;

$Q(n)$ – значение диспаратности в пикселях, вычисленное на n -м кадре;

f – ширина поля зрения камеры в градусах.

В основе любой стереосистемы лежит некоторый метод установления соответствия между точками или фрагментами двух изображений стереопары отвечающих одним и тем же элементам сцены [2]. Для решения этой задачи могут использоваться различные методы на основе особых точек, корреляционных функций, векторов движения и т.д.

Корреляционные функции

Основой данного подхода является поиск требуемого объекта на стереопаре изображений по определенному эталону с использованием корреляционной функции. Классический корреляционно-экстремальный алгоритм является частным случаем алгоритма поиска по критерию максимума апостериорной плотности в пространстве из координат центра объекта по горизонтальной и вертикальной осям. Существует несколько видов корреляционных функций, использующихся для нахождения соответствия между участком изображения и некоторым эталоном.

Корреляционная функция, представляющая собой квадрат разности, имеет вид [3]:

$$E(i, j) = \sum_{i_0, j_0}^{i_w, j_h} \sum_{i_k, j_k} (K(i_k, j_k) - Q(i + i_w, j + j_k))^2, \quad (2)$$

где $E(i, j)$ – массив результатов, полученных по итогам корреляционного наложения одного изображения на другое с использованием корреляционной функции;

i_k, j_k, i_w, j_h – индексы, предоставляющие начальный и конечный элементы массива результатов;

i, j – индексы, указывающие позицию в массиве результатов, в котором будет помещено значение, полученное в результате корреляционного наложения некоторого эталона на исходное изображение;

i_k, j_k – индексы, указывающие на элемент эталона;

$i + i_k, j + j_k$ – индексы элемента исходного массива, найденные путем сложения индексов массива результатов и эталона, показывает последовательное смещение эталону относительно исходного изображения.

Каждое из значений массива результатов (2) показывает степень соответствия участка рассматриваемого изображения эталону. Для разностной корреляционной функции идеальным совпадением будет минимальное значение. Преимущество разностной критериальной функции – отсутствие в них операций умножения, которые являются вычислительно затратными для корреляционных методов. Но при малых отношениях контраста объекта относительно фона к среднеквадратическому отклонению шума, присутствующего на изображении, точность разностных функций уступает корреляционным [4].

Особые точки

Локальная особая точка изображения – это точка с характерной (особой) окрестностью, которая имеет некие признаки, существенно отличающие её от основной массы точек [5]. Это означает, что особая точка может быть, например, точкой локального максимума или минимумом линии интенсивности, концом линии или угловой точкой. Из этого следует, что число локальных точек может сильно отличаться от общего числа точек изображения. Задача представления изображений совокупностью особых точек может быть сведена к поиску отличных по яркости областей. Среди методов выделения особых точек можно отметить SIFT (Scale Invariant Feature Transform) и SURF (Speeded Up Robust Features).

В основе метода SIFT лежит идея о том, что особые точки на изображении можно обнаружить с помощью построения пирамиды Гауссианов и пирамиды разностей Гауссианов. Гауссианом называется изображение [5]:

$$T(x, y, \sigma) = P(x, y, \sigma) * Q(x, y), \quad (3)$$

где T – значение гауссиана в точке с координатами (x, y) на исходном изображении;

σ – радиус размытия;

P – гауссово ядро;

Q – значение яркости точки с координатами (x, y) .

Разностью гауссианов называется изображение, полученное путём попиксельного вычитания двух гауссианов с разными значениями радиуса размытия [5]. Эта операция используется в процессе поиска локальных экстремумов, для этого разность гауссианов вычисляется для различных октав изображения в пирамиде гауссианов. Далее необходимо проверить являются ли найденные точки экстремумов особыми точками. Для этого нужно сравнить интенсивность найденных экстремумов с пороговым значением. Это можно осуществить с помощью разложения масштабируемого пространства в ряд Тейлора. Если значение интенсивности экстремума меньше порогового, то точка не подходит на роль особой. Также можно учитывать то, что точки, лежащие на границе какого-либо объекта, имеют большой изгиб одной из компоненты второй производной матрицы Гессе вдоль границы объекта и малый изгиб в перпендикулярном направлении.

Метод SURF имеет общие принципы работы с SIFT, однако аппроксимация размытия Гаусса с помощью фильтров квадратной формы позволяет увеличить быстродействие. В SURF используется метод выделения пятен (blob detector) основанный на использовании матрицы Гессе, образованной вторыми частными производными функции яркости [6]. Матрица имеет следующий вид [6]:

$$T(i, \sigma) = \begin{pmatrix} T_{xx}(i, \sigma) & T_{xy}(i, \sigma) \\ T_{xy}(i, \sigma) & T_{yy}(i, \sigma) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где i – точка изображения с координатами (x, y) ;

σ – масштаб фильтра;

$T_{xx}(i, \sigma)$ – свертки аппроксимации второй производной Гауссова ядра с исходным изображением в интегральной форме.

В SURF определитель матрицы Гессе используется для нахождения масштаба изображения и для поиска точек с некоторыми локальными изменениями вокруг этой точки. На основе этого выбираются точки, для которых этот определитель максимален.

Разработанный алгоритм определения дальности до объекта

Для решения задачи определения дальности до объекта был разработан алгоритм, в котором применяются два способа определения диспаратности. Первый способ основан на использовании детектора и дескриптора особых точек к стереопаре изображений, получен-

ных пассивной стереоскопической системой. Далее производится оценка диспаратности между пикселями объекта интереса на основе найденных совпадающих пар особых точек на двух изображениях. Второй способ базируется на вычислении разностной корреляционной функции. С помощью найденных оценок диспаратности производится расчет по формуле (1) расстояния от объекта интереса до стереоскопической системы и сравнивается с эталонным значением, которое присутствует в исходном наборе данных. Исходными данными является свободно распространяемый набор данных [7], специально разработанный для проверки алгоритмов стереозрения. На рисунке 2 приведен пример стереопары изображений.

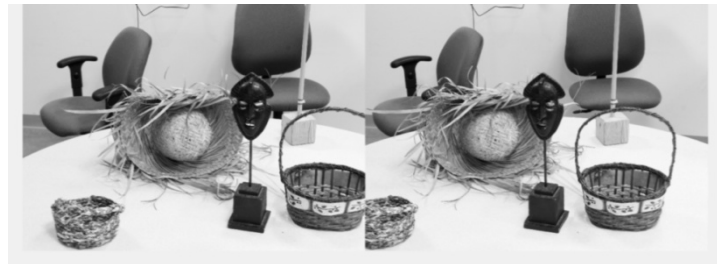


Рис. 2. Пример стереопары изображений

Экспериментальные исследования

В качестве критерия оценки качества разработанного алгоритма с двумя способами определения диспаратности выступала величина, определяющая ошибку измерения расстояния. Данная величина рассчитывается как разность эталонной и измеренной дальности в метрах. В таблице 1 представлены абсолютная и относительная ошибки оценивания расстояния от объекта интереса до стереосистемы для 15 стереопар.

Таблица 1. Ошибки оценивания расстояния до объекта интереса

номер стереопары	Абсолютная ошибка оценки расстояния, в метрах.		Относительная ошибка оценки расстояния, в процентах.	
	Способ на основе особых точек	Способ на основе корреляционной функции	Способ на основе особых точек	Способ на основе корреляционной функции
1	0.1	0.12	8.69	10.42
2	0.15	0.16	14.61	15.28
3	0.11	0.14	8.76	10.73
4	0.18	0.18	18.75	18.33
5	0.20	0.23	14.22	15.67
6	0.14	0.14	6.13	6.32
7	0.11	0.14	9.48	11.72
8	0.15	0.19	13.23	16.44
9	0.13	0.14	14.72	15.71
10	0.08	0.09	11.11	12.15
11	0.15	0.15	13.79	14.26
12	0.11	0.11	8.64	8.96
13	0.17	0.18	17.44	17.82
14	0.19	0.20	15.87	16.92
15	0.18	0.21	18.36	21.34

Анализируя таблицу 1 можно сделать вывод, что в задаче определения дальности до объекта для пассивной стереоскопической системы на 15 стереопарах изображений подход, основанный на использовании особых точек для оценки диспаратности между пикселями объекта интереса, показал приемлемый результат. Подход, основанный на разностной корреляционной функции, на некоторых стереопарах показал значение ошибки оценки расстояния до объекта немного выше, чем подход на особых точках.

Вывод

При выполнении работы был выполнен обзор методов определения расстояния до объекта с помощью стереопары, а также дан краткий вывод по каждому из них. Также был программно реализован алгоритм определения дальности до объекта среде MATLAB. Проведены экспериментальные исследования алгоритма стереозрения при различных методах расчета диспаратности: с использованием особых точек и разностной корреляционной функцией. Наилучший результат, с точки зрения ошибки оценивания расстояния до объекта интереса, показал способ с использованием особых точек. Метод с разностной корреляционной функцией также показал приемлемый результат. Исследования проводились на свободно распространяемом наборе данных. Исследования показали, что алгоритм способен эффективно выполнять свои задачи и позволяет определить расстояние до объекта интереса, не превышая определенной погрешности.

Библиографический список

1. Старовойтов, Е. Современные технические средства пассивной оптической локации / Е.А. Старовойтов // Современная электроника. - 2011, № 2. - С. 40 - 43.
2. Корепанов С.Е., Смирнов С.А., Стротов В.В. Алгоритм определения дальности до объекта для стереоскопической системы технического зрения реального времени // Цифровая обработка сигналов. - 2011, №3. - С. 57 - 61.
3. Bradski G., Kaehler Adrian. Learning Open CV. O'Reilly. - 2008. - 557 p.
4. Исследование методов обработки изображений с помощью пакета IMAGE PROCESSING TOOLBOX: Методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. акад.; Сост. Б.А. Алпатов, О.Е. Балашов, К.А. Бохан, А.А. Катаев, В.С. Муравьев, С.И. Муравьев, А.А. Селяев, В.В. Стротов; Под ред. Б.А. Алпатова. Рязань, -2005. -72 с.
5. David G. Lowe. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. - 2004. pp. 91 - 110.
6. Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool, "SURF: Speeded Up Robust Features" // Proceedings of the ninth European Conference on Computer Vision. - 2006. pp. 404 - 417.
7. D. Scharstein, H. Hirschm, Y. Kitajima1, G. Krathwohl1. High-Resolution Stereo Datasets with Subpixel-Accurate Ground Truth. - 2014 (URL: <http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2014>).

УДК 004.023; ГРНТИ 50.41

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.В. Белов, А.К. Лопатин

*Государственный социально-гуманитарный университет,
Российская Федерация, Коломна, ak_lopatin@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматривается решение задачи синтеза алгоритма обработки изображений изделий, оптимального по двум параметрам: точности обработки и быстродействию. Предлагаемое решение осуществляет одновременную структурную и параметрическую оптимизацию.

Ключевые слова: генетический алгоритм, обработка изображений, множество Парето.

THE SOLUTION OF THE OPTIMIZATION IMAGE'S PROCESSING PROBLEM

V.V. Belov, A.K. Lopatin

*State Social Humanities University,
Russia, Kolomna, ak_lopatin@mail.ru*

The summary. The paper considers the solution of the problem of synthesis of an algorithm for processing product inventions that is optimal for two parameters: processing accuracy and speed. The proposed solution provides simultaneous structural and parametric optimization..

Keywords: genetic algorithm, image processing, Pareto set.

В настоящей статье рассматриваются некоторые аспекты задачи выбора лучшего варианта, актуальность которых возникла в процессе решения задачи синтеза оптимальной цепочки операторов, образующих алгоритм обработки изображений изделий, находящихся на конвейерной ленте, с целью квалификации их качества [1].

Из-за сложности реальных изображений, а также связанной с ними избыточности изменчивости формы объектов и др. проблематичными остаются возможности построения автоматических систем анализа изображений и распознавания объектов на них.

