

16+

ISSN 2074-1707

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В. Н. ТАТИЩЕВА

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2023
№ 2 (62)

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК России для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям.

Группа специальностей 1.2 «Компьютерные науки и информатика»:

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Группа специальностей 2.2 «Электроника, фотоника, приборостроение и связь»:

2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки);

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки);

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки).

Группа специальностей 2.3 «Информационные технологии и телекоммуникации»:

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);

2.3.4 – Управление в организационных системах (технические науки);

2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);

2.3.6 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

Журнал входит в базу данных Ulrich's Periodicals Directory.

Астрахань
Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева
2023

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Астраханского государственного университета имени В. Н. Татищева

**ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:
управление и высокие технологии**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2023
№ 2 (62)**

Редакционная коллегия

И.М. Азмухамедов, доктор технических наук, профессор, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности, профессор кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева (главный редактор)

И.В. Аникин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы информационной безопасности» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ

А.А. Большаков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и управления» Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)

Л.А. Демидова, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительной и прикладной математики» Рязанского государственного радиотехнического университета (г. Рязань)

А.С. Катасёв, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем информационной безопасности ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» (г. Казань)

И.Ю. Квятковская, доктор технических наук, профессор, директор Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

А.Г. Кравец, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» Волгоградского государственного технического университета

В.Ю. Кузнецова, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационной безопасности Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева

Ю.В. Литовка, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета

А.М. Лихтер, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая физика» Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева

А.А. Лобатый, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск)

Е.В. Никольцев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и моделирование систем» Московского технологического университета (МИРЭА) (г. Москва)

В.О. Осипян, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные технологии» Кубанского государственного университета (г. Краснодар)

И.Ю. Петрова, доктор технических наук, профессор, первый проректор Астраханского государственного архитектурно-строительного университета, заведующая кафедрой САПР Астраханского государственного архитектурно-строительного университета

А.В. Рыбиков, кандидат физико-математических наук, директор «Физико-математического института» Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева; доцент кафедры электротехники, электроники и автоматики Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева

А.В. Скрипаль, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Медицинская физика» Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

И.Б. Старченко, доктор технических наук, профессор, ООО «Параметрика», научный руководитель (г. Таганрог Ростовской области)

Т.Л. Тен, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» Карагандинского экономического университета (Республика Казань, г. Караганда)

Е.Н. Тищенко, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и защита информации» Ростовского государственного экономического университета (РИНХ) – г. Ростов-на-Дону

С.А. Филит, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Биомедицинская инженерия» Юго-Западного государственного университета (г. Курск)

Л.Р. Фиопова, доктор технических наук, профессор, декан факультета Вычислительной техники, заведующая кафедрой «Информационное обеспечение управления и производства» Пензенского государственного университета

В.А. Цимбал, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» (Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого МО в г. Серпухов Московской области)

Н.К. Юрков, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета

N.A. Kolesova, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

Serg Miranda, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science, University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS dept. and MBDS innovation lab (www.mbds-fr.org)

Журнал выходит 4 раза в год
Все материалы, поступающие в редколлегию журнала,
проходят независимое рецензирование

© Астраханский государственный университет,
имени В. Н. Татищева, 2023
© Гайфитдинова С. Ю., дизайн обложки, 2023

ASTRAKHAN TATISHCHEV STATE UNIVERSITY

**PRIKASPIYSKIY ZHURNAL:
Upravlenie i Vysokie Tekhnologii**

**CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2023
No. 2 (62)**

The journal is included in the list of the reviewed scientific journals recommended by VAK of Russia for the publication of the main scientific results of theses for the candidate of science degree, for the doctor of science degree on the following scientific specialties.

Group of specialties 1.2 “Computer science and informatics”:

1.2.2 – Mathematical modelling, numerical methods and complexes of programmes (technical sciences).

Group of specialties 2.2 “Electronics, photonics, instrument engineering and communication”:

2.2.4 – Instruments and methods of measurement (by type of measurement) (technical sciences);

2.2.11 – Information-measuring and control systems (technical sciences);

2.2.12 – Medical devices, systems and products (technical sciences).

Group of specialties 2.3 “Information technologies and telecommunications”:

2.3.1 – System analysis, information control and processing (technical sciences);

2.3.4 – Management in organizational systems (technical sciences);

2.3.5 – Mathematical software and software for computing systems, complexes and computer networks (technical sciences);

2.3.6 – Information security methods and systems, information security (technical sciences).

The journal is included into the database Ulrich’s Periodicals Directory.

Astrakhan
Astrakhan Tatishchev State University
2023

Recommended by the Editorial and Publishing Board
of Astrakhan Tatishchev State University

**CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

2023

No. 2 (62)

Editorial Board

I.M. Azhmukhamedov, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Dean of the Faculty of Digital Technologies and Cybersecurity, Professor of Information Security Department, Astrakhan Tatishchev State University (**Editor-in-Chief**)

I.V. Anikin, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Security System Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI»

A.A. Bolshakov, Doct. Sci. (Engineering), Professor of «Systems of Automated Design Engineering and Control» department, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)

L.A. Demidova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Computational and Applied Mathematics Department, Ryazan State Radio Engineering University (Ryazan)

A.S. Katasev, Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Information Security Systems, Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev – KAI "(Kazan)

I.Yu. Kvyatkovskaya, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of "Information Technologies and Communications" Institute of the Astrakhan State Technical University

A.G. Kravets, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Automated Design Engineering Systems and Search Constructing Department, Volgograd State Technical University

V.Yu. Kuznetsova, Cand. Sci. (Engineering), Senior Lecturer of Information Security Department, Astrakhan Tatishchev State University

Yu.V. Litovka, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Automated Support System for Decision-Making, Tambov State Technical University

A.M. Likhner, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of General Physics, Astrakhan Tatishchev State University

A.A. Lobaty, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Systems and Technologies Department, Belarusian National Technical University (Belarus, Minsk)

E.V. Nikulchev, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the System Management and Modeling Department, Moscow Technological University (Moscow)

V.O. Osipyan, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Kuban State University (Krasnodar)

I.Yu. Petrova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, First Vice-Rector of the Astrakhan State Architectural and Construction University, Head of the CAD department of Astrakhan State Architectural and Construction University

A.V. Rybakov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Institute of Physics and Mathematics, Astrakhan Tatishchev State University

A.V. Skripal, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Medical Physics Department of the Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky

I.B. Starchenko, Doct. Sci. (Engineering), Professor, OOO «Parametrica» (Taganrog, Rostov Oblast), Research Supervisor

T.L. Ten, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Karaganda Economic University (Republic of Kazakhstan, Karaganda)

E.N. Tishchenko, Doct. Sci. (Economics), Professor, Head of the Information Technologies & Information Security Department, Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don

S.A. Filist, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of Biomedical Engineering Department, Southwest State University (Kursk)

L.R. Fionova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Dean of the Computer Technology Faculty, Head of the Department «Information Support of Management and Production, Penza State University

V.A. Tsimbal, Doct. Sci. (Engineering), Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Professor of the Automated Control Systems Department (Branch of the Military Academy of the Russian Strategic Missile Forces named after Peter the Great of the Moscow Oblast, Serpukhov, Moscow Oblast)

N.K. Yurkov, Honored worker of science of the Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the department «Designing and production of the radio equipment», Penza State University

N.A. Kolesova, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

Serg Miranda, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science dept., University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS department and MBDS innovation lab (www.mbds-fr.org)

The journal is published four times a year
All materials that come to the Editorial Board of the journal
are subject to independent peer-review

© Astrakhan Tatishchev State University, 2023
© S. Yu. Gayfitdinova, cover design, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

**Д. С. Соловьев, И. А. Соловьева,
В. В. Хлебников, Д. А. Саратов**

Математическое и компьютерное моделирование влияния
плотности заряда взрывчатых веществ
на динамику ударных волн в жидкостных средах 9–17

**П. Ф. Чернавин, Ф. П. Чернавин,
Д. Я. Андросов, Н. П. Чернавин**

Дерево секущих гиперплоскостей 18–25

А. В. Михайличенко, А. Е. Деркач, И. Б. Паращук

Элементы линейной калмановской экстраполяции
и гранулярных вычислений в приложении к задачам проактивного
контроля надежности мобильных центров обработки данных 26–33

К. А. Такшеев, И. А. Осипова

Модель корректировки временной оценки
при проектировании программного обеспечения
в условиях неопределенности или противоречивости данных 34–41

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**А. Н. Дилигенская, В. В. Золотарев,
Н. Е. Карпова, С. В. Селигеев**

Децентрализованное управление информационной безопасностью
на основе эмерджентного интеллекта в информационных системах 42–50

И. М. Ажмухамедов, Р. Ю. Демина, Н. О. Демин

Навязывание ложной информации злоумышленнику,
осуществляющему атаку с использованием SQL-инъекции 51–58

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

**А. А. Кабанов, В. А. Крамарь, О. А. Крамарь,
С. И. Фатеев, В. А. Карапетян**

Обнаружение, распознавание и локализация объекта в водной среде
с заданными отличительными признаками
при помощи системы технического стереозрения 59–73

И. М. Ажмухамедов, Н. Н. Багаев

Структура программного обеспечения для поддержки
принятия решений по управлению составом
средств защиты информации исполнительных
органов государственной власти 74–85

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Е. А. Ищукова, К. С. Романенко

В. В. Филимонова, В. Д. Салманов

Методика анализа данных в блокчейн-системе Bitcoin 86–96

В. В. Глебов, А. Н. Марьенков
Сравнительный анализ алгоритмов
обнаружения человека на изображении97–106

А. Н. Ручай
Обзор исследований в области оценки
физических и морфологических характеристик
биологических макрообъектов по изображениям..... 107–118

Д. О. Семёночкин, А. Г. Кравец
Подход к классификации методов тегирования
в системах автоматической обработки документов 119–125

И. С. Вершинин
Выбор оптимального объема стегаcontainers
для ассоциативной защиты картографических
и текстовых сцен. Обоснование выбора 126–134

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ)

А. С. Коновской, С. В. Нестеров
Адаптация модели оптимального приемника радиосигналов
в условиях лицензионных ограничений 135–142

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

**А. В. Полтавский, Н. К. Юрков, А. И. Мельничук,
А. Г. Избасов, И. М. Рыбаков**
Алгоритмизация задач фильтрации в модели
информационно-измерительной и управляющей системы
беспилотных летательных аппаратов..... 143–153

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 154

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM SYSTEMS

- D. S. Solovjev, I. A. Solovjeva,
V. V. Khlebnikov, D. A. Saratov**
Mathematical and computer modeling of the charge density influence
to explosives on the shock waves dynamics in fluid environment..... 9–17
- P. F. Chernavin, F. P. Chernavin,
D. Y. Androsov, N. P. Chernavin**
Tree of cutting hyperplanes..... 18–25
- A. V. Mikhailichenko, A. E. Derkach, I. B. Parashchuk**
Elements of linear kalman extrapolation
and granular computing in application to the tasks
of proactive reliability control of mobile data centers..... 26–33
- K. A. Taksheev, I. A. Osipova**
A model for adjusting the time estimate when designing software
under conditions of uncertainty or inconsistency of data 34–41

METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION PROTECTION, INFORMATION SECURITY

- A. N. Diligenskaya, V. V. Zolotarev,
N. E. Karpova, S. V. Seligeev**
Decentralized information security management
based on emergent intelligence in information systems..... 42–50
- I. M. Azhmukhamedov, R. Yu. Demina, N. O. Demin**
Imposing false information on an attacker
carrying out an attack using SQL-injection..... 51–58

MATHEMATICAL SOFTWARE AND SOFTWARE FOR COMPUTING MACHINES, COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS

- A. A. Kabanov, V. A. Kramar, O. A. Kramar,
S. I. Fateev, V. A. Karapetian**
Detection, recognition and localization of an object
in water environment with designated differentiative features
using the system of technical stereo vision 59–73
- I. M. Azhmukhamedov, N. N. Bagaev**
The structure of software to support decision-making
on the management of the composition of information security
tools of executive bodies of state power 74–85

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

- E. A. Ishchukova, K. S. Romanenko,
V. V. Filimonova, V. D. Salmanov**
Data analysis methodology in the Bitcoin blockchain system 86–96

V. V. Glebov, A. N. Marenkov
Comparative analysis of algorithms
for detecting a person in an image97–106

A. N. Ruchay
Review of studies in the assessment
of physical and morphological characteristics
of biological objects using images 107–118

D. O. Semjonochkin, A. G. Kravec
Approach to the classification of tagging methods
in automatic document processing systems 119–125

I. S. Vershinin
Choosing the optimal stegocontainer volume for associative protection
of cartographic and text scenes. Justification of the choice 126–134

**INSTRUMENT ENGINEERING, MEASUREMENT SCIENCE,
INFORMATION AND MEASURING DEVICES AND SYSTEMS**

**INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT
(BY TYPE OF MEASUREMENT)**

A. S. Konovskoi, S. V. Nesterov
Adaptation of the optimal radio receiver model
under license restrictions 135–142

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

**A. V. Poltavsky, N. K. Yurkov, A. I. Melnichuk
A. G. Izbasov, I. M. Rybakov**
Algorithmization of the filtration problem in the model
of information-measuring and control system
of unmanned aerial vehicles..... 143–153

RULES FOR THE AUTHORS 154

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 004.942

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ДИНАМИКУ УДАРНЫХ ВОЛН В ЖИДКОСТНЫХ СРЕДАХ

Соловьев Денис Сергеевич, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-6613-3218, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Соловьева Инна Александровна, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, кандидат технических наук, ассистент, ORCID: 0000-0002-1798-1859, e-mail: good.win32@yandex.ru

Хлебников Владимир Викторович, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-6152-1334, e-mail: khlebnikovvv@mail.ru

Саратов Дмитрий Александрович, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, студент, ORCID: 0009-0009-3642-8803, e-mail: dimjkee6800@yandex.ru

В работе проводится анализ существующих исследований по изучению динамики ударной волны для прогнозирования последствий взрыва. Для описания основных характеристик и явлений ударной волны в работе рассматривается система уравнений математической модели. Предложен алгоритм расчета, каждая итерация которого состоит из 8 шагов, определяющих: скорость движения во времени для каждого узла; координаты узлов; плотности узлов; искусственную вязкость; внутреннюю энергию лагранжевой частицы на единицу массы; давление в ячейке; шаг по времени из условия устойчивости Куранта – Фридрикса – Леви; контроль балансов энергии и массы. Расчет системы уравнений ведется с помощью одномерного конечно-разностного метода семейства «крест» с использованием неравномерной сетки, в которой масса всех сферических концентрических слоев одинаковая. Предложенный алгоритм реализован в программном обеспечении, с помощью которого проведен анализ результатов расчета уравнений модели для различных плотностей взрывчатых веществ.

Ключевые слова: математическая модель, взрывчатое вещество, численный метод, плотность заряда, алгоритм, детонация, ударная волна, жидкостная среда

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING OF THE CHARGE DENSITY INFLUENCE TO EXPLOSIVES ON THE SHOCK WAVES DYNAMICS IN FLUID ENVIRONMENT

Solovjev Denis S., Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-6613-3218, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Solovjeva Inna A., Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant, ORCID: 0000-0002-1798-1859, e-mail: good.win32@yandex.ru

Khlebnikov Vladimir V., Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics & Mathematics), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-6152-1334, e-mail: khlebnikovvv@mail.ru

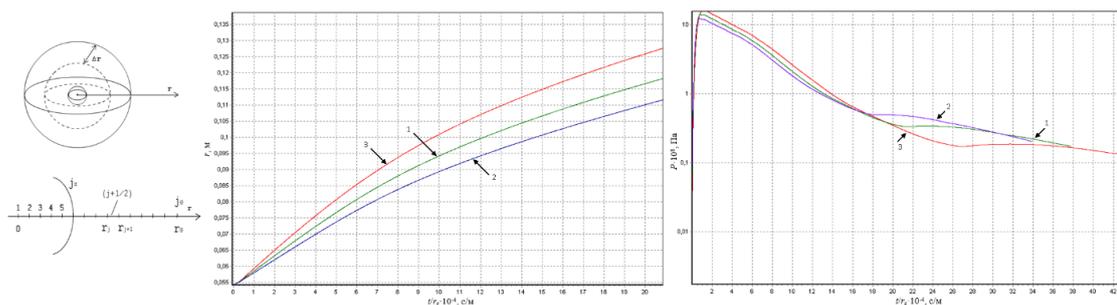
Saratov Dmitrij A., Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

student, ORCID: 0009-0009-3642-8803, e-mail: dimjkee6800@yandex.ru

An analysis of existing studies on the study of the shock wave dynamics for predict the effects of an explosion is carried out in the article. The system of mathematical model equations is considered in the article to describe the main characteristics and phenomena of the shock wave. The calculation algorithm is proposed, each iteration of which consists of 8 steps that determine: movement speed in time for each node; node coordinates; node density; artificial viscosity; internal energy of a Lagrangian particle per unit mass; pressure in cell; time step from the Courant-Friedrichs-Lewy stability condition; energy and mass balances control. The system of mathematical model equations calculation is carried out using the one-dimensional finite-difference method of the «cross» family with a non-uniform grid in which the mass for all spherical concentric layers is the same. The proposed algorithm is implemented in the software, which was used to analyze the calculating results the system of mathematical model equations for various densities of explosives.

Keywords: mathematical model, explosive, numerical method, charge density, algorithm, detonation, shock wave, fluid environment

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Взрыв представляет собой весьма сложный нелинейный физический процесс [1]. При любом взрыве внезапный выброс энергии порождает ударную волну, которая, двигаясь от очага взрыва, распространяется в окружающую среду. Далее следует образование газового пузыря, в котором происходят сложные динамические явления, включающие колебания и движение вверх. Прогнозирование последствий взрыва является важным в задачах, связанных с изучением динамики ударной волны как для проектирования систем защиты [2], оценки аварий [3], так и для исследований, связанных с оружием [4]. Так, основной целью защитной конструкции является повышение вероятности выживания людей на объекте от ударной волны после взрыва [5]. Ударная волна, создаваемая подводным взрывом, может нанести серьезный ущерб как надводным кораблям, так и подводным лодкам и поставить под угрозу их живучесть [6]. Основную информацию о процессе детонации взрывчатых веществ в настоящее время дает эксперимент. В работе [7] представлено экспериментальное исследование влияния водяного тумана как на смягчение ударной нагрузки, так и на динамическую реакцию защитной конструкции. Определению угла первого выхода детонационной волны на поверхность заряда, угла срыва детонации и времени задержки ее распространения посвящена работа [8]. В работе [9] описывается практическая методика оценки чувствительности взрывчатых веществ к различного рода тепловым воздействиям. Полномасштабные эксперименты с использованием взрывчатых веществ информативны, но имеют ряд ограничений: высокий риск и стоимость; строгие условия при низкой воспроизводимости параметров. С развитием информационных технологий компьютерное моделирование становится основным средством решения таких проблем [10, 11]. Благодаря использованию численных методов возможно изучение детонации взрывчатых веществ, особенно ударных волн, пузырьков и кавитации для понимания механизмов протекающих процессов. Одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на детонацию, является плотность взрывчатого вещества, исследование которой позволит оценить основные характеристики распространения ударной волны в окружающей среде.

Целью работы является исследование влияния плотности заряда взрывчатых веществ на динамику ударных волн в жидкостных средах с использованием математического и компьютерного моделирования.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В рассматриваемой математической модели явления происходят в следующей последовательности. Детонация сферического взрывчатого вещества инициируется в его центре, при этом ударная волна распространяется наружу с постоянной скоростью, пока не достигнет жидкости; в этом случае распределение переменных задается автомодельным решением Тейлора. При столкновении сферического детонационного фронта с жидкостью имеет место мгновенная стыковка течений на границе раздела; после этого в жидкость переходит ударная волна, а в детонационной волне распространяется волна разрежения. За волной разрежения на границе раздела формируется вторая

ударная волна, следующая к центру, в котором она отражается. Вторая ударная волна при достижении границы раздела газ – жидкость инициирует незначительную пульсацию и частично отражается. Явления внутреннего отражения удара и его частичного переноса в жидкость повторяются. Последовательности волн разрежения, вызванных с расширением, и вторичных ударных волн, перекрывающих волны разрежения, происходят в виде течения внутри газовой сферы. Когда основная ударная волна проходит последовательно расположенные сферические слои жидкости, в них вносятся энергии. Часть данной энергии представляет собой кинетическую, а другая – внутреннюю. Энтропия жидкости при этом увеличивается. После прохождения ударного фронта сферический слой жидкости, который приходит в движение, расширяется изоэнтропически (если не учитывать слабого влияния второй ударной волны), и, когда давление в нем возвратится к величине невозмущенного давления, этот слой будет иметь более высокий удельный объем и температуру, чем до встречи с ударным фронтом. Увеличившаяся в это время внутренняя энергия (диссипация энергии) слоя жидкости проявляется в росте температуры. Диссипация энергии в отдельном сферическом слое зависит только от условий в невозмущенной среде, интенсивности основной ударной волны в данном месте и уравнения состояния жидкости. Ударноволновая энергия у поверхности заряда (сумма диссипативных энергий, исчисляемая от границы раздела между газом и жидкостью и продолжаемая до произвольной точки) составляет приблизительно половину полной энергии, выделившейся при детонации, и может быть вычислена, если из расчетов или из экспериментов известна зависимость пикового давления ударной волны от расстояния. Таким образом, математическая модель содержит следующую систему уравнений:

1. Уравнение неразрывности (сохранения масс):

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{dU}{dr} + 2 \frac{U}{r} \right) = 0. \tag{1}$$

2. Уравнение движения (сохранения импульса):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}. \tag{2}$$

3. Уравнения для внутренней энергии вещества:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\partial \tau}{\partial t} + U \frac{\partial \tau}{\partial r} = - \frac{P}{\rho} \left(\frac{\partial U}{\partial r} + 2 \frac{U}{r} \right), \tag{3}$$

где ρ – плотность (кг/м³);

U – радиальная массовая скорость движения (м/с);

t – время (с);

P – давление (Па);

r – расстояние до центра взрыва (м);

τ – внутренняя энергия лагранжевой частицы (сферического слоя) (Дж/кг).

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим заряд взрывчатого вещества в форме шара, который подрывается в безграничной однородной жидкой среде [12]. Будем использовать радиальные координаты, т. е. примем, что детонационная волна распространяется одинаково во всех направлениях (рис. 1а). Рассмотрим неравномерную сетку, представленную на рисунке 1б.

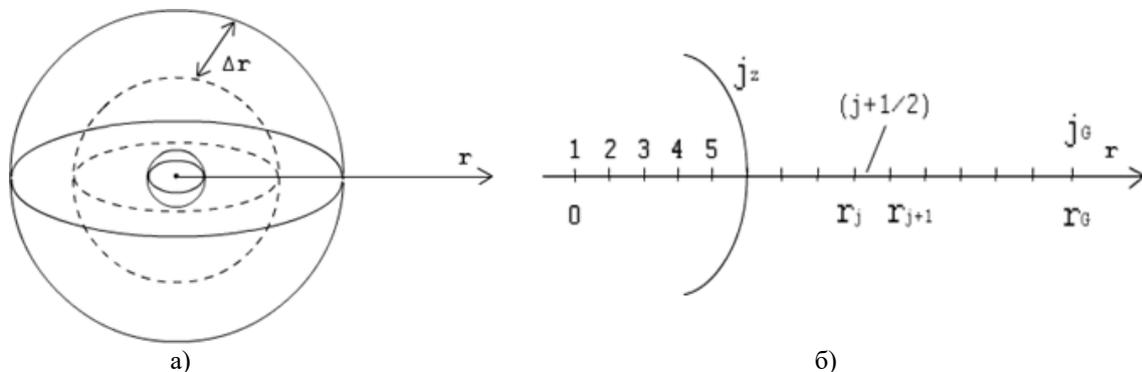


Рисунок 1 – Схема распространения детонационной волны (а) и представление взрывчатого вещества с окружающей его средой в виде сетки (б)

Разобьем геометрически заряд взрывчатого вещества и окружающую его среду на сферические концентрические пространственные ячейки неравномерно, т. е.:

$$r_{j+1} - r_j \neq const.$$

Разбиение осуществляется так, чтобы масса всех сферических концентрических слоев была одинаковой, другими словами, во всем поле движения выполняется условие:

$$h = \rho_{j+1/2}^0 \frac{(x_{j+1}^0)^3 - (x_j^0)^3}{3} = const, \quad (4)$$

где h – заданная эффективная масса ячейки (кг);

$\rho_{j+1/2}^0$ – начальная плотность вещества (кг/м³), определяемая согласно:

$$\rho_{j+1/2}^0 = \begin{cases} \rho_{BB}^0, & \text{если } j \leq j_z - 1 \\ \rho_{Ж}^0, & \text{если } j > j_z - 1 \end{cases}, \quad (5)$$

где ρ_{BB}^0 – начальная плотность взрывчатого вещества (кг/м³);

$\rho_{Ж}^0$ – начальная плотность жидкости (кг/м³);

j_z – номер узла, разделяющего взрывчатое вещество и жидкость.

Расчет осуществляется в следующей последовательности пошагово (верхний индекс указывает на временной шаг расчета):

1. Уравнение движения (находится новая скорость движения на $(n+1)$ -м шаге по времени в j -м узле):

$$U_j^{n+1} = U_j^n - \frac{\Delta t^n}{h} \left[(P_{j+1/2}^n + Q_{j+1/2}^n) - (P_{j-1/2}^n + Q_{j-1/2}^n) \right] (r_j^n)^2, \quad (6)$$

где Q – искусственная вязкость (Па);

Δt – шаг по времени (с).

2. Новая координата j -го узла:

$$r_j^{n+1} = r_j^n + \Delta t^n U_j^{n+1} \quad (7)$$

или

$$r_j^{n+1} = r_j^n + \frac{\Delta t}{2} (U_j^n + U_j^{n+1}). \quad (8)$$

3. Уравнение неразрывности для плотности:

$$\rho_{j+1/2}^{n+1} = \frac{3h}{(r_{j+1}^{n+1})^3 - (r_j^{n+1})^3} = const. \quad (9)$$

4. Для получения монотонного неосциллирующего численного решения к давлению добавляется искусственная вязкость:

$$Q_{j+1/2}^{n+1} = \begin{cases} 0, & \text{если } U_{j+1}^{n+1} \geq U_j^{n+1} \\ -C_L a_{j+1/2}^n \rho_{j+1/2}^{n+1} (U_{j+1}^{n+1} - U_j^{n+1}), & \text{если } U_{j+1}^{n+1} < U_j^{n+1} \end{cases}, \quad (10)$$

где C_L – безразмерный коэффициент вязкости жидкости;

$a_{j+1/2}^n$ – скорость звука в $(j+1/2)$ -й ячейке (м/с):

$$a_{j+1/2}^n = \begin{cases} \sqrt{\frac{\gamma_{BB} P_{j+1/2}^n}{\rho_{j+1/2}^n}}, & \text{если } j \leq j_z - 1 \\ C_0, & \text{если } j > j_z - 1 \end{cases}, \quad (11)$$

где C_0 – скорость звука в жидкости (м/с);

γ_{BB} – эффективный показатель адиабаты продуктов детонации.

5. Уравнение внутренней энергии лагранжевой частицы на единицу массы:

$$\tau_{j+1/2}^{n+1} = \tau_{j+1/2}^n + \frac{(U_{j+1}^n)^2 + (U_j^n)^2 - (U_{j+1}^{n+1})^2 - (U_j^{n+1})^2}{4} - \frac{(\Delta t)^n}{h} \left[\frac{P_{j+3/2}^n + Q_{j+3/2}^{n+1} + P_{j+1/2}^n + Q_{j+1/2}^{n+1}}{2} \right], \quad (12)$$

$$\cdot U_{j+1}^{n+1} \left(\frac{r_{j+1}^{n+1} + r_{j+1}^n}{2} \right)^2 - \frac{P_{j+1/2}^n + Q_{j+1/2}^{n+1} + P_{j-1/2}^n + Q_{j-1/2}^{n+1}}{2} \cdot U_j^{n+1} \left(\frac{r_j^{n+1} + r_j^n}{2} \right)^2 \Bigg].$$

6. Нахождение нового давления в $(j+1/2)$ -й ячейке:

$$P_{j+1/2}^{n+1} = f_{BB}(\rho_{j+1/2}^{n+1}, \tau_{j+1/2}^{n+1}), \quad (13)$$

если ячейки принадлежат продукту детонации взрывчатого вещества, т. е. $j \leq j_z - 1$, и

$$P_{j+1/2}^{n+1} = f_{Ж}(\rho_{j+1/2}^{n+1}, \tau_{j+1/2}^{n+1}), \quad (14)$$

если ячейки принадлежат жидкости, т. е. $j \geq j_z - 1$, где $f_{BB}(\rho, \tau)$, $f_{Ж}(\rho, \tau)$ – уравнения состояния соответственно продуктов детонации и жидкости.

7. Нахождение нового шага по времени из условия устойчивости.

Трудности расчета методом искусственной вязкости до больших времен связаны с условной численной устойчивостью [13]. Шаг по времени для каждого цикла вычисления должен быть выбран достаточно малым, чтобы возмущение, распространяющееся с местной скоростью звука, не могло за этот шаг пересечь наименьшую конечно-разностную ячейку (условие Куранта – Фридрихса – Леви). Поэтому, хотя и возможно, но непрактично проводить расчеты полного колебания на уровне моря с уравнением состояния, которое дает точную скорость звука. Для взрывов на больших глубинах период будет значительно короче, и здесь расчеты полного периода методом искусственной вязкости являются вполне осуществимыми:

$$\Delta t^{n+1} = \min_j \left\{ \frac{1}{2} \frac{r_{j+1}^{n+1} - r_j^{n+1}}{a_{j+1/2}^{n+1} + \frac{|U_{j+1}^{n+1} + U_j^{n+1}|}{2}} \right\}. \quad (15)$$

Если $\Delta t^{n+1} > Q_d \Delta t^n$, то

$$\Delta t^{n+1} = Q_d \Delta t^n, \quad (16)$$

где $Q_d = 1, 1 \div 1, 2$.

8. Для внутреннего контроля правильности работы необходимо отслеживать балансы энергии и массы:

а) закон сохранения массы:

$$M^{n+1} = \sum_j \rho_{j+1/2}^{n+1} \frac{(r_{j+1}^{n+1})^3 + (r_j^{n+1})^3}{3} = const = M_0, \quad (17)$$

где суммирование распространяется на всю расчетную область (по всем расчетным ячейкам);

б) закон сохранения энергии (суммы кинетической и внутренней энергии):

$$E^{n+1} = \sum_j \left[\tau_{j+1/2}^{n+1} \frac{(U_{j+1}^{n+1})^2 + (U_j^{n+1})^2}{4} \cdot \rho_{j+1/2}^{n+1} \frac{(r_{j+1}^{n+1})^3 + (r_j^{n+1})^3}{3} \right] = const = E_0, \quad (18)$$

Для выделения единственного решения необходимо задать граничные и начальные условия.

Граничные условия:

а) в центре симметрии: $r_1^n = 0$ и $U_1^n = 0$;

б) на границе расчетной области: $r_{jG}^n = r_G = const$ и $U_{jG}^n = 0$.

Начальные условия:

а) при условии $t = 0$ во всей расчетной области полагается $U_j^0 = 0$;

б) в области, занятой жидкостью ($j \geq j_z$), полагается $\rho_{j+1/2}^0 = \rho_{Ж}^0$, $P_{j+1/2}^0 = P_0$ и $\tau_{j+1/2}^0 = 0$;

в) в области продуктов детонации ($j \leq j_z - 1$) полагается $\rho_{j+1/2}^0 = \rho_{BB}^0$, $\tau_{j+1/2}^0 = \tau^0$

и $P_{j+1/2}^0 = (\gamma_{BB} - 1) \rho_{j+1/2}^0 \cdot \tau_{j+1/2}^0$, где $r_{j_z} = r_z$ – начальный радиус заряда.

Начальные условия в продуктах детонации являются приближением «лопающейся среды», в котором считается, что энергия взрывчатого превращения выделяется мгновенно, т. е. пренебрегается процессом детонационной волны в заряде. Данное приближение оправдано на расстояниях $r > (2\div 3)r_z$.

Перед началом вычислений необходимо задать начальную сетку. Для этого воспользуемся тем, что радиус заряда r_z известен и сетка разбивается таким образом, чтобы масса всех сферических концентрических слоев была одинаковой.

Инициализация начальных значений в узлах сетки осуществляется следующим образом:

- 1) задается число ячеек в заряде n_z ($j_z = n_z + 1$);
- 2) поскольку все ячейки должны иметь одинаковую эффективную массу h , то

$$h = \frac{\rho_{BB}^0 \cdot (r_{j_z}^{n=0})^3}{3n_z}. \quad (19)$$

Отсюда находится:

$$r_2^{n=0} = \sqrt[3]{\frac{3h}{\rho_{BB}^0}}; \quad (20)$$

- 3) в цикле j от 2 до $j_z - 1$:

$$r_{j+1}^{n=0} = \sqrt[3]{\frac{3h}{\rho_{BB}^0} + (r_j^{n=0})^3}; \quad (21)$$

- 4) в цикле j от j_z до j_G :

$$r_{j+1}^{n=0} = \sqrt[3]{\frac{3h}{\rho_{Ж}^0} + (r_j^{n=0})^3}. \quad (22)$$

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для решения поставленной задачи согласно (4)–(22) разработано программное приложение, позволяющее исследовать процесс распространения ударных волн при взрыве сосредоточенного заряда взрывчатого вещества в жидкости [14].

Исходными данными в приложении являются: радиус заряда; плотность взрывчатого вещества; плотность жидкости, в которой происходит взрыв заряда; энергия лагранжевой частицы; значение показателя адиабаты; количество точек в заряде; количество точек в жидкости.

Количество точек в заряде и жидкости определяет размерность динамических одномерных массивов для хранения расчетных данных со значениями: скорости; энергии лагранжевой частицы; радиуса; давления; объема; искусственной вязкости. При этом размерность массивов задается удвоенной – элементы с четными номерами задают значения в основных узлах сетки, с нечетными – в промежуточных.

В результате расчетов для близко отстоящих моментов времени определяются данные о положении и скорости частиц для каждой границы ячейки, а также давление, искусственная вязкость, удельный объем и внутренняя энергия в средней точке ячейки. Местоположение ударных волн, которые обнаруживаются автоматически как резкие, но непрерывные переходы, находится по локальным максимумам искусственной вязкости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования производятся для следующих взрывчатых веществ: 1) $\rho_{BB1}^0 = 1650$ кг/м³ (тринитротолуол $C_6H_2CH_3(NO_2)_3$); 2) $\rho_{BB2}^0 = 800$ кг/м³ (нитрат аммония NH_4NO_3); 3) $\rho_{BB3}^0 = 1950$ кг/м³ (перхлорат аммония NH_4ClO_4). Жидкостью выступает вода с плотностью $\rho_{Ж}^0 = 1000$ кг/м³. В расчетах использовались значения параметров и функций, приведенные в таблице.

Таблица – Значения параметров и функций

Параметр/функция (единица измерения)	Значение
Начальный радиус заряда r_z (м)	0,0545
Граница расчетной области r_G (м)	0,3
Число ячеек в заряде n_z (шт)	8
Эффективный показатель адиабаты продуктов детонации γ_{BB}	1,8
Скорость звука в воде C_0 (м/с)	1500
Безразмерный коэффициент вязкости жидкости C_L	1
Начальное давление жидкости P_0 (Па)	100000
Коэффициент пропорциональности для временного шага Q_d	1,2
Внутренняя энергия лагранжевой частицы τ_0 (Дж/кг)	4200000
Уравнение состояния продуктов детонации $f_{BB}(\rho, \tau)$ (Па)	$(\gamma_{BB} - 1) \rho \cdot \tau$

Уравнение состояния жидкости $f_{ж}(\rho, \tau)$ (Па)	$4,5 \cdot 10^8 \cdot (\rho/\rho^0_{ж} - 1) + P_0$
---	--

С помощью разработанного приложения проанализированы зависимости характеристик системы уравнений (1)–(3) для каждого из взрывчатых веществ с построением графических зависимостей: максимальных скорости и давления от расстояния до взрывчатого вещества; радиуса заряда и давления от времени взрыва.

Дополнительно определим рекомендации по выбору числа ячеек в заряде относительно длительности расчета системы уравнений математической модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2а и 2б изображены зависимости максимальной скорости U_{max} и давления P_{max} от расстояния r/r_z в логарифмических координатах соответственно.

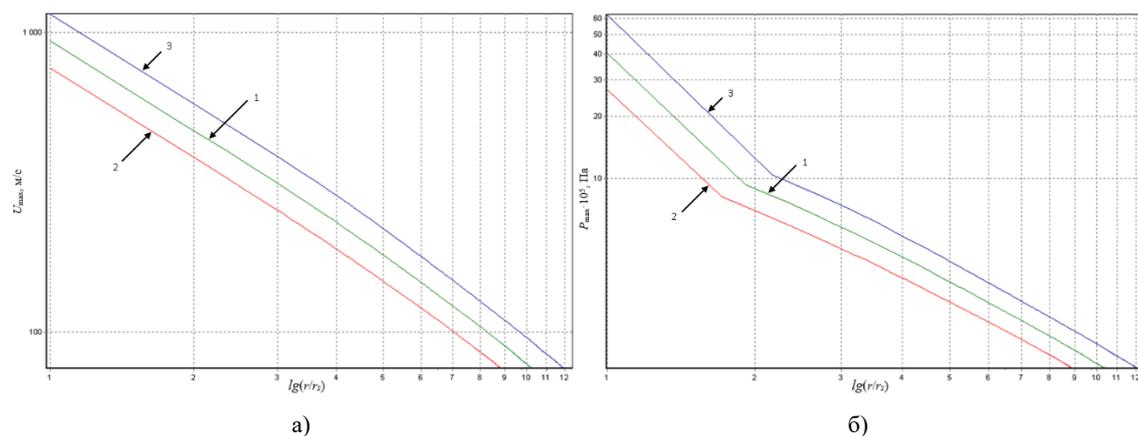


Рисунок 2 – Зависимость максимальной скорости U_{max} (а) и давления P_{max} (б) от расстояния r/r_z для трех веществ: 1) тринитротолуол; 2) нитрат аммония; 3) перхлорат аммония

В логарифмических координатах максимальная скорость распространения волны в воде практически является прямой линией. Таким образом, можно говорить об экспоненциальной зависимости скорости ударной волны от расстояния до центра заряда. Характер зависимостей скорости во всех случаях идентичен. С увеличением плотности вещества увеличивается скорость распространения детонации.

Кривые максимальных давлений имеют ярко выраженный «излом». Резкое изменение пикового давления сглаживается при задании более частой сетки для точек, значения которых выводятся на график. В данном случае оно принималось равным каждой тысячной точке.

На рисунке 3а изображены зависимости радиуса заряда r во времени взрыва t/r_z . При уменьшении плотности вещества радиус заряда также уменьшается.

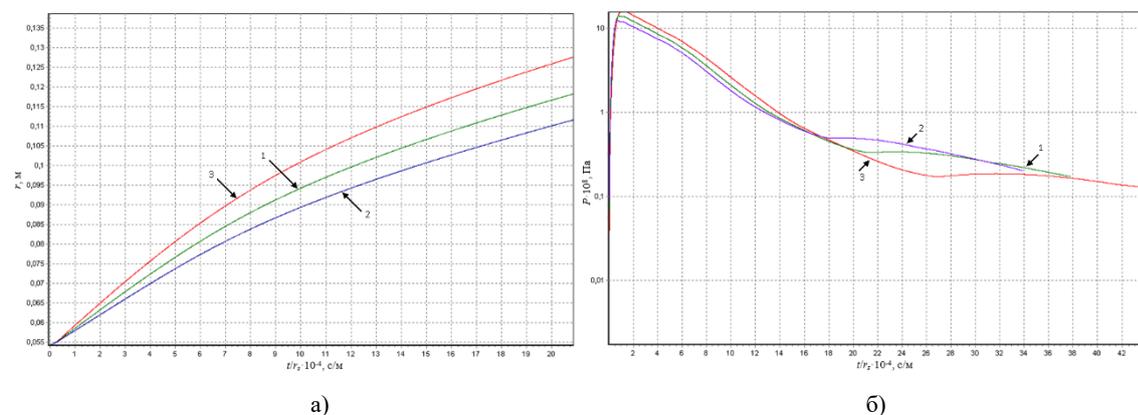


Рисунок 3 – Зависимость радиуса заряда r (а) и давления P (б) от времени взрыва t/r_z для трех веществ: 1) тринитротолуол; 2) нитрат аммония; 3) перхлорат аммония

Зависимость давления P на расстоянии одного начального радиуса заряда от центра во времени взрыва t/r_z приведена на рисунке 3б. При увеличении плотности взрывчатого вещества пиковое значение давления в определенной точке также увеличивается. Далее во времени появляются «изломы» за счет образования вторичных ударных волн, причем они появляются тем раньше, чем меньше плотность взрывчатого вещества.

Следует отметить, что при расчете системы уравнений (1)–(3) математической модели важную роль играет число ячеек в заряде n_z . Если взять его значение большим ($n_z > 10$), то точность расчетов повышается, однако в этом случае возникает необходимость увеличения числа ячеек в жидкости, так как в этом случае уменьшается эффективная масса каждой ячейки, которая должна быть постоянной, следовательно, намного возрастает длительность расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внимание, уделяемое проблеме изучения взрывов, в том числе самого мощного из них – ядерного, сказывается на интенсивном развитии представлений о природе ударных волн и постоянном совершенствовании методов расчета и экспериментальной техники. Явления ударной волны, вызванной взрывом, и оценка ее характеристик представляют собой сложную задачу как в теоретических, так и в прикладных исследованиях. Описание явлений, характерных для взрывных ударных волн, можно получить с использованием математического моделирования. Применение численных методов на основе конечных разностей позволяет исследовать основные характеристики ударных волн с использованием компьютерного моделирования. Так, последующее формулирование задачи оптимизации позволит подобрать вещество такой плотности, детонация которого в требуемой окружающей среде обеспечит значения максимальных скорости и давления ударной волны от центра заряда до расстояния к объектам различной конфигурации. Решение такой задачи оптимизации позволит существенно сократить количество дорогостоящих и опасных натуральных экспериментов со взрывчатыми веществами, а также обеспечить предварительную оценку заданного уровня защиты объектов.

Список источников

1. Орленко, Л. П. Физика взрыва и удара / Л. П. Орленко. – Москва : Физматлит, 2017. – 408 с.
2. Мишуев, А. В. Обеспечение взрывобезопасности и взрывоустойчивости промышленных, транспортных, энергетических и гражданских объектов / А. В. Мишуев, В. В. Казеннов, Н. В. Громов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 1–2. – С. 336–340.
3. Рыбаков, А. В. Варианты оценки защищенности зданий при аварийных взрывах / А. В. Рыбаков, Е. В. Иванов, А. Ю. Лебедев // Энергетическая политика. – 2020. – № 1 (143). – С. 88–95.
4. Булгаков, В. Г. О новых возможностях установления принадлежности осколков, изымаемых с мест взрывов, взрывному устройству / В. Г. Булгаков, Е. В. Булгакова, М. Ю. Гераськин // Судебная экспертиза. – 2017. – № 4 (52). – С. 83–97.
5. Шульгин, А. В. Результаты испытаний по определению параметров воздушной ударной волны и волны сжатия от взрыва конденсированных взрывчатых веществ при взаимодействии с элементами конструкций защитного сооружения / А. В. Шульгин // Технологии гражданской безопасности. – 2006. – Т. 3, № 2 (10). – С. 126–132.
6. Соловьев, Д. С. Численное моделирование погружения и всплытия подводных аппаратов с учетом их конфигурации (на примере подводных лодок) / Д. С. Соловьев, И. А. Соловьева, В. В. Хлебников, А. В. Самохвалов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 4 (56). – С. 105–114.
7. Shao, K. An experimental study on the mitigation effects of fine water mist on confined-blast loading and dynamic response of steel plates / K. Shao, H. Zhou, C. Zheng, H. Liu, W. Wu, Z. Guan, J. Dear // International Journal of Impact Engineering. – 2019. – Vol. 134. – P. 103370.
8. Го, С.-Л. Экспериментальное исследование и численное моделирование обтекания угла при детонации взрывчатых веществ на основе ТАТБ и CL-20 / С.-Л. Го, В. Цао, И.-Л. Дуань, Ю. Хань, Ц.-Л. Жань, С.-Ц. Лу // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 6. – С. 111–118.
9. Абизяева, А. В. Новый метод определения температуры вспышки взрывчатых материалов / А. В. Абизяева, Е. С. Васильева, А. М. Пыжов, Д. А. Сеницын // Бутлеровские сообщения. – 2018. – Т. 54, № 5. – С. 125–130.
10. Liu, M. B. Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology / M. B. Liu, G. R. Liu, Zhi Zong, K. Y. Lam // Computers & Fluids. – 2003. – Vol. 32. – P. 305–322.
11. Элькин, М. Д. Моделирование структуры и динамики S-гексогена / М. Д. Элькин, В. В. Смирнов, Е. А. Джалмухамбетова, О. М. Алыкова, Л. С. Амантаева // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 4 (20). – С. 066–071.
12. Мейдер, Ч. Л. Численное моделирование детонации / Ч. Мейдер. – Москва : Мир, 1985. – 384 с.
13. Баско, М. М. Метод искусственной вязкости расчета одномерных течений / М. М. Баско // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1990. – Т. 30, № 4. – С. 601–610.
14. Хлебников, В. В. Моделирование динамики ударных волн для детонации зарядов взрывчатых веществ в жидкостных средах : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611476 / В. В. Хлебников, Д. С. Соловьев, И. А. Соловьева, А. В. Самохвалов. – Дата регистрации: 26.01.2022.

References

1. Orlenko, L. P. *Fizika vzryva i udara* [The physics of explosion and impact]. Moscow, Fizmatlit, 2017. 408 p.
2. Mishuev, A. V., Kazyonov, V. V., Gromov, N. V. Obespecheniye vzryvobezопасnosti i vzryvoustoychivosti promyshlennykh, transportnykh, energeticheskikh i grazhdanskikh ob'yektov [Software explosion and industrial blast transport energy and civilian objects]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], 2011, no. 1–2, pp. 336–340.
3. Rybakov, A. V., Ivanov, E. V., Lebedev, A. Yu. Varianty otsenki zashchishchennosti zdaniy pri avariynnykh vzryvakh [Options for assessing the safety of buildings in case of emergency explosions]. *Energeticheskaya politika* [The Energy Policy], 2020, no. 1 (143), pp. 88–95.
4. Bulgakov, V. G., Bulgakova, E. V., Geraskin, M. Yu. O novykh vozmozhnostyakh ustanovleniya prinadlezhnosti oskolkov, izymayemykh s mest vzryvov, vzryvnomu ustroystvu [On new possibilities of establishing the accessories of shards removed from explosion sites to the explosive device]. *Sudebnaya ekspertiza* [Forensic examination], 2017, no. 4 (52), pp. 83–97.
5. Shulgin A. V. Rezultaty ispytaniy po opredeleniyu parametrov vozduшной udarnoy volny i volny szhatiya ot vzryva kondensirovannykh vzryvchatykh veshchestv pri vzaimodeystvii s elementami konstruktsiy zashchitnogo sooruzheniya [Results of tests to determine the parameters of an air shock wave and a compression wave from an explosion of condensed explosives when interacting with structural elements of a protective structure]. *Tekhnologii grazhdanskoй bezопасnosti* [Civil Security Technologies], 2006, vol. 3, no. 2 (10), pp. 126–132.
6. Solovyev, D. S., Solovyeva, I. A., Khlebnikov, V. V., Samokhvalov, A. V. Chislennoye modelirovaniye pogruzheniya i vsplytiya podvodnykh apparatov s uchetom ikh konfiguratsii (na primere podvodnykh lodok) [Numerical simulation of immersion and ascent processes for underwater vehicles taking into account their configuration (on the example of submarines)]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2021, no. 4 (56), pp. 105–114 (in Russ.).
7. Shao, K., Zhou, H., Zheng, C., Liu, H., Wu, W., Guan, Z., Dear, J. An experimental study on the mitigation effects of fine water mist on confined-blast loading and dynamic response of steel plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, vol. 134, p. 103370.
8. Guo, X.-L., Cao, W., Duan, Y.-L., Han, Y., Ran, J.-L., Lu, X.-J. Eksperimentalnoye issledovaniye i chislennoye modelirovaniye obtokaniya ugla pri detonatsii vzryvchatykh veshchestv na osnove TATB i CL-20 [Experimental study and numerical simulation of the corner turning of TATB based and CL-20 based polymer bonded explosives]. *Fizika goreniiya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2016, vol. 52, no. 6, pp. 111–118.
9. Abizyaeva, A. V., Vasilyeva, E. S., Pyzhov, A. M., Sinityn, D. A. Novyy metod opredeleniya temperatury vspyshki vzryvchatykh materialov [A new method for determination of deflagration point of explosives]. *Butlerovskie soobshcheniya* [Butlerov Communications], 2018, vol. 54, no. 5, pp. 125–130.
10. Liu, M. B., Liu, G. R., Zong, Zhi, Lam, K. Y. Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology. *Computers & Fluids*, 2003, vol. 32, pp. 305–322.
11. Elkin, M. D., Smirnov, V. V., Dzhalukhambetova, E. A., Alykova, O. M., Amantaeva, L. S. Modelirovaniye struktury i dinamiki S-geksogena [The modeling structure and dynamics of the S-cyclonite hexogen]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2012, no. 4 (20), pp. 066–071.
12. Meyder, Ch. L. *Chislennoye modelirovaniye detonatsii* [Numerical simulation of detonation]. Moscow, Mir Publ., 1985. 384 p.
13. Basko, M. M. Metod iskusstvennoy вязкости rascheta odnomernykh techeniy [Artificial viscosity method for calculating one-dimensional flows]. *Zhurnal vychislitelnoy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1990, vol. 30, no. 4, pp. 601–610.
14. Khlebnikov, V. V., Solovyev, D. S., Solovyeva, I. A., Samokhvalov, A. V. Modelirovaniye dinamiki udarnykh voln dlya detonatsii zaryadov vzryvchatykh veshchestv v zhidkostnykh sredakh : svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programm dlya EVM [Modeling of shock wave dynamics for detonation of explosive charges in liquid media : the certificate on state registration of the computer program. no. 2022611476], registration date 26.01.2022.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 14.03.2023.

The article was submitted 06.03.2023; approved after reviewing 13.03.2023; accepted for publication 14.03.2023.

DOI 10.54398/20741707_2023_2_18

УДК 004.001

ДЕРЕВО СЕКУЩИХ ГИПЕРПЛОСКОСТЕЙ

Чернавин Павел Федорович, Уральский федеральный университет, 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,

кандидат экономических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-3214-3906, e-mail: chernavin.p.f@gmail.com

Чернавин Федор Павлович, Уральский федеральный университет, 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,

кандидат экономических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-4105-231X, e-mail: chernavin_fedor@mail.ru

Андросов Дмитрий Ярославович, ООО «Озон Технология», 123112, г. Москва, Пресненская наб., 10, пом. I, этаж 41,

математик-разработчик, ORCID:0000-0003-2366-8997, e-mail: androsov.dya@phystech.edu

Чернавин Николай Павлович, Уральский федеральный университет, 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,

ассистент, ORCID: 0000-0002-2093-9715, e-mail: ch_k@mail.ru

Многие задачи классификации могут быть успешно решены методом дерева решений. В классической постановке в каждом узле дерева решение принимается на основе значения только одного признака, и поэтому деревья получаются громоздкими и трудно воспринимаемыми. В статье предлагается новый метод машинного обучения – дерево секущих гиперплоскостей. Базовая идея дерева решений – иерархические логические правила сохраняются, но решение в каждом узле принимается на основе секущей гиперплоскости, что значительно уменьшает размер дерева. Для решения данной задачи могут быть использованы программы частично-целочисленного математического программирования. Ключевое отличие предлагаемого подхода от других методов состоит в использовании в каждом узле функции Relu 1. Основой данного метода послужили работы по теории комитетных решений Уральской школы распознавания образов Института математики и механики УрО РАН. В статье приводится описание алгоритма построения дерева секущих гиперплоскостей и приводятся результаты классификации на данных из репозитория UCI.

Ключевые слова: классификация, машинное обучение, решающие деревья, гиперплоскость, метод комитетов, комитет старшинства

TREE OF CUTTING HYPERPLANES

Chernavin Pavel F., Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-3214-3906, e-mail: chernavin.p.f@gmail.com

Chernavin Fedor P., Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-4105-231X, e-mail: chernavin_fedor@mail.ru

Androsov Dmitry Y., Ozon Technology LLC, floor 41, office 1, 10 Presnenskaya embankment, Moscow, 123112, Russian Federation,

mathematician-developer, ORCID:0000-0003-2366-8997, e-mail: androsov.dya@phystech.edu

Chernavin Nikolai P., Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, Assistant, ORCID: 0000-0002-2093-9715, e-mail: ch_k@mail.ru

Many classification problems can be successfully solved by the decision tree method. In the classical formulation, at each node of a tree, a decision is made based on a value of only one feature, and therefore the trees are cumbersome and difficult to perceive. The article proposes a new machine learning approach - a tree of secant hyperplanes. The basic idea of a decision tree is that the hierarchical logical rules are preserved, but the decision at each node is made based on the secant hyperplane, which significantly reduces the size of the tree. To solve this problem, programs of partial-integer mathematical programming can be used. The key difference between the proposed approach and other methods is the use of the Relu 1 function in each node. This method is based on the theory of committee machine decisions of the Ural School of Pattern Recognition of the Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The article describes the algorithm to construct a tree of secant hyperplanes and presents the results of classification on data from the UCI repository.

Keywords: classification, machine learning, decision trees, hyperplane, committee machine method, precedence committee

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач классификации с табличными данными достаточно часто используются бустинги на деревьях решений. При этом в дереве решений в классической постановке используются правила вида: если значение некоторого признака $< const$, то принимается какое-то решение или анализируется другой признак. То есть дерево принятия решений в каждом узле оперирует только одним признаком. Пример классификации дерева решений приведен на рисунке 1.

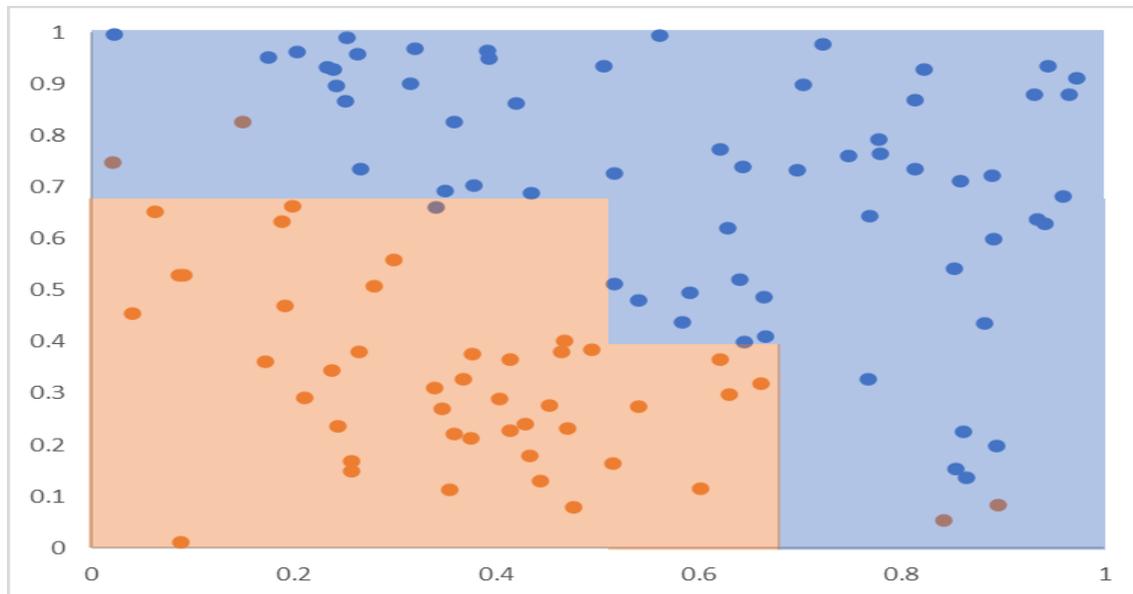


Рисунок 1 – Классификация дерева решений

Соответственно, дерево решений не способно решить следующую простую задачу классификации:

$$F(x_1, x_2) = \begin{cases} x_1 \leq x_2, F = 0 \\ x_1 > x_2, F = 1 \end{cases} \quad (1)$$

где F – метка класса; x_1, x_2 – входные параметры классифицируемых множеств.

Так, например, для примера, приведенного на рисунке 1, более корректным выглядит построение линейной, разделяющей гиперплоскости (Logit Regression).

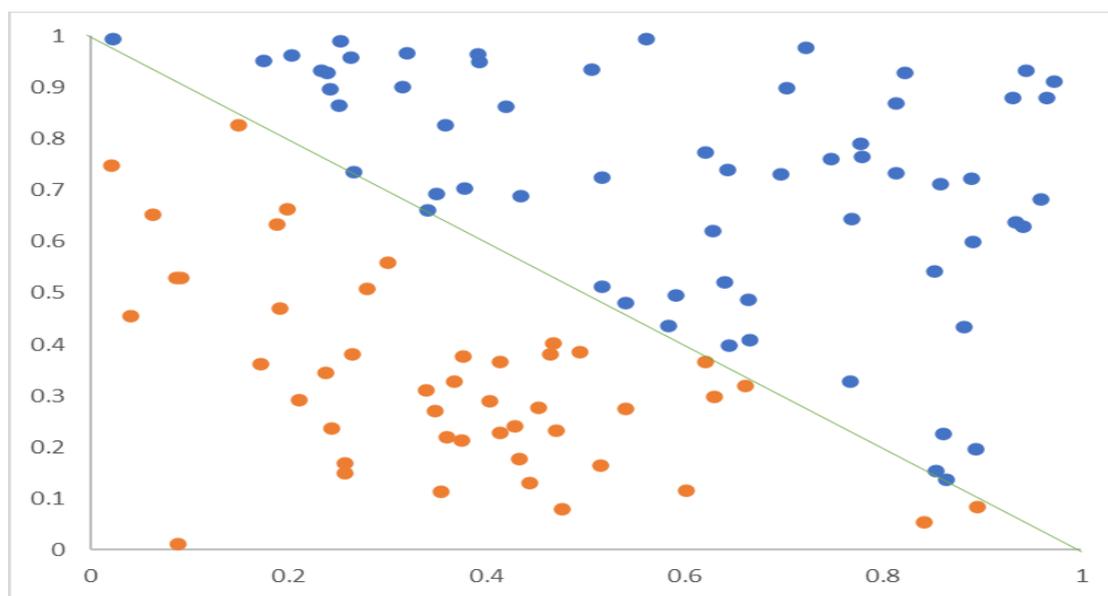


Рисунок 2 – Разделение множества гиперплоскостью

Целью работы является предложить алгоритм построения дерева решений, в котором в каждом узле принятие решений будет осуществляться исходя из того, находится наблюдение выше или ниже гиперплоскости, и показать практические результаты алгоритма на датасетах из UCI-репозитория. Данный алгоритм в дальнейшем в работе будет называться деревом секущих гиперплоскостей.

МЕТОД КОМИТЕТОВ

Идея дерева секущих гиперплоскостей появилась в рамках развития практического применения метода комитетов. Понятие комитета впервые появилось в работах Эйблора и Кейлора [2] в середине 60-х годов XX века. Дальнейшее развитие данный подход к построению решающих правил получил в задачах классификации уральской школы распознавания образов [3–5], а также в ряде публикаций зарубежных авторов [6–9]. Членом комитета называют линейный дискриминант – гиперплоскость. Будем считать, например, что если объект наблюдения находится выше гиперплоскости, то член комитета голосует «за», а на гиперплоскости или ниже – «против».

В теории комитетных конструкций рассматриваются следующие виды комитетов:

1. В комитете большинства решение о классификации принимается исходя из «решения» (нахождение объекта выше или ниже гиперплоскости) большинства членов комитета.

2. В комитете единогласия решение о принадлежности классов определяется при единогласном решении членов комитета.

3. В Р-комитете решение определяется исходя из сумм весов членов комитета. Комитеты большинства и единогласия являются частными случаями Р-комитета.

4. В комитете старшинства решение о классификации принимается последовательно, сперва старший член, затем, в случае отказа от классификации, решение принимается следующим по старшинству членом и т. д.

КОМИТЕТ СТАРШИНСТВА

Как было указано выше, в комитете старшинства решение о классификации принимается последовательно, сперва старший член, затем, в случае отказа от классификации, решение принимается следующим по старшинству членом и т. д. Соответственно, комитет старшинства можно построить итерационным способом. Далее проиллюстрируем графически построение комитета старшинства. Первоначальные множества изображены на рисунке 3.

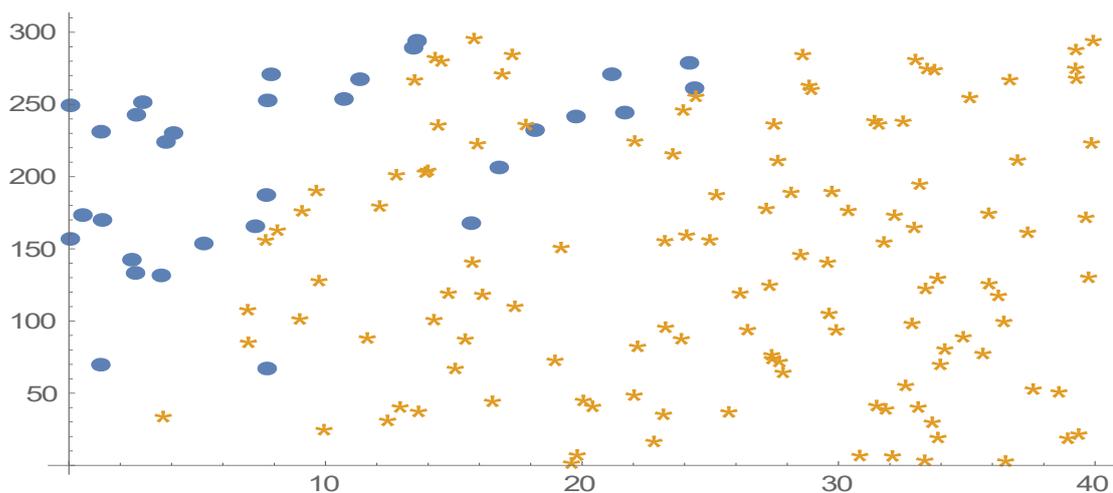


Рисунок 3 – Пример множеств, разделяемых КС

Синей стрелкой на рисунке 4 показано «голосование» за принадлежность к синему классу. После этого точки, за которые проголосовал член комитета, исключаются. Следующий член комитета строится на точках, от «голосования» за которые первый член комитета воздерживается.

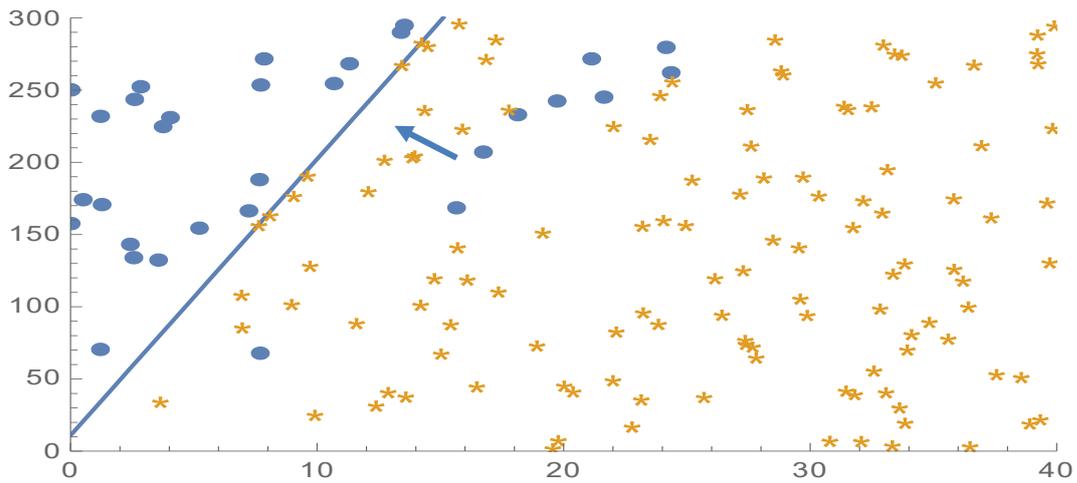


Рисунок 4 – Построение первого члена

Оранжевой стрелкой на рисунке 5 показано «голосование» за принадлежность к оранжевому классу.

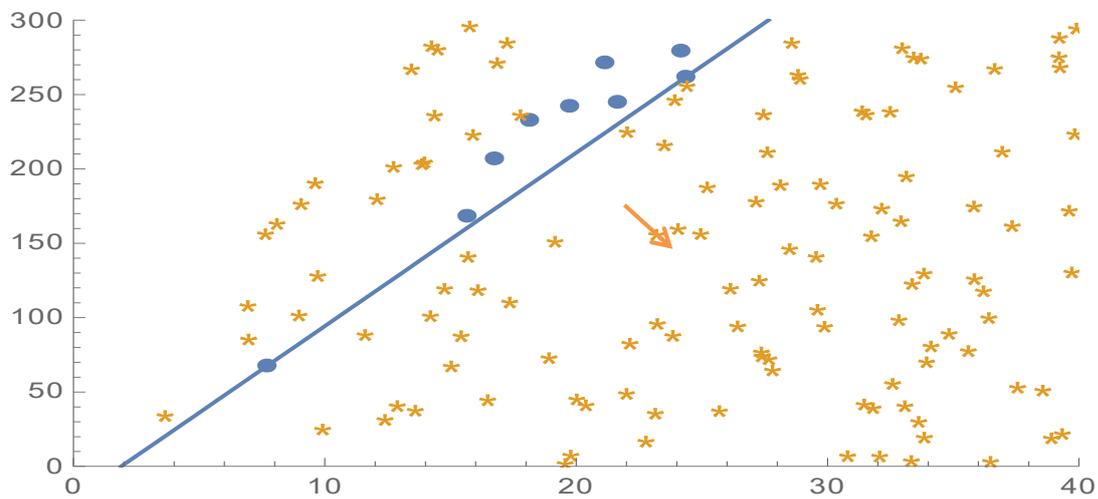


Рисунок 5 – Построение второго члена комитета

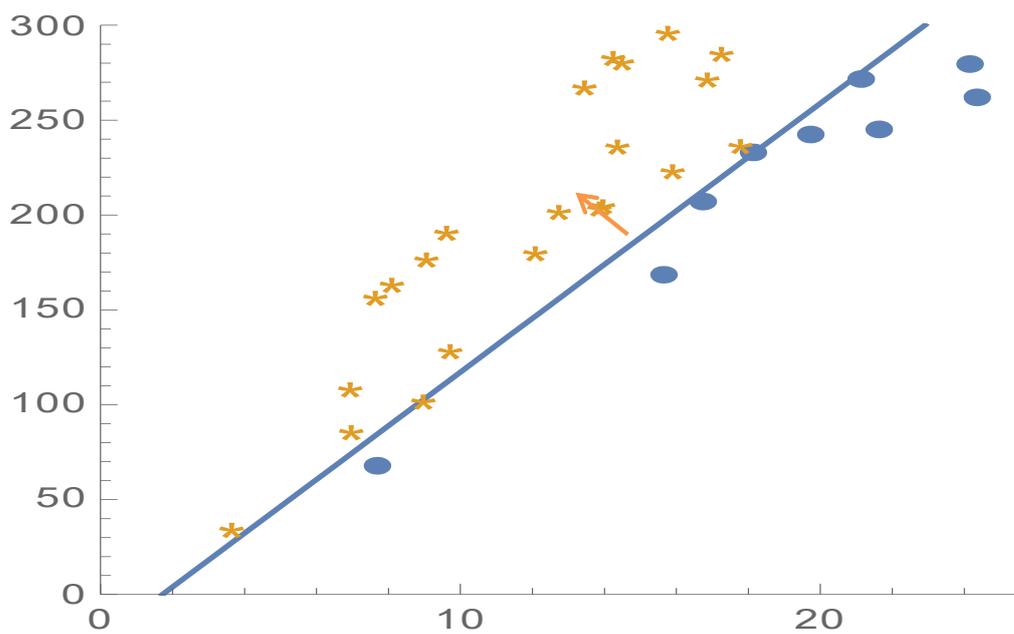


Рисунок 6 – Построение 3 члена комитета

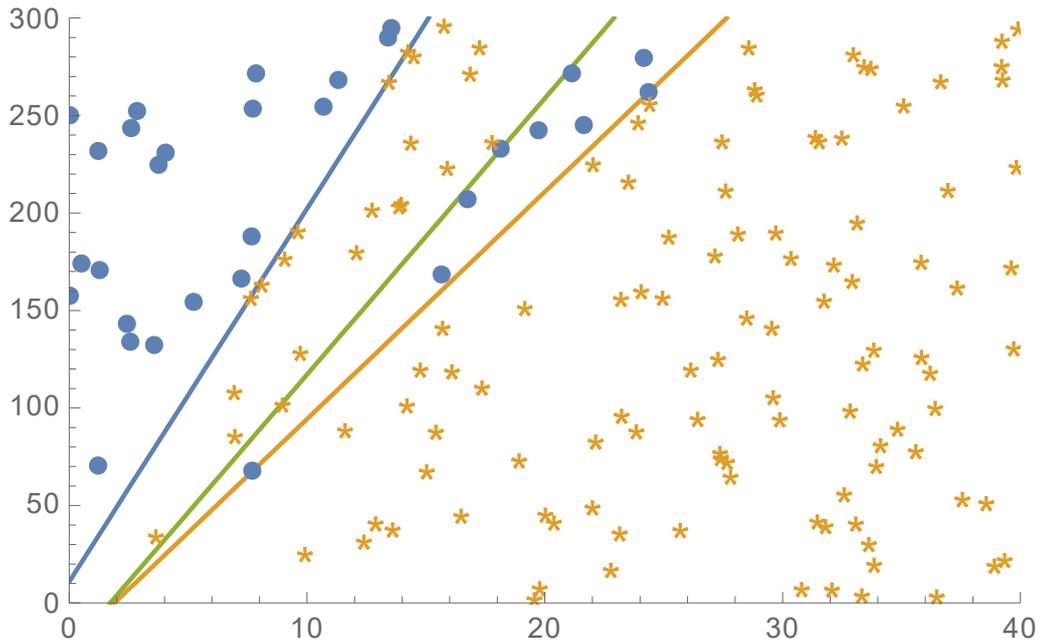


Рисунок 7 – Разделение множеств тремя линейными классификаторами (членами комитета)

Итого для стопроцентного разделения данного множества на обучающей выборке потребовалось всего три линейных классификатора.

В целом построение любых комитетов можно свести к задачам линейного программирования с частично целочисленными переменными [10], но данный подход имеет некоторые ограничения в связи с вычислительной сложностью задачи при большом объеме наблюдений. Поэтому в данной статье мы рассматриваем альтернативный подход на основе функции ReLU 1.

ДЕРЕВО СЕКУЩИХ ГИПЕРПЛОСКОСТЕЙ

По сути, дерево секущих гиперплоскостей является частным случаем комитета старшинства, построенного с использованием функции ReLU 1 (данная функция показала наилучшие практические результаты при обучении, но в целом не исключено использование иных нелинейных функций). При этом член комитета будет являться узлом дерева, полупространство, отсекаемое членом комитета, – листом дерева. Переход от теории комитетных решений к деревьям решений осуществлен в связи с большей распространённостью терминологии деревьев решений в существующей практике машинного обучения. Обозначим вектора коэффициентов секущих гиперплоскостей как $w_1^T, w_2^T, w_3^T, \dots$, а свободные члены – как $b_1, b_2, b_3 \dots$. Тогда дерево секущих гиперплоскостей можно представить в виде дерева решений следующего вида (рис. 8).