Особенно важна для применения в реальном масштабе времени разработка автоматических систем анализа изображений, представляющих собой перемещающиеся объекты на сравнительно неподвижном фоне, которые в дальнейшем будем называть «движущимися изображениями».

Применение систем, использующих анализ таких изображений требует распознавания подвижных элементов в реальном масштабе времени с высокой эффективностью (большая вероятность правильного обнаружения при малой вероятности ложной тревоги).

Единственным алгоритмом выделения движущихся объектов долгое время являлась межкадровая разность. Однако существуют ситуации [2], когда использование межкадровой разности приводит к существенным погрешностям или не позволяет определить движение объекта.

Ещё одной особенностью движущихся изображений может являться наличие смаза, причём в большинстве случаев движущиеся объекты, которые приводят к смазу на изображении должны быть распознаны как можно скорее и с наилучшими характеристиками. В силу этого необходимо иметь быстродействующие алгоритмы распознавания объектов также в автоматическом режиме.

Выбор математического аппарата для описания процесса обработки

Поскольку любой кадр изображения является реализацией случайного поля, а системы формирования и обработки изображений в первом приближении линейны, для описания процессов обработки имеет смысл использовать в качестве характеристики энергетический спектр (ЭС):

$$S^3 = |\dot{S}(\omega_x, \omega_y, \omega_t)|^2,$$

где ω_x, ω_y – пространственные частоты;

ω_t – временная частота;

$\dot{S}(\omega_x, \omega_y, \omega_t)$ – пространственно-временной спектр изображения, в каждом кадре зависящий только от двух пространственных частот.

При перемещении объекта по полю изображения меняется его фазопространственный спектр $\Phi(\omega_x, \omega_y)$, в то время как амплитудно-частотный спектр остаётся неизменным при условии, что не меняется форма объекта и его освещённость. Допуская, что краевые эффекты отсутствуют (изображение имеет бесконечную протяжённость по пространственным координатам), можно считать, что невозможно определить движение объекта по энергетическому спектру.

Если считать, что изображение имеет конечные размеры, то при перемещении объекта энергетический спектр будет меняться, и по его изменению можно определить движение объекта.

Характеристикой, наиболее приспособленной для определения местоположения объекта, традиционно считался фазовый спектр. К примеру, фазовым спектром блестящей точки с координатами (x_0, y_0) является $\Phi(\omega_x, \omega_y) = x_0\omega_x + y_0\omega_y$, откуда следует $x_0 = \frac{\partial \Phi(\omega_x, \omega_y)}{\partial \omega_x}$,

$y_0 = \frac{\partial \Phi(\omega_x, \omega_y)}{\partial \omega_y}$. Однако для объектов более сложных, чем точка такой подход не всегда можно использовать. Кроме того, фазовый спектр не обладает однозначностью, поэтому весьма ограничен в возможностях своего применения [3].

Устранить необходимость развёртывания фазового спектра и сохранить его возможность оценки местоположения объекта можно, введя частные фазоэнергетические спектры

$$\begin{cases} I_x(\omega_x, \omega_y) = \frac{\partial \Phi(\omega_x, \omega_y)}{\partial \omega_x} S^э \\ I_y(\omega_x, \omega_y) = \frac{\partial \Phi(\omega_x, \omega_y)}{\partial \omega_y} S^э \end{cases}$$

Поскольку изображение носит дискретный характер, то имеет смысл использовать нормированные частоты $\varphi_x, \varphi_y \in [-\pi; \pi]$.

Существенной особенностью является факторизуемость поставленной задачи, т.е. разности частных фазоэнергетических спектров можно просматривать отдельно по строкам и столбцам. Это позволяет строить модели рассматривая разность частных фазоэнергетических и энергетических спектров только по строкам.

Для частного энергетического спектра удобно использовать модель

$$S^э(\varphi_x) = \sum_{k=-M}^M a_k^2 + 2 \sum_{k=1}^{2M} \sum_{l=-M}^M a_k a_{k+l} \cos k\varphi_x,$$

а для частного фазоэнергетического спектра – модель вида

$$I_x(\varphi_x) = \sum_{k=-M}^M k a_k^2 + 2 \sum_{k=1}^{2M} \sum_{l=-M}^M (k+l) a_k a_{k+l} \cos k\varphi_x,$$

где a_k – яркость пикселя изображения; $[-M; M]$ – строка изображения.

Если изображение неподвижно, то межкадровые разности одноимённых спектров будут равны нулю. Недостатком использования межкадровых разностей частотных характеристик является их чувствительность к шумам.

Для устранения этого недостатка предлагается использовать следующую схему предварительной обработки изображений:

- 1) выравнивание гистограммы изображения;
- 2) фильтрация (сглаживание) изображения;
- 3) выделение границ путем вычисления градиента, т.е. получение градиентного (контурного) изображения;
- 4) уточнение границ – процесс минимизации толщины контуров, имеющий многочисленные альтернативные способы реализации, простейший из которых представляет собой совокупность следующих процедур:

4.1) закрытие – последовательное применение дилатации (расширения) и эрозии (разъедания), приводящее к удалению в контурах разрывов длиной до двух пикселей;

4.2) удаление одиночных пикселей – пиксели равные 1, все 8 соседей которых равны 0, заменяются на 0.

Использование конкретного способа уточнения границ принципиального значения не имеет.

Шаги 1 и 2 приведённой выше схемы реализуются с помощью генетического алгоритма, подробно описанного в работе [4].

Особенности генетического алгоритма

1. Осуществление одновременно и параметрическую, и структурную идентификацию формируемых цепочек.

2. а) в процедуре каждой мутации при формировании очередной цепочки операторов жестко фиксируется последовательность операций, мутируются только операторы, реализующие операцию; б) операция выравнивания гистограммы изображения может выполняться только один раз; в) операция фильтрации может повторяться, при этом допускается как использование одного и того же оператора, так и применение различных операторов фильтрации; г) операция выделения границ может выполняться только один раз; д) операция уточнения границ может выполняться только один раз. Все операции, кроме выравнивания гистограммы, являются обязательными.

3. а) оценивается не только фитнес-функция (показатель точности восстановления контура изделия – коэффициент нормированной кросс-корреляции эталонного фазочастотных спектра изображения изделия-эталона и фазочастотного спектра изображения тестируемого изделия), но и показатель трудоемкости формируемых цепочек операторов; б) формируется множество Парето с ограничением, – содержащее сведения о цепочках, удовлетворяющих требованию к точности восстановления контура изделия, и, одновременно, не доминирующих друг друга по точности и трудоемкости.

Выполнив формирование очередного поколения цепочек, главный поток генетического алгоритма передает управление потоку, реализующему цепочки сформированного поколения, который не только выполняет операторы цепочек, но и оценивает результаты их работы – точности восстановления контура и длительности работы всех цепочек. Эти результаты передаются в поток, который ведет упорядоченное множество Парето с ограничением, используя утверждения теорем, сформулированных и доказанных в работе [5].

Основания выбора оптимальной цепочки

Теорема 1. Множество Парето с двумя критериями качества элементов не может содержать элементы с одинаковыми значениями однопозиционных критериев.

Теорема 2. Сортировка элементов множества Парето с двумя критериями качества элементов по одному из критериев автоматически приводит к обратной сортировке по второму критерию, если критерии имеют одинаковое качественное направление, и к прямой сортировке по второму критерию, если критерии качественно разнонаправлены

Теорема 3. Процедура реализации лексикографического принципа выбора единственного лучшего варианта в условиях многокритериального оценивания качества вариантов с числом частных критериев q безусловно результативна (завершаема). При этом количество примененных частных критериев не превышает $q - 1$.

Совокупным критерием качества, объединяющим качественно положительный (качество восстановления границ) и качественно отрицательный (время работы) критерии является:

$$K_i^{[M2+]} = \frac{\bar{K}_{i,1}^{[+]} - \bar{K}_{1min}^{[+]}}{\bar{K}_{i,1}^{[-]} - \bar{K}_{1min}^{[-]}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Семантически интегральный критерий (1) представляет собой прирост «производительности»: он показывает, – насколько увеличивается (по отношению к минимальному значению) точность вычислений при увеличении на единицу времени вычислений. Верхний ин-

декс $[M2+]$ символизирует мультипликативность, двухкритериальность и тот факт, что свертка создана для поиска максимума прироста «производительности» (в числителе формулы размещено приращение качественно положительного частного критерия).

Применение свертки (1) при решении задачи синтеза оптимальной цепочки алгоритмов для вычисления градиентных изображений привело к получению следующего наблюдения: максимум $K_i^{[M2+]}$ – «тяготеет» к конечной части упорядоченного множества Парето. Предпочтительными оказываются алгоритмы со значениями частных критериев, близкими к максимальным значениям.

По завершении работы основного потока генетического алгоритма управление передается методу принятия решения о «лучшей» цепочке из сформированного множества Парето:

1. Частные критерии ранжируются по своей важности (значимости) на основе субъективного представления ЛПР. Для этого могут использоваться как методы прямого ранжирования (критериям непосредственно назначаются либо ранги, либо баллы, выражающие их важность), так и методы сравнительного анализа, позволяющие найти ранги косвенно, – по результатам парных сравнений частных критериев. Парные сравнения имеют явное предпочтение в тех случаях, когда критерии могут быть организованы в иерархию.

2. Вариант, лучший по самому значимому (главному) критерию, объявляется лучшим.

3. Если по главному критерию лучшими оказываются несколько вариантов, то далее используется лексикографический принцип: среди результатов выбора по первому критерию осуществляется выбор по второму по значимости критерию; при необходимости в использование вовлекаются последующие критерии в порядке убывания их значимости.

Таким образом условно решение задачи можно поделить на два этапа, выполняющихся последовательно:

- 1) генерация популяции (набор композиций алгоритмов);

- 2) формирование и ведение множества Парето «лучших» по совокупному критерию особей (композицию оптимальную в смысле критерия 1).

Поскольку во время работы генетического алгоритма поколения генерируются последовательно, то также последовательно осуществляется ведение множества Парето. При этом лучшие композиции из множества переходят в следующее поколение генетического алгоритма.

Библиографический список

1. Белов В.В., Лопатин А.К. Применение механизмов эвристического поиска для формирования цепочек алгоритмов, улучшающих градиентные изображения // Вестник РГРТУ. 2018. № 66–1. С. 78–89. DOI: 10.21667/1995-45652018-66-4-1-78-89.
2. Богословский А.В., Жигулина И.В., Копылов О.Е., Яковлев В.А. Биологически подобные алгоритмы для определения движения в системах технического зрения // Радиотехника. 2010. №5. С.41–45/
3. Жигулина И.В. Алгоритм развёртывания фазового спектра видеосигнала изображения для определения параметров движения объектов // Антенны. 2010. №11. С.62–64.
4. Белов В.В., Лопатин А.К. Применение генетических алгоритмов для формирования цепочек операторов, направленных на улучшение градиентных изображений // Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы Материалы IV Международной научно-практической конференции. 2017. С. 57–61.
5. Белов В.В., Лопатин А.К. Теорема о конечности лексикографической процедуры // В сборнике: Математическое и программное обеспечение вычислительных систем Межвузовский сборник научных трудов. Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2019. С. 25–31.

УДК 519.25; ГРНТИ 50.43.15

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ ПРИ ТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

В.В. Миронов¹, С.В. Труханов^{2*},

¹ Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, mironov.v.v@rsreu.ru

² Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - ОКБ «Спектр»,
Российская Федерация, Рязань, serge_tsv@mail.ru (*главный автор),

Аннотация. В публикации описывается подход к решению задачи идентификации объектов земной поверхности по гиперспектральным снимкам с использованием алгоритмов идентификации на базе математического аппарата нечёткой логики. Приводятся результаты исследования работы алгоритмов при обработке данных с КА «Ресурс-П» №1 и №2.

Ключевые слова: идентификация объектов, гиперспектральная характеристика, гиперспектральная съёмка, нечеткая логика.