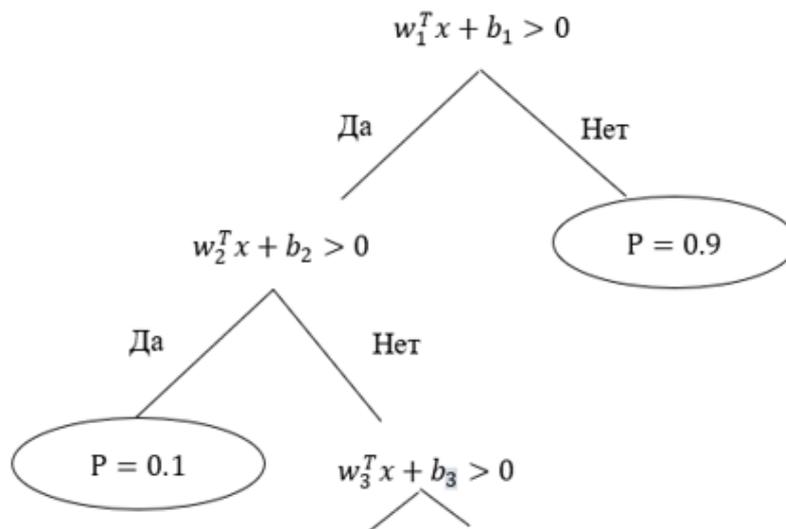


Рисунок 8 – Пример дерева секущих гиперплоскостей

Как видно из рисунка, на каждом узле логическое правило формируется гиперплоскостью.

ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВА СЕКУЩИХ ГИПЕРПЛОСКОСТЕЙ ЧЕРЕЗ RELU 1

Для построения дерева секущих гиперплоскостей можно использовать функцию ReLU1, которая задается следующим образом:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & 0 \leq x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases}$$

Для построения гиперплоскости, отсекающей класс 1, целевая функция задается следующим образом:

$$\min \sum(L - (L + 1) * y_i) * ReLU1(w_z * x_{z,i}), \tag{2}$$

где y_i – метка класса наблюдения i ; $x_{z,i}$ – параметры наблюдения i ; w_z – веса признака z в линейной гиперплоскости; L – некоторое число, влияющее на долю класса 0 в отсекающей гиперплоскости (при больших L член комитета будет полностью отказываться от классификации, при малых L доля класса 0 будет существенной. Далее будет описан алгоритм подбора L).

Функция принимает значения 0 для всех случаев, когда член комитета отказывается от классификации (точки лежат ниже гиперплоскости – значения $w_z * x_{z,i} \leq 0$). В ином случае для класса 0 функция принимает следующий вид: $L * ReLU1(w_z * x_{z,i})$, для класса 1 функция принимает вид $ReLU1(w_z * x_{z,i})$. Соответственно, минимизируя данную функцию, мы будем стремиться к увеличению числа точек класса 1, лежащих выше гиперплоскости, при одновременном уменьшении числа точек класса 0.

Как следует из рисунков 3–4, член комитета может голосовать за принадлежность к классу 1 или классу 0. Очевидно, что в случае, если требуется построить член комитета, голосующий за класс 0, то y_i необходимо заменить на $(1 - y_i)$.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ

Для построения дерева секущих гиперплоскостей с использованием функции ReLU1 предлагается следующий жадный алгоритм. В качестве гиперпараметра алгоритма требуется задать число наблюдений (N), находящихся выше гиперплоскости, данный параметр схож с минимальным числом наблюдений на листе у дерева.

Шаг 1. Осуществляется построение 2 гиперплоскостей (голосование за класс 1 / класс 0), при этом L определяется как 2^k ($k = 10$).

Шаг 2. Из 2 гиперплоскостей отбирается гиперплоскость с наибольшим числом наблюдений, лежащих выше гиперплоскости (голосование). В случае, если число наблюдений меньше N , то выполняется шаг 1 с $k = k - 1$ и т. д., до нахождения k , при котором число наблюдений выше гиперплоскости будет больше N .

Шаг 3. Наблюдения, которые находятся выше гиперплоскости, исключаются из выборки, вероятности принадлежности к классу определяются исходя из долей классов. Далее возвращаемся к шагу 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЕРЕВА СЕКУЩИХ ГИПЕРПЛОСКОСТЕЙ

В таблицах 1–2 далее представлены результаты применения дерева секущих гиперплоскостей на данных из UCI репозитория [11] и сравнение с другими методами по метрике GINI.

Таблица 1 – Результаты методов на тестовых выборках

Наборы данных	Дерево секущих гиперплоскостей	Decision tree	Random forest	Логистическая регрессия	LightGBM
Electrical Grid Stability Simulated Data	0,850	0,760	0,950	0,770	0,970
Wine Quality	0,590	0,570	0,800	0,570	0,740
Heart Disease	0,820	0,690	0,790	0,830	0,730
MAGIC Gamma Telescope	0,800	0,750	0,860	0,680	0,870
Wilt	0,900	0,770	0,996	0,540	0,997
Phishing Websites	0,950	0,950	0,976	0,950	0,979
Occupancy	0,992	0,987	0,997	0,985	0,997
HTRU2	0,945	0,941	0,946	0,950	0,963
Online shoppers intention	0,800	0,830	0,850	0,770	0,860

Таблица 2 – Характеристики наборов данных

Наборы данных	Объем выборки	Объем обучающей выборки	Объем тестовой выборки	Количество признаков	Доля класса 1	Время построения дерева секущих гиперплоскостей, с
Electrical Grid Stability Simulated Data	10000	7000	3000	12	0,37	984
Wine Quality	5000	3500	1500	11	0,66	653
Heart Disease	300	200	100	7	0,54	107
MAGIC Gamma Telescope	19000	13000	6000	10	0,65	692
Wilt	4300	3000	1300	5	0,02	5
Phishing Websites	10000	7000	3000	30	0,56	2 181
Occupancy	20500	14400	6100	5	0,23	61
HTRU2	18000	12500	5500	8	0,09	79
Online shoppers intention	12300	8600	3700	17	0,15	985

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом в большинстве случаев дерево секущих гиперплоскостей имеет качество выше, чем у дерева решений на основе классического подхода, но при этом проигрывает бустингам на деревьях (Random forest, LightGBM). Заметим, что дерево секущих гиперплоскостей также может использоваться в бустингах, и можно ожидать получение большей точности по сравнению с бустингами классического дерева. На текущий момент время, затрачиваемое на построение дерева секущих гиперплоскостей, значительно превышает время построения классического дерева. Поэтому дальнейшие исследования будут направлены на ускорение построения дерева. На наш взгляд, предлагаемый нами подход к построению дерева решений на основе секущих гиперплоскостей имеет хорошие перспективы, так как представляет разумный компромисс между временем решения, его компактностью, наглядностью и интерпретируемостью.

Список источников

1. Открытый курс машинного обучения. Тема 3. Классификация, деревья решений и метод ближайших соседей. – URL: www.habr.com/en/company/ods/blog/322534 (дата обращения: 20.12.2022).
2. Ablow, C. M. Inconsistent Homogenous Linear Inequalities / C. M. Ablow & D. J. Kaylor // *Bulletin of the American Mathematical Society*. – 1965. – Vol. 71, № 5. – P. 724.
3. Мазуров, В. Д. Экзистенциальные вопросы комитетных конструкций. Часть II / В. Д. Мазуров, Е. Ю. Полякова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 114–120.
4. Мазуров, В. Д. Комитеты системы линейных неравенств / В. Д. Мазуров, М. Ю. Хачай // *Автоматика и телемеханика*. – 2004. – № 2. – С. 43–54.
5. Mazurov, V. D. The committee machine constructions as a generalization of solutions of the contradictory problems in the objectives of operational research / V. D. Mazurov & M. Yu. Hachay // *Sampling analysis and operational research*. – 2003. – Vol. 10, № 2. – P. 56–66.
6. Rustempasic, In. Diagnosis of Parkinson's Disease using Principal Component Analysis and Boosting Committee Machines / In. Rustempasic & M. Can // *Southeast Europe Journal of Soft Computing*. – 2013. – Vol. 2, № 1. – P. 102–109.
7. Karaduzovic-Hadziabdica, K. Diagnosis of heart disease using a committee machine neural network / K. Karaduzovic-Hadziabdica & R. Kökerb // *Proceedings of the 9th International Conference on Applied Informatics*. January 29–February 1, 2014. – Eger, Hungary, 2014. – Vol. 1. – P. 351–360.
8. Barzegar, R. A supervised committee machine artificial intelligent for improving DRASTIC method to assess groundwater contamination risk: a case study from Tabriz plain aquifer, Iran / R. Barzegar, A. Moghaddam & H. Baghban // *Stochastic environmental research and risk assessment*. – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2015. – Vol. 1. – P. 351–360.
9. Bennett, K. Linear Programming Boosting via Column Generation / K. Bennett, A. Demiriz, J. Taylor // *Proceedings of Seventeenth Conference on Machine Learning*. – San Francisco, 2000. – P. 65–72.
10. Чернавин, П. Ф. Машинное обучение на основе задач математического программирования / П. Ф. Чернавин, Д. Н. Гайнанов, В. Н. Панкращенко, Ф. П. Чернавин, Н. П. Чернавин. – Москва : Наука, 2021. – 128 с.
11. UCI Machine Learning Repository. – URL: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.php>.

References

1. *Otkrytyy kurs mashinnogo obucheniya. Tema 3. Klassifikatsiya, derevyaya resheniy i metod blizhayshikh sosedey* [Open course in machine learning. Topic 3. Classification, decision trees and nearest neighbors]. Available at: www.habr.com/en/company/ods/blog/322534 (accessed 20.12.2022).
2. Ablow, C. M. & Kaylor, D. J. Inconsistent Homogenous Linear Inequalities. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1965, vol. 71, no. 5, p. 724.
3. Mazurov, V. D., Polyakova, E. Yu. Ekzistentsialnye voprosy komitetnykh konstruksiy Chast II [Existential questions of committee constructions. Part II]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2019, vol. 19, no. 1, pp. 114–120.
4. Mazurov, V. D., Khachai, M. Yu. Komitety sistemy lineynykh neravenstv [Committees of the system of linear inequalities]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2004, no. 2, pp. 43–54.
5. Mazurov, V. D. & Hachay, M. Yu. The committee machine constructions as a generalization of solutions of the contradictory problems in the objectives of operational research. *Sampling analysis and operational research*, 2003, vol. 10, no. 2, pp. 56–66.
6. Rustempasic, In. & Can, M. Diagnosis of Parkinson’s Disease using Principal Component Analysis and Boosting Committee Machines. *Southeast Europe Journal of Soft Computing*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 102–109.
7. Karadzovic-Hadziabdica, K. & Kökerb, R. Diagnosis of heart disease using a committee machine neural network. *Proceedings of the 9th International Conference on Applied Informatics*. January 29–February 1, 2014. Eger, Hungary, 2014, vol. 1, pp. 351–360.
8. Barzegar, R., Moghaddam, A. & Baghban, H. A supervised committee machine artificial intelligent for improving DRASTIC method to assess groundwater contamination risk: a case study from Tabriz plain aquifer, Iran. *Stochastic environmental research and risk assessment*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2015, vol. 1, pp. 351–360.
9. Bennett, K., Demiriz, A., Taylor, J. Linear Programming Boosting via Column Generation. *Proceedings of Seventeenth Conference on Machine Learning*. San Francisco, 2000, pp. 65–72.
10. Chernavin, P. F., Gaynanov, D. N., Pankrashchenko, V. N., Chernavin, F. P., Chernavin, N. P. *Mashinnoye obucheniye na osnove zadach matematicheskogo programmirovaniya* [Machine learning based on mathematical programming problems]. Moscow, Nauka Publ., 2021, 128 p.
11. *UCI Machine Learning Repository*. Available at: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.php>.

Статья поступила в редакцию 16.01.2023; одобрена после рецензирования 23.01.2023; принята к публикации 25.01.2023.

The article was submitted 16.01.2023; approved after reviewing 23.01.2023; accepted for publication 25.01.2023.

DOI 10.54398/20741707_2023_2_26

УДК 004:9

ЭЛЕМЕНТЫ ЛИНЕЙНОЙ КАЛМАНОВСКОЙ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ И ГРАНУЛЯРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ ПРОАКТИВНОГО КОНТРОЛЯ НАДЕЖНОСТИ МОБИЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Михайличенко Антон Валерьевич, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, адъюнкт, ORCID: 0009-0003-3228-8504, e-mail: toni09_91@mail.ru

Деркач Алексей Евгеньевич, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, соискатель, ORCID: 0000-0002-0108-3191, e-mail: shchuk@rambler.ru

Паращук Игорь Борисович, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-8793-7768, e-mail: parashchuk@comsec.spb.ru

Рассмотрен ряд условий и особенностей применения классической линейной калмановской экстраполяции в сочетании с алгоритмами гранулярных вычислений в интересах проактивного контроля надежности мобильных центров обработки данных. Данный подход опирается на известный метод унифицированного представления процессов смены состояний показателей надежности, описываемых уравнениями состояния и наблюдения, причем алгоритмы информационного гранулирования и собственно гранулярных вычислений позволяют уточнить зашумленные (нечеткие) исходные данные, без которых экстраполяция невозможна. Рассмотрены этапы, физическая сущность и математические аспекты подходов, реализующих линейную калмановскую экстраполяцию в сочетании с алгоритмами гранулярных вычислений, позволяющих устранить неопределенность исходных данных для моделирования и текущей оценки параметров технической надежности мобильных центров обработки данных. Практическое применение предложенных алгоритмов линейной калмановской экстраполяции в сочетании с гранулярными вычислениями позволит унифицировать методы проактивного контроля надежности систем такого класса.

Ключевые слова: мобильный центр обработки данных, проактивный контроль, надежность, экстраполяция по Калману, гранулярные вычисления, метод, показатель

ELEMENTS OF LINEAR KALMAN EXTRAPOLATION AND GRANULAR COMPUTING IN APPLICATION TO THE TASKS OF PROACTIVE RELIABILITY CONTROL OF MOBILE DATA CENTERS

Mikhailichenko Anton V., Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, postgraduate student, ORCID: 0009-0003-3228-8504, e-mail: toni09_91@mail.ru

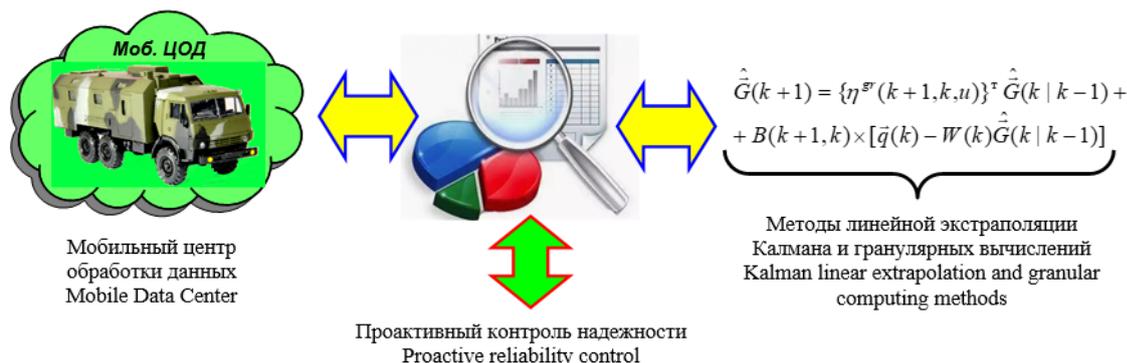
Derkach Alexey E., Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, applicant, ORCID: 0000-0002-0108-3191, e-mail: shchuk@rambler.ru

Parashchuk Igor B., Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-8793-7768, e-mail: parashchuk@comsec.spb.ru

A number of conditions and features of the application of classical linear Kalman extrapolation in combination with granular computing algorithms in the interests of proactive reliability control of mobile data centers are considered. This approach is based on the well-known method of unified representation of the processes of changing the states of reliability indicators described by the equations of state and observation, and the algorithms of information granulation and the actual granular calculations make it possible to clarify noisy (fuzzy) initial data, without which extrapolation is impossible. The stages, physical essence and mathematical aspects of approaches implementing linear Kalman extrapolation in combination with granular computing algorithms are considered, allowing to eliminate the uncertainty of the initial data for modeling and the current assessment of the parameters of the technical reliability of mobile data centers. The practical application of the proposed linear Kalman extrapolation algorithms in combination with granular calculations will allow to unify the methods of proactive reliability control of systems of this class.

Keywords: mobile data center, proactive control, reliability, Kalman extrapolation, granular computing, method, indicator

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Задачам проактивного контроля надежности и вопросам проактивного управления сложными техническими системами посвящено большое количество работ [1–18], из которых работы [3, 4, 11, 12, 18] признаются многими специалистами наиболее важными, основополагающими работами в данной области.

В рамках этих и ряда других работ понятие «проактивный контроль надежности» подразумевает упреждающее, прогностическое выявление (можно сказать, обоснованное предсказание) и устранение потенциальных проблем надежности технических объектов до того, как они реально возникнут и приведут к программным сбоям, аппаратным авариям и т. п. [2, 3, 11].

Иногда говорят, что проактивный контроль позволяет предвидеть варианты развития событий с точки зрения динамики изменения уровня надежности объекта контроля и параметров внешней среды, влияющей на эту надежность. Он призван помочь планировать и реализовывать упреждающее управление надежностью (например, создание и пополнение запасов для ремонта и технического обслуживания). Таким образом, чтобы направлять тренд динамики изменения уровня надежности объекта контроля в нужном направлении, нужно добиваться гарантированной надежности объекта [18].

Иными словами, проактивный контроль надежности нацелен на предварительное, априорное, заблаговременное выявление негативных отклонений в состоянии параметров надежности объекта контроля здесь и сейчас до того, как эти негативные события в будущем приведут (могут привести) к негативным последствиям.

При этом часто рассматривают не напрямую «проактивный контроль» надежности, а так называемый «проактивный подход» к контролю надежности, некий превентивный менеджмент для реализации «проактивной концепции» технического обслуживания и ремонта сложных объектов [19].

В рамках данного проактивного подхода подразумевается осуществление предварительной оценки рисков, т. е. идентификация потенциальных проблем надежности объекта с целью превентивной подготовки специальных предупредительных мер, нацеленных на снижение количества этих проблем с надежностью и оперативного их решения в случае возникновения.

Данная трактовка, на наш взгляд, не противоречит ранее рассмотренному нами понятию «проактивный контроль надежности», однако требует от конструкторов (проектировщиков), разработчиков и создателей сложных технических систем осуществления целого ряда предварительных циклических операций:

- сбор данных о надежности системы и их анализ;
- формулировка базовых показателей надежности системы, отражающих ее работоспособность, восстанавливаемость и ремонтпригодность;
- формулировка и определение цели надежного функционирования системы;
- мониторинг технического состояния системы путем оценки общей надежности и частных параметров ее работоспособности, восстанавливаемости и ремонтпригодности;
- поддержание показателей надежности системы;
- выделение наиболее эффективных ресурсов обслуживания и ремонта для достижения целей надежного функционирования системы [19].

Особенно актуальными, на наш взгляд, являются задачи проактивного контроля надежности современных мобильных центров обработки данных (МЦОД) – сложных информационно-технических объектов, предназначенных для работы в экстремальных условиях, зачастую во враждебной природной среде, например, в пустыне, зонах чрезвычайных ситуаций или среди льдов Арктики [16, 20–23].

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОАКТИВНОГО КОНТРОЛЯ НАДЕЖНОСТИ МЦОД НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ КАЛМАНОВСКОЙ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ И ГРАНУЛЯРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Очевидно, что контроль показателей надежности таких сложных, масштабируемых информационно-технических систем в реальных условиях их эксплуатации либо невозможен, либо крайне затруднен, либо осуществляется в условиях различного рода неопределенности, обусловленной этими возможными условиями.

Более того, важную роль в обосновании актуальности играет фактор импортозамещения – появились и начали активно использоваться отечественные компоненты МЦОД, следовательно, их тоже надо уметь заблаговременно (проактивно) проверять на надежность работы в таких условиях, «проверять запас их прочности».

При этом в ряде работ ключевыми задачами при исследованиях подобного рода являются задачи оптимального оценивания состояния случайных процессов, к которым относят смену состояний показателей надежности сложных информационно-технических систем, например, таких как МЦОД. Для проактивного контроля оптимальное оценивание (фильтрация) трансформируется в задачи оптимальной экстраполяции (предсказания).

Таким образом, на этапах проактивного контроля производится оптимальная экстраполяция (иначе, прогнозная оптимальная фильтрация) значений параметров надежности МЦОД. Результатом являются экстраполированные (прогностические) оценочные значения показателей, численно характеризующих надежность мобильных центров обработки данных на будущих, последующих $(k+1)$ -х $\{(k+1, k+2, \dots, k+K)\}$ шагах их эксплуатации.

Для случая рекурсивной экстраполяции (прогностического оценивания) нестационарного состояния линейной системы решение было предложено Р. Е. Калманом.

На стадии прогнозирования фильтр Калмана экстраполирует значения переменных состояния, а также их неопределенности. Затем по данным измерения (полученного с некоторой погрешностью) результат экстраполяции уточняется [24].

При этом алгоритмы калмановской экстраполяции обеспечивают оптимальность прогностических оценок показателей надежности МЦОД по критерию минимума среднеквадратической ошибки (МСКО) и могут быть модифицированы для случая линейаризуемой нелинейной системы [24–28].

В основе предлагаемого подхода, ориентированного на прогностическую оценку показателей надежности МЦОД с использованием алгоритмов калмановской экстраполяции (КЭ) и гранулярных вычислений (ГВ), содержится метод унифицированного представления процессов смены состояний показателей надежности МЦОД в виде управляемых цепей Маркова в форме разностных стохастических уравнений, уравнения состояния для которых имеют вид:

$$\Delta \bar{a}_r(k+1) = D^T(k+1) \bar{G}(k+1); \quad (1)$$

$$\bar{G}(k+1) = \{\eta^{gr}(k+1, k, u)\}^T \bar{G}(k) + \Delta \bar{G}(k+1), \quad (2)$$

где уравнение (1) описывает процесс смены состояний конкретного показателя надежности (ПН) $\Delta \bar{a}_r$ для каждого будущего, последующего $(k+1)$ -го шага эксплуатации МЦОД, в котором:

$D^T(k+1)$ – диагональная транспонированная квадратная матрица (порядка m) возможных значений ПН $\Delta \bar{a}_r$ для каждого последующего $(k+1)$ -го шага эксплуатации МЦОД;

$\bar{G}(k+1)$ – рассчитываемый с помощью уравнения (2) дополняющий вектор-столбец индикаторов состояния ПН $\Delta \bar{a}_r$ для каждого будущего, последующего $(k+1)$ -го шага эксплуатации МЦОД, который введен для корректной записи динамики перехода данного ПН из состояния в состояние.

При этом оригинальность предлагаемого метода заключается именно в уравнении (2), описывающем бинарные состояния элементов дополняющего вектора-столбца индикаторов состояния ПН, в котором основной составляющей является $\{\eta^{gr}(k+1, k, u)\}^T$ – транспонированная и «гранулированная» (gr) квадратная матрица (порядка m) вероятностей перехода дискретной цепи Маркова, обуславливающих смену состояний ПН $\Delta \bar{a}_r$ для любого последующего $(k+1)$ -го шага эксплуатации МЦОД.

В отличие от известных подходов, элементы этой матрицы $\{\eta^{gr}(k+1, k, u)\}^T$ получены с помощью ГВ, позволивших математически корректно устранить зашумленность (нечеткость) исходных данных, характеризующих динамику смены состояний конкретного ПН $\Delta \bar{a}_r$ для каждого последующего $(k+1)$ -го шага эксплуатации МЦОД.

Сущность гранулярных вычислений, решающих подобные задачи, детально описана в работах [29–30].

Информационное гранулирование, лежащее в основе ГВ для нашего примера, представляет метод объединения массивов зашумленных (нечетких) данных, характеризующих динамику смены состояний конкретного ПН, на основе их слияния и разделения по принципу функционального сходства, а также свойства неразличимости этих объектов, основанного на принципе тяготения точек информационного пространства – нечетких данных о значениях вероятности смены состояний ПН к некоторой центральной точке [30].

Гранулярное представление исходных данных, характеризующих динамику смены состояний конкретного ПН МЦОД, и собственно ГВ, основанные на преобразовании информационных гранул, реализуются в ходе двух этапов:

- 1) этап гранулирования – соединение множеств нечетко заданных исходных данных в информационные гранулы по принципу функционального сходства;
- 2) гранулярное суммирование, вычисление функции следа гранулярной суммы и ее минимизация как итоговый результат преобразования нечетких данных о значениях вероятности смены состояний ПН в точную численную форму [29–30].

Тем самым с помощью ГВ решается задача определения элементов транспонированной квадратной матрицы вероятностей перехода дискретной цепи Маркова $\{\eta^{gr}(k+1, k, u)\}^T$ в уравнении (2), которые обуславливают смену состояний ПН $\Delta \bar{a}_T$ для любого последующего $(k+1)$ -го шага эксплуатации МЦОД.

При этом уравнение наблюдения за процессом $\Delta \bar{a}_T(k+1)$ – процессом смены состояний ПН МЦОД $\Delta \bar{a}_T$ – имеет вид:

$$\bar{q}(k+1) = W(k, \Delta \bar{a}_T(k)) \bar{G}(k+1) + \bar{\psi}(k+1), \quad (3)$$

где $W(k, \Delta \bar{a}_T(k))$ – квадратная диагональная матрица (порядка m) наблюдаемых значений процесса смены состояний ПН $\Delta \bar{a}_T$ для любого последующего $(k+1)$ -го шага эксплуатации МЦОД, а $\bar{\psi}(k+1)$ – вектор белых шумов наблюдения с нулевым средним и соответствующей матрицей дисперсий.

Исходя из этого, сформулируем конкретизированные для управляемых цепей Маркова алгоритмы калмановской экстраполяции, оптимальной в смысле критерия МСКО, опираясь на введенные в уравнения (1) и (2), описывающие процесс смены состояний показателей надежности МЦОД.

При описании процесса смены состояний ПН $\Delta \bar{a}_T$ для последующего $(k+1)$ -го шага эксплуатации МЦОД на основе линейного векторного разностного уравнения (1), представления уравнения состояния элементов дополняющего вектора-столбца индикаторов состояния этого ПН в виде (2) и уравнения наблюдения в виде (3) оптимальные (в смысле МСКО) проактивные оценки индикаторов $\hat{G}(k+1)$ состояния управляемого процесса $\Delta \bar{a}_T(k+1)$ могут быть получены в результате решения следующих рекуррентных уравнений одношаговой экстраполяции [26, 28]:

$$\hat{G}(k+1) = \{\eta^{gr}(k+1, k, u)\}^T \hat{G}(k|k-1) + B(k+1, k) \times [\bar{q}(k) - W(k) \hat{G}(k|k-1)], \quad (4)$$

где $B(k+1, k)$ – коэффициент усиления линейного экстраполятора Калмана, расчет одношагового значения которого осуществляется в соответствии с уравнением:

$$B(k+1, k) = \{\eta^{gr}(k+1, k, u)\}^T P(\Delta \bar{G}(k+1|k)) W^T(k+1) \times \\ \times [W(k+1) P(\Delta \bar{G}(k+1|k)) W^T(k+1) + V_{\psi}(k+1)]^{-1}, \quad (5)$$

где $P(\Delta \bar{G}(k+1|k))$ – матрица, элементами которой являются значения априорных дисперсий ошибок экстраполяции. Элементы этой матрицы определяются для очередного, следующего, $(k+1)$ -го шага экстраполяции на основе уравнения:

$$P(\Delta \bar{G}(k+1|k)) = \{\eta^{gr}(k+1, k, u)\}^T P(\Delta \bar{G}(k|k-1)) \{\eta^{gr}(k+1, k, u)\}^T + \\ + E(k) V_{\psi}(k) E^T(k) - \{\eta^{gr}(k+1, k, u)\} P(\Delta \bar{G}(k|k-1)) W^T(k) \times \\ \times [W(k) P(\Delta \bar{G}(k|k-1)) W^T(k) + V_{\psi}(k)]^{-1} \times W(k) P(\Delta \bar{G}(k|k-1)) \{\eta^{gr}(k+1, k, u)\}^T, \quad (6)$$

где $E(k)$ – переходная матрица априорных ошибок экстраполяции; $V_v(k) = M[\bar{v}(k), \bar{v}^T(j)]/\delta(k-j)$ – ковариационная матрица шума возбуждения процесса смены состояний элементов дополняющего вектора-столбца индикаторов состояния ПН $\bar{G}(k)$; $\delta(k-j)$ – символ Кронекера; $V_\psi(k) = M[\bar{\psi}(k), \bar{\psi}^T(j)]/\delta(k-j)$ – ковариационная матрица шума наблюдения за процессом $\bar{G}(k)$.

Уравнениями (1)–(6) описан рекуррентный подход, сочетающий алгоритмы ГВ для устранения зашумленности исходных данных и классические алгоритмы линейной экстраполяции по Калману. Предложенный подход приемлем и позволяет получать проактивные и оптимальные (в смысле критерия МСКО) оценочные значения индикаторов состояния процессов, описываемых параметрами и ПН МЦОД, имеющими линейный характер изменений.

Это в конечном итоге позволяет решить уравнения состояния (1) и (2) и перейти к вероятностно-временному проактивному оцениванию вероятностных характеристик надежности МЦОД на основе полученных экстраполированных оценочных значений их показателей, изменяющихся линейно.

Сложнее обстоит дело с теми ПН МЦОД, механизм изменения состояния которых носит нелинейный характер. Наличие в составе системы показателей надежности МЦОД таких показателей обуславливает необходимость решения в дальнейшем задачи нелинейной экстраполяции.

Причем, опираясь на описанные уравнениями (1)–(3) модели состояния и наблюдения ПН МЦОД, несложно получить аналитические выражения для оптимального (по критерию МСКО) проактивного оценивания как линейно, так и нелинейно изменяющихся состояний параметров надежности на основе расширенных линеаризованных алгоритмов экстраполяции Калмана [25].

При этом предложенный подход к анализу надежности сложных технических систем в целом не противоречит современным научным и практическим тенденциям, исследуемым и пропагандируемым специалистами в данной области знаний [31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для решения задач проактивного контроля надежности мобильных центров обработки данных предложены и обоснованы подходы, сочетающие методы оптимальной (в смысле МСКО) калмановской экстраполяции ПН, изменяющихся линейно, и гранулярные вычисления.

При этом в рамках решения задачи проактивного контроля надежности МЦОД применение ГВ может быть успешно реализовано на двух стадиях: формирования содержательной, но безызыточной системы показателей надежности МЦОД и, как показано в данной статье, синтеза элементов матрицы переходных вероятностей, важнейшего компонента марковской модели (уравнения (1)–(3)) процесса смены состояний ПН в динамике функционирования МЦОД.

Использование при реализации предложенного подхода единого критерия МСКО для проактивного оценивания линейно изменяющихся ПН МЦОД в сочетании с гранулярными вычислениями, устраняющими зашумленность (нечеткость) исходных данных, характеризующих динамику смены состояний этих ПН, позволяет унифицировать алгоритмы проактивного контроля надежности систем такого класса, создавая предпосылки для унификации алгоритмов мониторинга МЦОД в целом.

Список источников

1. Haiquan, L. Proactive eavesdropping in UAV-aided mobile relay systems / L. Haiquan, D. Haibo, S. Ping, L. Pei, W. Baoyun // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2020. – № 48. – P. 1993–1997.
2. Остроухова, Н. Г. Проактивный контроль как основа поиска и обоснования рациональных управленческих решений (на примере принятия решений о ремонте газопроводов) / Н. Г. Остроухова // Вестник Самарского государственного экономического университета. – 2010. – № 9 (71). – С. 86–88.
3. Дубровин, М. Г. Концепция проактивного мониторинга и управления объектами ИТ-инфраструктуры / М. Г. Дубровин // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2020. – № 1. – С. 44–49.
4. Охтилев, М. Ю. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами / М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 162–174.
5. Mahdisoltani, F. Improving Storage System Reliability with Proactive Error Prediction / F. Mahdisoltani, I. Stefanovici, B. Schroeder // 2017 USENIX Annual Technical Conference. – 2017. – P. 391–402.
6. Абдрахманова, Р. З. Проактивный контроль как основа поиска и обоснования рациональных управленческих решений (на примере принятия решений о ремонте металлорежущих станков) / Р. З. Абдрахманова // Вклад молодежной науки в реализацию Стратегии «Казахстан-2050»: тезисы докладов Республиканской студенческой научной конференции: в 3 ч. / Министерство образования и науки Республики Казахстан; Карагандинский государственный технический университет. – 2017. – С. 194–195.
7. Анисимов, Б. Н. Система для проактивного контроля за деятельностью предприятия: патент на изобретение RU 2584453 C2, 20.05.2016 / Б. Н. Анисимов, Д. Н. Штатов. – Заявка № 2014119953/08 от 19.05.2014. – ФИПС, 2016. – 36 с.

8. Корчагина, Л. М. Внутренний контроль и управление рисками как инструмент проактивного управления в строительных компаниях / Л. М. Корчагина // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2021. – Т. 3, № 11 (119). – С. 133–138.
9. Кузин, П. И. Способ проактивного управления параметрами комплекса контроля безопасности связи в СВЧ-диапазоне / П. И. Кузин, В. А. Липатников // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018) : сборник научных статей : в 4 т. / под редакцией С. В. Бачевского, составители: А. Г. Владыко, Е. А. Аникевич. – 2018. – С. 212–217.
10. Xiaopin, Z. A proactive system reliability analysis framework of electric vehicles / Z. Xiaopin, Z. Wenwen, Q. Li // Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013). – 2013. – P. 1333–1336.
11. Sokolov, B. Models and algorithms of operational planning and control of dynamical objects with application of the Pontryagin's Maximum principle / B. Sokolov, A. Gnidenko, A. Shalyto // Proceedings of the 2017 IEEE 5th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE, Latvia, Riga, 24–25 November, 2017. – 2017. – P. 1–5.
12. Chang, A. Proactive Control: Neural Oscillatory Correlates of Conflict Anticipation and Response Slowing / A. Chang, J. Ide, H. Li, C. Chen, C. Li // eNeuro. – 2017. – № 61 (17). – P. 1–14.
13. Lavrinenko, E. A. Proactive monitoring system for investment projects: mathematical support / E. A. Lavrinenko, V. A. Kalugin, Y. Y. Bondareva, S. B. Nadejda // COMPUSOFT. An International Journal of Advanced Computer Technology. – 2019. – № 8 (6). – P. 3171–3175.
14. Larson, K. E. Examining How Proactive Management and Culturally Responsive Teaching Relate to Student Behavior: Implications for Measurement and Practice / K. E. Larson, E. T. Pas, C. P. Bradshaw, M. S. Rosenberg, N. L. Day-Vines // School Psychology Review. – 2018. – Vol. 47, № 2. – P. 153–166.
15. Hawley, K. Preliminary Analysis / K. Hawley, M. Moench, L. Sabbag // Semi-Classical Analysis for Nonlinear Schrödinger Equations. WKB Analysis, Focal Points, Coherent States. – 2nd ed. – 2020. – P. 123–134.
16. Михайличенко, А. В. Архитектура системы проактивного контроля технической надежности мобильных центров обработки данных / А. В. Михайличенко, И. Б. Парашук // I-methods. – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 1–15.
17. Парашук, И. Б. Обеспечение безопасности беспилотных транспортных средств «умного города» с использованием проактивного поиска уязвимостей в человеко-машинных интерфейсах взаимодействия на основе методов теории катастроф / И. Б. Парашук, А. А. Чечулин // Региональная информатика (РИ-2022) : материалы юбилейная XVIII Санкт-Петербургской международной международной конференции. Санкт-Петербург, 26–28 октября 2022 г. – Санкт-Петербург : СПОИСУ, 2022. – С. 116–118.
18. Охтилев, М. Ю. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы / М. Ю. Охтилев, Н. Г. Мустафин, В. Е. Миллер, Б. В. Соколов // Известия ВУЗОВ. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 11. – С. 7–15.
19. Бобровицкий, В. И. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта оборудования в условиях централизации ремонтной службы предприятия / В. И. Бобровицкий, А. В. Сидоров // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2011. – № 1 (24). – С. 23–28.
20. Parker, P. M. The 2021–2026 World Outlook for IT and Telecom Micro-Mobile Data Centers / P. M. Parker. – New York : ICON Group International, Inc., 2020. – 301 p.
21. Dutt, D. G. Cloud Native Data Center Networking: Architecture, Protocols, and Tools / D. G. Dutt. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2019. – 486 p.
22. Крюкова, Е. С. Вопросы оценки надежности современных систем хранения данных для мобильных дата-центров / Е. С. Крюкова, В. В. Ткаченко, А. В. Михайличенко, И. Б. Парашук // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2021. – Т. 13, № 5. – С. 86–95.
23. Прохоров, А. Н. Центры обработки данных. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Н. Прохоров, С. С. Рахматуллин. – 1-е изд. – Москва : ООО «АльянсПринт», 2021. – 416 с.
24. Сеницын, И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева : учебное пособие / И. Н. Сеницын. – Москва : Университетская книга, Логос, 2006. – 640 с.
25. Welch, G. An Introduction to the Kalman Filter / G. Welch, G. Bishop. – Chapel Hill : University of North Carolina, 2001. – 433 p.
26. Парашук, И. Б. Применение алгоритмов Калмана для текущей фильтрации показателей качества сетей спутниковой связи / И. Б. Парашук // Военно-техническая конференция ВТИ ЖДВ и ВОСО, посвященная 100-летию изобретения радио : тезисы докладов и выступлений. – Санкт-Петербург : ВТИ ЖДВ и ВОСО, 1996. – С. 9–12.
27. Воронков, Г. С. Повышение энергоэффективности систем радиосвязи с ортогональным частотным мультиплексированием сигналов на основе их экстраполяции по Калману / Г. С. Воронков, И. В. Кузнецов, А. Х. Султанов // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 3. – С. 273–280.
28. Singpurwalla, N. Kalman Filter Models for Extrapolations in Dose-Response Experiments and Accelerated Life-Tests / N. Singpurwalla // The American Statistician. – 1988. – № 41. – P. 101–106.
29. Pedrycz, W. Handbook of Granular Computing / W. Pedrycz, A. Skowron, V. Kreinovich. – N.Y. : John Wiley & Sons, Ltd., 2008. – 283 p.
30. Парашук, И. Б. Нейро-нечеткие сети и алгоритмы гранулярных вычислений в задачах интеллектуальной обработки данных для оценки надежности мобильных дата-центров / И. Б. Парашук, Н. В. Михайличенко, А. В. Михайличенко // Применение искусственного интеллекта в информационно-телекоммуникационных системах : сборник материалов научно-практической конференции (31 марта 2021 г. Военная академия связи, Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург : ВАС, 2021. – С. 110–115.
31. Балакирев В. С. Надежность и диагностика автоматизированных систем : учебное пособие для вузов / В. С. Балакирев, А. А. Большаков. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 144 с.

References

1. Haiquan, L., Haibo, D., Ping, S., Pei, L., Baoyun, W. Proactive eavesdropping in UAV-aided mobile relay systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, no. 48, pp. 1993–1997.
2. Ostroukhova, N. G. Proaktivnyy kontrol kak osnova poiska i obosnovaniya ratsionalnykh upravlencheskikh resheniy (na primere prinyatiya resheniy o remonte gazoprovodov) [Proactive control as the basis for the search and justification of rational management decisions (by the example of making decisions on the repair of gas pipelines)]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of Samara State University of Economics], 2010, no. 9 (71), pp. 86–88.
3. Dubrovin, M. G. Kontseptsiya proaktivnogo monitoringa i upravleniya obektami IT-infrastruktury [The concept of proactive monitoring and management of IT infrastructure facilities]. *ITNOU: Informatsionnyye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* [ITNOU: Information technologies in science, education and management], 2020, no. 1, pp. 44–49.
4. Okhtilev, M. Yu., Sokolov, B. V., Yusupov, R. M. Teoreticheskiye i tekhnologicheskiye osnovy kontseptsii proaktivnogo monitoringa i upravleniya slozhnyimi obektami [Theoretical and technological foundations of the concept of proactive monitoring and management of complex objects]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFU. Technical sciences], 2015, no. 1 (162), pp. 162–174.
5. Mahdisoltani, F., Stefanovici, I., Schroeder, B. Improving Storage System Reliability with Proactive Error Prediction. *2017 USENIX Annual Technical Conference*, 2017, pp. 391–402.
6. Abdrakhmanova, R. Z. Proaktivnyy kontrol kak osnova poiska i obosnovaniya ratsionalnykh upravlencheskikh resheniy (na primere prinyatiya resheniy o remonte metallorezhushchikh stankov) [Proactive control as a basis for the search and justification of rational management decisions (by the example of making decisions on the repair of metal-cutting machines)]. *Vklad molodezhnoy nauki v realizatsiyu Strategii «Kazakhstan-2050»: tezisy dokladov Respublikanskoj stu-dencheskoy nauchnoy konferentsii* [Contribution of youth science to the implementation of the Strategy “Kazakhstan-2050”: abstracts of reports of the Republican Student Scientific Conference] : in 3 parts. Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan; Karaganda State Technical University, 2017, pp. 194–195.
7. Anisimov, B. N., Shtatov, D. N. *Sistema dlya proaktivnogo kontrolya za deyatelnostyu predpriyatiya : patent na izobreteniyu* [System for proactive control over the activities of the enterprise : patent for the invention]. RU 2584453 C2, 05.20.2016. Application no. 2014119953/08 dated 05.19.2014. FIPS, 2016. 36 p.
8. Korchagina, L. M. Vnutrenniy kontrol i upravleniye riskami kak instrument proaktivnogo upravleniya v stroitelnykh kompaniyakh [Internal control and risk management as a tool for proactive management in construction companies]. *Ekonomika i upravleniye: problemy, resheniya* [Economics and management: problems, solutions], 2021, vol. 3, no. 11 (119), pp. 133–138.
9. Kuzin, P. I., Lipatnikov, V. A. Sposob proaktivnogo upravleniya parametrami kompleksa kontrolya bezopasnosti svyazi v OVCH-SVCH diapazone [Method of proactive control of the parameters of the communication security control complex in the VHF-microwave range]. *Aktualnyye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii (APINO 2018) : sbornik nauchnykh statey* [Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2018) : collection of scientific articles] : in 4 vol. 2018, pp. 212–217.
10. Xiaopin, Z., Wenwen, Z., Li, Q. A proactive system reliability analysis framework of electric vehicles. *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013)*, 2013, pp. 1333–1336.
11. Sokolov, B., Gnidenko, A., Shalyto, A. Models and algorithms of operational planning and control of dynamical objects with application of the Pontryagin's Maximum principle. *Proceedings of the 2017 IEEE 5th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE, Latvia, Riga, 24–25 November, 2017*. 2017, pp. 1–5.
12. Chang, A., Ide, J., Li, H., Chen, C., Li, C. Proactive Control: Neural Oscillatory Correlates of Conflict Anticipation and Response Slowing. *eNeuro*, 2017, no. 61 (17), pp. 1–14.
13. Lavrinenko, E. A., Kalugin, V. A., Bondareva, Y. Y., Nadejda, S. B. Proactive monitoring system for investment projects: mathematical support. *COMPUSOFT. An International Journal of Advanced Computer Technology*, 2019, no. 8 (6), pp. 3171–3175.
14. Larson, K. E., Pas, E. T., Bradshaw, C. P., Rosenberg, M. S., Day-Vines, N. L. Examining How Proactive Management and Culturally Responsive Teaching Relate to Student Behavior: Implications for Measurement and Practice. *School Psychology Review*, 2018, vol. 47, no. 2, pp. 153–166.
15. Hawley, K., Moench, M., Sabbag, L. Preliminary Analysis. *Semi-Classical Analysis for Nonlinear Schrödinger Equations. WKB Analysis, Focal Points, Coherent States*. 2nd ed. 2020, pp. 123–134.
16. Mikhailichenko, A. V., Parashchuk, I. B. Arkhitektura sistemy proaktivnogo kontrolya tekhnicheskoy nadezhnosti mobilnykh tsentrov obrabotki dannykh [Architecture of the system of proactive control of technical reliability of mobile data centers]. *I-methods* [I-methods], 2022, vol. 14, no. 2, p. 1–15.
17. Parashchuk, I. B., Chechulin, A. A. Obespecheniye bezopasnosti bespilotnykh transportnykh sredstv “um-nogo goroda” s ispolzovaniyem proaktivnogo poiska uyazvimostey v cheloveko-mashinnykh interfeysakh vzaimodeystviya na osnove metodov teorii katastrof [Ensuring the safety of unmanned vehicles of the “smart city” using proactive vulnerability search in human-machine interaction interfaces based on the methods of the theory of catastrophes]. *Regionalnaya informatika (RI-2022) : materialy yubiley-naya XVIII Sankt-Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii. Sankt-Peterburg, 26–28 oktyabrya 2022 g.* [Regional Informatics (RI-2022) : materials of Jubilee XVIII St. Petersburg International Conference. St. Petersburg, October 26–28, 2022]. St. Petersburg, 2022, pp. 116–118.
18. Okhtilev, M. Yu., Mustafin, N. G., Miller, V. E., Sokolov, B. V. Kontseptsiya proaktivnogo upravleniya slozhnyimi obektami: teoreticheskiye i tekhnologicheskiye osnovy [The concept of proactive management of complex

objects: theoretical and technological foundations]. *Izvestiya VUZOV. Priborostroeniye* [Izvestiya VUZOV. Instrumentation], 2014, vol. 57, no. 11, pp. 7–15.

19. Bobrovitsky, V. I., Sidorov, A. V. Sovershenstvovaniye sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya v usloviyakh tsentralizatsii remontnoy sluzhby predpriyatiya [Improvement of the system of maintenance and repair of equipment in the conditions of centralization of the repair service of the enterprise]. *Vibratsiya mashin: izmereniye, snizheniye, zashchita* [Vibration of machines: measurement, reduction, protection]. Donetsk, DonNTU, 2011, no. 1 (24), pp. 23–28.

20. Parker, P. M. *The 2021–2026 World Outlook for IT and Telecom Micro-Mobile Data Centers*. New York, ICON Group International Inc., 2020. 301 p.

21. Dutt, D. G. *Cloud Native Data Center Networking: Architecture, Protocols, and Tools*. Sebastopol, O'Reilly Media, 2019. 486 p.

22. Kryukova, E. S., Tkachenko, V. V., Mikhaylichenko, A. V., Parashchuk, I. B. Voprosy otsenki nadezhnosti sovremennykh sistem khraneniya dannykh dlya mobilnykh data-tsentrov [Issues of reliability assessment of modern data storage systems for mobile data centers]. *Naukoymkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High-Tech Technologies in Earth Space Research], 2021, vol. 13, no. 5, pp. 86–95.

23. Prokhorov, A. N., Rakhmatullin S. S. *Tsentry obrabotki dannykh. Analiz, trendy, mirovoy opyt* [Data processing centers. Analysis, trends, world experience]. 1st ed. Moscow, Alliansprint LLC, 2021. 416 p.

24. Sinitsyn, I. N. *Filtry Kalmana i Pugacheva : uchebnoye posobiye* [Kalman and Pugachev filters : textbook]. Moscow, University Book “Logos”, 2006. 640 p.

25. Welch, G., Bishop, G. *An Introduction to the Kalman Filter*. Chapel Hill, University of North Carolina, 2001. 433 p.

26. Parashchuk, I. B. Primeneniye algoritmov Kalmana dlya tekushchey filtratsii pokazateley kachestva setey sputnikovoy svyazi [Application of Kalman algorithms for current filtering of quality indicators of satellite communication networks]. *Voенно-tekhnicheskaya konferentsiya VTI ZHDV i VOSO, posvyashchennaya 100-letiyu izobreteniya radio : tezisy dokladov i vystupleniy* [Military-technical conference of VTI ZHDV and VSO dedicated to the 100th anniversary of the invention of radio : abstracts of reports and speeches]. St. Petersburg, VTI ZHDV and VOSO, 1996, pp. 9–12.

27. Voronkov, G. S., Kuznetsov, I. V., Sultanov, A. Kh. Povysheniye yenergoeffektivnosti sistem radiosvyazi s ortogonalnym chastotnym multipleksirovaniyem signalov na osnove ikh yekstrapolyatsii po Kalmanu [Improving the energy efficiency of radio communication systems with orthogonal frequency multiplexing of signals based on their extrapolation by Kalman]. *Infokommunikatsionnyye tekhnologii* [Infocommunication Technologies], 2017, vol. 15, no. 3, pp. 273–280.

28. Singpurwalla, N. Kalman Filter Models for Extrapolations in Dose-Response Experiments and Accelerated Life-Tests. *The American Statistician*, 1988, no 41, pp. 101–106.

29. Pedrycz, W., Skowron, A., Kreinovich, V. *Handbook of Granular Computing*. N.Y., John Wiley & Sons Ltd., 2008. 283 p.

30. Parashchuk, I. B., Mikhaylichenko, N. V., Mikhaylichenko, A. V. Neyro-nechetkiye seti i algoritmy granul'yarnykh vychisleniy v zadachakh intellektual'noy obrabotki dannykh dlya otsenki nadezhnosti mobilnykh data-tsentrov [Neuro-fuzzy networks and algorithms of granular computing in intelligent data processing tasks for assessing the reliability of mobile data centers]. *Primeneniye iskusstvennogo intellekta v informatsionno-telekommunikatsionnykh sistemakh : sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii (31 marta 2021 g. Voyennaya akademiya svyazi, Sankt-Peterburg)* [Application of artificial intelligence in information and telecommunication systems. Collection of materials of the scientific and practical conference (March 31, 2021 Military Academy of Communications. St. Petersburg)]. Saint Petersburg, VAS, 2021, pp. 110–115.

31. Balakirev, V. S., Bolshakov, A. A. *Nadezhnost i diagnostika avtomatizirovannykh sistem : uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Reliability and diagnostics of automated systems : textbook for universities]. St. Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University, 2018. 144 p.

Статья поступила в редакцию 15.03.2023; одобрена после рецензирования 27.03.2023; принята к публикации 28.03.2023.

The article was submitted 15.03.2023; approved after reviewing 27.03.2023; accepted for publication 28.03.2023.

DOI 10.54398/20741707_2023_2_34

УДК 004.584

МОДЕЛЬ КОРРЕКТИРОВКИ ВРЕМЕННОЙ ОЦЕНКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЛИ ПРОТИВОРЕЧИВОСТИ ДАННЫХ

Такшеев Кирилл Александрович, Уральский технический институт связи и информатики, 620109, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15, магистрант, ORCID: 0000-0002-4851-8058, e-mail: taksheev.ka@uisi.ru

Осипова Ирина Александровна, Уральский технический институт связи и информатики, 620109, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-3823-1141, e-mail: minesur@mail.ru

Современная наука занимается анализом больших сложных систем. Системы, разработанные для решения новых проблемы, могут работать с неопределенными или противоречивыми данными. Такие данные могут быть непредсказуемы. Одними из часто используемых и доказавших свою эффективность при решении подобного класса задач являются сети Байеса, основанные на экспертных оценках специалистов и априорных и апостериорных данных наблюдений. Новые модели, подходы и методы позволяют строить вероятностные прогнозы на основе наблюдений, а также делать прогноз как результирующих показателей, так и влияния неосновных факторов на другие факторы. Сети Байеса являются динамической системой. Это позволяет в реальном времени строить цепочки зависимостей, а также наблюдать за изменением показателей. В данной статье также разобрана одна из предметных областей, для решения задач в которой была использована сеть Байеса для корректировки временной оценки при постановке задач при проектировании программного обеспечения.

Ключевые слова: сети Байеса, моделирование, неопределенность, оценка погрешности временных затрат, сложные системы

A MODEL FOR ADJUSTING THE TIME ESTIMATE WHEN DESIGNING SOFTWARE UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY OR INCONSISTENCY OF DATA

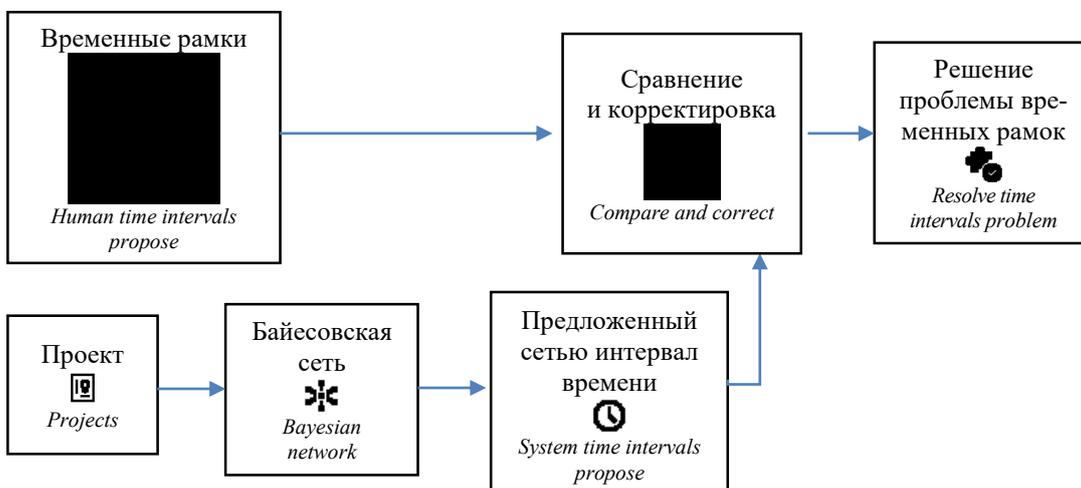
Taksheev Kiril A., Ural Technical Institute of Communication and Informatics, 15 Repin St., Yekaterinburg, 620109, Russian Federation, master student, ORCID: 0000-0002-4851-8058, e-mail: taksheev.ka@uisi.ru

Osipova Irina A., Ural Technical Institute of Communication and Informatics, 15 Repin St., Yekaterinburg, 620109, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0002-3823-1141, e-mail: minesur@mail.ru

Modern science deals with the analysis of large complex systems. Systems designed to solve new problems can work with uncertain or contradictory data. Such data can be unpredictable. One of the most frequently used and proven effective solutions to this class of problems are Bayesian networks based on expert assessments of specialists and on a priori and a posteriori observational data. Modern models, approaches and methods allow us to build probabilistic forecasts based on observations, and also allows us to make a forecast of both the resulting indicators and the forecast of the influence of non-main factors on other factors. Bayesian networks are a dynamic system, which allows you to build chains of dependencies in real time, as well as monitor changes in indicators. In this article, one of the subject areas is also analyzed, for solving problems in which the Bayes network was used to adjust the time estimate when setting tasks in software design.

Keywords: Bayesian networks; modeling; uncertainty; estimation of time-cost error, complex systems

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

В современном мире величины имеют случайный характер, в частности данные имеют искажения или потери. Данные, имеющие искажения или потери, называются неполными данными или неполной информацией. Существуют математические модели и подходы, которые направлены на работу с таким типом данных. Эти подходы направлены на представление определенной области знаний в виде математической модели – графической модели [1].

Актуальность изучения вопроса – потребность в установке временных рамок или временных затраты на реализацию части или всего проекта. Возникает проблема с оценкой подзадач, которые составляют саму основу проекта. Возникает противоречие по полной оценке проекта и оценке по подзадачам. Основная проблема состоит в несоответствии ожидаемого затраченного времени и реально затраченного времени на выполнение задач и всего проекта. Временная оценка задачи ложится на человека, который имеет опыт, но все же он имеет человеческий фактор, который можно нивелировать путем создания дополнительно экспертной системы.

Цель исследования – предложить и формализовать механизм установки временных рамок при постановке задач и подзадач при проектировании программного обеспечения с участием информации, которая содержит неопределенность или противоречивость данных.

В задачи исследования входит:

- 1) проанализировать предметную область и выделить основные факторы и целевой показатель модели;
- 2) изучить подходы и алгоритмы к построению моделей в условиях неопределенности или противоречивости данных и выделить среди них наиболее подходящий;
- 3) на основе выделенного подхода предложить и формализовать целевую модель.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вероятностные модели строятся из двух типов узлов. Это влияющие факторы – факторы, которые влияют на результат и прогнозируемый показатель – конечный узел, который является конечным результатом работы модели. Рассмотрим основные узлы для каждого типа.

ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Это такие факторы, которые непосредственно влияют на результирующий узел модели.

Таблица 1 – Влияющие факторы и их описание

Влияющие факторы	Описание фактора
Первоначальная временная субъективная оценка человека	Данная оценка не является абсолютно точной, но имеет под собой основу, такую как опыт и знания сотрудника.
Субъективная оценка сложности поставленной задачи	Данная оценка позволит более точно оценить погрешность форс-мажорных обстоятельств, которые могут повлиять на временную оценку задачи.
Комплексное содержание задачи	Первой частью этого фактора является описание задачи. Описание задачи часто вносит значительное влияние на точность и скорость выполнения задачи, поставленной перед работником. Если первой частью фактора является качественное содержание задачи, то второй частью является количественная часть содержания. Данный фактор был поделен на две части, так как было замечено, что чем более наполнена задача определенными словами, тем ближе к единице было отношение затраченного времени к прогнозируемому. А подробность описания задачи является также немаловажным фактором.
Наличие подзадач и их количество	Данный фактор обусловлен тем, что при анализе было выявлено, что чем более качественно и количественно поделена задача на подзадачи, тем точнее будет дана временная оценка данной задаче.
Квалификация исполнителя задачи	Было замечено, что постановка временных рамок в зависимости от квалификации разная. Разного уровня квалифицированный персонал мог не соблюдать поставленные временные рамки, когда полное и более верное решение задачи могло потребовать его полную или значительную переделку

ПРОГНОЗИРУЕМЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ

В модели может быть несколько результирующих показателей, но будет рассмотрен один – наиболее важный и интересующий результирующий показатель – «Рамки временной оценки». Следствием полученной оценки может быть уже количественная величина, которая позволит откорректировать ожидаемое затраченное время на решение поставленной задачи.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПОДХОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ДАННЫХ

Для достижения поставленной цели следует изучить, проанализировать и выбрать один из разработанных подходов к построению моделей для работы с неопределенными или недостоверными данными.

На данный момент доминирующее положение занимают два подхода – это байесовские сети, их обобщенный вариант – алгебраические байесовские модели, а также марковские модели и их общий случай – скрытые марковские модели.

МАРКОВСКИЕ ЦЕПИ

Марковские цепи представляет собой последовательность случайных событий с конечным или счетным числом исходов, где вероятность события зависит только от состояния, достигнутого на предыдущем событии. Впервые понятие «марковская цепь» ввел А. А. Марков (старший) в работе 1906 г. [2, 3].

Математически данную цепь можно представить формулой:

$$X = (X_n)_{n \in \mathbb{N}} = (X_0, X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1)$$

Тогда марковская цепь подразумевает, что у нас есть

$$\mathbb{P}(X_{n+1} = s_{n+1} | X_n = s_n, X_{n-1} = s_{n-1}, \dots, X_0 = s_0) = \mathbb{P}(X_{n+1} = s_{n+1} | X_n = s_n). \quad (2)$$

Последняя формула отражает основной смысл марковской цепи, а точнее ее хронологичность, то есть распределение вероятностей следующего состояния зависит от текущего состояния и не зависит от прошлых состояний.

Логическим продолжением данной теории стала абстрактная модель, которая позволила отойти от цепи со всеми известными параметрами к модели с недостоверными данными.

Скрытая марковская модель – это статистическая модель, похожая на марковский процесс с неизвестными или недостоверными параметрами. Задача заключается в разгадывании всех неизвестных параметров на основе наблюдаемых. Первые заметки были опубликованы Баумом в 1960-х, а затем в 1970-х были применены при распознавании речи [4].

В обычной марковской модели состояние видимо наблюдателю, поэтому вероятности переходов – единственный параметр. В скрытой марковской модели мы можем следить лишь за переменными, на которые оказывает влияние данное состояние [10]. Каждое состояние имеет вероятностное распределение среди всех возможных выходных значений. Поэтому последовательность символов, сгенерированная СММ, дает информацию о последовательности состояний.

Общая структура представляет собой переменные со случайными значениями, зависящие от времени (рис. 1) [5].

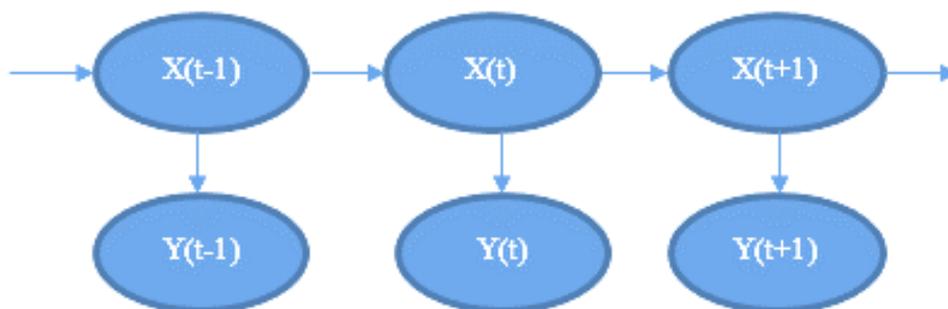


Рисунок 1 – Общий вид скрытой марковской модели

Одним из самых простых методов подсчета интересующего нас исхода является полный перебор, но из-за того, что скрытых узлов может быть очень велико, были придуманы алгоритмы, которые позволяют увеличить скорость вычислений.

Проанализировав подход к проектированию моделей интересующего нас типа, можно сделать вывод, что у данной модели есть свои достоинства и недостатки, и именно опираясь на них, будет в дальнейшем сделан выбор в пользу одного из подходов. Данный подход не является единственным. Следующий подход – байесовские сети.

БАЙЕСОВСКАЯ СЕТЬ

Байесовская сеть – это другой подход к моделированию вероятностных событий, который будет разобран как альтернатива марковской цепи [6].

Байесовская сеть, или байесовская сеть доверия, – это графовая вероятностная модель, представляющая собой множество переменных и их вероятностных зависимостей по Байесу [7].

Байесовская сеть – это ориентированный ациклический граф, каждой вершине которого соответствует случайная переменная, а дуги графа кодируют отношения условной независимости между этими переменными. Вершины могут представлять переменные любых типов, быть взвешенными параметрами, скрытыми переменными или гипотезами (рис. 2) [8].

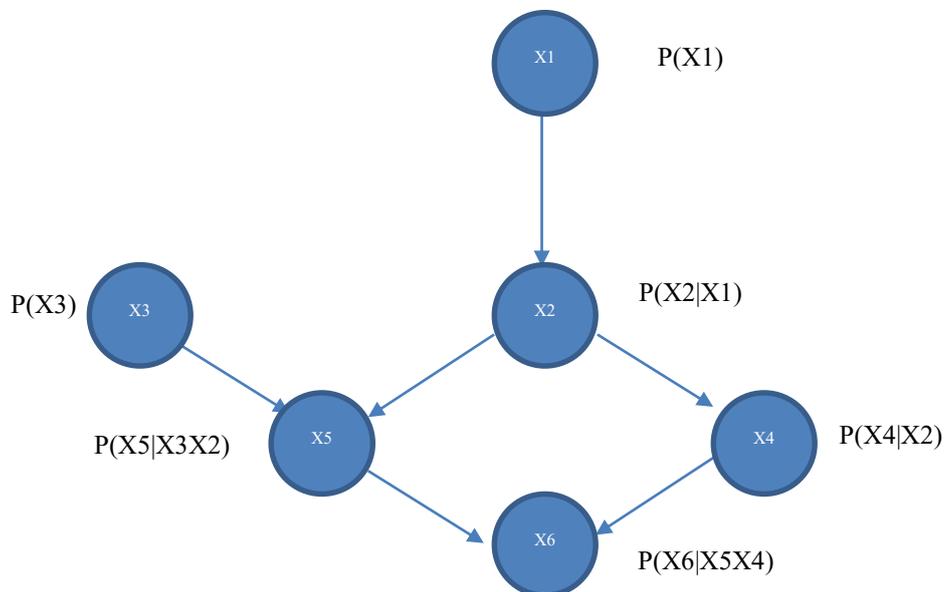


Рисунок 2 – Пример байесовской сети доверия

В основе модели лежит формула, предложенная Байесом (5):

$$P(S|W) = \frac{P(W|S) \cdot P(S)}{P(W)} = \frac{P(W|S) \cdot P(S)}{P(W|S) \cdot P(S) + P(W|H) \cdot P(H)}, \quad (3)$$

где $P(S|W)$ – условная вероятность исследуемого события;

$P(S)$ – полная вероятность исследуемого события;

$P(W|S)$ – условная вероятность, что влияющее событие произошло;

$P(H)$ – полная обратная вероятность исследуемого события;

$P(W|H)$ – условная вероятность обратного события исследуемому.

В силу того, что байесовская сеть – это полная модель для переменных и их отношений, она может быть использована для того, чтобы давать ответы на вероятностные вопросы. Например, сеть можно использовать, чтобы получить новое знание о состоянии подмножества переменных, наблюдая за другими переменными (переменные-свидетельства). Этот процесс вычисления апостериорного распределения переменных по переменным-свидетельствам называют вероятностным выводом. Это следствие дает нам универсальную оценку для приложений, где нужно выбрать значения подмножества переменных, которое минимизирует функцию потерь, например, вероятность ошибочного решения. Байесовская сеть может также считаться механизмом для автоматического построения расширения теоремы Байеса для более сложных задач [9].

Продолжением теории над байесовскими сетями доверия стали алгебраические байесовские сети.

Алгебраические байесовские сети (АБС) – это логико-вероятностная модель баз фрагментов знаний с вероятностной неопределенностью. Математической моделью фрагмента знаний (ФЗ) (рис. 3) в теории АБС выступает идеал конъюнктов с оценками вероятности их истинности, причем оценки могут быть как скалярные, так и интервальные. Алгебраическая байесовская сеть состоит из набора фрагментов знаний, который рассматривается как ее первичная структура; связи между фрагментами знаний – вторичная структура АБС – представляются в виде графа смежности и его подвидов (дерева смежности и цепи смежности) [6, 7, 8].

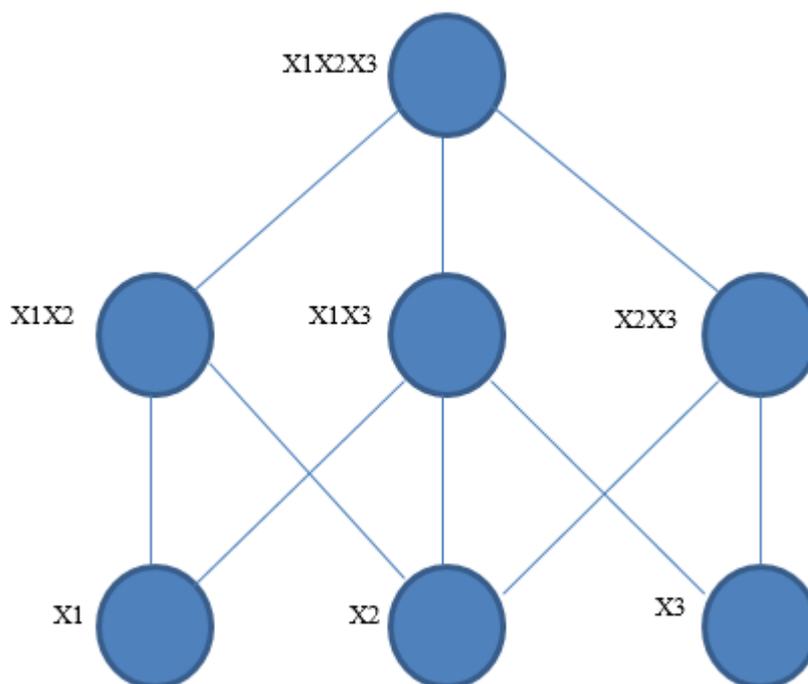


Рисунок 3 – Фрагмент знаний

В данном разделе мы разобрали основные подходы и модели построения событий с неполной или недостоверностью знаний. Для построения модели, указанной в цели данной работы, будет выбрана БСД, так как в модели нет циклов, есть числовые параметры и есть возможность в дальнейшем трансформировать существующую БСД в АБС, что позволит расширять и модернизировать оценочную систему.

Таблица 2 – Сравнение байесовской сети и марковской цепи

	Байесовские сети	Марковские цепи	Пояснение
Трудозатраты на построение модели	Большие	Малые	Байесовская модель предполагает, что последующее состояние зависит от всех предыдущих, а марковская модель только от одного предыдущего.
Четкая связь фактов	Отсутствует	Присутствуют	В марковской цепи распределение вероятностей следующего состояния зависит от текущего состояния и не зависит от прошлых состояний, в байесовской сети на последующие состояния влияют текущее состояние и предыдущие состояния.
Наличие циклов	Нет	Да	В байесовской сети наличие циклов приведет к бесконечной рекурсии.
Результат	Вероятностный	Четкий	Байесовская сеть в итоге вероятность, а не результат, в отличие от марковской цепи.
Наличие невероятных событий	Нет	Да	Байесовская сеть не может иметь событий с нулевой вероятностью. В марковскую цепь можно добавить переход с нулевой вероятностью

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

На основе приведенного выше сравнения было принято решение строить модель с использованием байесовской сети. На первом уровне расположены два фактора: «Количественное содержание задачи», «Качественное содержание задачи». На втором уровне содержатся факторы, которые непосредственно влияют на вероятность правильной оценки задачи. Ими являются: «Оценка сложности

задачи», «Количество подзадач», «Уровень квалификации ответственного за задачу», «Оценка содержания задачи», «Временная оценка сотрудника». На третьем уровне будет расположена вершина «Вероятность точности временной оценки». Соединим вершины третьего уровня с вершиной «Оценка содержания задачи», а все вершины второго уровня соединим с вершиной третьего уровня (рис. 4).



Рисунок 4 – БСД вероятности точности временной оценки

Заполнив таблицу вероятностей переходов между вершинами будет получена БСД, которая в дальнейшем будет обучаться на условных и безусловных вероятностях или на экспертных оценках, будет получена модель.

При выставлении определенных данных был получен следующий результат работы модели, которая продемонстрирована на рисунке 5. Применим набор параметров:

1. Количественная оценка текста «Normal».
2. Качественная оценка текста «Normal».
3. Квалификация ответственного за задачу «Junior».
4. Временная оценка сотрудника «1 час».
5. Количество подзадач «0».
6. Сложность задачи «Easy».

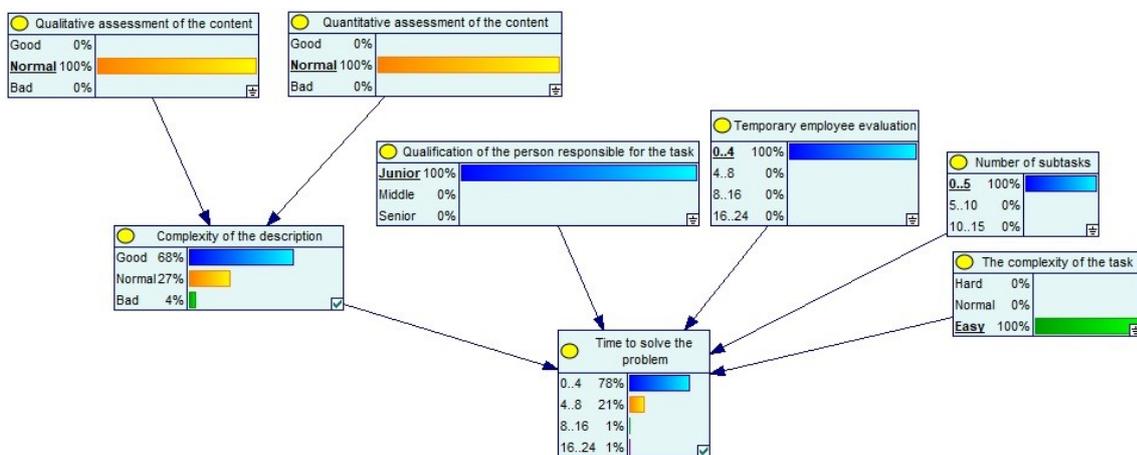


Рисунок 5 – Результат работы модели

В результате моделирования были получены вероятности временных промежутков:

1. 78 % – «0...4».
2. 21 % – «4...8».
3. 1 % – «8...16»
4. 1 % – «16...24»

После обучения полученная модель позволит получить более точные временные рамки, что позволит точнее и подробнее планировать временные затраты на разработку проекта, а также повысит точность постановки самих задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были достигнута цель и выполнены следующие задачи:

1. Выделены основные факторы модели.
2. В условиях неопределенности и недостоверности данных был выбран подход – моделирование с использованием байесовской сети доверия.
3. Предложена и формализована модель установки временных рамок при постановке задач и подзадач при проектировании программного обеспечения с участием информации, которая содержит неопределенность или противоречивость данных.