APPLICATION OF THE MATHEMATICAL APPARATUS FUZZY LOGIC IN THEMATIC DATA PROCESSING SPACE HYPER SPECTRAL SHOOTING

В.В. Миронов¹, С.В. Труханов^{2*},

¹ Ryazan State Radio Engineering University named by V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, mironov.v.v@rsreu.ru

^{2*} АО «RKT «Progress» – ОКБ «Spectr»,
Russia, Ryazan, serge_tsv@mail.ru (*correspondence author);

The summary. The publication describes an approach to solving the problem of identifying objects of the earth's surface using hyperspectral images using identification algorithms based on the mathematical apparatus of fuzzy logic. The results of the study of the operation of the algorithms when processing data from the Resurs-P spacecraft No. 1 and No. 2 are presented.

Keywords: object identification, hyperspectral characteristic, hyperspectral shooting, fuzzy logic.

Введение

Разработка отечественных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием аппаратуры гиперспектральной съёмки выявило необходимость создания программных средств обработки данных с этой аппаратуры [1-3].

Наряду с решением задач по созданию стандартных продуктов выходной информации с космических аппаратов (КА) – панхроматических и цветосинтезированных снимков высокого разрешения, цифровых моделей рельефа, решаются задачи создания средств тематической обработки нового вида информации – гиперспектральных данных.

Так, в 2016 г., филиалом АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара) – ОКБ «Спектр» (г. Рязань) совместно с Рязанским государственным радиотехническим университетом имени В.Ф. Уткина (РГРТУ) был создан и внедрен в штатную линейку средств обработки данных программный комплекс тематической обработки данных гиперспектральной съёмки, поступающих с российского космического аппарата «Ресурс-П».

Данный программный комплекс позволяет создавать тематические карты растительного покрова на базе индексов растительности, а также выявлять антропогенные объекты на гиперспектральных снимках с помощью алгоритмов идентификации (распознавания), применяющих математический аппарат нечёткой логики [4, 5].

Метод идентификации

Новый метод идентификации состоит из следующих шагов.

Шаг 1. С обработанного (радиометрическая коррекция, геопривязка, атмосферная коррекция и др.) и сегментированного гиперспектрального снимка выделяются гиперспек-

тральные характеристики (ГСХ) интересующих сегментов – наземных объектов. ГСХ представляет собой набор значений коэффициентов спектрального отражения (КСО) в узких соприкасающихся спектральных диапазонах.

Шаг 2. Затем исследуемые ГСХ сравниваются с эталонными характеристиками из доступных спектральных библиотек [6].

Сравнение ведётся с использованием модели нечёткой линейной регрессии (НЛР), в которой процесс идентификации описывается уравнением:

$$Y(x) = A_1 x + A_0, \quad (1)$$

где $A_1 = \langle a_1, c_1, d_1 \rangle$ и $A_0 = \langle a_0, c_0, d_0 \rangle$ – треугольные нечеткие числа, соответствующие параметрам k и b уравнения классической линейной регрессии (КЛР) ($y = kx + b$). Под треугольным нечетким числом A принято понимать упорядоченную тройку действительных чисел $\langle a, c, d \rangle$, ($c < a < d$), через которые его функция принадлежности $\mu_A(x)$ определяется как:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} (x - c)/(a - c), & \text{если } x \in [c, a], \\ (x - d)/(a - d), & \text{если } x \in [a, d], \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Шаг 3. Находя оптимальные значения $a_0, c_0, d_0, a_1, c_1, d_1$ путем решения соответствующей задачи квадратичного программирования рассчитываются значения нечётких мер подобия для наборов исследуемой и эталонных ГСХ, вписывающихся в регрессионный коридор используемой модели НЛР [5, 7].

Шаг 4. По полученным значениям мер подобия определяется степень сходства между эталоном и исследуемым объектом.

Результаты применения и вывод

При многократной практической обработке гиперспектральных снимков с КА «Ресурс-П» №1 и №2 с помощью алгоритмов идентификации на базе классических [8] и нечётких мер подобия [9] и при усреднении результатов методами математической статистики [10] было показано, что применение разработанного математического аппарата нечёткой линейной регрессии в комплексе с классическими алгоритмами позволяет повысить эффективность идентификации объектов на поверхности Земли на 7,2 %.

Выигрыш в 7 с лишним процентов, как известно специалистам, существенен для рассматриваемого класса задач. Тем самым реальные эксперименты позволяют сделать вывод об эффективности предложенной методики

Одновременно вызывает интерес дальнейшее развитие исследований в области применения нелинейных математических моделей нечеткости (из эталонной библиотеки нелинейных моделей) при идентификации объектов Земной поверхности по данным гиперспектральной съемки.

Библиографический список

1. Еремеев В.В. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с.

2. Ахметов Р.Н., Везенов В.И., Еремеев В.В., Стратилатов Н.Р., Юдаков А.А. Основные направления исследований по созданию технологий обработки данных гиперспектральной съемки Земли // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Гиперспектральные приборы и технологии». Красноярск, 2013. С. 23-25.
3. Миронов В.В. Муртазов А.К., Усовик И.В. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. Монография. Изд. 2-е исправленное и дополненное / под науч. ред. проф. Миронова В.В. - Рязань: Book Jet. 2018. 313 с.
4. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
5. Труханов С.В. Алгоритмы идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки Земли с использованием нечёткой линейной регрессии. Дис. канд. техн. наук: 05.13.01. Рязань, 2016. 153 с.
6. Balridge A.M., Hook S.J., Rivera G. The ASTER spectral library version 2.0// Remote Sensing of Environment 113 (2009). P.711–715.
7. Demidova L., Trukhanov S. Objects Hyperspectral Features Identification on the Base of Fuzzy Linear Regression and Fuzzy Similarity Measures // Contemporary Engineering Sciences. 2015. Vol. 8.no.19. P. 885-900.
8. Григорьева О.В. Методика идентификации нефтезагрязнений почвогрунтов по данным много- и гиперспектральной оптико-электронной аэросъемки. Дис. канд. техн. наук: 25.00.36. С-Пб, 2009. 265 с.
9. Mendel N., J.M., Type-2 Fuzzy Sets and Systems and Overview // IEEE Computational Intelligence Magazine 2 (1). – P.20-29. – February 2007.
10. Натан А. А., Горбачёв О. Г., Гуз С. А. Математическая статистика. М.: МЗ Пресс, 2005. 160 с.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СЛЕЖЕНИЯ, ВЫПОЛНЯЕМОГО НА ОСНОВЕ ПИРАМИДАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ЛУКАСА-КАНАДЕ, В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

**П.В. Бабаян^а, С.А. Буйко^б, Л.А. Вдовкин^б, М.Д. Ершов^а, В.С. Муравьев^а,
А.М. Орехова^а, А.В. Сиренко^б, С.А. Смирнов^а**

^а*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, rvbradio@yandex.ru*

^б*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
Российская Федерация, Нижегородская обл., Саров*

Аннотация. Одним из эффективных способов повышения качества отслеживания объектов является совместное использование базовых алгоритмов слежения, которое объединяет их преимущества и устраняет недостатки. Для совместного использования алгоритмов требуется оценка эффективности каждого базового алгоритма в реальном времени. В этой работе мы предлагаем алгоритм оценки эффективности алгоритма слежения за объектами, основанный на пирамидальной реализации алгоритма Лукаса-Канаде (LKP).

Ключевые слова: комплексирование, слежение, пирамидальный алгоритм Лукаса-Канаде.

Введение

В работе [1] представлен подход к повышению качества слежения на основе использования двух типов метрик работоспособности. Первый тип (количественные характеристики работоспособности - КХР) предполагает использование эталонной информации о траектории движения объекта, его форме и размерах. Второй тип метрик (признаки работоспособности – ПР) вычисляются на основе информации, получаемой в процессе обработки наблюдаемой видеопоследовательности. Помехоустойчивое слежение реализуется при этом путем выполнения следующих этапов.

1. В процессе слежения вычисляются ПР для каждого из базовых алгоритмов.
2. На основании найденной заранее связи между вычисленными ПР и КХР определяются КХР для каждого из алгоритмов.
3. На основе сравнения КХР производится выбор алгоритма слежения, обеспечивающего наилучшее значение КХР.

Слежение на основе пирамидального алгоритма Лукаса-Канаде

В данной работе исследовались возможности оценивания качества работы для алгоритма слежения в котором на первом кадре видеосюжета выполнялись следующие операции:

1. Выделение границы объекта в заданной области изображения путем использования метода наращивания областей.

2. Выбор на границе объекта опорных точек с некоторым шагом. В данной работе используется шаг 3 пиксела.

В дальнейшем слежение за объектом осуществляется с применением пирамидального алгоритм Лукаса-Канаде [2]. Алгоритм основан на оценивании векторов оптического потока в точках изображения. При этом для сокращения вычислительных затрат при значительных по модулю векторах смещения используется пирамидальная обработка изображений.

Количественные характеристики работоспособности

Желаемым результатом работы алгоритма определения координат является полное совпадение эталонных координат центра объекта в текущем кадре $x_{\mathcal{O}}(n)$, $y_{\mathcal{O}}(n)$ с результатами их оценки $x_H(n)$, $y_H(n)$. На практике, вследствие наличия аддитивных шумов и других искажений, возможны ошибки определения координат. В таком случае можно считать, что координаты объекта были определены в данном кадре, если разность между эталонными и вычисленными координатами не превышает заданной величины, связанной с размерами объекта. В качестве такой величины можем принять размер диагонали прямоугольника, ограничивающего эталонное изображение объекта $d_{\max}(n)$ в данном кадре видеопоследовательности, умноженный на коэффициент D . Если ширина и высота ограничивающего прямоугольника в данном кадре соответственно $a_{\mathcal{O}}(n)$ и $b_{\mathcal{O}}(n)$, то

$$d_{\max}(n) = D \cdot \sqrt{a_{\mathcal{O}}(n)^2 + b_{\mathcal{O}}(n)^2} \quad (1)$$

Коэффициент D в данной работе принимается равным 1,5.

Будем считать, что ошибка определения координат центра объекта на n -м кадре равна:

$$e'_{centr}(n) = \sqrt{e_x^2(n) + e_y^2(n)} \quad (2)$$

где $e_x(n) = x_{\mathcal{O}}(n) - x_H(n)$ и $e_y(n) = y_{\mathcal{O}}(n) - y_H(n)$ – ошибки вычисления координат по горизонтали и вертикали, соответственно.

При превышении ошибки определения координат $e'_{centr}(n)$ на n -м кадре допустимой величины $d_{\max}(n)$ будем ограничивать значение ошибки, т.е. $e_{centr}(n) = \min\{e'_{centr}(n), d_{\max}(n)\}$. В данной работе рассматриваются следующие КХР.

КХР 1 – Среднее отклонение вычисленного центра объекта от истинного центра

$$\bar{e}_{centr} = \frac{\sum_{n=1}^N e_{centr}(n)}{N}, \quad (3)$$

где N – количество кадров в видеосюжете.

КХР 2 – СКО отклонения вычисленного центра объекта от истинного центра

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N e_{centr}^2(n)}{N} - \bar{e}_{centr}^2} \quad (4)$$

Признаки работоспособности

ПР дают оценочную характеристику работоспособности алгоритма, но они, как правило, коррелируют с КХР. Существенным недостатком ПР по сравнению с КХР является невозможность непосредственного сравнения качества оценивания координат для различных алгоритмов, поскольку ПР, характеризующие разные алгоритмы определения координат, обычно не совпадают ни по размерности, ни по диапазону значений [3].

Чем выше точность определения координат и лучше работа алгоритма, тем большие значения должны принимать ПР. В ходе выполнения работы было проанализированы следующие признаки работоспособности.

ПР 1. Сумма времен жизни точек, отнесенная к длине видеосюжета.

Под временем жизни точки понимается число кадров от появления точки до ее исчезновения. Чем дольше существует каждая точка, тем выше значение признака и точность решения задачи слежения. Данный параметр вычисляется из выражения:

$$t_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^N N_{cl}(i) / N. \quad (5)$$

где $N_{cl}(i)$ – число отслеживаемых алгоритмом определения координат точек в кадре i , N – число кадров в видеосюжете.