Представленная модель может быть реализована, обучена и использована в процессе управления проектом, а также на стадии планирования временных затрат на разработку проекта. Модель позволит увеличить точность постановки сроков выполнения проекта и затрат на его разработку.

Список источников

1. Трухан, С. В. Применение сетей Байеса к построению моделей оценки риска актуарных процессов / С. В. Трухан, П. И. Бидюк // *ScienceRise*. – 2016. – Т. 8, № 2 (25). – С. 6–14. – DOI: 10.15587/2313-8416.2016.74962
2. Сироткин, А. В. Алгебраические байесовские сети: вычислительная сложность алгоритмов логико-вероятностного вывода в условиях неопределенности / А. В. Сироткин. – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2011.
3. Сироткин, А. В. Матричные уравнения локального логико-вероятностного вывода в алгебраических байесовских сетях / А. В. Сироткин, А. Л. Тулупьев // *Труды СПИИРАН*. – Санкт-Петербург : Наука, 2008. – Вып. 6. – С. 134–143.
4. Тулупьев, А. Л. Байесовские сети: логико-вероятностный вывод в циклах / А. Л. Тулупьев. – Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2008. – 140 с. (Сер. Элементы мягких вычислений.)
5. Тулупьев, А. Л. Вероятностная логика и вероятностные графические модели в базах фрагментов знаний с неопределенностью / А. Л. Тулупьев // *Интегрированные модели, мягкие вычисления, вероятностные системы и комплексы программ в искусственном интеллекте : научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов (Коломна, 26–27 мая 2009 г.)* : в 2 т. – Москва : Физматлит, 2009. – Т. 1. – С. 26–46.
6. Тулупьев, А. Л. Байесовские сети: логико-вероятностный подход / А. Л. Тулупьев, С. И. Николенко, А. В. Сироткин. – Санкт-Петербург : Наука, 2006. – 607 с
7. Тулупьев, А. Л. Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах / А. Л. Тулупьев, А. В. Сироткин, С. И. Николенко. – Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2009. – 400 с.
8. Фильченков, А. А. Связность и ацикличность первичной структуры алгебраической байесовской сети / А. А. Фильченков, А. Л. Тулупьев // *Вестник СПбГУ*. Сер. 1. – 2013. – С. 110–119.
9. Азарнова, Т. В. Формирование структуры байесовской сети процесса тестирования надежности информационных систем / Т. В. Азарнова, Н. Г. Аснина, Д. К. Проскурин, П. В. Полухин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2017. – Т. 13, № 6. – С. 45–51.

References

1. Trukhan, S. V., Bidyuk, P. I. *Primenenie setey Bayesa k postroeniyu modeley otsenki riska aktuarnykh protsessov* [Application of Bayesian networks to construction. risk assessment models of actuarial processes]. *ScienceRise*, 2016, vol. 8, no. 2 (25), pp. 6–14. DOI: 10.15587/2313-8416.2016.74962.
2. Sirotkin, A. V. *Algebraicheskie bayesovskie seti: vychislitel'naya slozhnost algoritmov logiko-veroyatnostnogo vyvoda v usloviyakh neopredelennosti* [Algebraic Bayesian networks: computational complexity of logic-probabilistic inference algorithms under uncertainty]. Saint Petersburg, Publishing House of St. Petersburg University, 2011.
3. Sirotkin, A. V., Tulupev, A. L. *Matrichnye uravneniya lokalnogo logiko-veroyatnostnogo vyvoda v algebraicheskikh bayesovskikh setyakh* [Matrix equations of local logical-probabilistic inference in algebraic Bayesian networks]. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAN]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2008, issue 6, pp. 134–143.
4. Tulupev, A. L. *Bayesovskie seti: logiko-veroyatnostnyy vyvod v tsiklakh* [Bayesian networks: logical-probabilistic inference in cycles]. Saint Petersburg, Publishing House of St. Petersburg University, 2008. 140 p. (Ser. Elements of soft computing.)
5. Tulupev, A. L. *Veroyatnostnaya logika i veroyatnostnye graficheskie modeli v bazakh fragmentov znaniy s neopredelennostyu* [Probabilistic logic and probabilistic graphical models in knowledge fragment databases with

uncertainty]. *Integrirrovannyye modeli, myagkie vychisleniya, veroyatnostnye sistemy i komplekсы programm v iskusstvennom intellekte : nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov, molodykh uchennykh i specialistov* [Integrated models, soft computing, probabilistic systems and software packages in artificial intelligence : scientific and practical conference of students, postgraduates, young scientists and specialists] (Kolomna, May 26–27, 2009) : in 2 vol. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, vol. 1, pp. 26–46.

6. Tulupev, A. L., Nikolenko, S. I., Sirotkin, A. V. *Bayesovskie seti: logiko-veroyatnostnyy podkhod* [Bayesian networks: a logical-probabilistic approach]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2006. 607 p.

7. Tulupev, A. L., Sirotkin, A. V., Nikolenko, S. I. *Bayesovskie seti doveriya: logiko-veroyatnostnyy vyvod v atsiklicheskikh napravlennykh grafakh* [Bayesian networks of trust: logical-probabilistic inference in acyclic directed graphs]. Saint Petersburg, Publishing House of St. Petersburg University, 2009. 400 p.

8. Filchenkov A. A., Tulupev A. L. Svyaznost i aciklichnost pervichnoy struktury algebraicheskoy bayesovskoy seti [Connectivity and acyclicity of the primary structure of an algebraic Bayesian network]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of St. Petersburg State University], Ser. 1, 2013, pp. 110–119.

9. Azarnova, T. V., Asnina, N. G., Proskurin, D. K., Polukhin, P. V. Formirovaniye struktury bayesovskoy seti protsessa testirovaniya nadezhnosti informatsionnykh sistem [Formation of the structure of the Bayesian network of the process of testing the reliability of information systems]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2017, vol. 13, no. 6, pp. 45–51.

Статья поступила в редакцию 29.10.2022; одобрена после рецензирования 28.12.2022; принята к публикации 28.12.2022.

The article was submitted 29.10.2022; approved after reviewing 28.12.2022; accepted for publication 28.12.2022.

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

DOI 10.54398/20741707_2023_2_42
УДК 004.896

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ЭМЕРДЖЕНТНОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Дилигенская Анна Николаевна, Самарский государственный технический университет, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус,

доктор технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-9867-9781, e-mail: adiligenskaya@mail.ru

Золотарев Вячеслав Владимирович, Сибирский государственный университет науки и технологий, 660037, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31,

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности информационных технологий, ORCID: 0000-0002-8054-8564, e-mail: zolotarev@sibsau.ru

Карпова Надежда Евгеньевна, Самарский государственный технический университет, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус,

кандидат технических наук, заведующий кафедрой электронных систем и информационной безопасности, ORCID: 0000-0001-9837-7903, e-mail: nadevkar@mail.ru

Селигеев Сергей Викторович, Сибирский государственный университет науки и технологий, 660037, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31,

студент, e-mail: seligeevsergei@gmail.com

В статье представлен подход, реализующий децентрализованное размещение средств защиты информации, учитывающий возможности получения данных изолированных сегментов, возможности управления на основе неполных данных или предиктивного анализа, безопасной коммуникации средств защиты и сценарного управления. Управление информационной безопасностью реализуется на уровне накопления опыта коллекторов данных отдельных средств защиты информации в сегментах информационной системы и дискретной по времени синхронизации различных сегментов. Также представлены возможности эмерджентного интеллекта как инструмента решения задачи управления информационной безопасностью. Управляющие компоненты могут быть как подключены к синхронизирующему центру асинхронно, обмениваясь с ним данными, но при этом центр не выполняет управляющей функции напрямую, выступая как средство синхронизации коллекторов данных, так и использоваться полностью децентрализованно. В качестве примера рассмотрен процесс управления уязвимостями информационной системы.

Ключевые слова: сложные системы, распределенные системы, информационная безопасность, управление информационной безопасностью, децентрализация

DECENTRALIZED INFORMATION SECURITY MANAGEMENT BASED ON EMERGENT INTELLIGENCE IN INFORMATION SYSTEMS

Diligenskaya Anna N., Samara State Technical University, main building, 244 Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-9867-9781, e-mail: adiligenskaya@mail.ru

Zolotarev Vyacheslav V., Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Information Technologies Security Department, ORCID: 0000-0002-8054-8564, e-mail: zolotarev@sibsau.ru

Karpova Nadezhda E., Samara State Technical University, main building, 244 Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Electronic Systems and Information Security, ORCID: 0000-0001-9837-7903, e-mail: nadevkar@mail.ru

Seligeev Sergey V., Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation,

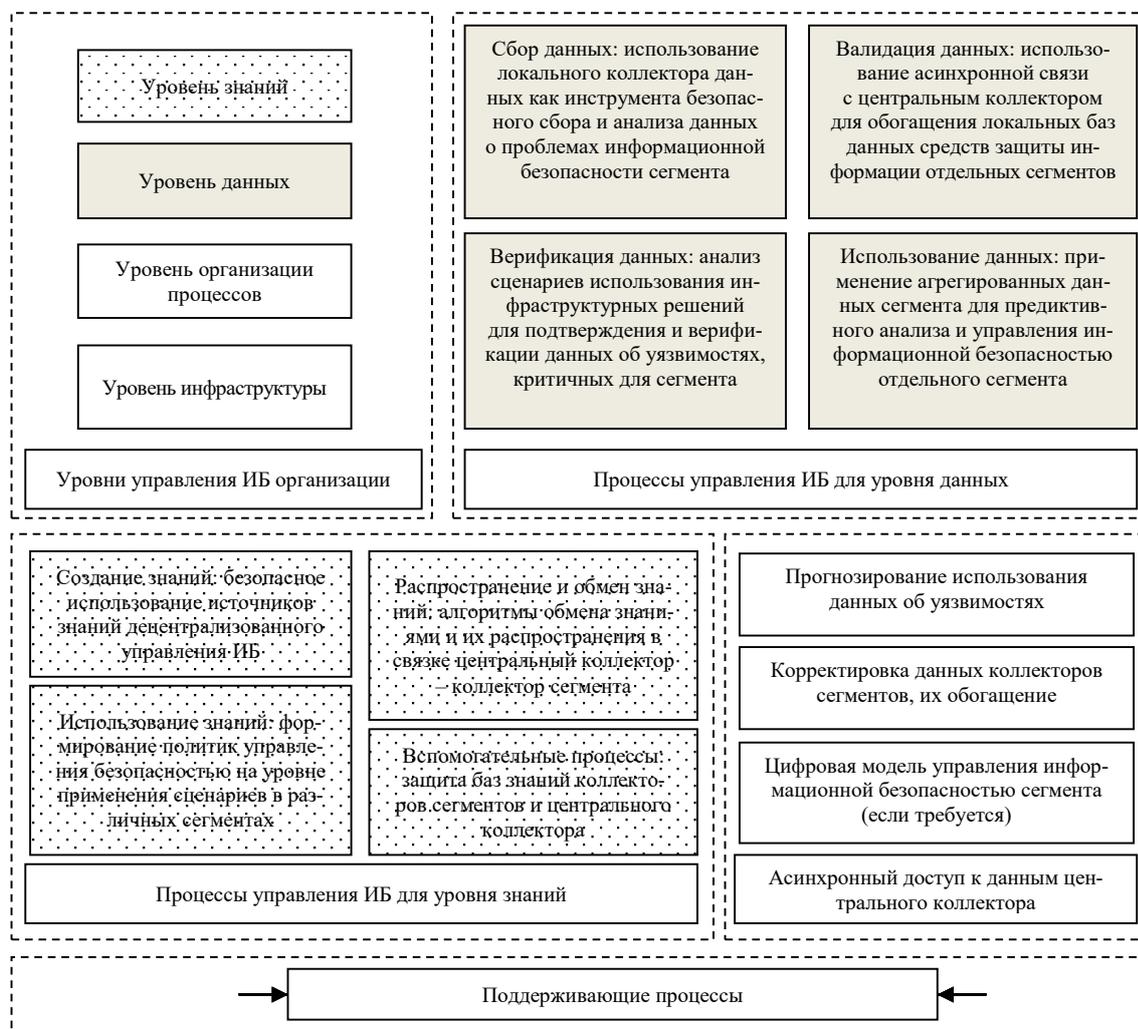
student, ORCID: no, e-mail: seligeevsergei@gmail.com

The article presents an approach that implements decentralized placement of information security tools, taking into account the possibilities of obtaining data from isolated segments, management capabilities based on incomplete data or predictive analysis, secure communication of security tools and scenario management. Information security management is implemented at the level of accumulation of experience of data collectors of individual information security tools in the

segments of the information system and discrete time synchronization of various segments. The possibilities of emergent intelligence as a tool for solving the problem of information security management are also presented. The control components can be either connected to the synchronizing center asynchronously, exchanging data with it, but the center does not perform the control function directly, acting as a means of synchronizing data collectors, or used completely decentralized. As an example, the process of vulnerability management of an information system is considered.

Keywords: complex systems, distributed systems, information security, information security management, decentralization

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Развитие систем защиты информации в настоящее время предполагает их усложнение, децентрализацию либо использование агентов-сборщиков данных, компиляцию и агрегацию данных различных подсистем и принятие решений на основе агрегированных данных.

Системы, усложняясь, становятся многоуровневыми, в них роль компонентов могут выполнять и автономные средства защиты информации, изначально не предполагаемые как сочлененные, за счет агрегирования данных от этих систем. Этот подход, называемый оркестрацией систем защиты, имеет широкое применение в задачах управления информационной безопасностью.

В этой связи становятся востребованными новые модели и методы адаптивного управления ресурсами систем защиты информации в реальном времени, предназначенные для решения задач распределения, планирования, оптимизации, прогнозирования, согласования, мониторинга и контроля использования ресурсов по событиям информационной безопасности, без полного перестроения планов, а только той их части, которая прямо или косвенно задета событием. Такие задачи возникают в системах управления событиями, инцидентами, центрами обработки данных по компьютерным атакам, информационной безопасностью в целом.

При этом планирование ресурсов должно предполагать не столько «инкрементальное» изменение плана, когда новые действия и процедуры претендуют на свободные ресурсы, как вычислительные,

так и в области систем хранения, а также алгоритмические, предназначенные для инициации различных стадий принятия решений, добавляясь в открытые интервалы времени «в хвост» уже имеющихся в расписании действий и процедур, сколько выявление и разбор конфликтов между уже ранее запланированными действиями и процедурами при условии, что еще есть время для принятия таких решений.

Кроме того, конфликты могут возникать и в условиях неполной информации о событии, возникающей из-за отложенной передачи информации из изолированных (временно изолированных) сегментов.

Таким образом, подход, комплексно рассматривающий процесс принятия решения по управлению информационной безопасностью для гетерогенных и распределенных (децентрализованных) систем защиты информации, повышающий эффективность принятия решений по критерию снижения времени реагирования на инциденты информационной безопасности, является актуальным

Децентрализованные системы защиты информации построены по принципу децентрализованной вычислительной сети, то есть сети с относительно равноправными узлами, управление доступом к каналам передачи данных в этих сетях распределено между узлами. Следовательно, важной характеристикой такой сети является функциональность узлов (возможность автономной или полуавтономной работы, возможность работы с данными только своего сегмента/узла, возможность предиктивного анализа), а также безопасность коммуникаций, реализованная децентрализованным способом.

В российской научной литературе тематика защиты децентрализованных распределенных сетей представлена достаточно слабо [1–3]. При этом надо учитывать и сам объект анализа – социальную сеть, распределенную структуру глобальной сети или, скажем, сенсорную сеть и возможность размещения интегрированных систем защиты информации в централизованном или децентрализованном варианте [4–6].

Так, в работе [7] методы системного анализа применены для решения задач информационной безопасности, построения моделей, повышения эффективности взаимодействия участников и элементов системы на основе методов визуальной аналитики.

В работе [8] исследование эффективности функционирования системы в области информационной безопасности базируется на применении методов системного анализа и системного подхода, основанных на показателях максимальной эффективности и оптимальной эффективности работы системы.

Комплексный подход к синтезу систем защиты информации и анализу качества их функционирования на основе методов искусственного интеллекта представлен следующими решениями: синтез адаптивной системы управления ИБ с использованием нейросетевых моделей и интеллектуальных агентов [9] и интеграция процедур динамического и статического обнаружения угроз на базе интеллектуальных технологий для их классификации [10].

МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Использование мультиагентных технологий [11] предоставляет качественно новый подход к построению систем информационной безопасности и их управлению.

В Самарской школе мультиагентных систем [12–14] в начале 2000-х годов был предложен ряд новых моделей и методов принятия согласованных решений агентами для создания интеллектуальных систем управления ресурсами.

В последнее время находят воплощение идеи поиска согласия (консенсуса), который может строиться как по горизонтали, так и по вертикали, в ходе выработки и согласования коллективных решений, когда у всех участников критерии могут быть разные, но в рамках диалога стороны могут выявлять и разрешать конфликты и находить компромиссы путем переговоров и взаимных уступок, что отвечает растущему сетевому взаимодействию. В этой модели сочетаются возможности как конкуренции, так и согласованным действиям. Тенденция перехода от одного «глобального» плана к «распределенному» множеству, причем непрерывно самосинхронизируемых решений, актуальна и для одной распределенной системы.

Важным шагом в развитии данного направления является теория активных систем [15], развивающая идеи программно-целевого планирования, в рамках которой кроме «центра» свои интересы и свободу выбора могут иметь и «исполнители» комплексных проектов. При этом исполнители стремятся к выбору таких своих состояний, которые являются наилучшими с точки зрения их предпочтений при заданных управляющих воздействиях центра, а управляющие воздействия, в свою очередь, зависят от состояний управляемых субъектов. Однако и в данном случае основные решения принимает центр, а переговоры между самими исполнителями не предусмотрены.

Модели самоорганизации, включающие поиск такого рода вертикального (центр – исполнитель) и горизонтального (исполнитель – исполнитель) «консенсуса» при построении сложных планов, на сегодня остаются мало изученными, но весьма перспективными при использовании распределенных и сетевых интеллектуальных систем для решения задач управления информа-

ционной безопасностью [16–17]. В основе сетецентрического подхода к системам управления ресурсами лежит принцип построения «системы систем», когда множество различных систем управления взаимодействуют между собой для выработки согласованных решений по управлению.

Методы защиты ресурсов информационной системы (ИС) существенно зависят от ее архитектуры. В настоящее время широкое распространение получили сложные, территориально распределенные ИС, в которых гибко сочетаются элементы централизации и децентрализации [3]. В сложных корпоративных ИС обычно присутствует несколько уровней управления.

УРОВНИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Уровни управления информационной безопасностью могут быть представлены как на уровне данных, так и на уровне инфраструктуры, организационных процессов и знаний.

Результатом использования предлагаемых подходов является комплексный подход к построению децентрализованных систем ИБ. Использование комплексного подхода к построению систем ИБ, позволяющего систематизировать и классифицировать области применения методов и задач информационной безопасности, проводить анализ соответствующих им моделей и их свойств, также структур данных, позволяет получить новые результаты, обладающие синергией свойств и характеристик отдельных подходов.

Авторами ранее предложен единый подход, учитывающий необходимость как работать с «сырыми», необработанными данными на уровне их агрегирования, так и обращаться к отдельным сценариям и использовать их для прогнозирования развития ситуации как в отдельном сегменте, так и на уровне системы в целом [18].

Подход, представленный в настоящей статье, привлекает знания из смежной области эмерджентного интеллекта [11, 12]. Предлагаемый подход использует идею эмерджентного интеллекта как важный шаг по переходу от вертикальных (иерархических) структур управления системами защиты информации к горизонтальным связям между различными сегментами децентрализованной системы на основе сетецентрической платформы. Этот переход также предполагает движение от традиционных централизованных, монолитных, иерархических, последовательных систем к полностью распределенным «системам систем» с эмерджентным интеллектом на основе сетевых взаимодействий, способным работать автономно и асинхронно, выполнять, моделировать и оценивать, в том числе предиктивно, различные действия, процедуры и сценарии в области управления информационной безопасностью.

Предположим, что выстроенная таким образом децентрализованная система обладает возможностью собирать (коллекционировать), агрегировать и анализировать данные. Следовательно, на уровне отдельного сегмента такой системы, обладающего самостоятельностью в вопросах сбора и анализа таких данных, возникают собственные задачи управления информационной безопасностью (рис. 1).

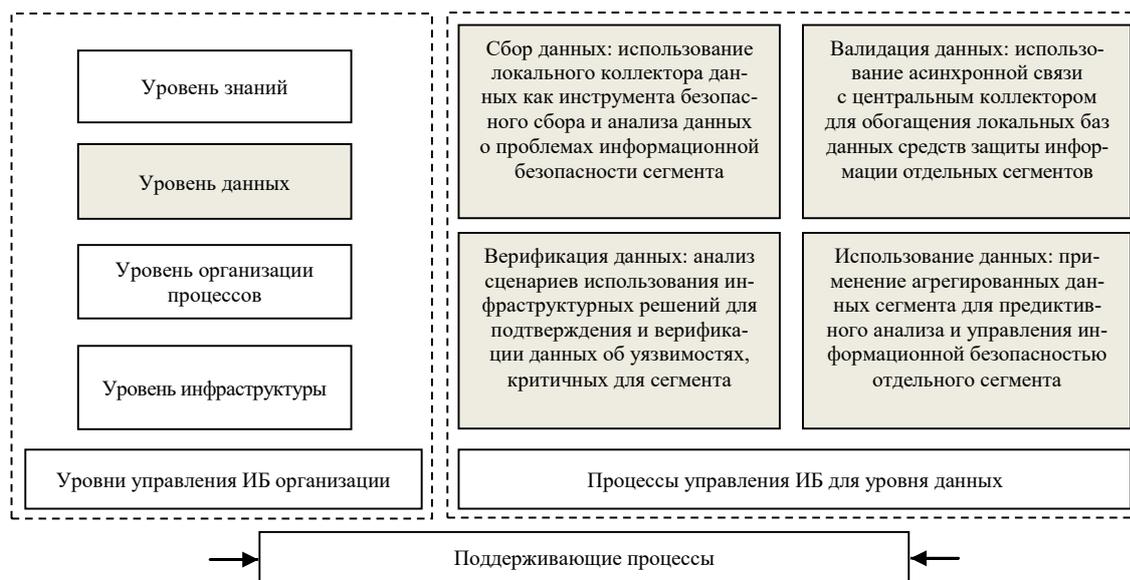


Рисунок 1 – Управление информационной безопасностью отдельного сегмента в децентрализованной системе: уровень данных

На уровне сбора необработанных данных в отдельных сегментах в децентрализованной системе возникнет несколько типовых проблем, а именно:

- недостаток или неполнота данных приведет к различным решениям, принимаемым средствами защиты информации в отдельных сегментах, даже при наличии коллектора данных в каждом сегменте;
- невозможность синхронного обмена данными (исходя из схемы организации системы в целом) приведет к повышению ее показателей надежности, но снижению времени реагирования на появление новых угроз и уязвимостей.

Следовательно, в такой системе либо удаленно, либо в одном из ее сегментов должен существовать компонент, отвечающий за периодическое обогащение данными баз данных локальных коллекторов (далее для простоты – коллектор-«обменник»). В рамках децентрализованной схемы логично предположить, что эти данные могут так или иначе собираться локальными коллекторами и поступать в обработанном или «сыром» виде на указанный коллектор-«обменник» в асинхронном режиме; это вносит в схему один или несколько дополнительных элементов, но частично снимает указанные типовые проблемы. Альтернативой этому решению являются предиктивные алгоритмы, работающие с неполными данными каждого сегмента. Это может быть приемлемо, если сегменты должны быть полностью изолированными или быть изолированными в течение длительных промежутков времени.

Таким образом, за процессы безопасного сбора и анализа данных в такой системе должен отвечать локальный коллектор сегмента (если существуют коллекторы-«обменники», то они также выполняют аналогичную функцию в своих сегментах). Процессы валидации данных происходят в асинхронном режиме в те моменты, в которые возможно локальное или удаленное подключение к «обменнику». Процессы верификации и использования данных должны поддерживать алгоритмы предиктивного анализа.

В результате исследования направления децентрализованных систем защиты информации возможна постановка следующей научной проблемы. Децентрализация сбора данных приводит к неполноте и неточности данных отдельных агентов (подсети, сегмента), но централизация баз означает замедление времени реагирования, появление точки отказа и снижение устойчивости системы защиты информации к угрозам отказа в обслуживании, нарушения конфиденциальности. Каким образом должен быть обеспечен баланс между этими характеристиками, должно быть определено результатами текущих исследований в этой области науки.

Для реализации предлагаемого подхода в работе выбираются мультиагентные технологии, что позволяет предложить принципиально новые основы построения систем защиты информации, особенно на уровне управления информационной безопасностью.

Максимально полный охват возможных вариантов архитектур интегрированных систем защиты информации в централизованном или децентрализованном варианте призван обеспечить вероятность попадания оптимального решения в спектр допустимых альтернатив. Методы эмерджентного интеллекта позволяют проектировать защиту ИС на полном цикле функционирования ИС, в том числе на начальных этапах, характеризующихся неполнотой информации.

Методы принятия решений предназначены реализовать на множестве доступных вариантов выбор альтернативы, обеспечивающей наибольшую ИБ в каждом конкретном случае в зависимости от типа распределенных сетей, объема доступной на текущий момент информации и т. д.

Принимая указанную схему управления информационной безопасностью, необходимо учитывать следующие стандартные процессы:

- управление требованиями к безопасности хранения, обработки, синтеза и анализа данных. С точки зрения указанной задачи этот процесс будет реализован и для каждого локального сегмента, и для коллекторов данных, и для баз знаний средств защиты информации, в том числе на уровне оркестрации в отдельных сегментах или при создании коллекторов-«обменников»;
- реализация процедур и сценариев обеспечения непрерывности функционирования отдельных сегментов, алгоритмов обмена данными и системы в целом;
- обучающие сценарии для формируемого набора действий при работе отдельных сегментов;
- управление коммуникациями, включая любой периодичности обмен информацией между сегментами, если таковой возможен;
- предиктивные сценарии для средств защиты информации отдельных сегментов.

Предположим, что обмен данными между сегментами возможен, пусть и в асинхронном режиме. В таком случае в упомянутой выше высокоуровневой задаче управления информационной безопасностью можно выделить процессы управления на уровне знаний, поскольку обмен «сырыми», необработанными данными будет неэффективен как по причине ограниченного полезного использования такого канала обмена данными, так и по причине появления необходимости дополнительной обработки указанных данных.

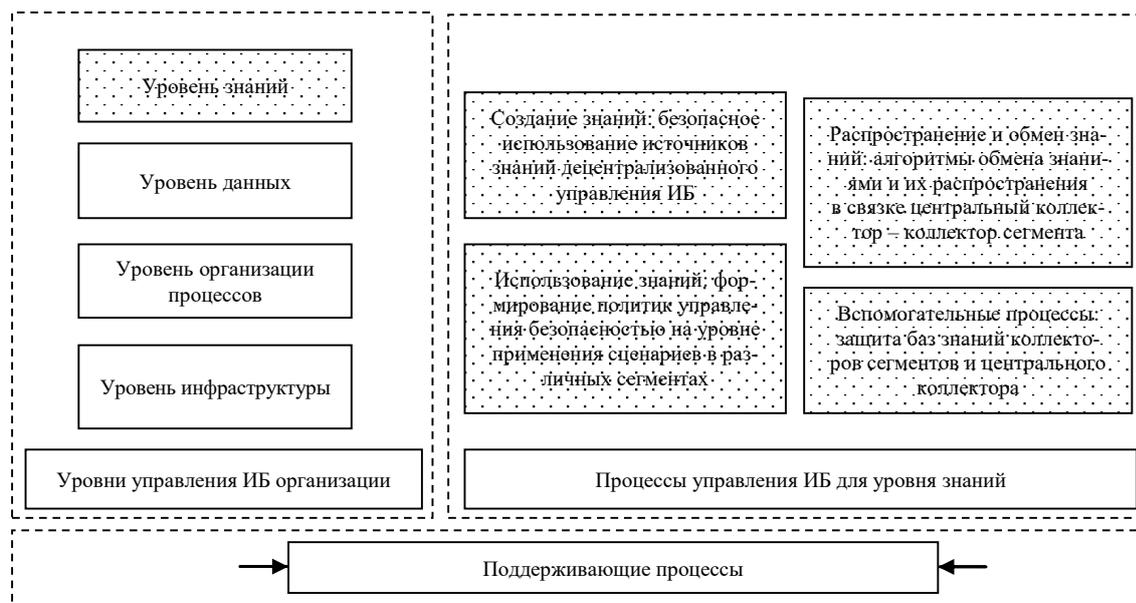


Рисунок 2 – Управление информационной безопасностью отдельного сегмента в децентрализованной системе: уровень знаний

Следовательно, обмен должен вестись либо на уровне метаданных, используемых для обогащения баз данных локальных коллекторов (и последующего их использования средствами защиты информации локального сегмента), либо на уровне создания баз знаний в коллекторах-«обменниках» и реализации процессов управления безопасностью на уровне знаний в децентрализованной системе (рис. 2).

В качестве знаний могут быть полезны:

- сценарии действий;
- процедуры и регламенты реагирования на инциденты;
- методики, сценарии и регламенты оркестрации средств защиты информации;
- вектора атак и порядок эксплуатации уязвимостей;
- результаты исследования величины и мест возникновения ущерба инфраструктуре, процессам и/или данным;
- алгоритмы предиктивного анализа, позволяющие работать в условиях неполных данных отдельных сегментов.

Далее рассмотрен принцип и пример организации частично децентрализованного управления уязвимостями, иллюстрирующего приведенный выше подход.

УПРАВЛЕНИЕ УЯЗВИМОСТЯМИ ЛОКАЛЬНЫХ СЕГМЕНТОВ В ЧАСТИЧНО ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СХЕМЕ

Предлагаемый междисциплинарный подход призван обеспечить повышение эффективности (надежности) информационной безопасности систем за счет оптимизации управляющих решений на каждом из этапов реализации и синергетического эффекта проектной составляющей (архитектуры ИС), интеллектуального управления средствами защиты информации в отдельных ситуациях и принятия оптимального решения из всех допустимых альтернатив. Разработка алгоритмов предиктивного анализа для такой схемы управления представляется отдельной интересной задачей.

Таким образом, научная значимость рассматриваемой проблемы обусловлена необходимостью разработки и исследования новых подходов к решению проблемы повышения информационной безопасности интегрированных систем, основанных на методах проектирования защиты ИС, эмерджентных интеллектуальных технологиях и методах системного анализа, что позволит использовать преимущества и сильные стороны всех направлений.

Проблема управления информационной безопасностью для децентрализованных систем защиты информации, включая алгоритмы безопасного обмена информацией, алгоритмы предиктивного анализа для принятия решений в условиях неполной информации и сетецентрического управления, а также управления средствами защиты изолированных сегментов и взаимодействия с ними.

Решение задачи поддерживает современные направления развития систем защиты информации, даже частичное решение задачи – это совершенствование современных архитектур децентрализованных систем защиты информации, создание базиса для интеллектуализации и автономного принятия решений в таких системах.

С точки зрения реализации показанная выше схема позволяет обеспечить реализацию алгоритма сценарного управления системой защиты информации, модифицирующего известные процессные модели и учитывающего возможности эмерджентного интеллекта отдельных средств (подсистем, сегментов) системы защиты информации. При этом схема управления ИБ должна включать возможность реализации сценариев как компонентов единой системы управления защитой информации на программном уровне, взаимодействовать не менее чем с двумя отдельными средствами защиты информации, реализующими функции сбора данных о состоянии распределенной системы и способными действовать автономно.

Кроме того, следствием реализации показанной выше или подобной ей схемы можно считать реализацию системы управления информационной безопасностью на основе данных, включающей использование децентрализованных (частично децентрализованных) систем защиты информации, функционирующих на основе интеллектуальных технологий и использующих подходы эмерджентного интеллекта.

Приведем пример реализации подобной схемы на примере децентрализованного управления уязвимостями информационной системы, состоящей из некоторого количества сегментов, большую часть времени существующих изолированно. Общая структурная схема такой системы приведена ниже (рис. 3).

Итак, представлена система, которая состоит из N числа типовых сегментов. Данные сегменты в рамках работы применяются для ведения бизнес-процесса или решения некоторой вычислительной задачи. Сегменты территориально расположены в различных местах, и в некоторые моменты времени сегменты могут терять связь с другими сегментами и до момента восстановления связи будут являться независимыми. Теперь, имея примерное описание исходной системы, перейдем к описанию проблемы.

Так как сегменты территориально находятся в различных местах, атаки на каждый из них могут иметь различную специфику, но при этом каждая из них будет актуальна для всех остальных сегментов. Проблема заключается в следующем: специалисты, работающие только с уязвимостями, специфичными для своего сегмента, могут упустить уязвимости, специфичные для других сегментов. Исходя из проблемы, присутствует необходимость сбора метаданных об уязвимостях (далее метаданные) в каждом конкретном сегменте и распространение полученных данных между оставшимися сегментами в системе. При реализации подобной схемы каждый из сегментов будет иметь всю актуальную информацию о возможных векторах атак.

Имея описание исходной системы и проблемы, присутствующей в ней, можно перейти к описанию схемы реализации сбора и распространения метаданных.

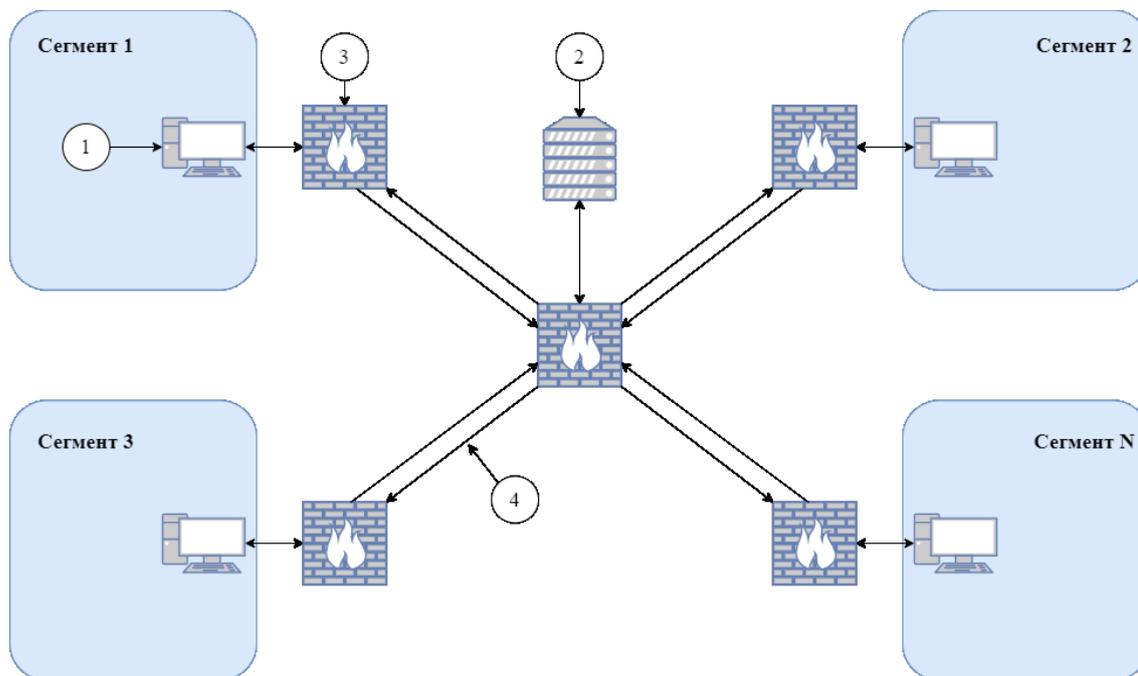


Рисунок 3 – Схема сбора и распространения метаданных

Описание стоит начать с того, что в каждом сегменте присутствует локальный коллектор метаданных (1), который имеет выход за периметр сегмента. Выход за периметр происходит через межсетевой экран (3). Сбор данных со всех сегментов обеспечивает центральный коллектор (2), который также защищен межсетевым экраном (3). В качестве механизма передачи данных между локальными коллекторами и центральным коллектором планируется применение асимметричного канала: локальные коллекторы лишь отправляют метаданные на центральный коллектор, который,

в свою очередь, с заданной периодичностью распространяет собранные метаданные между сегментами. Также предполагается, что локальные коллекторы имеют возможность отправки запроса на получение накопленных метаданных. Итого каждый сегмент имеет возможность получения метаданных по расписанию или по требованию.

Однако даже в теоретической реализации данной схемы присутствуют проблемы: сами метаданные и коллекторы. Проблема метаданных заключается в том, что нет их точной регламентации. Так, например, метаданными может являться статистика по реализованным уязвимостям или классы успешных атак. Эта проблема создает сложность формализации метаданных для коллекторов, так как они являются некоторым программным решением и могут манипулировать лишь машиночитаемыми данными.

Проблема самих коллекторов заключается в том, что на рынке нет программных решений для реализации подобной специфической задачи. Это создает необходимость в создании подобного решения самостоятельно или ожидания появления схожего по функционалу продукта от известных вендоров.

Исходя из описанных проблем, предложенная схема на данный момент времени может существовать лишь в рамках концепта. Подобная схема применима при невозможности полной централизации системы. При реализации мы имеем лишь частный случай централизации процесса управления уязвимостями, что и является достоинством данного концепта.

Таким образом, предложенная система реализует модель имплементации управления информационной безопасностью на основе данных, впервые учитывающая ограничения, особенности применения и свойства эмерджентного интеллекта отдельных средств (подсистем, сегментов) системы защиты информации. Очевидно, что для такой схемы полностью применим вариант, когда каждый конкретный сегмент имеет автономный, управляемый децентрализованно набор средств защиты информации, но вместе с тем имеет возможность, пусть асинхронно, обмениваться метаданными для обогащения собственных баз данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В показанной в статье схеме управления информационной безопасностью могут быть реализованы как алгоритм сценарного управления системой защиты информации, так и алгоритм имплементации управления информационной безопасностью на основе данных. Этот набор алгоритмов может модифицировать известные процессные модели и учитывать возможности эмерджентного интеллекта отдельных средств (подсистем, сегментов) системы защиты информации.

Формирование метода управления информационной безопасностью на основе данных включает использование децентрализованных (частично децентрализованных) систем защиты информации, функционирующих на основе интеллектуальных технологий и использующих подходы эмерджентного интеллекта и реализация системы управления информационной безопасностью на основе данных. Это может включать использование децентрализованных (частично децентрализованных) систем (процессов, процедур, операций) защиты информации, функционирующих на основе интеллектуальных технологий и использующих подходы эмерджентного интеллекта, позволяет учитывать возможности сетецентрического управления средствами защиты в условиях изоляции отдельных сегментов, полной либо временной, включая возможность имплементировать подходы эмерджентного интеллекта.

Список источников

1. Овчинников, Н. А. Разработка модели угроз системы защиты информации «Умный дом» / Н. А. Овчинников, Е. А. Максимова // Информационные системы и технологии. – 2015. – Т. 92, № 6. – С. 141.
2. Галибус, Т. В. Концептуальное моделирование и организация механизмов защиты информации в распределенных системах / Т. В. Галибус, В. В. Краснопрошин // Информатика. – 2016. – № 1. – С. 92–102.
3. Кругликов, С. В. Информационная безопасность информационных систем с элементами централизации и децентрализации / С. В. Кругликов и др. // Вопросы кибербезопасности. – 2020. – № 1 (35). – С. 2–7.
4. Ageyev, D. Traffic monitoring and abnormality detection methods for decentralized distributed networks / D. Ageyev et al. // Information Security Technologies in the Decentralized Distributed Networks. – Springer, Cham, 2022. – С. 287–305.
5. Skandylas, C. Adaptive trust-aware decentralized information flow control / C. Skandylas, N. Khakpour, J. Andersson // 2020 IEEE International Conference on Autonomic Computing and Self-Organizing Systems (ACSOS). – 2020. – P. 92–101.
6. Tingting, L. A decentralized information flow model for saas applications security / L. Tingting, Z. Yong // 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications. – 2013. – P. 40–43.
7. Котенко, И. В. Визуальная аналитика для информационной безопасности: области применения, задачи и модели визуализации / И. В. Котенко, М. В. Коломеец, К. Н. Жернова, А. А. Чечулин // Вопросы кибербезопасности. 2021. № 4 (44). с. 2–15.
8. Кулик, С. Д. Применение системного анализа для оценки эффективности средств обеспечения информационной безопасности / С. Д. Кулик // Безопасность информационных технологий. – 2019. – Т. 26, № 1. – С. 25–35.
9. Mukhin, V. Adaptive security system based on intelligent agents for distributed computer systems / V. Mukhin et al. // Int. Conf. on Development and Application Systems (DAS) (Suceava). – 2016.
10. Zhang, B.-Y. Research on virus detection technique based on ensemble neural network and SVM / B.-Y. Zhang, J.-P. Yin, S.-L. Wang, X.-A. Yan // Neurocomputing. – 2014. – P. 24–33. – DOI: 10.1016/j.neucom.2013.04.055.
11. Skobelev, P. Towards Autonomous AI Systems for Resource Management: Applications in Industry and Lessons Learned / P. Skobelev // 16th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems (PAAMS 2018). – 2018. – LNAI 10978. – P. 12–25. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-94580-4_2.

12. Скобелев, П. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений / П. Скобелев // *Автометрия*. – 2002. – Т. 38, № 6. – С. 45–61.
13. Виттих, В. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени / В. Виттих, П. Скобелев // *Автометрия*. – 2009. – № 2. – С. 78–87.
14. Скобелев, П. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем / П. Скобелев // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2010. – № 12. – С. 33–46.
15. Бурков, В. Теория активных систем: состояние и перспектива / В. Бурков, Д. Новиков. – Москва : Синтег, 1999.
16. Ivanyuk, V. Network-Centric Methods Management / V. Ivanyuk, N. Abdikeyev, F. Patshenko, N. Grineva // *Management Science*. – Moscow : Financial University under the Government of Russian Federation, 2017. – Vol. 7 (1). – P. 26–34.
17. Chigani, A. Architecting Network-Centric Software Systems: A Style-Based Beginning / A. Chigani, D. Jamed, S. Bohner // *31st IEEE Software Engineering Workshop (SEW'07)*. – P. 290–299. – <https://doi.org/10.1109/SEW.2007.95>.
18. Золотарев, В. В. Модель и алгоритм управления информационной безопасностью образовательной организации высшего образования с учетом требований управления на основе данных / В. В. Золотарев, М. А. Лапина // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2022. – № 4 (60).

References

1. Ovchinnikov, N. A., Maksimova, E. A. Razrabotka modeli ugroz sistemy zashchity informatsii «Umnyy dom» [Development of a threat model of the information security system "Smart house"]. *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies], 2015, vol. 92, no. 6, p. 141.
2. Galibuse, T. V., Krasnoprosin, V. V. Kontseptualnoye modelirovaniye i organizatsiya mekhanizmov zashchity informatsii v raspredelennykh sistemakh [Conceptual modeling and organization of information security mechanisms in distributed systems]. *Informatika* [Computer Science], 2016, no. 1, pp. 92–102.
3. Kruglikov, S. V. et al. Informatsionnaya bezopasnost informatsionnykh sistem s elementami tsentralizatsii i detsentralizatsii [Information security of information systems with elements of centralization and decentralization]. *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity Issues], 2020, no. 1 (35), pp. 2–7.
4. Ageev, D. et al. Methods of traffic monitoring and anomaly detection in decentralized distributed networks. *Information security technologies in decentralized distributed networks*. Springer, Cham, 2022, pp. 287–305.
5. Skandilas, S., Hakpour, N., Andersson, J. Adaptive decentralized management of information flows taking into account trust. *IEEE 2020 International Conference on Autonomous Computing and Self-Organizing Systems (ACSOS)*, 2020, pp. 92–101.
6. Tingting, L., En, Z. A model of a decentralized information flow for ensuring the security of saas applications. *The Third International Conference of 2013 on the design of intelligent systems and engineering applications*, 2013, pp. 40–43.
7. Kotenko, I. V., Kolomeyets, M. V., Zhernova, K. N., Chechulin, A. A. Vizualnaya analitika dlya informatsionnoy bezopasnosti: oblasti primeneniya, zadachi i modeli vizualizatsii [Visual analytics for information security: applications, tasks and visualization models]. *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity Issues], 2021, no. 4 (44), pp. 2–15.
8. Kulik, S. D. Primeneniye sistemnogo analiza dlya otsenki yeffektivnosti sredstv obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti [Application of system analysis to assess the effectiveness of information security tools]. *Bezopasnost informatsionnykh tekhnologiy* [Information Technology Security], 2019, vol. 26, no. 1, pp. 25–35.
9. Mukhin, V. et al. Adaptive security system based on intelligent agents for distributed Computer systems. *Int. Conference on Development and Application Systems (DAS) (Suceava)*, 2016.
10. Zhang, B.-Yu., Yin, J.-P., Wang, S.-L., Yang, H.-A. Investigation of a virus detection method based on an ensemble neural network and SVM. *Neurocomputing*, 2014, no. 137, pp. 24–33. DOI: 10.1016/j.neucom.2013.04.055.
11. Skobelev, P. On the way to autonomous artificial intelligence systems for resource management: application in industry and lessons learned. *The 16th International Conference on the Practical Application of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS 2018)*, 2018, LNAI 10978, pp. 12–25. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-94580-4_2.
12. Skobelev, P. Otkrytyye multiagentnyye sistemy dlya operativnoy obrabotki informatsii v protsessakh prinyatiya resheniy [Open multi-agent systems for operational information processing in decision-making processes]. *Avtometriya* [Autometry], 2002, vol. 38, no. 6, pp. 45–61.
13. Vittikh V., Skobelev P. Metod sopryazhennykh vzaimodeystviy dlya upravleniya raspredeleniyem resursov v realnom masshtabe vremeni [Method of conjugate interactions for managing resource allocation in real time]. *Avtometriya* [Autometry], 2009, no. 2. pp. 78–87.
14. Skobelev, P. Multiagentnyye tekhnologii v promyshlennykh primeneniakh: k 20-letiyu osnovaniya Samarskoy nauchnoy shkoly multiagentnykh sistem [Multi-agent technologies in industrial applications: to the 20th anniversary of the founding of the Samara scientific school of multi-agent systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, Automation, Control], 2010, no. 12, pp. 33–46.
15. Burkov, V., Novikov, D. Burkov, V. *Teoriya aktivnykh sistem: sostoyaniye i perspektiva* [Theory of active systems: state and perspective]. Moscow, Synteg, 1999.
16. Ivanyuk, V., Abdikeyev, N., Patsenko, F., Grineva, N. Ivanyuk, V. Network-Centric Methods Management. *Management Science*. Moscow : Financial University under the Government of Russian Federation, 2017, vol. 7 (1), pp. 26–34.
17. Chigani, A., Jamed, D., Bohner, S. Architecting Network-Centric Software Systems: A Style-Based Beginning. *31st IEEE Software Engineering Workshop (SEW'07)*, pp. 290–299. <https://doi.org/10.1109/SEW.2007.95>.
18. Zolotarev, V. V., Lapina, M. A. Model i algoritm upravleniya informatsionnoy bezopasnostyu obrazovatelnoy organizatsii vysshego obrazovaniya s uchedom trebovaniy upravleniya na osnove dannykh [Model and algorithm of information security management of an educational organization of higher education taking into account the requirements of data-based management]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2022, no. 4 (60).

Статья поступила в редакцию 15.02.2023; одобрена после рецензирования 06.03.2023; принята к публикации 30.03.2023.

The article was submitted 15.02.2023; approved after reviewing 06.03.2023; accepted for publication 30.03.2023.

УДК 004.056.53

**НАВЯЗЫВАНИЕ ЛОЖНОЙ ИНФОРМАЦИИ ЗЛОУМЫШЛЕННИКУ,
ОСУЩЕСТВЛЯЮЩЕМУ АТАКУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SQL-ИНЪЕКЦИИ**

Ажмухамедов Искандар Маратович, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9058-123X, e-mail: aim_agtu@mail.ru

Демина Раиса Юрьевна, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

кандидат технических наук, ORCID: 0009-0009-1615-5641, e-mail: raisa.demina.91@mail.ru

Демин Николай Олегович, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

аспирант, ORCID: 0009-0000-7404-3597, dnicolas1988@gmail.com

В рамках статьи рассмотрена проблема обеспечения безопасности информационных систем от атак с использованием SQL-инъекций. Проанализированы основные методы защиты, такие как параметризованные запросы и межсетевое экранирование. Рассмотрены недостатки классических методов и предложена схема защиты, предусматривающая имитацию уязвимости с последующим навязыванием злоумышленнику дезинформации. В классическую схему защиты от атак с использованием SQL-инъекций предлагается внедрить блок, который бы отвечал за перенаправление нелегитимных запросов к альтернативной базе данных. Альтернативная база данных должна быть идентична по структуре оригинальной базе данных, но содержать только заведомо ложные сведения. Представлена блок-схема алгоритма анализа, перенаправления запроса и формирования ответа злоумышленнику. Предложенная схема позволяет как минимум выиграть время для принятия дополнительных мер по защите конфиденциальных данных. Как максимум – навязать атакующему достоверно выглядящие заведомо ложные сведения. Предлагаемая схема защиты реализует подход, предусматривающий попытку атакующего извлечь определенную выгоду из атаки, а не только отразить ее.

Ключевые слова: информационная безопасность, межсетевое экранирование, дезинформация, SQL-инъекции, атаки на WEB-ресурсы

**IMPOSING FALSE INFORMATION ON AN ATTACKER
CARRYING OUT AN ATTACK USING SQL-INJECTION**

Azhmukhamedov Iskandar M., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-9058-123X, e-mail: aim_agtu@mail.ru

Demina Raisa Yu., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0009-0009-1615-5641, e-mail: raisa.demina.91@mail.ru.

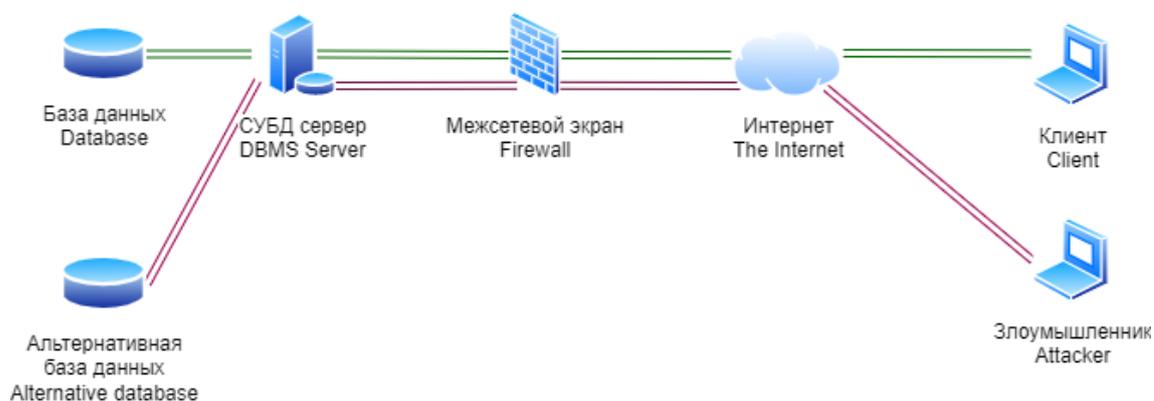
Demin Nikolay O., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

graduate student, ORCID: 0009-0000-7404-3597, dnicolas1988@gmail.com.

The article considers the problem of ensuring the security of information systems from attacks using SQL injections. The main methods of protection such as parameterized requests and firewall are analyzed. The disadvantages of classical methods are considered and a protection scheme is proposed, which provides for the imitation of vulnerability with the subsequent imposition of disinformation on the attacker. In the classic scheme of protection against attacks using SQL injections, it is proposed to introduce a block that would be responsible for redirecting illegitimate requests to an alternative database. The alternative database must be identical in structure to the original database, but must contain only deliberately false information. A block diagram of the algorithm for analyzing, redirecting the request and forming a response to the attacker is presented. The proposed scheme allows, at a minimum, to gain time to take additional measures to protect confidential data. As a maximum – to impose reliable-looking deliberately false information on the attacker. The proposed protection scheme implements an approach that provides for an attempt by the attacker to extract a certain benefit from the attack, and not only to repel it.

Keywords: information security, firewall, disinformation, SQL-injections, attacks on WEB resources

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Количество кибер-атак непрерывно растет. По информации Positive Technologies, в I квартале 2022 г. количество кибер-атак увеличилось на 14,8 % по сравнению с IV кварталом 2021 г. [1]. Доля массовых атак увеличилась до 33 % от общего числа. Отдельного внимания заслуживает тот факт, что возрос интерес злоумышленников к веб-ресурсам: с 13 % (IV квартал 2021 года) до 22 % (I квартал 2022 г.). Согласно отчету Ростелеком Солар [2], во II квартале 2022 г. преобладали инциденты, связанные с атаками на WEB-ресурсы (рис. 1). Атакам высокой доли критичности, связанным с утечкой учетных записей (УЗ) и заражением вредоносным программным обеспечением (ВПО) в указанный период времени злоумышленниками, было уделено существенно меньше внимания.



Рисунок 1 – Инциденты с высокой долей критичности, II квартал 2022 г., по версии Ростелеком Солар

Участившиеся утечки персональных данных из различных источников привлекли внимание российских законодателей. Интерфакс, со ссылкой на председателя комитета Госдумы по информационной политике Александра Хинштейна, сообщил, что «размер штрафов за утечку персональных данных может зависеть от ее размера». «Наряду с введением оборотных штрафов для компаний, допустивших повторные утечки, предполагаются и внушительные штрафы для должностных лиц. Кроме того, отдельно вводится и уголовная ответственность», – отметил глава комитета [3].

Защита информационных систем (в частности, WEB-ресурсов), обращающихся к базам данных, уже давно является актуальной задачей, но в последнее время, в связи с увеличением числа атак, требуется особое внимание к обеспечению конфиденциальности, целостности и доступности защищаемых данных, в том числе и персональных данных граждан.

Рассмотрим подробнее наиболее распространенные механизмы, используемые при проведении атак на WEB-ресурсы, так как именно они стали основной мишенью злоумышленников во II квартале 2022 г. (табл. 1).

Таблица 1 – Наиболее распространенные виды атак

Тип атаки	Описание
DoS- и DDos-атаки	Атаки, проводимые с целью нарушения доступности ресурса. Часто используется сеть ботов для проведения более масштабной атаки.
Фишинговые атаки	Вид мошеннических атак, при которых злоумышленники создают поддельный ресурс, похожий на настоящий, с целью выманивания у пользователей конфиденциальных сведений.
Атаки с использованием SQL-инъекций	Злоумышленники пытаются передать на сервер вместо запрашиваемых данных SQL-команду, направленную на получение несанкционированного доступа к информации или ее изменение/уничтожение.
Межсайтинговый скриптинг (XSS-атаки)	Злоумышленники пытаются внедрить в код приложения вредоносные скрипты.
Атаки типа «человек посередине»	Злоумышленник тайно внедряется в процесс общения двух сторон. Злоумышленники пытаются читать переписку сторон и/или выдавать себя за одну из сторон

Использование SQL-инъекций является привычным приемом злоумышленников, атакующих информационные системы, включающие в себя отправку запросов к базе данных. Несмотря на то, что данный прием уже давно изучен специалистами в области информационной безопасности и программной инженерии, данный вид уязвимости все равно продолжает эксплуатироваться злоумышленниками. Злоумышленники через поля ввода информации, расположенные на интерфейсе приложения, пытаются изменить структуру запланированных разработчиками SQL-запросов и совершить вредоносные действия, к которым относятся:

- получение сведений о базе данных, ее структуре, названиях таблиц, количестве колонок в таблицах и пр.;
- получение информации, к которой отсутствует возможность обратиться через интерфейс приложения;
- внесение несанкционированных изменений в базу данных, вплоть до полного уничтожения информации.

При атаках с использованием SQL-инъекций злоумышленники в поля для ввода информации вводят текст, содержащий нелегитимные запросы к базе данных [4]. Если разработчики информационных систем не предусмотрели необходимые проверки введенных пользователем данных, то злоумышленники могут воспользоваться данной уязвимостью и совершить несанкционированные действия с базой данных. Как правило, при попытке внедрения SQL-инъекции злоумышленник использует следующие приемы:

1. Попытка спровоцировать вывод необрабатываемого сообщения об ошибке, содержащего полезную информацию о базе данных. WEB-приложения, как и любые другие приложения, должны перехватывать все сообщения об ошибках и выводить пользователю только ту информацию, которая может сориентировать пользователя, помочь устранить причину и дать инструкции по дальнейшим действиям. Предоставлять пользователю техническую информацию нецелесообразно, потому что неспециалист ничего не поймет, а злоумышленник может использовать добытые сведения при проведении атаки на систему.

2. Передача злоумышленником специальных символов в качестве параметра запроса, например «'». Символ одинарной кавычки используется при передаче текстовых данных. Злоумышленник может попытаться обмануть приложение, закрыть кавычку раньше времени и после этого текст, который он написал в текстовом поле (при недостаточной защите) будет воспринят как команда, а не как текстовая информация.

3. Использование оператора UNION для подсчета количества полей и для объединения результатов запросов. Некоторая информация, хранимая в базе данных, не предназначена для вывода пользователю. Администраторы иногда забывают настроить соответствующие права доступа. В других случаях легитимный пользователь должен получать информацию дозированно, а злоумышленник желает получить всю информацию сразу. В этих случаях атакующий объединяет результаты легитимного (не интересующего злоумышленника) запроса с результатами инъекции, которые предоставляют для злоумышленника непосредственный интерес.

4. Использование логических операторов OR/AND. Использование в инъекциях конструкции «OR 1=1» приводит к тому, что первоначальное условие, заложенное разработчиками в запросе, становится бесполезным, и злоумышленник получает информацию, неограниченную первоначальным условием.

5. Использование символов комментирования для «отсечения» не нужной злоумышленнику части запроса. В некоторых ситуациях злоумышленник предполагает, что в запросе, после введенной им инъекции, содержится еще существующая часть легитимного запроса. Злоумышленник может сделать ее бесполезной, если введет в конце инъекции символ комментирования. Все введенное после символа комментирования перестанет считаться запросом.

6. Использование «;» для ввода нескольких запросов. Злоумышленник может попытаться не внедриться в выполнение легитимного запроса, а выполнить свой собственный. Используя в инъекции символ «;», атакующий может запустить на выполнение новую команду, которая исполнится после основного запроса.

На разных этапах жизненного цикла программных продуктов специалисты предусматривают, реализуют и тестируют различные механизмы защиты от SQL-инъекций. Но, согласно исследованиям, злоумышленники все равно часто успешно используют SQL-инъекции в кибер-атаках. После одной неудачной попытки злоумышленники не останавливаются и продолжают перебирать варианты внедрения нелегитимных запросов к базе данных, и в какой-то момент некоторые из них достигают своей цели.

Следовательно, целесообразно разработать механизм защиты от внедрения SQL-инъекций, который не просто отражал атаку злоумышленника, но и предотвращал бы дальнейшие попытки.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ ЗАЩИТЫ ОТ SQL-ИНЪЕКЦИЙ

Существует два основных подхода к организации защиты информационной системы от внедрения злоумышленником SQL-инъекций.

В первую очередь прикладные программисты должны при разработке клиентского программного обеспечения устанавливать ряд ограничений на входные данные. Вся информация, считанная из текстовых полей, должна проверяться по ряду критериев: длина строки, соответствие маске, наличие запрещенных символов. При этом крайне осторожно необходимо относиться к текстовым данным, содержащим внутри себя символы, которые используются в языке запросов. Примеры подобных символов представлены в таблице 2. К сожалению, на практике не всегда получается соблюсти все требования безопасности. Также из соображений безопасности разработчикам рекомендуется использовать параметризованные запросы [5].

Таблица 2 – Специальные символы, часто используемые при SQL-инъекциях

Входной символ	Значение в языке Transact-SQL
;	Разделитель запросов
'	Разделитель строк символьных данных
--	Разделитель однострочного комментария. Текст после -- и до конца этой строки не обрабатывается сервером
/* ... */	Разделители комментариев. Сервер не обрабатывает текст между знаками /* и */
xp_	Используется в начале имени расширенных хранимых процедур каталога. Например, xp_cmdshell

К сожалению, для защиты информационной системы недостаточно установить ограничения на поля ввода данных в клиентском приложении. Довольно часто программное обеспечение содержит текстовые поля, ввод данных в которые предполагается в свободной форме. В таком случае может быть довольно сложно выявить внедренную в эти данные SQL-инъекцию.

Еще одним способом защиты WEB-приложений, использующих системы управления базами данных (СУБД), является установка межсетевых экранов [6–8], который фильтрует все поступающие на сервер запросы. Межсетевые экраны включают в себя проверку поступающих запросов по черным и белым спискам, используют сигнатурный анализ и поиск аномалий в поведении пользователя [9–12]. Подобные средства защиты имеют больше вычислительных мощностей, чем клиентские рабочие станции и могут проводить более глубокий и сложный анализ поступающих пакетов данных, в том числе с использованием технологий машинного обучения, как, например, это реализовано в средствах защиты от компании Selectel [13].

В случае поступления нелегитимного запроса к СУБД, он либо обрабатывается таким образом, что не наносит вреда базе данных, либо СУБД сообщает злоумышленнику о невозможности выполнения его запроса. В случае, если средство защиты детектировало систематическое поступление нелегитимных запросов и на основе этого был сделан вывод о проведении спланированной атаки, учетная запись злоумышленника и/или его IP-адрес обычно добавляется в черный список. Но необходимо учитывать, что пока злоумышленник не достиг своей цели (или не отказался от попыток ее достижения), он может вновь регистрироваться и менять свои IP-адреса.

В связи с вышесказанным представляется целесообразным рассмотреть вариант разработки средства защиты от SQL-инъекций, которое бы создавало у злоумышленника иллюзию достижения цели атаки, но полученные им данные были бы недостоверными и лишь имитировали бы истинные

конфиденциальные сведения, предоставляющие интерес злоумышленника, давало бы злоумышленнику уверенность в том, что цель атаки была хотя бы частично достигнута.

СХЕМА ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

В случае традиционного использования межсетевого экранирования для защиты от SQL-инъекций типовая схема работы информационной системы выглядит так, как представлено на рисунке 2. Зелеными линиями отображен легитимный трафик, а красными – трафик, детектированный как вредоносный.

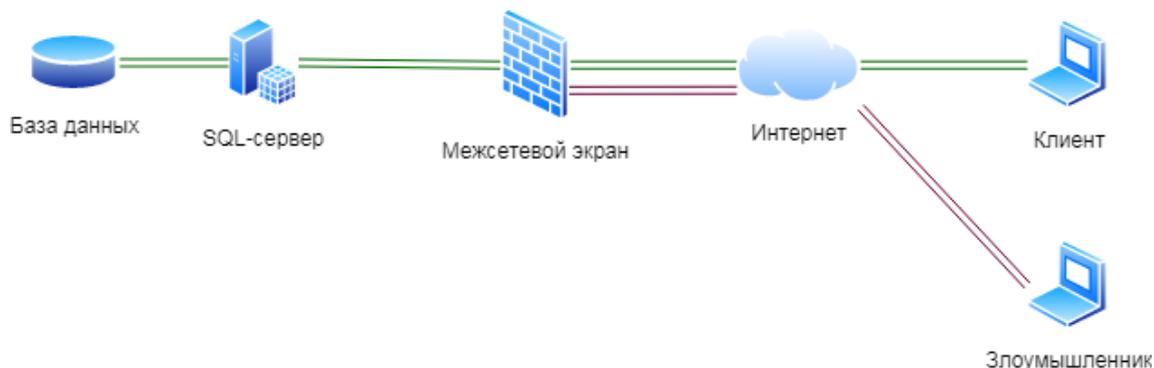


Рисунок 2 – Типовая схема передачи запроса к базе данных

Как видно из схемы, в классическом варианте межсетевого экранирования отфильтровывает нелегитимные обращения к базе данных, и злоумышленник понимает, что его попытка оказалась неудачной.

Можно модифицировать представленную схему таким образом, чтобы межсетевой экран не отсекал нелегитимные запросы, а перенаправлял их на альтернативную базу данных, в которой содержится информация, по своей структуре идентичная данным из оригинальной базы данных, но по смысловому содержанию не имеющая ничего общего с реальной информацией (рис. 3).

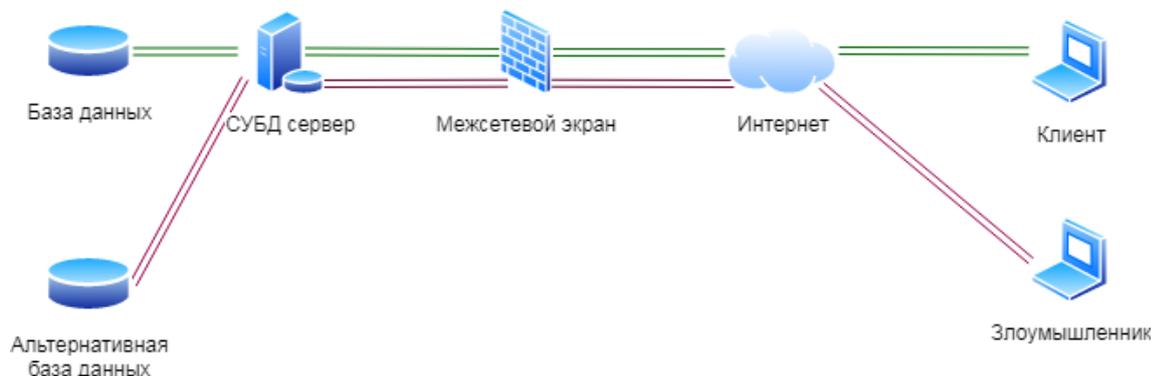


Рисунок 3 – Предлагаемая схема передачи запроса к базе данных

При разработке информационной системы с учетом предлагаемых изменений необходимо учитывать несколько факторов:

1. Если запрос состоит частично из легитимного запроса, а частично из нелегитимного, то необходимо определить, к какой именно базе данных должен быть отправлен легитимный запрос.
2. Для корректного выполнения предыдущего пункта необходимо правильно разделять запросы.
3. Если нелегитимный запрос подразумевает выполнение действий, после которых работа информационной системы невозможна, то такой запрос должен быть отклонен, потому что будет очевидно несоответствие между тем, что запрос якобы был выполнен, и тем фактом, что информационная система продолжает функционировать.
4. Информация, хранящаяся в альтернативной базе данных, должна выглядеть максимально достоверно.

Основное предназначение предлагаемого решения – это дезинформация злоумышленника, который через SQL-инъекции пытается незаконно получить информацию из базы данных. Предполагается, что дезинформация позволит выиграть время, пока злоумышленник будет анализировать полученные из альтернативной базы данных сведения и убедится в их недостоверности.

С учетом вышеизложенных пунктов можно предложить блок-схему алгоритма анализа полученных от пользователя запросов (рис. 4) с учетом настроек, предложенных лицом, принимающим решение (ЛПР).



Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма анализа пользовательских запросов к СУБД

При формировании альтернативной базы данных следует учесть возможность генерации как просто похожего контента, так и контента, который отличается от оригинального строго определенным образом. В чем именно будут состоять отличия, определять должно ответственное лицо.

В дальнейшем необходимо будет учесть более сложные сценарии атак, включающих в себя попытки обновления базы и создания триггеров или процедур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый механизм защиты в случае его успешного использования может позволить как минимум выиграть время специалистам информационной безопасности или как максимум успешно навязать злоумышленнику достоверно выглядящую дезинформацию. При этом предлагаемая схема не влияет на качество детектирования SQL-инъекций, так как не вмешивается в блок распознавания атак.

Список источников

1. Актуальные киберугрозы: I квартал 2022 года // Positive Technologies. – 21 июня 2022. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2022-q1/>.
2. Атаки на российские компании во 2-м квартале 2022 года // Ростелеком Солар. – URL: <https://rt-solar.ru/analytics/reports/2880/>.
3. Штрафы за «слив» персональных данных в РФ планируется привязать к размеру утечки // Интерфакс. – URL: <https://www.interfax.ru/russia/878652>.
4. Переспелов, А. В. Проверка безопасности СУБД MYSQL при помощи проведения пентестинга на KALILINUX / А. В. Переспелов, К. В. Дубинина, С. А. Матросова // Устойчивое развитие науки и образования. – 2019. – № 10 – С. 168–171.
5. Внедрение кода SQL // Microsoft Learn: сайт компании – 27.09.2022 – URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/sql/relational-databases/security/sql-injection?view=sql-server-ver16>.
6. Ситдикова, А. Г. Предотвращение SQL-инъекций при помощи межсетевых экранов прикладного уровня / А. Г. Ситдикова, В. Г. Жуков // Решетниковские чтения. – 2018. – Т. 2 – С. 341–343.
7. Ажмухамедов, И. М. Выявление аномалий в вычислительных сетях общего пользования на основе прогнозирования объема сетевого трафика / И. М. Ажмухамедов, А. Н. Марьенков // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2012. – № 3. – С. 35–39.
8. Добрышин, М. М. Модель сетевых атак типа XSS- и SQL-инъекций на веб-ресурсы, учитывающая различные уровни сложности их реализации / М. М. Добрышин, Д. Е. Шугуров, Д. Л. Беляев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – № 2 – С. 196–204.
9. Кومانов, П. А. Безопасность сайтов и SQL-инъекции / П. А. Кومانов, В. С. Семиков // Академическая публицистика. – 2019. – № 2 – С. 19–21.
10. Alghawazi, M., Detection of SQL Injection Attack Using Machine Learning Techniques: A Systematic Literature Review / M. Alghawazi, D. Alghawazi, S. Alarifi // Journal of Cybersecurity and Privacy. – 2022. – № 2 (4). – P. 764–777. <https://www.mdpi.com/2624-800X/2/4/39>.
11. Архипова, А. Б. Анализ обнаружения атаки на базе SQL-инъекции с помощью импульсной искусственной нейронной сети / А. Б. Архипова, П. А. Поляков // Безопасность цифровых технологий. – 2021. – № 3 (102) – С. 57–67.
12. Митрофанов, М. В. Методика обнаружения атак типа SQL-инъекция на основе алгоритмов искусственного интеллекта, методом задачи классификации / М. В. Митрофанов, А. М. Крибель, А. С. Фроленков, О. Л. Спицын // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2021. – Т. 13, № 5. – С. 96–102.
13. Средства WAF // Selectel: сайт компании. – URL: <https://selectel.ru/services/is/waf/>.

References

1. *Aktualnye kiberugrozy: I kvartal 2022 goda* [Current cyber threats: The first quarter of 2022]. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2022-q1/>.
2. *Ataki na rossiyskie kompanii vo 2-m kvartale 2022 goda* [Attacks on Russian companies in the 2nd quarter of 2022]. Available at: <https://rt-solar.ru/analytics/reports/2880/>.
3. *Shtrafy za "sliv" personalnykh dannykh v RF planiruetsya privyazat k razmeru utechki* [Fines for the "drain" of personal data in the Russian Federation are planned to be tied to the size of the leak]. Available at: <https://www.interfax.ru/russia/878652>.
4. Perespelov, A. V., Dubinina, K. V., Matrosova, S. A. Proverka bezopasnosti SUBD MYSQL pri pomoshchi provedeniya pentestinga na KALILINUX [Security check of MYSQL database management system with the help of penetesting on KALILINUX]. *Ustoychivoe razvitie nauki i obrazovaniya* [Sustainable Development of Science and Education], 2019, no. 10, pp. 168–171.
5. *Vnedrenie koda SQL* [SQL code implementation]. Available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/sql/relational-databases/security/sql-injection?view=sql-server-ver16>.
6. Sitdikova, A. G., Zhukov, V. G. Predotvrashcheniye SQL-inyektsiy pri pomoshchi mezhsetevykh ekranov prikladnogo urovnya [Prevention of SQL injections with application firewalls]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings], 2018, vol. 2, pp. 341–343.
7. Azhmukhamedov, I. M., Marenkov A. N. Vyyavleniye anomalii v vychislitelnykh setyakh obshchego polzovaniya na osnove prognozirovaniya obema setevogo trafika [Anomaly detection in public computer networks on the basis of forecasting volume of network traffic]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Kompyuternye sistemy* [Problems of Information Security. Computer Systems], 2012, no. 3, pp. 35–39.