Два следующих признака характеризуют окрестность особой точки. Качество слежения за опорными точками зависит от собственных чисел λ_1, λ_2 системной матрицы, используемой в алгоритме Лукаса-Канаде.

Если оба собственных числа малы ($\lambda_1 \approx 0, \lambda_2 \approx 0$), то яркость практически не меняется, т.е. область однородна. Когда оба собственных значения велики и сравнимы друг с другом, это указывает на наличие в центре окна угловой точки. Угловые точки более предпочтительны для слежения, поэтому значения собственных чисел характеризуют устойчивость слежения за выбранными точками.

В данной работе предлагается анализировать минимальное значение из собственных чисел $\lambda_{\min}$. Более подходящие для отслеживания точки имеют большие значения собственных чисел. В качестве интегральных характеристик используются следующие два признака.

ПР 2. Сумма минимальных собственных чисел, отнесенная к числу кадров, рассчитывается следующим образом:

$$\lambda_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{ca}(i)} \lambda_{\min j}(i) / N, \quad (6)$$

где $\lambda_{\min j}(i)$ – минимальное собственное число точки j в кадре i .

ПР 3. Сумма времен жизни точек, отнесенное к межкадровому СКО. Опорных точек

Межкадровое СКО точек может быть оценено следующим образом:

$$\sigma_{sh} = \sqrt{\tilde{\sigma}_x^2 + \tilde{\sigma}_y^2}, \quad (7)$$

$$\text{где } \tilde{\sigma}_x^2 = \sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{N_{cl}(i)} (d_{x,j}(i) - \bar{d}_x(i))^2 / N_{cl}(i) \right] / N, \quad \tilde{\sigma}_y^2 = \sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{N_{cl}(i)} (d_{y,j}(i) - \bar{d}_y(i))^2 / N_{cl}(i) \right] / N;$$

$(d_{x,j}(i), d_{y,j}(i))$ – межкадровое отклонение координат точки j в кадре i ,

$(\bar{d}_x(i), \bar{d}_y(i))$ – среднее значение межкадрового отклонения точек в кадре i .

Для комплексного учета числа найденных в видеосюжете точек предлагается использовать признак: $Q = t_{sum} \sigma_{sh}^{-1/2}$.

Для выбора наиболее подходящих ПР необходимо провести экспериментальные исследования на тестовой базе видеосюжетов.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились с использованием синтетических и реальных изображений. Исследовалась эффективность в разных условиях наблюдения и при искажениях изображений, вызванных шумом, размытием и низкой контрастностью.

Результаты проведенных экспериментов подтвердили целесообразность применения ПР, предложенных в работе, для оценки эффективности работы алгоритма определения координат как на натуральных, так и на синтезированных видеосюжетах.

Заключение

В работе предложены признаки работоспособности для оценивания качества слежения за объектом на основе пирамидального алгоритма Лукаса-Канаде. Сделан вывод о целесообразности использования признаков работоспособности «Сумма времен жизни точек, отнесенная к длине видеосюжета», «Сумма минимальных собственных чисел, отнесенная к числу кадров», «Сумма времен жизни точек, отнесенное к межкадровому СКО». В результате экспериментальных исследований показано наличие связи между ПР и КХР в условиях действия шума. Планируется использовать предложенные признаки работоспособности при построении комплексного алгоритма слежения за объектами, объединяющего достоинства нескольких базовых алгоритмов.

Библиографический список

1. Boris Alpatov, Pavel Babayan, Sergey Smirnov, "Object tracking in the video sequence based on the automatic selection of the appropriate coordinate estimation method", Proc. SPIE 8542, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VI, 85420N (November 19, 2012).
2. Bouguet J.Y. Pyramidal implementation of the affine Lucas-Kanade feature tracker description of the algorithm // Intel Corporation. – 2001. – Т.5. – pp. 1-10.
3. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Смирнов С.А. Автоматический выбор метода измерения координат в системах обнаружения и сопровождения объектов // Цифровая обработка сигналов и ее применения: Тез. докл. 11-й междунар. конф. Том 2. – М., 2009. – С. 443-445.
4. Shi J. et al. Good features to track // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 1994. – pp. 593-600.

УДК 621.391.8; ГРНТИ 28.21.27

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДИСКРЕТНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

К.С. Колдаева

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, karina.mila@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматривается применение и сравнение методов оценивания на основе рекурсивных фильтров и нечеткой логики для определения состояния дискретного канала связи, а также приведены их основные особенности. Показан результат статистического анализа применения обеих процедур идентификации состояния канала связи.

Ключевые слова: дискретный канал связи, нечеткая логика, рекуррентный алгоритм.

RESEARCH OF ESTIMATION METHODS OF DISCRETE COMMUNICATION CHANNEL CONDITION

K.S. Koldaeva

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, karina.mila@yandex.ru*

The summary. The paper discusses the use and comparison of estimation methods based on recursive filters and fuzzy logic to determine the state of a discrete communication channel, and also given their main features. It is shown the result of a statistical analysis of the application of both procedures for identifying the state of the communication channel.

Keywords: discrete communication channel, fuzzy logic, recurrent algorithm.

В телекоммуникационных системах используются линии (каналы) связи различной физической природы, обеспечивающие передачу последовательности бит. Неоднородная среда, формирующаяся при этом, характеризуется различной эффективностью процесса передачи данных. В среде передачи данных изменения происходят случайным образом, что приводит к нестационарности потоков ошибок, возникающих в образующемся дискретном канале связи. В этих условиях бывает предпочтительно использовать адаптивные протоколы передачи данных, изменяющие свои параметры и структуры в зависимости от текущего состояния дискретного канала связи.

Чтобы обеспечить адаптивное управление передачей данных необходимо осуществлять непрерывный оперативный контроль канала связи. Для этого используются различные процедуры оценивания состояния дискретного канала. От оперативности и надежности получаемых при этом оценок зависит качество связи.

Существует процедура оценивания вероятности искажения двоичного символа в регулярно передаваемых тестовых последовательностях, которая не отличается оперативностью контроля. Кроме того, в условиях реального функционирования канала связи отсутствует информация о действительном изменении состояния канала, поэтому предполагается, что канал находится в некотором квазистационарном состоянии. Переходы канала из одного квазистационарного состояния в другое сопровождаются динамическими ошибками, что также снижает достоверность оценивания.

Более эффективными представляются процедуры, основанные на контроле блоков передаваемых данных с помощью кодов, обнаруживающих ошибки [1]. Причем, более предпочтительными с точки зрения реализации, представляются процедуры на основе рекурсивных фильтров с экспоненциальным сглаживанием результатов оценивания [1, 2].

В условиях отсутствия достоверной информации о поведении нестационарного канала, когда трудно предложить адекватную модель его поведения, представляется перспективным подход, основанный на использовании нечеткой логики и нечетких решающих правил.

В связи с этим предлагается алгоритм контроля дискретного канала связи, обеспечивающий повышение эффективности идентификации за счет использования дополнительной

информации о скорости изменения состояния канала и применения технологии нечеткого условного вывода [3-5].

В контексте решения задачи оценивания на основе нечеткой логики была разработана экспертная система, которая реализована в виде системы нечеткого условного вывода, позволяющая определять текущее состояние дискретного канала связи на основе оценок вероятности появления ошибки и скорости изменения вероятности появления ошибки в канале.

Согласно предлагаемому подходу для формирования условного нечеткого вывода о состоянии канала вводятся лингвистические переменные, значения которых (термы) представлены в табл. 1.

При описании лингвистических переменных используются стандартные функции принадлежности [4, 5].

Анализ ситуаций, возникающих при оценивании состояния канала, позволяет рекомендовать логику условного нечеткого вывода, отраженную базой решающих правил, представленной в табл. 2.

Таблица 1. Лингвистические переменные и термы

Лингвистические переменные	Термы
<i>Вероятность появления ошибки в канале</i>	Низкая
	Средняя
	Высокая
<i>Скорость изменения вероятности появления ошибки в канале</i>	Низкая
	Средняя
	Высокая
<i>Состояние канала</i>	Хорошее
	Плохое

Таблица 2. База решающих правил

Р	V		
	<i>Низкая</i>	<i>Средняя</i>	<i>Высокая</i>
<i>Низкая</i>	Хорошее	Хорошее	-
<i>Средняя</i>	Хорошее	-	Плохое
<i>Высокая</i>	-	Плохое	Плохое

Здесь Р – вероятность искажения блока данных, V – скорость изменения этой вероятности.

Для вычисления оценки $\hat{P}_i$ вероятности искажения Р блока данных используется рекуррентный алгоритм цифрового фильтра с бесконечной памятью первого порядка ЦФБ₁:

$$\hat{P}_i = (1 - \beta)x_i + \beta\hat{P}_{i-1}, \quad (1)$$

где $x_i \in \{0,1\}$ – результаты декодирования;

$x_i = 0$ – означает, что блок принят без ошибки;

$x_i = 1$ – означает, что блок принят с ошибкой;

i – номер блока в контролируемой выборке;

$\beta < 1$ – коэффициент, определяемый из условия равенства дисперсий оценок, рекурсивного и нерекурсивного фильтра с памятью N [6]:

$$\beta = \frac{N-1}{N-2}.$$

Процедура учитывает результаты декодирования с убывающими весами $(1-\beta)\beta^{N-i}$ относительно момента оценивания, что позволяет раньше реагировать на изменение состояния канала [6].

Исследование характера изменения оценки $\hat{P}$ вероятности ошибок в канале при изменении состояния канала показывает, что это изменение происходит практически с постоянной скоростью, что позволяет дополнительно использовать для определения скорости изменения оценки $\hat{P}$ алгоритм цифрового фильтра с бесконечной памятью второго порядка аста-тизма (ЦФБ₂), воспроизводящего скорость изменения линейно изменяющегося процесса без динамической ошибки:

$$\begin{aligned} V_n &= \Delta_0 U_n - \Delta_1 Y_n; \\ U_n &= X_n + \beta U_{n-1}; \\ \Delta_0 &= (1-\beta)^2; \\ \Delta_1 &= (1-\beta)^3/\beta; \\ Y_n &= \beta(U_{n-1} + Y_{n-1}). \end{aligned}$$

Основным достоинством этого алгоритма, как и алгоритма (1), является рекуррентность вычислительной процедуры и простота реализации.

Предлагаемый алгоритм исследовался на примере применения квазистационарного канала без памяти с двумя состояниями – хорошим и плохим, с имитацией независимых ошибок, подчиняющихся распределению Бернулли. Блок-схема исследуемой смоделированной системы представлена на рисунке 1.

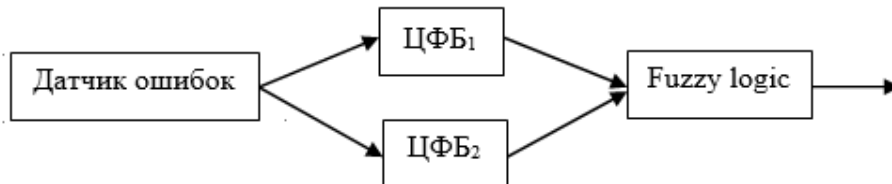


Рис. 1. Блок-схема моделируемой системы

Построение системы нечеткого вывода реализовано в пакете Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB, где вся исходная информация о стратегии оценивания заносится в базу решающих правил в виде правил условного логического вывода «ЕСЛИ..., ТО» («IF..., THEN...») и функций принадлежности, которые определяются на основе изучения поставленной задачи и объекта исследования. Центральным звеном такой системы является блок нечеткого вывода Fuzzy logic, или блок принятия решений, в котором на основе нечеткой информации о параметрах делается вывод о соответствующей нечеткой оценке состояния канала связи.

В ходе исследования были получены оценки эффективности алгоритма на основе результатов статистического анализа по результатам моделирования в виде графиков зависимости среднего числа ложных срабатываний и задержки перехода канала из одного состояния в другое от разных реализаций интенсивности помехи при подобранных параметрах процедуры нечеткой логики в сравнении с процедурой определения состояния канала, основанного на логическом решении сравнения с порогом с применением рекурсивного фильтра ЦФБ₁ (рисунок 2 а, б).

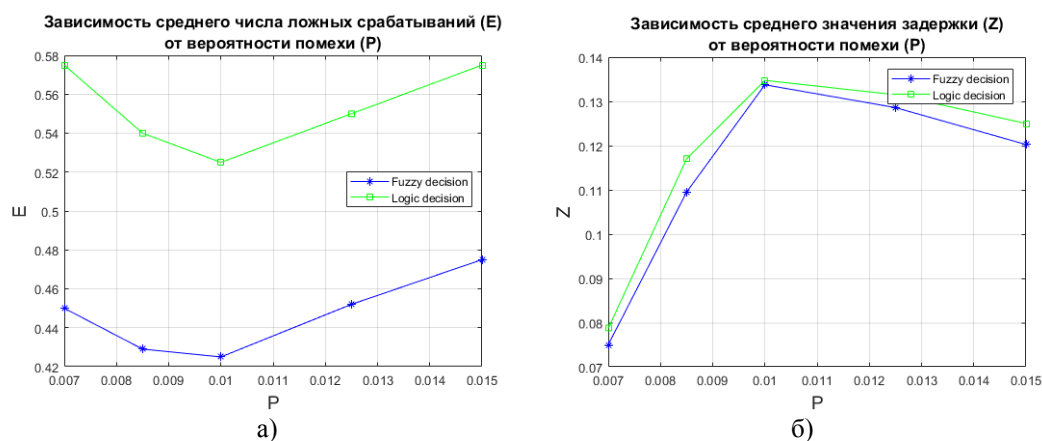


Рис. 2. Графики зависимости среднего числа ложных срабатываний (а) и среднего значения задержки при изменении состояния канала связи (б) от вероятности помехи

Полученные результаты подтверждают предположение об уменьшении числа ложных срабатываний и запаздывания в изменении состояния канала связи при использовании процедуры условного нечеткого вывода по сравнению с непосредственным оцениванием на основе ЦФБ₁. Результаты моделирования подтвердили целесообразность применения алгоритма оценивания состояния дискретного канала связи на основе нечеткой логики, однако при изменении свойств канала необходимо изменять параметры условного алгоритма для дальнейшей корректной работы системы.

Библиографический список

1. А.Н. Гаврилов, В.Н. Карпов, Л.П. Коричнев, Ю.М. Коршунов, А.Н. Пылькин. Устройство для приема дискретной информации, закодированной корректирующим кодом. А.С. № 1462492, Б.И. № 8, 1989.
2. Ю. М. Коршунов, А. И. Бобиков, И. А. Вакарин, В. Н. Степаненко, А.И. Степашкин. Расчёт и проектирование цифровых сглаживающих и преобразующих устройств. Под ред. Ю.М. Коршунова. М., «Энергия», 1976. - 336 с. с ил.
3. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию решений. М.: Мир, 1976.
4. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов А.В., Алексеев Г.В., Меркурьева и др. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.
5. Гаврилов А.Н., Бобиков А.И. Системы управления с нечеткой логикой. Уч. пособие / РГРТА – Рязань, 2000, -72 с.
6. Коршунов Ю.М., Бобиков А.И. Цифровые сглаживающие и преобразующие системы. М., «Энергия», 1969.

УДК 004.051+65.011.46; ГРНТИ 50.01

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА ТОВАРА ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ LOGINOM

С.В. Староверов, И.А. Иванова, В.Э. Перунова, Н.А. Чижова

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина

Россия, Рязань, s_staroverov@inbox.ru

Аннотация. Рассмотрена эффективность программ обработки данных, разработаны алгоритмы обработки данных потребителей товаров в системе Loginom, проведена оценка эффективности алгоритмов.

Ключевые слова: эффективность программы, обработка данных, оценка эффективности алгоритмов, система Loginom.

EFFICIENCY OF THE CONSUMER PRODUCT SELECTION ALGORITHMS IN THE LOGINOM SYSTEM

S.V. Staroverov, I.A. Ivanova, V.E. Perunova, N.A. Chizhova

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin

Russia, Ryazan, s_staroverov@inbox.ru

Abstract. The efficiency of data processing programs is considered, algorithms are developed for processing data of consumers of goods in the Loginom system, the efficiency of algorithms is evaluated.

Keywords: program efficiency, data processing, estimation of algorithms efficiency, Loginom system.

В современном мире мы наблюдаем парадигму, в которой с одной стороны, возникают гигантские объемы новой информации и, с другой стороны, возрастают требования к ее качеству, в том числе, к повышению эффективности методов и инструментов обработки. Термин «big data» (большие данные) расширяет сферу своего использования в различных областях науки и техники и может быть охарактеризована тремя «V» - объемом (volume), скоростью (velocity), многообразием (variety).

В процессе развития общества возникло понятие «эффективности» (efficiency), которое, в общем случае, определяется соотношением полученного результата и ресурсов (затрат), направленных на достижение указанного результата. По данному критерию предпочтительным является вариант решения задачи, обеспечивающий заданный результат при экономии ресурсов (материальных, человеческих, временных, финансовых). В экономических расчетах компоненты показателей эффективности, чаще всего, выражаются в денежных единицах. На этапах процесса принятия решений, разнообразные критерии эффективности могут использоваться как при сравнении фактических показателей с заданными нормативами, так и в сравнении фактических показателей для альтернативных вариантов. Принимая во внимание указанные закономерности развития информации и общества, можно в частности, говорить о расширении использования критериев эффективности для всех стадий жизненного цикла программного обеспечения (ПО), используемого в задачах обработки данных.

Наряду с указанным выше понятием, часто используется и другой термин эффективности - результативность (effectiveness), определяемый как характеристика достижения целей (результатов), без связи с привлекаемыми ресурсами. В настоящей работе эффективность понимается как характеристика определенного результата, рассматриваемого в непосредственной связи с привлекаемыми ресурсами (efficiency). Кроме того, понятие эффективности как результативность (effectiveness) имеет ограниченное применение, например, в случаях, когда альтернативные продукты или решения обеспечивают достижение заданной цели, и для принятия решения о выборе варианта следует учитывать привлекаемые ресурсы.

Алгоритм (algorithm) представляет собой корректно определенную вычислительную процедуру, на вход (input) которой подается некоторая величина или набор величин, и результатом выполнения которой является выходная (output) величина или набор значений [1].

Алгоритм также рассматривается как инструмент, предназначенный для решения корректно поставленной вычислительной задачи. Поэтому, в статье не устанавливается различия между терминами «программа» и «алгоритм» с точки зрения оценки их эффективности.

Одним из свойств алгоритма (программы) является то, что он имеет множество вариантов решения. Не требует доказательств значительная разница, которая может существовать в эффективности различных алгоритмов, предназначенных для решения одной задачи. Причем указанная разница в эффективности возникает, в значительной мере не только, за счет применения различного аппаратного и программного обеспечения [1]. Таким образом, задача оценки эффективности конкурирующих алгоритмов, использующих общее аппаратное и ПО, является фундаментальной и возникает еще на этапе разработки программы.

Согласно стандартам ISO и ГОСТ РФ характеристика эффективности (efficiency) включается в понятие качества ПО и его использования. В ISO 25010 [2] и соответствующего ему ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 [3] характеристика качества рассматривается как качество при использовании (quality in use) и качество ПО (software quality). Качество при использовании представляет собой степень, с которой продукция или система могут быть применены определенными пользователями для удовлетворения их требований в достижении целей эффективности (в т. ч. и экономической), избегания риска, удовлетворенности и охвата контекста в заданных условиях использования. Под качеством программного обеспечения понимается степень удовлетворения программным продуктом заявленных и подразумеваемых потребностей при использовании в указанных условиях. Качество при использовании программы характеризует, в том числе, эффективность (efficiency). Характеристика производительности (performance efficiency) включается в качество ПО.

Важной характеристикой, непосредственно связанной с эффективностью, является производительность (performance). В случаях, когда возрастание производительности связано с ростом результатов при неизменных ресурсах, или, когда заданный результат достигается при привлечении меньших ресурсов, указывает и на рост эффективности. Ситуация, когда рост отдачи не соотносится с привлекаемыми ресурсами, противоречит условиям работы в условиях ограниченных ресурсов. Поэтому, характеристики производительности и эффективности достаточно тесно связаны. Этот факт находит свое отражение в определениях терминов качества и в использовании термина «эффективность по производительности» (performance efficiency). Согласно ISO 25010 эффективность по производительности формулируется как производительность относительно используемых ресурсов в заданных условиях и рассматривается в разрезе: времени (time behavior); использования ресурсов (resource utilization); пропускной способности каналов связи (capacity).

Общую техническую и экономическую эффективность ПО можно рассматривать в разных измерениях – как эффективность при разработке, так и как эффективность при использовании. Как известно, затраты на разработку программы связаны, в значительной степени, с затратами на привлекаемых специалистов. В этой связи, представляют интерес инструменты визуального проектирования и стандартные библиотеки программ. Их применение существенно сокращает время и затраты на специалистов в области кодирования (программирования) на этапах разработки и модернизации ПО.

Другое измерение эффективности программ проявляется в их использовании. Здесь в качестве информации для оценивания используются затраты времени или ресурсов техники (например, памяти, энергии и т.д.). Разнообразие исходных условий, технических задач и целей потребителей приводит к использованию различных показателей эффективности и сравнительной эффективности ПО.

Важными показателями технической эффективности алгоритмов является скорость и время [1]. Для задач различных классов, указанные критерии имеют разное значение. Например, при решении задач обработки данных и принятия решений в реальном времени, указанные критерии являются основными. Для задач бизнес-аналитики, скорость и времена обра-

ботки данных, часто не относятся к числу приоритетных. В условиях увеличения объемов обрабатываемых данных, высокой стоимости времени аналитиков, многовариантности и повторяемости расчетов, увеличения числа компьютеров (рабочих мест), роста загруженности сетевых ресурсов и т.д., суммарный рост скорости, снижение времени обработки данных приводит к существенным техническим и экономическим выгодам при минимальном уровне риска.

Несмотря на уважение к абсолютным показателям, для целей оценки эффективности и сравнительной эффективности алгоритмов следует использовать преимущественно относительные показатели. Для алгоритмов обработки данных, показателем сравнительной эффективности (производительности), отражающим скорость обработки данных, является:

$$PI = V / t , \quad (1)$$

где V - объем обрабатываемых данных, t – время работы алгоритма.

При сравнении алгоритмов с позиции их экономической целесообразности, в знаменателе (1) следует учитывать затраты ресурсов в денежном измерении:

$$PIc = V / (t c) , \quad (2)$$

где c – средняя стоимость маш.-ч. работы компьютерной системы, t – время работы алгоритма для заданной компьютерной системы, ч.

Соотношение (2) имеет преимущество перед (1) в случаях оценки эффективности алгоритмов при наличии различий в затратах для рассматриваемых вариантов. Данная ситуация может возникать, например, в случаях функционирования ПО на разных компьютерных системах, что при этом не исключает сравнение алгоритмов различных версий. При использовании (2) для сравнения алгоритмов, разделенных продолжительными промежутками времени, может возникнуть сложность в виде искажающего влияния инфляции. В последнем случае, для корректного анализа результатов, необходимо проводить расчеты в сопоставимых ценах.

При оценке алгоритмов, для которых известен доход, можно использовать следующий коэффициент эффективности:

$$PIr = S / (Z + t c) , \quad (3)$$

где S – доход, полученный от работы алгоритма, Z – затраты, связанные с получением дохода. Соотношение (3), например, может применяться для оценки эффективности автоматизированных торговых алгоритмов на финансовых рынках.

К основным факторам, оказывающим влияние на эффективность ПО обработки больших данных, относится не только время, но и объем данных. Поэтому, необходимым этапом проведения анализа или сравнительного анализа эффективности такого ПО, является чувствительность показателей программы к увеличению объема обрабатываемых данных.