8. Dobryshin, M. M., Shugurov, D. E., Belyaev, D. L. Model setevykh atak tipa XSS- i SQL-inyektsiy na veb-resursy, uchityvayushchaya razlichnyye urovni slozhnosti ikh realizatsii [A model of network attacks type XSS and SQL injection to web resources, taking into account the different levels of difficulty of their implementation]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2021, no. 2, pp. 196–204.

9. Komanov, P. A., Semikov, V. S. Bezopasnost saytov i SQL-inyektsii [Site Security and SQL injection]. *Akademicheskaya publitsistika* [Academic Journalism], 2019, no. 2, pp. 19–21.

10. Alghawazi, M., Alghawazi, D., Alarifi, S. Detection of SQL Injection Attack Using Machine Learning Techniques: A Systematic Literature Review. *Journal of Cybersecurity and Privacy*, 2022, no. 2 (4), pp. 764–777. <https://www.mdpi.com/2624-800X/2/4/39>.

11. Arkhipova, A. B., Arkhipova, P. A. Analiz obnaruzheniya ataki na baze SQL-inyektsii s pomoshchyu impulsnoy iskus-stvennoy neyronnoy seti [Analysis of the detection of an attack based on SQL injection using an impulse artificial neural network]. *Bezopasnost tsifrovyykh tekhnologiy* [Digital Technology Security], 2021, no. 3 (102), pp. 57–67.

12. Mitrofanov, M. V., Kribel, A. M., Frolenkov, A. S., Spitsyn, O. L. Metodika obnaruzheniya atak tipa SQL-inyektsiya na osnove algoritmov iskusstvennogo intellekta, metodom zadachi klassifikatsii [The method of detecting attacks, such as SQL-injection based on artificial intelligence algorithms, by the method of the classification problem]. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High-tech technologies in space exploration of the Earth], 2021, vol. 13, no. 5, pp. 96–102.

13. *Sredstva WAF* [WAF funds]. Available at: <https://selectel.ru/services/is/waf/>.

Статья поступила в редакцию 03.04.2023; одобрена после рецензирования 06.04.2023; принята к публикации 06.04.2023.

The article was submitted 03.04.2023; approved after reviewing 06.04.2023; accepted for publication 06.04.2023.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ
И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

DOI 10.54398/20741707_2023_2_59
УДК 004.001

**ОБНАРУЖЕНИЕ, РАСПОЗНАВАНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТА В ВОДНОЙ СРЕДЕ
С ЗАДАНЫМИ ОТЛИЧИТЕЛЬНЫМИ ПРИЗНАКАМИ
ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕРЕОЗРЕНИЯ¹**

Кабанов Алексей Александрович, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-3105-7283, e-mail: kabanov@sevsu.ru
Крамарь Вадим Александрович, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-0528-1978, e-mail: vakramar@sevsu.ru
Крамарь Олег Александрович, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-6215-5591, e-mail: rolets@yandex.ru
Фатеев Сергей Игоревич, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, младший научный сотрудник, ORCID: 0000-0002-8103-0652, e-mail: fateev-si@ya.ru
Карапетян Валерий Артемович, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, кандидат технических наук, доцент, e-mail: karvalart@mail.ru

В статье рассматриваются подходы к решению задач обнаружения, распознавания и локализации объекта с заданными некоторыми отличительными признаками в водной среде при помощи системы технического стереозрения с учетом ограничений. Система стереозрения разрабатывается в рамках задачи, в которой АНПА с целью проведения мониторинговой миссии следует из начальной точки своего маршрута по заданной траектории с целью обнаружить, классифицировать объект с известными характеристиками и определить его координаты при помощи подкильной системы технического стереозрения на расстоянии от нее до 5 метров при соответствующей прозрачности воды. Разработанная программа для системы технического стереозрения должна обеспечить АНПА следующей информацией: видеоряд; кадр с изображением обнаруженного объекта, неизвестные заранее характеристики объекта в случае возможности их выявления (цвет, размер или форма), дальность до объекта от системы технического стереозрения, линейные координаты относительно системы технического стереозрения. Тестирование разработанного программного обеспечения проводилось на действующем модуле стереозрения, установленном на АНПА на подкильном отсеке. Исследование выполнялось в бассейне и в открытой воде. Проведенные эксперименты показали эффективность разработанной системы при ее совместном использовании с подводным роботом.

Ключевые слова: система технического стереозрения, подводный робототехнический комплекс, стереозрение

**DETECTION, RECOGNITION AND LOCALIZATION OF AN OBJECT
IN WATER ENVIRONMENT WITH DESIGNATED DIFFERENTIATIVE FEATURES
USING THE SYSTEM OF TECHNICAL STEREO VISION**

Kabanov Aleksey A., Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0002-3105-7283, e-mail: kabanov@sevsu.ru
Kramar Vadim A., Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), professor, ORCID: 0000-0002-0528-1978, e-mail: vakramar@sevsu.ru
Kramar Oleg A., Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation, Researcher, e-mail: rolets@yandex.ru
Fateev Sergey I., Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation, Junior Researcher, ORCID: 0000-0002-8103-0652, e-mail: fateev-si@ya.ru

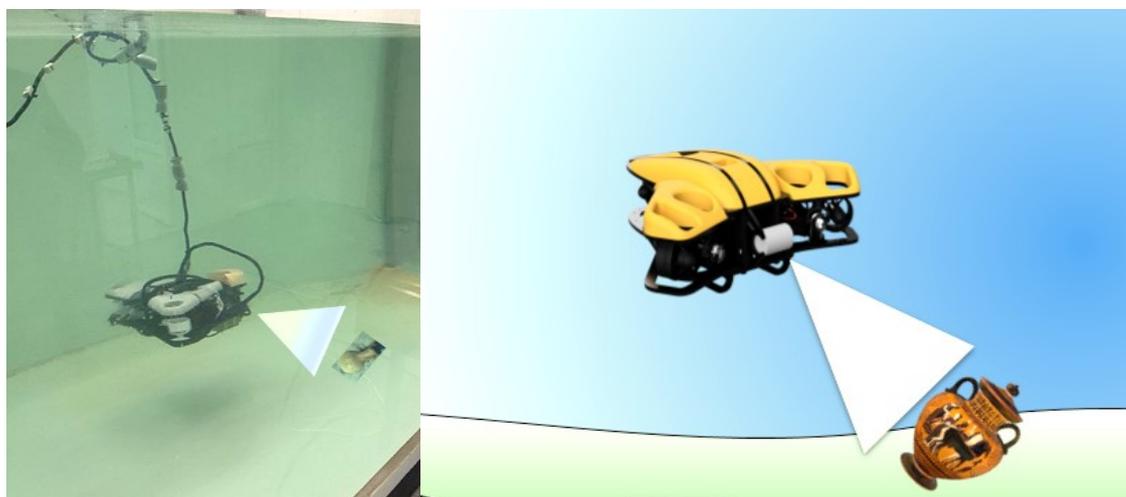
¹ Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-19-00392, <https://rscf.ru/project/22-19-00392>.

Karapetian Valerii A., Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), e-mail: karvalart@mail.ru

The article discusses approaches to solving the problems of detecting, recognizing and localizing an object with some given distinctive features in an aquatic environment using a technical stereo vision system, taking into account restrictions. The stereo vision system is being developed as part of the task in which the AUV, for the purpose of conducting a monitoring mission, follows from the starting point of its route along a given trajectory in order to detect, classify an object with known characteristics and determine its coordinates using a technical stereo vision system at a distance from it up to 5 meters with appropriate water clarity. The developed program for the system of technical stereo vision should provide the AUV with the following information: video sequence; a frame with an image of the detected object, previously unknown characteristics of the object if it is possible to detect them (color, size or shape), distance to the object from the technical stereo vision system, linear coordinates relative to the technical stereo vision system. Testing of the developed software was carried out on the operating module of stereo vision installed on the AUV in the underbody compartment. The study was carried out in the pool and in open water. The experiments performed have shown the effectiveness of the developed system when used in conjunction with an underwater robot.

Keywords: computer vision system, underwater robot, stereo vision

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для решения задач обнаружения и локализации объекта в подводной среде разрабатываются и применяются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [1–3]. Для блока управления АНПА требуются алгоритмы обработки получаемых данных, которые могут решить поставленные перед АНПА. К алгоритмам предъявляются требования по скорости их работы, точности выявления отличительных признаков объекта, устойчивости срабатывания.

Для решения задачи обнаружения объекта достаточно выявить его отличительные признаки, такие как геометрическая форма и размер в метрической системе. Если также стоит задача распознавания типа или класса объекта, выявление дефектов и выполнения с ним ряда операций, может потребоваться определение цвета и высокая точность определения его габаритов. Наиболее наглядной и интерпретируемой информацией, получаемой аппаратом, является снятое видеокамерой изображение, позволяющее определить цвет и геометрическую форму объекта [4, 5]. Используя стереокамеру, можно с высокой точностью определить и габариты обнаруженного объекта [6–9]. Однако применение видеокамер под водой предполагает ряд ограничений: размер наблюдаемого пространства ограничивается углом обзора видеокамер, степенью прозрачности воды и яркостью освещения подводными фонарями, неравномерностью освещения, бликами, вызванными отражением света от содержащейся в воде взвеси, быстрым затуханием низкочастотного красного спектра света.

Существуют подходы, основывающиеся на предварительной обработке изображения такими алгоритмами, как расчет глобальных значений контраста, темный канал, которые позволяют отделить явно выраженный объект интереса от несложного фона. В случае сложного фона с большим количеством объектов или наличия на нем связанных с замутненностью воды контрастных пятен такой подход требует дополнительной обработки. Применение нейронных сетей [10, 11] сопряжено со сложностями сбора обучающей выборки изображений объектов интереса в условиях неравномерной цветопередачи и освещения, замутненности воды, времени пребывания объекта под водой,

особенно в случае, когда его подводные снимки отсутствуют. Ряд подходов [12] предполагает наличие объекта интереса в конкретной освещенной искусственным источником света области на изображении и отсутствие бликов. Также объект, обнаруженный при помощи данного метода, может не являться объектом интереса. Алгоритм цветокоррекции [13], который позволяет восстановить цвета подводной сцены в соответствии с их восприятием человеком в воздушной среде в случае смены ракурса показывает неудовлетворительные результаты.

В рамках данной статьи рассматриваются подходы к решению задач обнаружения, распознавания и локализации объекта с заданными отличительными признаками в водной среде при помощи системы технического стереозрения (СТЗ) с учетом ограничений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается задача, в которой АНПА (рис. 1) в рамках мониторинговой миссии, следуя по заданной траектории на глубине до 50 метров, должен обнаружить и классифицировать объект с известными характеристиками и определить его координаты при помощи подкильной СТЗ на расстоянии до 5 метров от объекта при соответствующей прозрачности воды. Требуется разработать программу для СТЗ, которая должна обеспечить АНПА следующей информацией: видеоряд; кадр с изображением обнаруженного объекта; неизвестные заранее характеристики объекта в случае возможности их выявления (цвет, размер или форма); дальность до объекта от СТЗ; линейные координаты относительно СТЗ. Работу программы необходимо реализовать внутри отдельного отсека АНПА (рис. 2) с видеокамерами и вычислительным блоком.

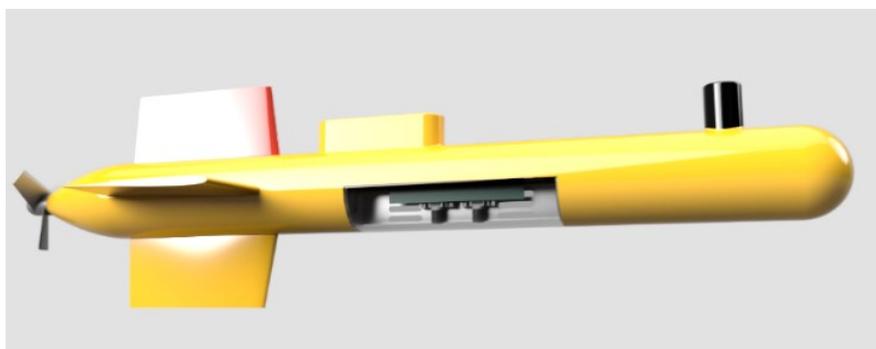
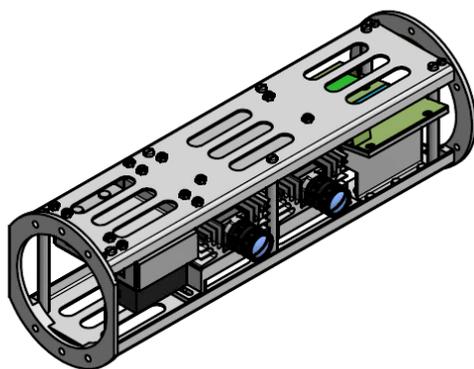
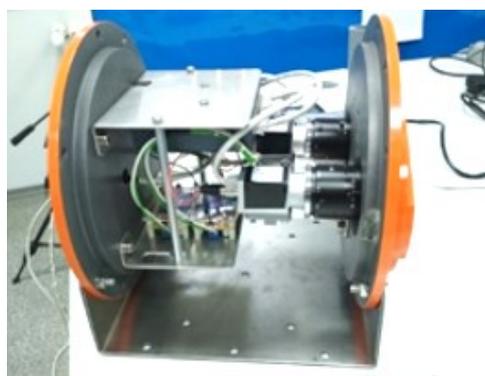


Рисунок 1 – Внешний вид АНПА

Подкильная СТЗ представляет собой: две промышленные камеры Basler acA1920-50gc, (CMOS-матрица Sony IMX174, частота 50 кадров в секунду при разрешении 2,3 Мпикс, Full HD с разрешением 1920 x 1200 пикселей; объективы Lens TS0814-MP F1.4 f8mm 1" с ручной регулировкой, фокусным расстоянием 8 мм и диафрагмой от F1.4-F16 и углами обзора 70° x 47,5°); PoE коммутатор 1000 Мбит/с; герметичный корпус. Камеры имеют КМОП-сенсор Sony IMX174 с глобальным затвором (одновременно все строки пикселей подвергаются экспозиции, моментальная фиксация изображения, а не построчное считывание), с широким динамическим диапазоном (отношения между яркостью самого светлого и самого темного из снимаемых объектов), низким уровнем шума. Снимаемая видеокамерами информация обрабатывается на одноплатном компьютере QBiP-1165G7A с установленным процессором Intel Core i7-1165G7, 2.8...4.7GHz, 4-Core и оперативной памятью 16 Гб.



а)



б)

Рисунок 2 – Модуль отсека АНПА для обработки подводного видео

Для описываемой системы нет необходимости использовать операционную систему, нацеленную на клиентоориентированность. Напротив, необходима операционная система способная работать без вмешательства оператора и способная к длительному эксплуатированию без сбоев. Поскольку пакет ПО ruon камер Basler для Linux x86 (64-разрядных) предлагается в формате установочного пакета для Debian и аналогичных дистрибутивов Linux (например, Ubuntu), то в качестве операционной системы выберем Debian 11, который отличается низкими требованиями к процессору и ОЗУ.

ПАРАМЕТРЫ НАСТРОЙКИ КАМЕР СТЕРЕОМОДУЛЯ

Поскольку стереокамера находится внутри герметичного корпуса, полученное изображение с камер сильно искажено, поэтому необходимо заранее провести настройку параметров объективов. Также после изменения параметров объективов необходимо проводить заново калибровку стереокамеры [14]. Необходимо настроить: а) параметры объективов камер (зафиксировать размер диафрагмы, выбрать расстояние фокусировки); б) параметры камер (время выдержки, светочувствительность).

Параметры камер и их объективов должны отвечать следующим критериям: резкое изображение в рабочей области; низкий уровень шума на изображении; приемлемое время выдержки для съемки небыстро движущихся объектов.

Необходимую дистанцию фокусировки по заданным границам глубины резкости определяем по формуле:

$$R = \frac{2L_1L_2}{L_1 + L_2}, \quad (1)$$

где L_1 – выбранная передняя (ближняя) глубина резко изображаемого пространства (ГРИП);
 L_2 – выбранная задняя (дальняя) ГРИП.

Рабочая зона применения стереокамеры лежит в интервале от 0,5 до 5 м. Таким образом, необходимая дистанция фокусировки по заданным границам глубины резкости равна $R = 0,91$ м. Размер диафрагмы выбирался из расчета, что СТЗ будет использоваться в условиях с искусственным освещением. Поэтому для достаточного прохождения света через объективы необходимо увеличить площадь отверстия диафрагмы.

На рисунке 3 приведены расчеты размытия изображения при разных расстояниях фокусировки на 0,4; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5 метра и разных размерах диафрагмы F1,4 (пунктирная линия); F2 (непрерывная линия); F4(штрихпунктирная линия).

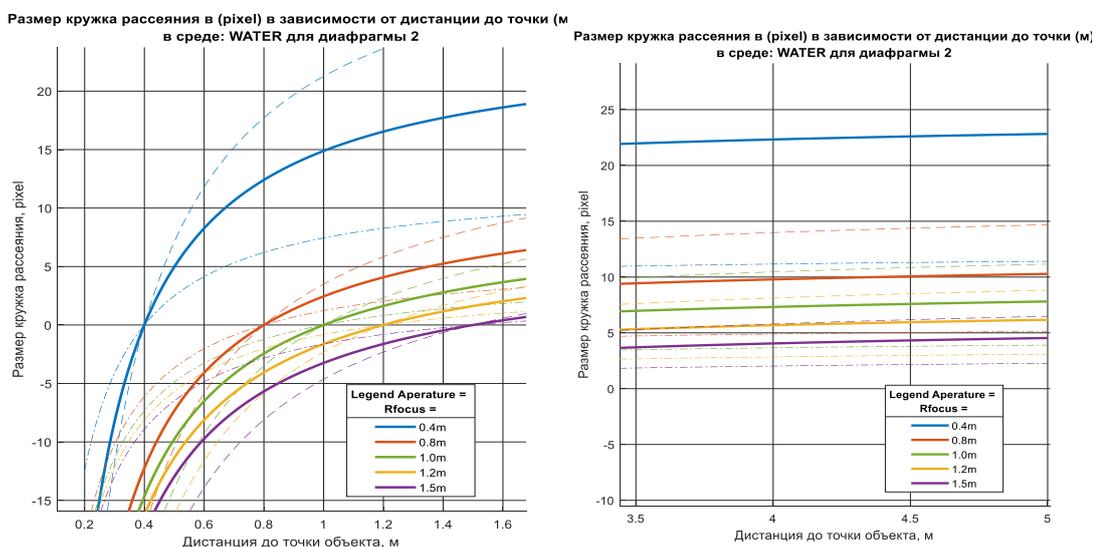


Рисунок 3 – Размер кружка рассеяния в pixel в зависимости от дистанции до точки объекта (м) и размера диафрагмы

Для алгоритмов SLAM (simultaneous localization and mapping) и SFM (Structure from Motion) одинаковое размытие больше сказывается на более удаленных объектах, чем на близких из-за того, что объект одного и того же размера в физических единицах измерения на дальних дистанциях имеет размер на изображении в пикселях на порядок меньший, чем на ближних. Поэтому важно сохранить малое размытие для удаленных объектов. По графикам (рис. 3) видно, что на расстоянии до объекта 5 метров приемлемое размытие в 5 пикселей достигается при расстоянии фокусировки 1,2 метра при достаточной площади отверстия диафрагмы в F2. Определенные в ходе исследований настройки камер стереопары и параметров их объективов для приемлемой работы алгоритмов СТЗ приведены в таблице 1.

Таблица 1– Параметры камер СТЗ, определенные в ходе исследований

Среда	Параметры камеры		Параметры объектива	
	Светочувствительность	Время выдержки, с	Диафрагма, диафрагменное число	Расстояние фокусировки, м
Вода	Авто	Авто (< 1/200)	F2	0,91

Диафрагма и расстояние фокусировки используемых объективов Lens TS0814-MP F1.4 f8mm 1" регулируется вручную. Диафрагму можно менять в диапазоне диафрагменных чисел от F1.4 до F16, а расстояние фокусировки – от 0,5 м до ∞. Горизонтальные и вертикальные углы обзора камер в воздухе α_u^a , α_v^a определяются выражениями:

$$\alpha_u^a = 2arctg\left(\frac{h}{2f}\right) = 70,23^\circ, \alpha_v^a = 2arctg\left(\frac{v}{2f}\right) = 47,45^\circ, \quad (2)$$

где $u = 11,3$ мм, $v = 7,1$ мм – размеры сенсора по горизонтали и вертикали соответственно;
 $f = 8$ мм – фокусное расстояние для используемого типа камер.

Пренебрегая толщиной стекла и используя закон Снелла, получаем преломления света на границе двух сред:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_1}{n_2} = 1,33, \quad (3)$$

где θ_1 – угол падения света на стеклянный интерфейс колпака камеры;

θ_2 – угол преломления света в воздушной среде колпака камеры;

n_1, n_2 –показатели преломления воды и воздуха соответственно.

Находим выражения для углов обзора камер в воде:

$$\alpha_u^w = 2arctg\left(\frac{h}{2f}\right) = 51.13^\circ, \quad \alpha_v^w = 2arctg\left(\frac{v}{2f}\right) = 35.14^\circ. \quad (4)$$

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Краткое описание алгоритма работы программы по обнаружению объекта в водной среде имеет следующий вид. На вход программы подаются два синхронных кадра с частотой 15 Гц, определяющие стереоснимок. Строится трехмерная модель рабочего пространства. Изображение обрабатывается таким образом, чтобы убрать шум и неравномерность освещения, сделать более явными объект и его границы. Затем объект обнаруживается. Определяются его характеристики, записывается кадр с выделенным на изображении объектом. В описанных выше этапах алгоритма сложности могут вызвать необходимость проведения калибровки стереокамеры в водной среде, поиск соответствующих ключевых точек на стереопаре в условиях ограниченной видимости, неравномерной цветопередачи, неестественные цвета, фон со сложной текстурой и большим количеством деталей, наличие различных нецелевых объектов, подходящих под отличительные признаки. Основными показателями качества работы программы являются устойчивость срабатывания, скорость работы (15 Гц), выявление всех характеристик объекта с приемлемой точностью.

Рассмотрим метод выделения объектов по облаку 3D точек. В алгоритме поиска 3D точек по стереоизображениям в качестве входных данных используется стереопара. Выходными данными будут пространственные координаты обнаруженных точек, принадлежащих трехмерным объектам.

Алгоритм поиска 3D точек имеет следующую последовательность операций: 1) предобработка [15, 16], удаление дисторсии и ректификация стереопары; 2) построение карты диспаратности; 3) реконструкция трехмерной сцены из карты диспаратности; 4) выделение области рабочего пространства в реконструированной области по данным о положении и размерах рабочего пространства (отсеивание точек, выходящих за область рабочего пространства).

Основная идея алгоритма поиска 3D [17] точек состоит в том, что для каждой 2D точки на одном изображении выполняется поиск парной ей 2D точки на другом изображении. Найденная пара 2D точек на изображениях соответствует 3D точке в пространстве. Зная координаты пары 2D точек на изображении, с помощью метода триангуляции определяются координаты соответствующей 3D точки в трехмерном пространстве.

Для 2D точки на изображении первой камеры парная 2D точка на изображении второй камеры лежит на эпиполярной линии (рис. 4). Для упрощения поиска изображения выравниваются методом ректификации так, чтобы все эпиполярные линии были параллельны сторонам изображения в горизонтальном направлении. Таким образом, для каждой 2D точки соответствующую ей парную 2D точку нужно искать в той же строке на изображении со второй камеры.

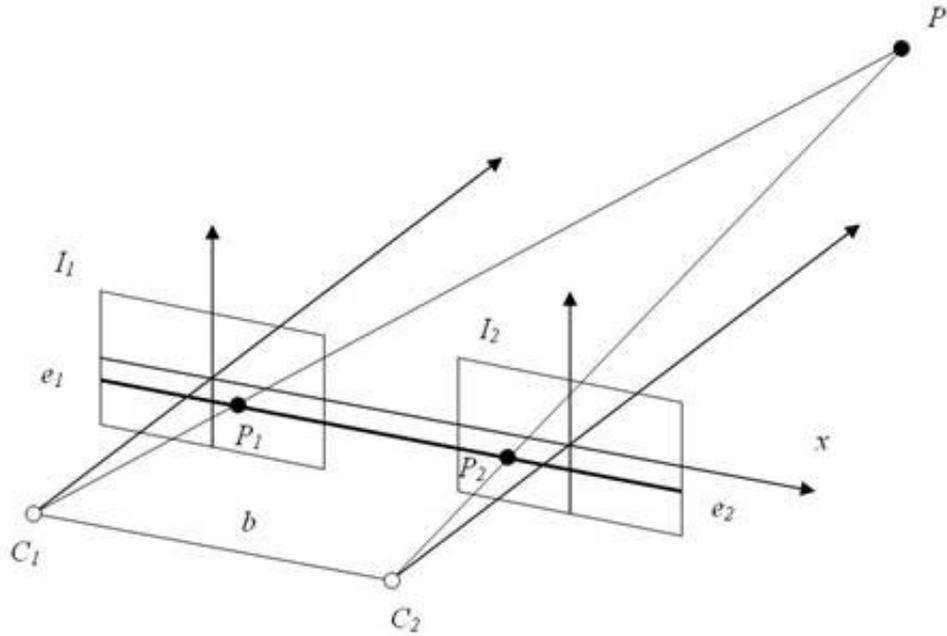


Рисунок 4 – Эпиполярные линии

После ректификации изображений выполняют поиск соответствующих пар точек. В результате получается карта диспаратности, которая содержит информацию в виде матрицы размером, соответствующим ректификационному изображению левой камеры, содержащей в каждом элементе матрицы смещение между соответствующими пикселями левого и правого изображений камер стереокамеры. Карта диспаратности используется для получения карты глубин – изображения, на котором для каждого пикселя изображения первой камеры вместо цвета хранятся координаты соответствующей 3D точки.

Недостаток алгоритма поиска 3D точек заключается в том, что значение диспаратности достоверно определяется только в местах быстрого изменения яркости, что влечет за собой возникновение ошибок при работе со сложными сценами. Карта глубины получается в значительной мере зашумленной и разреженной. Так происходит при обработке сцен, на которых присутствует, к примеру, ровная стена, тень от объекта, предмет, имеющий равномерную окраску и малое количество характерных деталей, горизонтальные линии перепадов яркости, которые параллельны эпиполярным линиям.

На рисунке 5 приведен пример недостатка используемого алгоритма поиска 3D точек. Алгоритм не обнаруживает точки, принадлежащие горизонтальным линиям перепадов яркости, которые параллельны эпиполярным линиям.

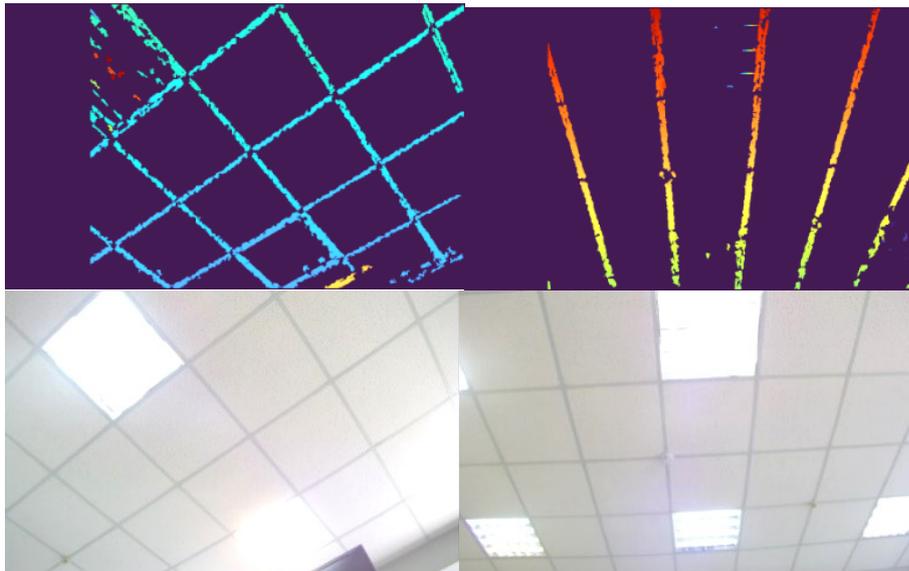


Рисунок 5 – Иллюстрация недостатка используемого алгоритма поиска 3D точек при поиске точек горизонтальных линий

После нахождения облака 3D точек далее используется алгоритм кластеризации для выделения отдельных объектов. Алгоритм кластеризации позволяет разделить единый массив точек на отдельные кластеры. Предполагается, что точки кластера принадлежат конкретному объекту или его части. Работа с кластерами точек позволяет выделять на изображении только объекты, представляющие интерес. При программной реализации используется DBSCAN (Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise) алгоритм кластеризации [18, 19]. В качестве входа используются X_{points} – пространственные координаты обнаруженных точек, принадлежащих трехмерным объектам. Выходом является C_{points} – структура, состоящая из векторов, количество которых равно числу найденных кластеров. В каждом из векторов содержатся номера точек, принадлежащих соответствующему кластеру: пространственные координаты центра кластера, координаты прямоугольной области изображения, выделяющие объект на левом изображении стереопары.

МЕТОД КОНТУРОВ

Поскольку получение данных с камер и нахождения объектов на изображении происходит в автоматическом режиме, важно контролировать информативность полученных изображений. Также необходимо определить, насколько качественные поступают изображения. На большой глубине будет отсутствовать естественное освещение, и возможны ситуации, при которых вследствие плохого освещения изображение будет сильно затемнено или, наоборот, при сильном освещении фонарем сильно засвечено. В таких условиях алгоритм не сможет обнаружить никаких объектов на изображениях, хотя будет продолжать работать в штатном режиме. Необходимо обнаруживать такие ситуации и сигнализировать о том, что изображения поступают испорченные, и корректировать освещение. Для этого производится контроль гистограммы изображения на наличие количества слишком темных или слишком светлых пятен на изображении.

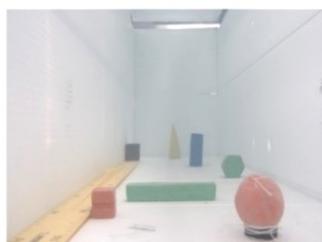
Для поиска сильно темных или светлых изображений преобразуем изображение из цветового пространства RGB в HSV и будем использовать канал Value (значение цвета) (другое название канала Brightness (яркость)), который отражает яркость из цветовой модели. Критерием определения качества фотографии будем считать яркость. Яркость на изображении в формате HSV исчисляется в процентном соотношении, где 0 – это отсутствие яркости (черный цвет), 100 % – максимальная яркость (белый цвет).

Рассмотрим работу алгоритма. Для оценки затемненности рассмотрим двухмерную матрицу, отражающую значение яркости каждого пикселя на изображении, элементы которой могут принимать значения от 0 до 1. В указанной матрице значение элемента (пикселя), равное 1, указывает на максимальную яркость, и значение, равное 0, указывает на минимальную яркость. Если количество элементов в матрице, значение которых меньше 0,2, составляет 80 % от общего количества элементов, то изображение сильно затемнено и считается испорченным. Соотношение, определяющее незатемненность изображения, имеет вид:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \hat{a}_{ij}}{n \cdot m} > 0,8, \quad (5)$$

где n и m – размеры матрицы яркости;
 \hat{a}_{ij} – элемент матрицы яркости.

На рисунке 6 приведены примеры распределения яркостей пикселей для разных яркостей тестовых рисунков. Обычное фото, сильно осветленное и затемненное. На гистограммах рисунка 6 по оси X отчается яркость оттенков от 0–100 %, по оси Y отчается количество пикселей той или иной яркости. На рисунке 6в видно, что для затемненного изображения показатель яркости на графике сильно смещен в сторону минимальных значений яркости. Таким образом, алгоритм позволяет определить, насколько качественные мы получаем изображения.



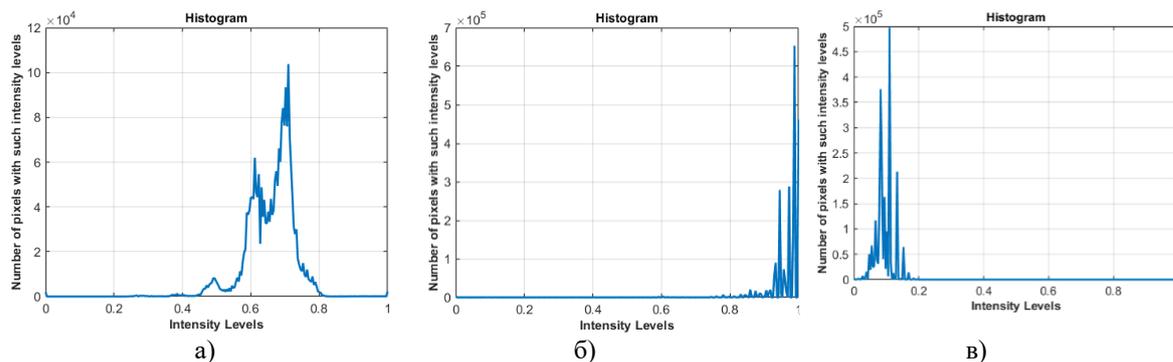
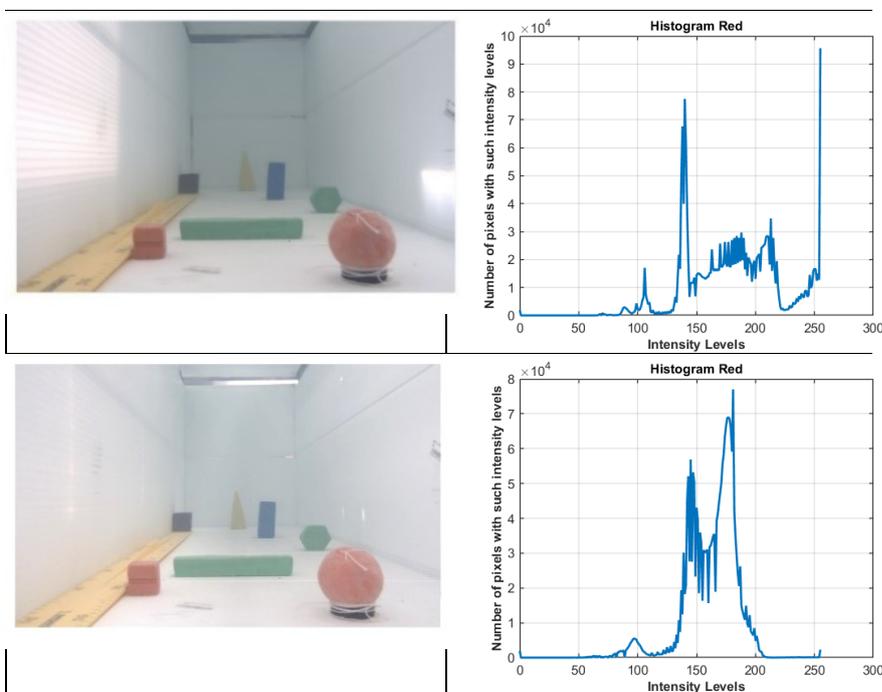


Рисунок 6 – Примеры распределения яркостей пикселей для разных яркостей тестовых рисунков: а) нормальное изображение; б) засвеченное изображение; в) затемненное изображение

ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТА ОПРЕДЕЛЕННОГО ЦВЕТА

По полученным изображениям необходимо обнаруживать предметы, которые имеют определенный цвет. Изображение с камер получаем в формате RGB. Пространство изображения в формате RGB представляет массив трехмерных векторов, которыми задаются координаты каждого элемента в массиве. При постоянно изменяющихся условиях освещения, расстояния до объекта, прозрачности воды и в целом видимости до предмета, цвета интересующего нас объекта постоянно искажаются. И при разной освещенности один и тот же объект будет иметь разные оттенки цветов. На рисунке 7 приведены примеры гистограммы распределения RGB, построенные для красного цвета. Из рисунка видно, что распределение меняется от условий съемки несмотря на то, что сцена на изображении не меняется.

Для выделения необходимого цвета необходимо определить диапазон цветов, которые удовлетворяют заданным условиям. При условии, что освещение предмета и расстояние до него в мутной воде постоянно меняется, диапазон оттенков интересующего предмета будет меняться. Поэтому диапазон цветов должен каждый раз пересчитываться при изменении внешней среды. Это приведет к дополнительной нагрузке на вычислительные мощности и понижению точности. Задавая широкий диапазон цветовой гаммы, мы рискуем получить на снимках шумы и артефакты, которые не позволят найти предмет, а также могут затронуть ненужные цвета.