В процессе разработки ПО, в рамках одной системы возникает задача выбора наиболее эффективного алгоритма обработки данных. При сравнении алгоритмов, созданных в одной системе, работающих на одном аппаратном обеспечении и обрабатывающих равный объем данных, в качестве обратного показателя эффективности алгоритма выступает время. В этих условиях, для двух сравниваемых алгоритмов 1 и 2 при условии $V_1=V_2$ и $c_1=c_2$ в соотношениях (1) и (2), показатель относительной технической и экономической эффективности оценивается, исходя из отношения показателей производительности алгоритмов, или отношения времени обработки данных:

$$PI_2 / PI_1 = t_1 / t_2 , \quad (4)$$

где PI_2 и PI_1 – показатели эффективности (производительности) алгоритмов 2 и 1 согласно (1), t_1 и t_2 – время обработки данных для алгоритмов 1 и 2.

Чтобы иметь возможность оценивать время выполнения алгоритма в процессе его тестирования, инструментарий разработчика ПО должен содержать встроенный измеритель. Данный инструментарий должен оценивать не только общее время выполнения программы, но и время выполнения ее процедур и модулей.

Одной из современных систем обработки больших данных и бизнес - аналитики является платформа (система) Loginom [4, 5]. Платформа позволяет обрабатывать большие объемы данных с высокой производительностью на основе параллельной обработки, оптимизации вычислительных алгоритмов и других современных концепций обработки данных и поддержки принятия решений. В Loginom при разработке алгоритмов используется визуальное проектирование и интеграция данных без кодирования, что облегчает процесс обучения и разработки ПО. Система также имеет средства для точной оценки времени выполнения программы и ее частей, что позволяет провести оценку эффективности алгоритмов.

В рамках предварительного этапа соревнования «Loginom Хакатон 2020» проходившего среди команд ВУЗов России, решалась задача обработки базы данных транзакций (покупок товаров) потребителями и базы данных товаров различных групп. Одной из подзадач в рамках соревнования, являлась выдача рекомендации каждому потребителю в виде случайного товара из определенной группы, выбранной по заданному критерию. В процессе обучения и разработки командой РГРТУ были предложены различные алгоритмы решения указанной подзадачи.

Из нескольких предложенных алгоритмов, показательными являются два. Первый алгоритм (Алгоритм 1) обеспечивает достижение заданного результата с использованием индексации, сортировки и группировки записей базы данных транзакций. Другой алгоритм (Алгоритм 2) при достижении результата использовал операции индексации баз данных, с последующим их слиянием (связыванием) по ключевым значениям полей. Оба алгоритма являются корректными и позволяют решить поставленную задачу, но имеют отличия в уровне эффективности. В связи с этим, возникает вопрос об оценке чувствительности и эффективности алгоритмов в условиях роста объема обрабатываемой информации.

Исходя из этого, дополнительно была проведена оценка эффективности разработанных алгоритмов на основе соотношений (1) и (4). Для работы алгоритмов использовался компьютер с процессором Intel(R) Celeron CPU N3450 1,1 ГГц, ОЗУ 8Гб, под управлением операционной системы Windows 10. Алгоритмы тестировались на базах данных транзакций с объемами 300 тыс., 1 млн., и 3 млн. записей, где одна транзакция потребителя (приобретение одного товара в один момент времени) соответствует одной записи в базе данных. Время работы алгоритма (подмодели) оценивалось встроенными средствами Loginom. Показатели эффективности обработки данных алгоритмами 1 и 2 содержатся в таблице.

Таблица. Показатели эффективности алгоритмов

Показатель	Число транзакций в базе данных, тыс. записей		
	300	1000	3000
Алгоритм 1:			
1.1. Время обработки данных, с.	0,86	5,19	18,91
1.2. Производительность (PI_1), записей /с.	349	193	159
1.3. Темп роста времени обработки данных	1	6,0	22,0
Алгоритм 2:			
2.1. Время обработки данных, с.	0,032	0,121	0,402
2.2. Производительность (PI_2), записей /с.	9375	8264	7463
2.3. Темп роста времени обработки данных	1	3,8	12,6
3. Отношение эффективности алгоритмов 2 и 1, п.2.2/п.1.2	26,9	42,9	47,0

Тестирование показало, что алгоритмы обеспечивают решение поставленной задачи, но имеют существенные отличия в уровне эффективности. При наименьшем объеме данных (0,3 млн. записей), разность времени обработки алгоритмом 1 и 2 не превышает 1 с., находится в нормальных границах по отклику и для задачи является несущественной. При росте числа транзакций, разрыв времени обработки между 1 и 2 алгоритмом возрастает. Для 1 млн. записей разность времени обработки данных алгоритмом 1 и 2 составляет 5 с., и является существенным значением с точки зрения критерия отклика алгоритма. Зависимость темпа роста времени обработки данных алгоритмами 1 и 2 от объема данных (0,3 млн. записей = 1) отражена на рисунке 1.

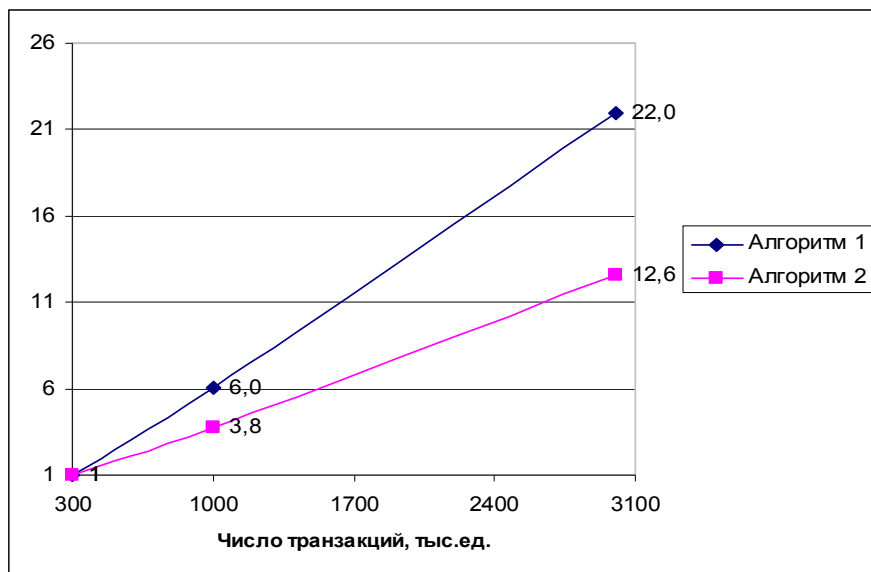


Рис. 1. Зависимость индекса роста времени работы алгоритма от объема данных

Результаты показывают, что при росте объемов данных в 10 раз до 3 млн. записей, время обработки с помощью алгоритма 1 увеличивается в 22 раза, что отражает его высокую степень чувствительности к указанному фактору. Напротив, алгоритм 2 в заданных условиях демонстрирует существенно меньшую чувствительность к росту числа транзакций покупателей.

Коэффициент отношения производительности алгоритмов 2 и 1 в зависимости от числа транзакций, представлен на рисунке 2.

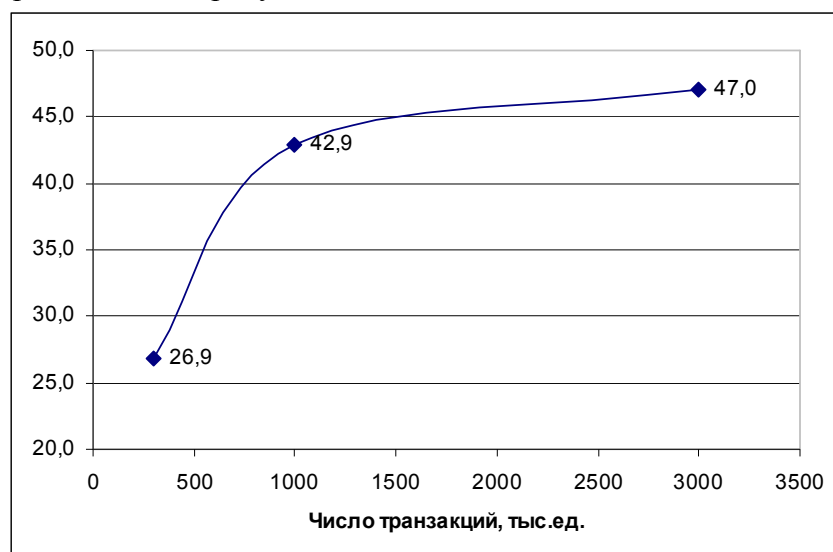


Рис. 2. Коэффициент отношения производительности алгоритмов 2 и 1

Зависимость на рисунке 2 отражает сравнительную эффективность алгоритмов 2 и 1 при увеличении объема данных. Для минимального объема тестовых данных коэффициент отношения производительности алгоритмов составляет 27. Далее, разрыв в эффективности алгоритмов возрастает, и для данных объемом 3 млн. записей коэффициент отношения эффективности алгоритмов составляет 47. Полученные результаты доказывают безусловную эффективность алгоритма 2 и целесообразность его использования, что в наибольшей мере проявляется в условиях роста числа транзакций от 1 млн. и более.

Необходимо отметить, что для других задач и условий, различия в эффективности конкурирующих алгоритмов могут быть менее существенными и подвержены влиянию большего числа факторов, чем в приведенном случае. Вместе с тем, необходимо понимать, что, во-первых, при создании программы существуют определенные резервы в повышении производительности, и, во-вторых, анализ эффективности ПО является необходимой процедурой, что, в свою очередь, требует наличия соответствующих инструментов и методов.

Следует обратить внимание, при решении указанной задачи были задействованы далеко не все возможности платформы, остались дополнительные резервы повышения эффективности. Несмотря на это, полученные результаты позволяют сделать заключение, о том, что аналитическая платформа Loginom удовлетворяет современным требованиям в области обработки данных и позволяет оценить эффективность алгоритмов.

Библиографический список:

1. Кормен Т.Х. и др. Алгоритмы: построение и анализ, 3-е издание.: М.: «Вильямс», 2013. - 1328 с.
2. ISO 25000 Standards: ISO/IEC 25010 [Электронный ресурс] — URL <https://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010?limit=3&limitstart=0> (дата обращения: 01.02.2020).
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов: М.: «Стандартинформ», 2015 [Электронный ресурс] - URL <https://docplan.ru/Data/600/60038.pdf> (дата обращения: 01.02.2020).
4. Арустамов А.И. Современные концепции построения аналитических платформ // Материалы научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях» НИТ-2018, т. 1, РГРТУ, 2018 — с.14-16.
5. Сайт платформы Loginom [Электронный ресурс] - URL <https://loginom.ru/> (дата обращения: 01.10.2019).

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

КАЛИБРОВКА ВИДЕОКАМЕР МНОГОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОГО ТЕСТ-ОБЪЕКТА

И.А. Кудинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, igor.kudinov@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрена конструкция тест-объекта, который может быть использован для определения внутренних и внешних параметров видеокамер, работающих в составе системы технического зрения, состоящей из нескольких разноспектральных видеокамер видимого и инфракрасного диапазонов длин волн.

Ключевые слова: калибровка видеокамер, техническое зрение, тест-объект.

CALIBRATION BY THE TEST OBJECT OF VIDEO CAMERAS OF THE MULTI-SPECTRUM TECHNICAL VISION SYSTEM

I.A. Kudinov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, igor.kudinov@mail.ru*

The summary. The paper considers the test object that can be used to determine intrinsic and extrinsic parameters of cameras operating as part of a vision system consisting of several different-spectrum cameras of visible and infrared wavelength ranges.

Keywords: camera calibration, television and thermal imaging technical vision, test object.
Intrinsic and extrinsic

Задача калибровки систем технического зрения (СТЗ), состоящих из нескольких разноспектральных видеокамер видимого и инфракрасного диапазонов длин волн, осложняется тем, что физическая природа изображений, формируемых этими камерами, является различной. Телевизионные (ТВ) камеры и камеры ближнего и средневолнового инфракрасных (ИК) диапазонов воспринимают отраженный объектом свет, а камеры средневолнового и длинноволнового ИК диапазонов – собственное тепловое излучение объекта. В связи с этим для калибровки СТЗ с разноспектральными камерами требуется либо решение задачи поиска сюжетных соответствий на кадрах телевизионных и тепловизионных камер, либо их предварительная фотограмметрическая калибровка по универсальному (имеющему высокую контрастность и в ТВ, и в ИК диапазонах длин волн) тест-объекту (ТО).

Для калибровки многоспектральных СТЗ известны различные ТО. Рассмотрим простой в конструктивном исполнении ТО, который может быть использован для калибровки многокамерной многоспектральной СТЗ.

ТО состоит из двух частей (рис. 1): стационарной, типа «док-станция», состоящей из электронагревателя 1 и терморегулятора 2, и съемной, состоящей из светлой пластины с высокой теплопроводностью 3 (например, алюминиевой) и нанесенного на одну из ее сторон шаблона типа «шахматное поле» из виниловой пленки 4, обеспечивающего тепловой контраст.

Для обеспечения равномерного прогрева съемной части ТО целесообразно применять планарный инфракрасный электрообогреватель с длиной и шириной не менее длины и ширины съемной части.

ТО при калибровке видеокамер многоспектральной системы технического зрения используют следующим образом.

Док-станцию подключают к источнику напряжения и с помощью терморегулятора 2 устанавливают температуру нагрева – на 20-30 градусов выше температуры воздуха, при которой проводится калибровка. На инфракрасный обогреватель устанавливают съемную пластину 3 шаблоном 4 вверх и дожидаются ее прогрева (при необходимости температуру пластины можно контролировать при помощи термометра). Для алюминиевой пластины размером 500×500×6 мм при потребляемой мощности инфракрасного обогревателя 400 Вт время прогрева при комнатной температуре составляет 4-5 минут.

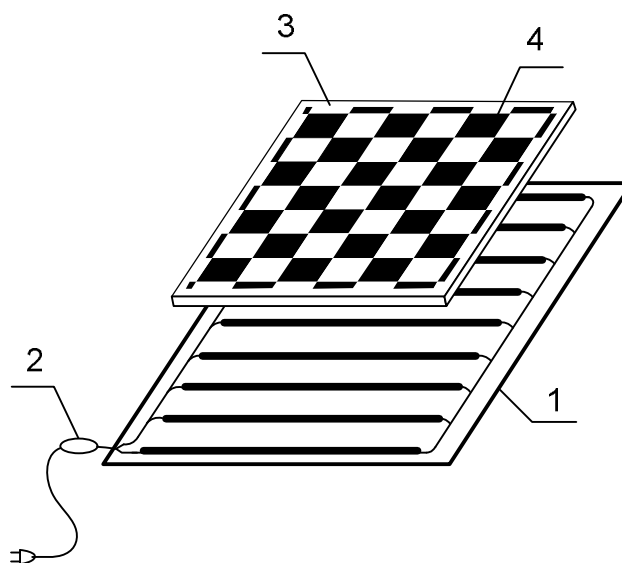


Рис. 1. Конструкция планарного ТО для калибровки видеокамер многоспектральной СТЗ

На рис. 2 показано изображение ТО, расположенного на док-станции, полученное с помощью измерительного тепловизора Testo 875 после пятиминутного прогрева (расстояние от тепловизора до центра ТО – 600 мм), а на рис. 3 – изображение съемной части ТО (расстояние от тепловизора до центра ТО – 9,5 м).

При достижении требуемой температуры пластину 3 снимают с док-станции 1 и определяют тепловой контраст

$$K_T = \frac{I_{\max}^{\text{ТПВ}} - I_{\min}^{\text{ТПВ}}}{I_{\max}^{\text{ТПВ}}},$$

где $I_{\max}^{\text{ТПВ}}$ и $I_{\min}^{\text{ТПВ}}$ – соответственно максимальная и минимальная яркость пикселей изображений ТО, формируемых калибруемыми инфракрасными камерами (например, тепловизоров средневолнового 3-5 мкм и длинноволнового 8-14 мкм диапазонов). Если $K_T \geq 0,2$, то выполняют калибровку камер по методике Джанга [1] для определения матриц их внутренних и внешних параметров, а также оценивания коэффициентов дисторсии объективов [2]. При этом меняют ракурс съемки ТО таким образом, чтобы его изображение располагалось как в центральной части кадра, так и по его краям, и сохраняют серию кадров (не менее 15). Далее в каждом из них выделяют пиксельные координаты опорных точек (углов темных многоугольников изображения калибровочного шаблона), которые затем используются в алгоритме калибровки. Изображения с инфракрасных тепловизионных камер переводят в негативные: при использовании шаблона с темными многоугольниками его изображения инвертируют. Формирование негативного изображения обеспечивает схожесть изображений ТО, полученных телевизионными и тепловизионными камерами.

В ходе калибровки тепловой контраст контролируется. Если значение K_T падает ниже 0,2, съемная пластина 3 тест-объекта повторно устанавливается на док-станцию 1 для повторного прогрева для обеспечения теплового контраста.

Для алюминиевой пластины размером 500×500×6 мм интервал времени с момента прогрева до рабочей температуры до момента падения теплового контраста ниже порогового значения 0,2 составляет 5-6 минут.

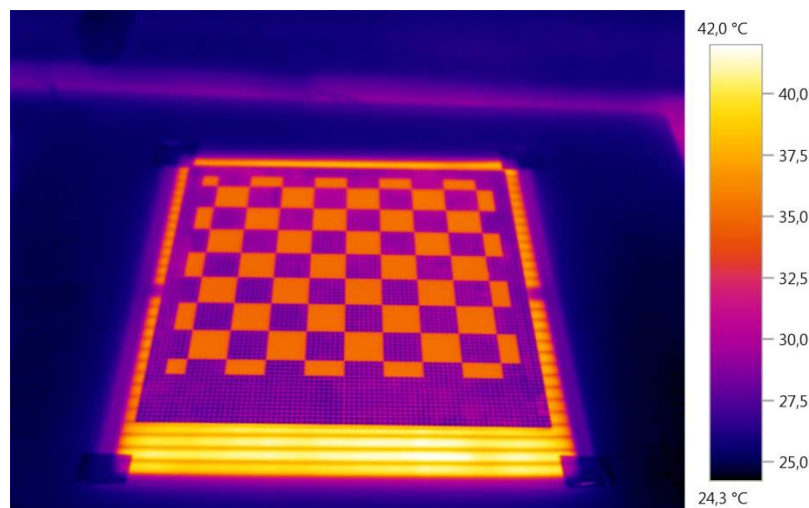


Рис. 2. Изображение ТО на док-станции во время прогрева, полученное с помощью тепловизора

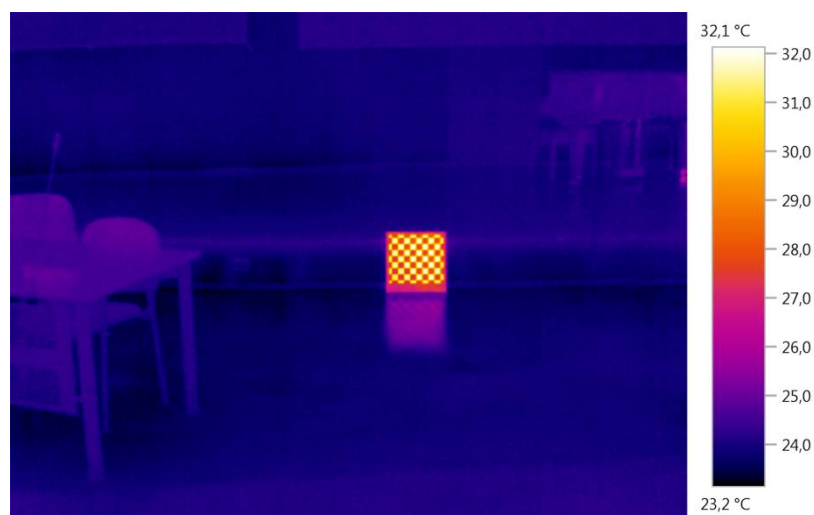


Рис. 3. Изображение съемной части ТО после прогрева

Отсутствие проводов питания, ведущих к съемной части ТО, позволяет применять его, например, в контрольных приспособлениях для осуществления калибровки видеограмметрических систем [3], в том числе и мультиспектральных, в которых выполняется автоматизированное перемещение ТО относительно калибруемой камеры.

Библиографический список

1. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – Vol. 22(11). – P. 1330-1334
2. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision: 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 656 p.
3. Патент RU 2645432, опубликовано 21.02.2018, МПК: G01C11/00.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ АСИНХРОННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРИЛОЖЕНИЙ НА МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ НА БАЗЕ ОС ANDROID

А.Д. Назаров

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, artyom.nazarov9@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматривается применение механизмов асинхронного программирования при разработке мобильных приложений.

Ключевые слова: асинхронное программирование, обработка изображений, мобильные устройства, пользовательский интерфейс, android.

THE USE OF THE MECHANISMS OF ASYNCHRONOUS PROGRAMMING IN APPLICATION DEVELOPMENT ON ANDROID-BASED MOBILE DEVICES

А.Д. Назаров

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, artyom.nazarov9@gmail.com*

The summary. The paper discusses the use of asynchronous programming mechanisms in the development of mobile applications.

Keywords: mobile image handling, asynchronous programming, user interface, user experience, android.

Компьютерные программы сейчас используются практически во всех сферах деятельности человека. Мир шагнул далеко вперед в области информационных технологий. Современные приложения требуют высокой производительности, масштабируемости и надёжности.

С повышением уровня развития вычислительной техники, значительно возрастает актуальность использования изображений. Развитие мобильных устройств влечет улучшение их технических характеристик, что сильно влияет на интересы современного общества. Появляются социальные сети, где фотографии на мобильный телефон становятся ключевой единицей обмена информации, например, Instagram. Вопрос обработки больших изображений прямо на мобильных устройствах является одним из главных на рынке приложений для телефонов.

Сегодня двумя главными конкурирующими платформами являются Android и iOS[1]. Два гиганта Google и Apple, разработчики данных систем, заимствуют друг у друга лучшие идеи, чтобы удовлетворить высокие потребности современного пользователя. Работа с изображениями также модифицируется. Изменение изображения высокого качества – дело ресурсоемкое. На помощь приходит модернизация алгоритмов и применение особенностей платформы для ускорения их работы.

Традиционно в программировании используют синхронное программирование - последовательное выполнение инструкций с синхронными системными вызовами, которые полностью блокируют поток выполнения, пока системная операция, например чтение с диска, не завершится [2]. Однако обработка изображений на устройствах с небольшими вычислительными мощностями занимает большое количество времени. В связи с этим требуется применение механизмов асинхронности при разработке мобильных приложений.

Асинхронность в программировании - это выполнение процесса в неблокирующем режиме системного вызова, что позволяет потоку программы продолжить обработку [3]. То есть применяются асинхронные вызовы функций, при которых программа не дожидается выполнения метода, вызванного ранее перед запуском последующего.

На телефонах платформы Android приложение состоит из компонентов, называемых Activity [4]. По умолчанию все компоненты одного приложения работают в одном процессе и потоке, называемым «главным потоком».

Существует 5 типов процессов [5], приведенные в порядке важности:

- процесс переднего плана - процесс, необходимый для текущей деятельности пользователя;
- видимые процессы - процессы, которые не содержат компонентов переднего плана, но могут влиять на отображение на экране. Видимый процесс считается исключительно важным, его следует удалять только в случае, если требуется сохранить работу всех процессов переднего плана;
- служебный процесс - процесс, который выполняет службу, запущенную с помощью метода `startService()`, и не попадает ни в одну из двух категорий более высокого уровня;
- фоновый процесс - процесс, содержащий действия, которые не видны пользователю в настоящее время. Эти процессы не оказывают непосредственного воздействия на работу пользователя, и система может удалить их в любой момент, чтобы освободить память для процессов переднего плана, видимых или служебных процессов;
- пустой процесс - процесс, не содержащий никаких компонентов активного приложения. Единственная причина сохранять процесс такого типа - это кэширование, которое улучшает время следующего запуска компонента в этом процессе.

При запуске приложения система создает поток выполнения для приложения, который называется «главным». Этот поток очень важен, так как он отвечает за диспетчеризацию событий на виджеты соответствующего интерфейса пользователя, включая события графического представления. Он также является потоком, в котором приложение взаимодействует с компонентами пользовательского интерфейса. По существу, главный поток - это то, что иногда называют потоком пользовательского интерфейса.

Виджетами приложений называются миниатюрные представления приложений, которые можно встраивать в другие (например, на главный экран) и получать периодические обновления. Виджеты являются важной частью настройки главного экрана смартфона. Пользователи могут перемещать виджеты по панелям главного экрана и, если это поддерживается, изменять их размер по своему усмотрению.[6]

Система не создает отдельного потока для каждого экземпляра компонента. Все компоненты, которые выполняются в одном процессе, создают экземпляры в потоке пользовательского интерфейса, и системные вызовы каждого компонента отправляются из этого потока. Поэтому методы, которые отвечают на системные обратные вызовы всегда выполняются в потоке пользовательского интерфейса процесса.

Например, когда пользователь нажимает кнопку на экране, поток пользовательского интерфейса приложения отправляет событие нажатия на виджет, который, в свою очередь, устанавливает кнопку в нажатое состояние и отправляет запрос на аннулирование в очередь событий. Поток пользовательского интерфейса исключает запрос из очереди и уведомляет виджет, что он должен отобразиться повторно.

При выполнении ресурсоемких задач возникает необходимость вызывать обработку больших объемов данных, не останавливая, при этом, поток пользовательского интерфейса. На помощь в таких задачах приходит механизм `AsyncTask`, реализованный в операционной системе Android. Он объединяет в себе механизм создания отдельного потока `Thread` для тяжелой задачи и обработчика `Handler` для обратного вызова.

Данный механизм был использован при разработке приложения для обработки изображений. Главное окно приложения приведено на рисунке 1.

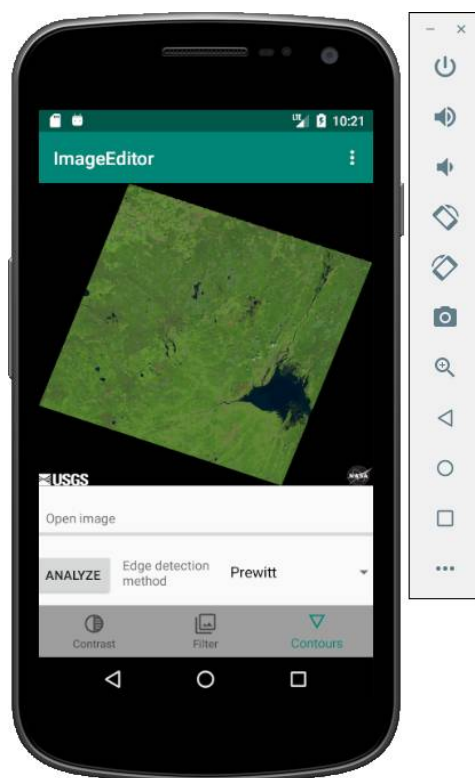


Рис. 1. Главное окно приложения

При запуске анализа контуров изображения нажатием на кнопку «Analyze» запустится поток поиска контуров по выбранному алгоритму. В данном случае - это алгоритм Прюитта [6]. Как видно на рисунке 2, после нажатия на кнопку запускается индикатор прогресса, показывающий оставшееся время до конца выполнения алгоритма.

Несмотря на то, что задача обработки изображения запущена, у пользователя есть возможность работать с интерфейсом, поскольку задача выполняется в отдельном потоке. При переходе в меню «Filter», процесс нахождения контуров не прекращается. Результат обработки контура приведён на рисунке 3.

Таким образом, за счёт использования в приложении механизма асинхронности, решена проблема зависания при обработке больших изображений на мобильных устройствах.



Рис. 2. Процесс нахождения контуров
запущен

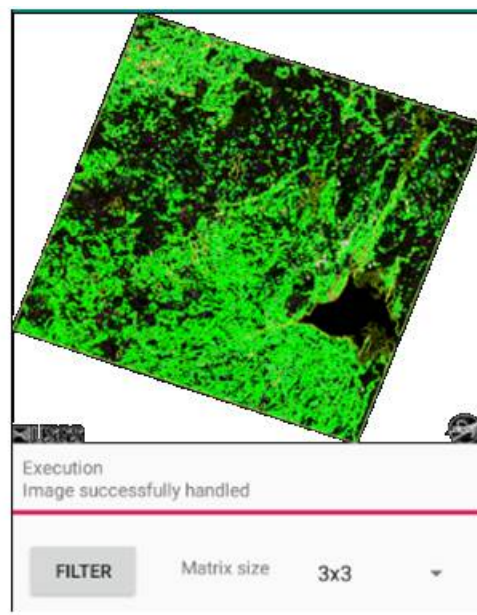


Рис. 3. Результат асинхронного
поиска контуров методом Прюитта

Библиографический список

1. <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide>
2. <https://proglib.io/p/asynchrony/>
3. <https://tproger.ru/articles/asynchronous-programming/>
4. <https://developer.android.com/guide/components/activities/intro-activities>
5. <https://developer.android.com/guide/components/activities/process-lifecycle>
6. <https://developer.android.com/guide/topics/appwidgets/overview>
7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений: Издание 3-е, исправленное и дополненное

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИЯ О III МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2020».....	3
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ».....	5
Секция «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ».....	5
Кострова Ю.С. Моделирование динамики популяции русской выхухолы в бассейне Оки.....	5
Дорохова Т.Ю., Пучков Н.П. Методика выбора приоритетных вариантов при педагогическом проектировании.....	8
Бухенский К.В., Конюхов А.Н., Дюбуа А.Б., Сафошкин А.С. Операции над нечеткими числами и мера нечеткости.....	12
Кузнецова В.О. Математическое моделирование процесса наводороживания и его влияние на НДС сферической оболочки из титанового сплава.....	20
Дмитриев О.С., Барсуков А.А. Моделирование кинетических характеристик процесса отверждения полимерных композитов.....	31
Сеттиев Ш.Р. О течении несжимаемой вязкой жидкости по наклонной плоскости.....	35
Лискина Е.Ю. Математическая модель демографических волн на примере населения Российской Федерации.....	42
Абрамов В.В. Малое периодическое решение системы дифференциальных уравнений с нулевой матрицей линейного приближения.....	47
Абрамов В.В. К задаче о ветвлении периодических решений.....	54
Чемезов О.Н. О совместном обнаружении и оценивании марковских сигналов.....	58
Заяц Т.А., Еськова О.И. Аспекты применения компьютерного моделирования имитационных моделей.....	61
Юдаев Ю.А. Моделирование процесса формирования низкотемпературной плазмы методом частиц.....	65
Толкачев А.В., Толкачев А.В. Моделирование дискретной системы синус-гордона с гистерезисными связями.....	70
Ильин М.Е. Математическая модель управления электромеханической системой.....	75
Енгальчева Н.Р. Математические методы экономического анализа.....	80
Карасева Н.И., Дмитриева М.Н., Абрамова Р.П., Варакута А.Л. Анализ влияния качественного состава питьевой воды на частоту заболеваний ЖКТ (на примере нескольких районов Липецкой области).....	83

Дунаева И.В., Дехтяр Д.А. Моделирование влияния осевого вращения на деформирование заряда в рамках изучения технических дисциплин.....	89
Тупицын А.В., Тупицына С.В. Скорринговая модель для коммерческого банка на основе наивного байесовского классификатора.....	92
Сафонова Ю.А., Лемешкин А.В., Панарин Д.Ю., Рудыка А.О. использование алгоритма нечеткого вывода в процессе определения сбалансированного состава продуктов питания.....	96
Сафонова Ю.А., Черняева С.Н., Тимашов А.Н., Струненко И.А. Применение методов математического моделирования при разработке пищевых изделий со сбалансированным составом.....	101
Утеулиев Н.У., Бегитов Б.Н. Методы качественного анализа для эколого-экономических моделей очистки загрязненных вод.....	105
Секция «ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ».....	108
Полковникова Н.А. Система поддержки принятия решений на основе свёрточных нейронных сетей по распознаванию объектов на изображениях.....	108
Шитова К.Г. Разработка интеллектуальной рекомендательной системы подбора кредитных продуктов для предприятий на основе нейронных сетей.....	112
Ершов М.Д. Особенности реализации алгоритмов анализа изображений на платформе интеллектуальных камер.....	116
Клочко В.К., Нгуен К.Х. Повышение точности и надежности пассивной системы ближнего видения.....	121
Храмшина Е.О. Программные средства поиска ассоциативных правил.....	125
Маканов К.И., Муравьев В.С. Исследование эффективности применения LBP и HOG дескрипторов в задаче распознавания лиц.....	131
Савин Д.С. Применение PTV Vissma для моделирования перекрестка на ул. Дзержинского – Первомайский проспект.....	136
Муртазов А.К. Особенности оптического диапазона и организация метеорологического мониторинга оптико-электронными средствами.....	142
Селиванов Е.В. Новые методы в предсказательной аналитике.....	152
Ломаков А.В. Современные технологии визуализации данных.....	156
Дмитриевский Б.С., А.А. Терехова, Канавалов И.А., Аль-Кнфер С.Н.А. Оперативное планирование и управление сложными объектами.....	162
Ивкина М.С., Марчев Д.В. Обзор методов визуализации многомерных данных.....	166

Бобиков А.И., Барина А.А., Назаркин Н.А. Проектирование закона управления методом динамического обратного шага для решения задачи слежения в системе из двух спаренных резервуаров.....	170
Баранова Ю.И. Локализация дорожных знаков на основе методов выделения контуров на изображениях.....	174
Овчинников А.Ю., Корепанов С.Е. Автоматическое слежение за объектом с использованием корреляционного метода.....	178
Бабаян П.В., Сконников П.Н., Трофимов Д.В. Алгоритм сегментации объекта на изображении для определения размера эталона при автоматическом сопровождении объектов.....	184
Ловкин Д.В., Корепанов С.Е. Слежение за объектом с использованием метода оценки оптического потока.....	187
Алланазарова Ю.Р. Алгоритмы обработки изображений в бортовых системах обнаружения и слежения за объектами.....	191
Смирнов М.А. Алгоритм определения дальности до объекта с помощью пассивной стереоскопической системы.....	195
Белов В.В., Лопатин А.К. Решение задачи оптимизации автоматической обработки изображений.....	199
Миронов В.В., Труханов С.В. Применение математического аппарата нечёткой логики при тематической обработке данных космической гиперспектральной съемки.....	204
Бабаян П.В., Буйко С.А., Вдовкин Л.А., Ершова М.Д., Муравьева В.С., Орехова А.М., Сиренко А.В., Смирнова С.А. Оценка качества слежения, выполняемого на основе пирамидального алгоритма Лукаса-Канаде, в реальном времени.....	206
Колдаева К.С. Исследование методов оценивания состояния дискретного канала связи.....	210
Староверов С.В., Иванова И.А., Перунова В.Э., Чижова Н.А. Эффективность алгоритмов выбора товара для потребителя в системе LOGINOM.....	214
Кудинов И.А. Калибровка видеокамер многоспектральной системы технического зрения с помощью универсального тест-объекта.....	219
Назаров А.Д. Применение механизмов асинхронного программирования при разработке приложений на мобильных устройствах на базе ОС Android.....	223

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Научное издание

В 10 томах

Том 5

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.20. Формат 60х84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 28,75.

Тираж 100 экз. Заказ №.

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Редакционно-издательский центр РГРТУ,
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.
Отпечатано в типографии Book Jet,
390005, г. Рязань, ул. Пушкина, д. 18