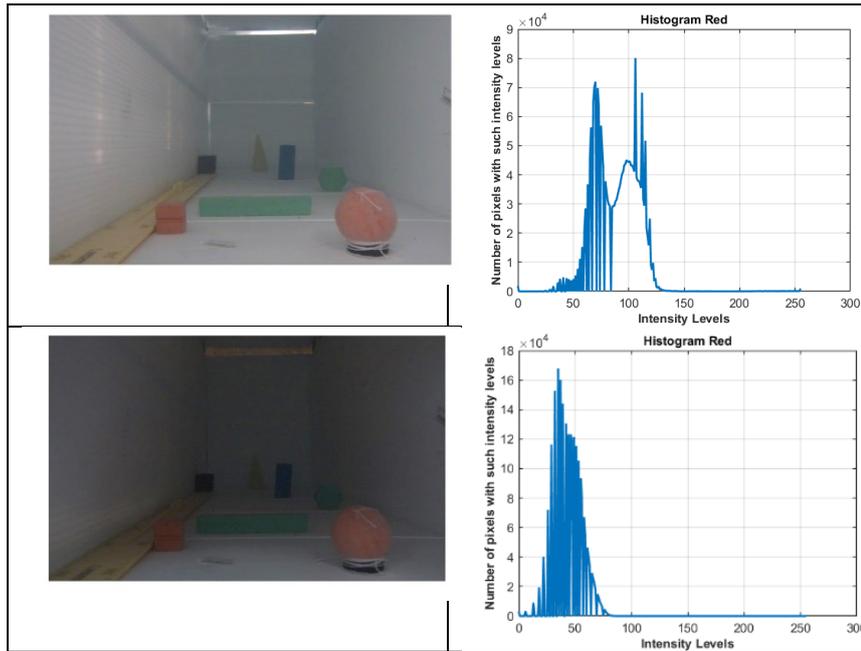


Рисунок 7 – Гистограмма распределения красного цвета в формате RGB

Для разработки алгоритма распознавания необходимого цвета в различных условиях окружающей среды и при различном освещении, без изменений начальных параметров воспользуемся следующими подходами. Первый подход – переход в другое цветовое пространство. Если для задачи важно сохранение цвета при различных условиях освещения, то осуществим переход в цветовое решение HSV. В этой системе цветов обеспечивается непосредственный контроль тона, насыщенности и яркости. Используя модель HSV, сможем контролировать необходимый диапазон цветов при различных условиях освещения. Переход из RGB в HSV определяется следующим образом. Пусть $H \in [0,360]$ – значение цветового тона, S, V – насыщенность и яркость, R, G, B – значения трех цветов: красный, зеленый, синий соответственно в формате RGB. Причем $S, V, R, G, B \in [0,1]$. Пусть MAX – максимальное значение из R, G, B , а MIN – минимальное. Тогда для перехода воспользуемся соотношениями:

$$H = \begin{cases} 60 \cdot \frac{G - B}{MAX - MIN} + 0, & \text{if } MAX = R, G \geq B \\ 60 \cdot \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360, & \text{if } MAX = R, G < B \\ 60 \cdot \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120, & \text{if } MAX = G \\ 60 \cdot \frac{R - G}{MAX - MIN} + 240, & \text{if } MAX = B \end{cases}, S = \begin{cases} 0, & \text{if } MAX = 0 \\ 1 - \frac{MIN}{MAX}, & \text{if } MAX > 0 \end{cases}, V = MAX. \quad (6)$$

Для поиска предметов с определенным цветом определим диапазон цветов, которые будут удовлетворять заданным условиям. Проведя исследования с изображением, полученном в бассейне (рис. 6, 7), найдем предметы красного и зеленого цветов. Измерив цветовую гамму интересующих предметов в формате HSV, определим, что цветовой тон (Hue) для красных предметов равен от 0 до 20, а для зеленых – от 60 до 180 градусов. Диапазон значений Saturation (насыщенность) и Value (яркость) выберем с максимально большим диапазоном, чтобы иметь возможность определять цвета при различных изменениях освещения.

Нижняя и верхняя границы цвета будут иметь значения: для красного цвета LowScalar (0, 30, 0), HScalar (20, 255, 255); для зеленого – LowScalar (60, 30, 0), HScalar (180, 255, 255). Здесь LowScalar – трехмерный вектор, описывающий нижнюю границу искомого цвета, представленного в формате HSV, HScalar – трехмерный вектор, описывающий верхнюю границу искомого цвета, представленного в формате HSV.

Воспользуемся функцией inRange пакета OpenCV, которая проверяет, лежат ли элементы массива между элементами двух других массивов.

Сформируем маску изображения по правилу:

$$x'_{i,j} = \begin{cases} 255, & \text{if } (\text{LowScalar} \leq x_{i,j} < \text{HScalar}) = \text{true}, \\ 0 & \end{cases} \quad (7)$$

где $x_{i,j}$ – элемент матрицы значений пикселей исходного изображения;

$x'_{i,j}$ – маска изображения. В результате формируется маска изображения, в которой интересные предметы будут выделены белым цветом, а остальное пространство будет помечено черным (рис. 8). При наложении маски на основную фотографию получим изображение, в котором остались только интересные предметы (рис. 9). При этом на изображениях остался шум и лишние предметы.



Рисунок 8 – Маска по результатам работы метода inRange: а) для красного цвета; б) для зеленого

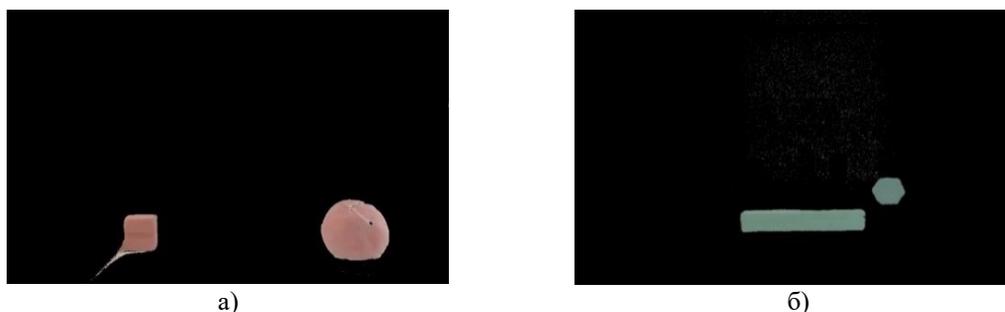


Рисунок 9 – Наложение маски на основное изображение: а) для красного цвета; б) для зеленого

Для удаления шума и лишних деталей, а также для заливки пустых областей внутри найденной фигуры применим методы морфологической обработки бинарных изображений. В качестве основных морфологических операций будем использовать метод эрозии и расширения. Метод эрозии заключается в преобразовании значений пикселей по правилу: пиксель в исходном изображении (либо 1, либо 0) будет считаться 1, только если все пиксели под ядром равны 1, в противном случае он размывается (обнуляется). В методе расширения пиксельный элемент равен 1, если хотя бы один пиксель под ядром равен 1. Таким образом, увеличивается белая область на изображении или увеличивается размер объекта переднего плана. Комбинируя эти методы, удалим шум и мелкие предметы. Применим последовательно методы эрозии и расширения. Комбинация этих методов именно в такой последовательности определяется операцией открытия множества. На практике операция открытия сглаживает контуры объекта, обрывает перешейки, ликвидирует выступы небольшой ширины, а также удаляет шум и отдельно стоящие мелкие предметы.

Открытие множества A по примитиву B определяется выражением:

$$A \oslash B = (A \ominus B) \oplus B, \quad (8)$$

где в качестве множества A выступает изображение, а в качестве примитива B – шаблон размером 10×10 пикселей.

Для заливки образовавшихся пустот внутри объекта, которые образовались в связи с неровностью цветового фона, используем последовательно методы расширения и эрозии. Комбинация этих методов в указанной последовательности определяет операцию закрытия множества. На практике операция закрытия сглаживает контуры объекта, в общем случае «заливает» узкие разрывы и длинные углубления малой ширины, а также ликвидирует небольшие отверстия и заполняет промежутки контура. Закрытие множества A по примитиву B определяется выражением:

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B, \quad (9)$$

где, как и раньше, в качестве множества A выступает изображение, а в качестве примитива B – шаблон размером 10×10 пикселей.

Далее необходимо выделить объекты, определить их контур и найти относительные размеры. Учитывая проблемы, возникающие при прямом применении контурного анализа, разработан новый метод обнаружения необходимого предмета, который комбинирует несколько способов обнаружения предмета и тем самым достигает возможность обнаружения необходимых объектов в реальном времени без использования сложных вычислительных систем. Суть метода заключается в первоначальной 2D обработке изображения алгоритмами, не требующими сложных математических вычислений и поиска внешних контуров объекта для сужения области поиска и уменьшения объема обрабатываемой информации для 3D алгоритмов. Решение проблемы достигается за счет кластеризации объектов на изображении путем обработки изображения 2D алгоритмами. Кластеризация проводится с помощью поиска всех контуров на изображении, используя метод сегментации изображений с помощью порогового значения:

$$dst(x, y) = \begin{cases} maxval, & \text{if } src(x, y) > thresh, \\ 0 & \end{cases} \quad (10)$$

где $thresh$ – значение, используемое для классификации значения пикселя, порог, обозначающий интенсивность пикселя, ниже которого значения на исходном изображении будут проигнорированы;

$maxVal$ представляет значение интенсивности пикселя, которое будет передано выходному массиву при превышении порогового значения;

src – массив исходного изображения в виде двумерного массива размером (x, y) ;

dst – массив выходного изображения в виде двумерного массива размером (x, y) .

Сравнивая интенсивность пикселя (x, y) на исходном изображении src с пороговым значением $thresh$, принимаем решение сохранять значение пикселя или нет.

Для определения контуров объектов необходимо пройти этап предварительной обработки изображений, в котором используется несколько алгоритмов: приведение изображения в оттенки серого (цвет увеличивает отношение сигнала к коэффициенту шума, поэтому для поиска контуров сохранять цвета нет необходимости); алгоритм размытия по Гауссу (используется для удаления шумов); использование пороговой функции фиксированного уровня. После обработки изображения получаем маску контуров на изображении (рис. 10а). Путем наложения маски на основное изображение находим объекты на изображении (рис. 10б).

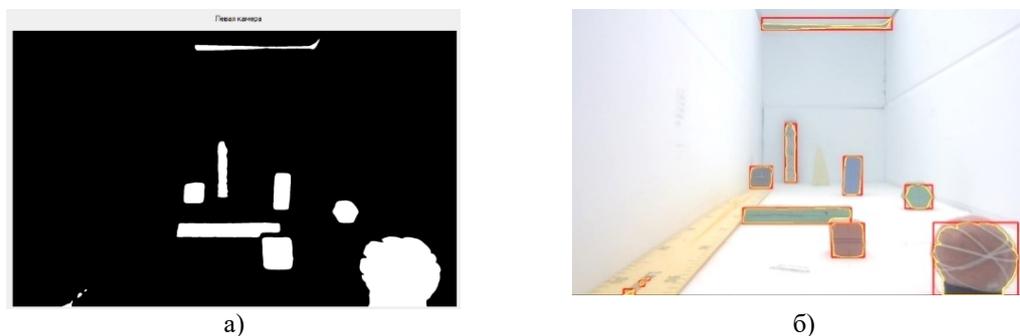


Рисунок 10 – Определение контуров: а) маска найденных объектов с помощью порогового значения; б) найденные объекты

Полученные контуры отфильтровываются по определенному цвету, в который окрашен искомый объект (рис. 11). Если в найденных областях отсутствует определенный цвет, который характерен для нашего объекта, такие области игнорируются и не используются в дальнейшей обработке.



Рисунок 11 – Выделение только интересующих объектов

В полученной области находим максимально возможное количество 3D точек на объекте с помощью алгоритма поиска 3D точек по стереоизображениям (рис. 12).

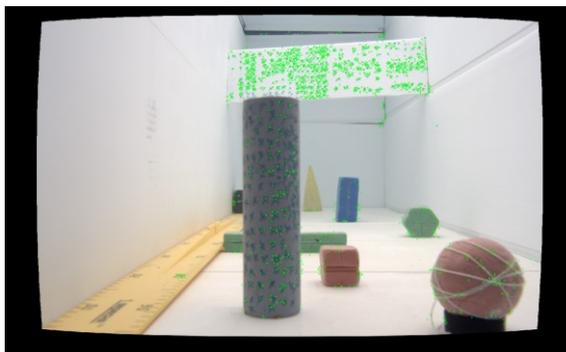


Рисунок 12 – Ключевые точки

Для полученной области определяется модель, имеющая минимальную ошибку между аппроксимирующей моделью и облаком точек. Распознавание объекта выполняется поэтапно. На первом шаге все кластеры аппроксимируются моделью плоскости при помощи метода наименьших квадратов. В качестве модели плоскости используется следующее уравнение:

$$z = a \cdot x + b \cdot y + c. \quad (11)$$

На втором шаге все кластеры аппроксимируются искомой моделью при помощи метода наименьших квадратов. На третьем шаге для всех кластеров определяется искомая модель. Например, для модели цилиндра: модель плоскости используется для определения углов наклона облака точек; производится вращение облака точек таким образом, чтобы аппроксимирующая плоскость становится перпендикулярной оси Z ; производится поворот облака точек вокруг оси Z на 180 градусов с дискретностью в 0,5 градуса; на каждом шаге проекция на плоскость XZ аппроксимируется окружностью; рассчитывается ошибка между радиусом и евклидовым расстоянием от центра окружности до точки; выбирается модель окружности, для которой средняя ошибка является минимальной; радиус окружности принимается за радиус цилиндра; в качестве координат (x, z) центров оснований цилиндра применяются координаты центра полученной окружности, а за координату y берется минимальное и максимальное значение координаты облака точек по оси Y ; центр основания приводится к исходной системе координат облака точек.

В результате по полученным 3D точкам определяем поверхность, которую описывают полученные точки. Если поверхность приближена к искомой фигуре, то мы делаем вывод о нахождении искомого объекта, так как наш объект наиболее приближен к его форме цилиндра и имеет заданный цвет (рис. 13).

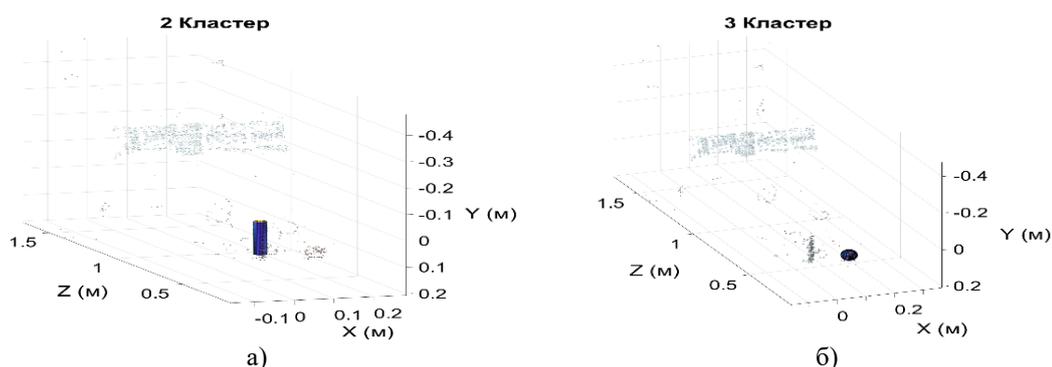


Рисунок 13 – Результаты кластеризации объектов: а) выделенный цилиндр; б) выделенный шар

На рисунке 14 приведен пример обнаружения с помощью разработанной системы оранжевой трубы под водой. Предлагаемые алгоритмы распространяются и не поиск более сложных объектов под водой, в том числе артефактов. Пример таких объектов приведен на рисунке 15.

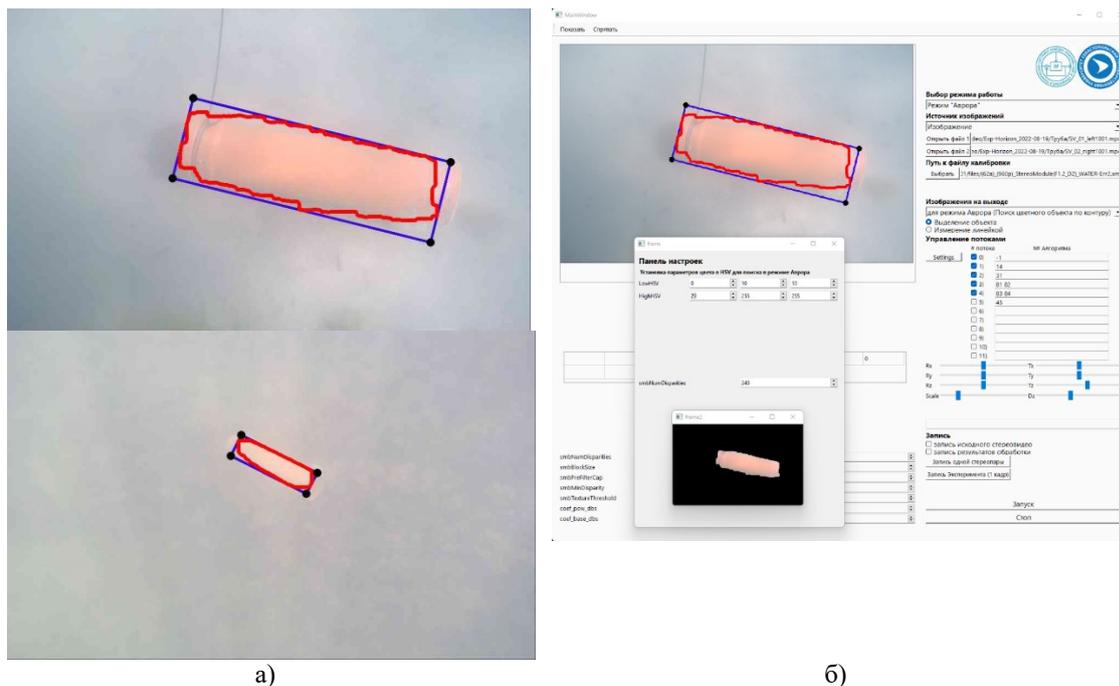


Рисунок 14 – Обнаружение оранжевой трубы под водой: а) работа программы; б) интерфейс программы



Рисунок 15 – Пример подводных объектов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке алгоритмов программы обнаружения, распознавания и локализации объекта с заданными некоторыми отличительными признаками в водной среде при помощи СТЗ с учетом ограничений применена параллельная организация работы алгоритмов. Обычно программная СТЗ состоит из нескольких отдельных алгоритмов, которые в большинстве случаев выполняются последовательно. При этом суммарное время обработки одного кадра складывается из времени работы всех алгоритмов, входящих в состав программной части. Но если один из алгоритмов выполняется медленно, то и общая реализация всей программной части будет выполняться медленно. В режиме реального времени это будет выглядеть как зависания картинки на экране оператора. Естественно, для увеличения быстродействия всей программной части возникает потребность организовать работу входящих в состав алгоритмов параллельно, многопоточно. Такой способ организации работы дополнительно создает ряд проблем, которых бы не было, если работа алгоритмов была организована последовательно. Среди возникающих проблем можно выделить: общие данные (изображения, координаты 3D точек, результаты кластерного анализа) используются одновременно, приводя к возникновению конфликта; данные на выходе алгоритмов могут относиться к разным стереопарам стереокамеры; некоторые алгоритмы выполняются настолько быстро, что выполняют обработку одного кадра изображения многократно, с частотой выше скорости обновления кадров камеры, что приводит к лишним вычислительным затратам и росту количества обращений к общим данным (одновременно общие данные могут использоваться только одним алгоритмом, другие ждут своей очереди); нет возможности

разделить некоторые алгоритмы с большим временем исполнения (с большими вычислительными затратами) на отдельные части для параллельной организации их работы.

Для решения поставленной задачи выбран подход распараллеливания задач, так как в используемой подводной СТЗ имеется достаточное количество алгоритмов, каждый из которых выполняет свои задачи. Распараллеливание по данным не применялось, так как для большинства используемых алгоритмов невозможно разделить данные на части, а там, где это можно сделать, нет существенной надобности в связи с тем, что эти алгоритмы выполняются достаточно быстро.

Для реализации многопоточной работы алгоритмов в качестве основного вычислительного устройства используется многоядерный процессор (CPU).

Для решения описанных ранее во введении проблем были выбраны следующие методы (соответственно нумерации проблем во введении): 1) при обращении к общим данным применяется управление конкурентными потоками через использование мьютексов (mutex, от mutual exclusion – «взаимное исключение») – одноместный семафор, служащий для управления конкурентными потоками; 2) синхронизация данных (организация параллельной работы алгоритмов таким образом, чтоб данные на выходе алгоритмов относились к одному кадру); 3) синхронизация времени выполнения потоков через управление временем работы каждого потока; 4) использование ресурсов видеокарты (GPU) для ускорения выполнения некоторых алгоритмов с большим временем выполнения, которые невозможно разделить на отдельные части (задачи).

Для работы СТЗ в однопоточном последовательном режиме используется один основной цикл, в котором выполняются алгоритмы, выполняющие покадровую обработку данных. В тело этого цикла не входят процедуры активации устройств и инициализации данных. В многопоточной параллельной организации работы алгоритмов каждый поток имеет свой отдельный цикл, в котором выполняется один или несколько алгоритмов.

В результате многопоточной организации выполнения алгоритмов удалось повысить скорость работы подводной системы технического стереозрения. Быстродействие программы увеличилось почти в 2 раза (в 3 раза – при реализации части алгоритмов на GPU). Также удалось увеличить скорость обновления кадров на экране оператора в 5 раз, то есть воспроизводить видео почти без задержек. Это позволило повысить скорость получения информации от СТЗ.

Список источников

- Pedro, J. Sanz. TRIDENT An European Project Targeted to Increase the Autonomy Levels for Underwater Intervention Missions / Pedro, J. Sanz, Pere, Ridaio, Gabriel, Oliver, Giuseppe, Casalino, Yvan, Petillot, Carlos, Silvestre, Claudio, Melchiorri, Alessio, Turetta // 2013 OCEANS. San Diego, 23–27 September, 2013. – San Diego, 2013.
- Drap, P. Photogrammetry for virtual exploration of underwater archeological sites / P. Drap, J. Seinturier, D. Scaradozzi // Proceedings of the 21st International Symposium, CIPA 2007: AntiCIPAting the Future of the Cultural Past. Athens, Greece, 1–6 October 2007. – Athens, 2007.
- Giuseppe, Casalino. MARIS: A National Project on Marine Robotics for Interventions / Giuseppe, Casalino, Massimo, Caccia, Andrea, Caiti, Gianluca, Antonelli, Giovanni, Indiveri, Claudio, Melchiorri and Stefano, Caselli // 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation University of Palermo. June 16–19, 2014. Palermo, Italy. – Palermo, 2014.
- Bazeille, S. Automatic underwater image pre-processing / S. Bazeille, I. Quidu, L. Jaulin and J. P. Malkasse // CMM'06. October 2006, Brest, France.
- Rizzini, D. L. Integration of a stereo vision system into an autonomous underwater vehicle for pipe manipulation tasks / D. L. Rizzini // Computers & Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 58. – P. 560–571.
- Brandou, V. 3D reconstruction of natural underwater scenes using the stereovision system IRIS / V. Brandou, A-G. Allais, M. Perrier, E. Malis, P. Rives, J. Sarrazin, and P-M. Sarradin // OCEANS 2007-Europe. – IEEE, 2007.
- Skorohod, B. A. Accuracy analysis of 3D points reconstructed from workspace of underwater robot / B. A. Skorohod, A. V. Statsenko, S. I. Fateev, P. V. Zhilyakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – vol. 1661, issue 1. – P. 012124.
- Скорород, Б. А. Разработка алгоритмов построения 3D изображений рабочего пространства РТК подводного базирования на базе информации, полученной от оптических камер / Б. А. Скорород, А. В. Стаценко, С. И. Фатеев, П. В. Жилияков // Управление и обработка информации в технических системах : материалы XV Всероссийской научно-практической конференции и XI молодежной школы-семинара. – Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2020. – С. 355–360.
- Prabhakar, C. J. 3D Surface Reconstruction of Underwater Objects / C. J. Prabhakar // International Journal of Computer Applications. – 2012. – P. 31–37.
- Chen, Z. Monocular Vision-Based Underwater Object Detection / Z. Chen, Z. Zhang, F. Dai, Y. Bu, H. Wang // Sensors. – 2017, Aug 3. – № 17 (8). – P. 1784.
- Yujie, Li Underwater image de-scattering and classification by deep neural network / Yujie, Li, Huimin Lu, Jianru, Li, Xin, Li, Yun, Li, Seiichi, Serikawa // Computers & Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 54. – P. 68–77.
- Chen, Z. Underwater Object Segmentation Based on Optical Features / Z. Chen, Z. Zhang, Y. Bu, F. Dai, T. Fan, H. Wang // Sensors. – 2018. – № 18. – P. 196.
- Lee, D. Vision-based object detection and tracking for autonomous navigation of underwater robots / D. Lee, G. Kim, D. Kim, H. Myung & H. Choi // Ocean Engineering. – № 48. – P. 59–68.
- Jordt, A. Refractive calibration of underwater cameras / A. Jordt, R. Koch // Computer Vision – ECCV 2012. – Berlin, Germany : Springer Berlin Heidelberg, 2012. – P. 1–14.

15. Arnold-Bos, A. A. Preprocessing Framework for Automatic Underwater Image Denoising / A. Arnold-Bos, J. Malkasse, G. Kervern // *Proceedings of The European Conference on Propagation and Systems*. – Brest, France, 2005.
16. Pizer, S. M. Adaptive histogram equalization and its variations / S. M. Pizer, E. P. Amburn, J. D. Austin, R. Cromartie, A. Geselowitz, T. Greer, B. T. H. Romeny, and J. B. Zimmerman // *Computer Vision, Graphics, Image Processing*. – September 1987. – № 39 (3). – P. 355–368.
17. Скороход, Б. А. Анализ точности построения 3D координат рабочего пространства подводного робота / Б. А. Скороход, П. В. Жилияков, А. В. Стаценко, С. И. Фатеев // *Системы контроля окружающей среды*. – 2020. – № 3 (41). – С. 163–170.
18. Воронцов, К. В. Алгоритмы кластеризации и многомерного шкалирования / К. В. Воронцов. – Москва : МГУ, 2007. – 18 с.
19. Ester, M. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise / M. Ester // *Third AAAI Conference on Human Computation and Crowdsourcing*. – 2015.

References

1. Pedro, J. Sanz, Pere, Ridaó, Gabriel, Oliver, Giuseppe, Casalino, Yvan, Petillot, Carlos Silvestre, Claudio Melchiorri, Alessio Turetta TRIDENT An European Project Targeted to Increase the Autonomy Levels for Underwater Intervention Missions. *2013 OCEANS. San Diego, 23–27 September, 2013*. San Diego, 2013.
2. Drap, P. Seinturier, J. Scaradozzi, D. Photogrammetry for virtual exploration of underwater archeological sites. *Proceedings of the 21st International Symposium, CIPA 2007: AntiCIPAting the Future of the Cultural Past, Athens, Greece, 1–6 October 2007*. Athens, 2007.
3. Giuseppe, Casalino, Massimo, Caccia, Andrea, Caiti, Gianluca, Antonelli, Giovanni, Indiveri, Claudio, Melchiorri and Stefano, Caselli. MARIS: A National Project on Marine Robotics for Interventions. *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation University of Palermo. June 16–19, 2014. Palermo, Italy*. Palermo, 2014.
4. Bazeille, S., Quidu, I., Jaulin, L. and Malkasse, J. P. Automatic underwater image pre-processing. *CMM'06, October 2006, Brest, France*. Brest, 2006.
5. Rizzini, D. L. Integration of a stereo vision system into an autonomous underwater vehicle for pipe manipulation tasks. *Computers & Electrical Engineering*, 2017, vol. 58, pp. 560–571.
6. Brandou, V., Allais, A.-G., Perrier, M., Malis, E., Rives, P., Sarrazin, J., and Sarradin, P.-M. 3D reconstruction of natural underwater scenes using the stereovision system IRIS. *OCEANS 2007-Europe*. IEEE, 2007.
7. Skorokhod, B. A., Statsenko, A. V., Fateev, S. I., Zhilyakov, P. V. Accuracy analysis of 3D points reconstructed from workspace of underwater robot. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1661, issue 1, p. 012124.
8. Skorokhod, B. A., Statsenko, A. V., Fateev, S. I., Zhilyakov, P. V. Razrabotka algoritmov postroeniya 3D izobrazheniy rabocheho prostranstva RTK podvodnogo bazirovaniya na baze informatsii, poluchennyoy ot opticheskikh kamer [Development of algorithms for constructing 3D images of the working space of an underwater RTK based on information received from optical cameras]. *Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh : materialy XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XI molodezhnoy shkoly-seminara* [Management and processing of information in technical systems: materials of XV All-Russian Scientific and Practical Conference and XI Youth School-Seminar]. Taganrog, South Federal University Publ., 2020, pp. 355–360.
9. Prabhakar, C. J. 3D Surface Reconstruction of Underwater Objects. *International Journal of Computer Applications*, 2012, pp. 31–37.
10. Chen, Z., Zhang, Z., Dai, F., Bu, Y., Wang, H. Monocular Vision-Based Underwater Object Detection. *Sensors*, 2017, Aug 3, no. 17 (8), p. 1784.
11. Yujie, Li, Huimin, Lu, Jianru, Li, Xin, Li, Yun, Li, Seiichi, Serikawa. Underwater image de-scattering and classification by deep neural network. *Computers & Electrical Engineering*, 2016, vol. 54, pp. 68–77.
12. Chen, Z., Zhang, Z., Bu, Y., Dai, F., Fan, T., Wang, H. Underwater Object Segmentation Based on Optical Features. *Sensors*, 2018, no. 18, p. 196.
13. Lee, D., Kim, G., Kim, D., Myung, H., & Choi, H. Vision-based object detection and tracking for autonomous navigation of underwater robots. *Ocean Engineering*, no. 48, pp. 59–68.
14. Jordt, A., Koch, R. Refractive calibration of underwater cameras. *Computer Vision – ECCV 2012*. Berlin, Germany, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 1–14.
15. Arnold-Bos, A., Malkasse, J., Kervern, G. A Preprocessing Framework for Automatic Underwater Image Denoising. *Proceedings of The European Conference on Propagation and Systems*. Brest, France, 2005.
16. Pizer, S. M., Amburn, E. P., Austin, J. D., Cromartie, R., Geselowitz, A., Greer, T., Romeny, B. T. H., and Zimmerman, J. B. Adaptive histogram equalization and its variations. *Computer Vision, Graphics, Image Processing*, September 1987, no. 39 (3), pp. 355–368.
17. Skorokhod, B. A., Zhilyakov, P. V., Statsenko, A. V., Fateev, S. I. Analiz tochnosti postroeniya 3D koordinat rabocheho prostranstva podvodnogo robota [Analysis of the accuracy of constructing 3D coordinates of the working space of an underwater robot]. *Sistemy kontrolya okruzhayushhey sredy* [Environmental Control Systems], 2020, no. 3 (41), pp. 163–170.
18. Vorontsov, K. V. *Algoritmy klasterizatsii i mnogomernogo shkalirovaniya* [Clustering and multidimensional scaling algorithms]. Moscow, Moscow State University Publ., 2007. 18 p.
19. Ester, M. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *Third AAAI Conference on Human Computation and Crowdsourcing*, 2015.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 16.03.2023.

The article was submitted 06.03.2023; approved after reviewing 13.03.2023; accepted for publication 16.03.2023.

УДК 004.001

**СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ СОСТАВОМ
СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ
ОРГАНОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ВЛАСТИ**

Ажмухамедов Искандар Маратович, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

доктор технических наук, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности, профессор кафедры информационной безопасности, ORCID: 0000-0001-9058-123X, e-mail: aim_agtu@mail.ru

Багаев Никита Николаевич, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

магистрант, ORCID: 0000-0001-9585-6060, e-mail: nickitabagaew@yandex.ru

На основе модели угроз для организации подбираются средства защиты информации. Перечень всех средств защиты информации, а также соответствующей документации должен вестись сотрудниками отдела информационной безопасности в организациях, и чаще всего учет ведется в нескольких файлах, в которых информация может дублироваться или отсутствовать по какой-либо причине. Вследствие этого учет средств защиты информации может оказаться запутанным или вовсе неверным, а также в процессе централизованной закупки можно допустить ошибку при выборе средства защиты, либо при подсчете количества лицензий для организации. В результате организация может понести финансовые потери из-за невозможности оперативного автоматизированного контроля и анализа информационных процессов. Для избежания данных проблем необходима единая система, в которую на вход будет заноситься информация сотрудниками отдела информационной безопасности, а на выходе получать информационную панель. В статье дается описание системы поддержки принятия решений, которая позволяет проводить учет, мониторинг и анализ средств защиты информации, а также помогает при централизованной закупке.

Ключевые слова: средства защиты информации, средства криптографической защиты информации, веб-приложение, информационная система, исполнительные органы государственной власти, централизованная закупка

**THE STRUCTURE OF SOFTWARE TO SUPPORT DECISION-MAKING
ON THE MANAGEMENT OF THE COMPOSITION OF INFORMATION SECURITY
TOOLS OF EXECUTIVE BODIES OF STATE POWER**

Azhmukhamedov Iskandar M., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Dean of the Faculty of Digital Technologies and Cybersecurity, Professor of the Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID: 0000-0001-9058-123X, e-mail: aim_agtu@mail.ru

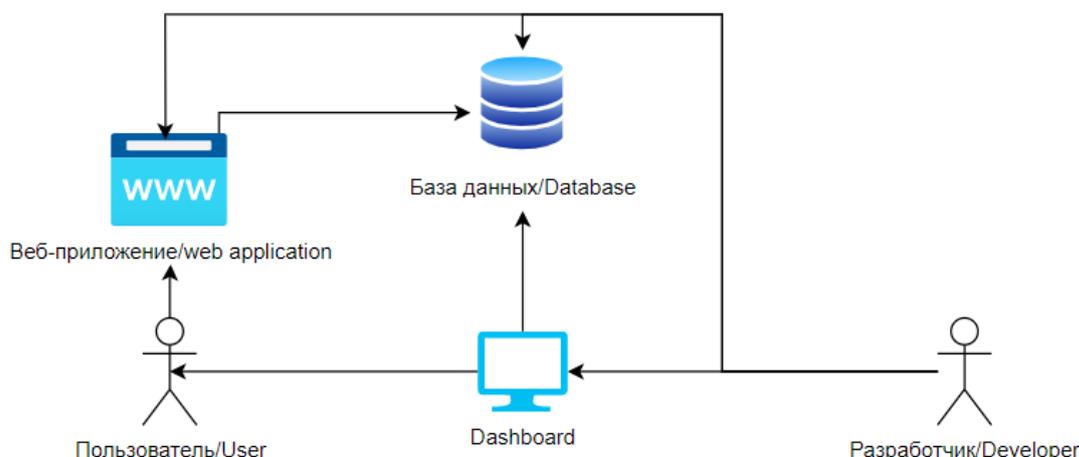
Bagaev Nikita N., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

undergraduate student, ORCID: 0000-0001-9585-6060, e-mail: nickitabagaew@yandex.ru

Based on the threat model, information security tools are selected for the organization. A list of all information security tools, as well as relevant documentation, should be maintained by employees of the information security department in organizations, and most often records are kept in several files in which information may be duplicated or missing for some reason. As a result, the accounting of information security tools may be confusing or completely incorrect, and in the process of centralized procurement, an error may be made when choosing a means of protection, or when calculating the number of licenses for an organization. As a result, the organization may incur financial losses due to the impossibility of operational automated control and analysis of information processes. To avoid these problems, a unified system is needed, in which information will be entered by the employees of the information security department, and an information panel will be received at the output. The article describes a decision support system that allows for accounting, monitoring and analysis of means of protection information, as well as helps with centralized procurement.

Keywords: means of protection information, means of cryptographic protection of information, web application, information system, executive bodies of state power, centralized procurement

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Безопасность и стабильность информационных систем играют важную роль как в некоторых организациях, так и во всех отраслях промышленности в современных условиях. Попытки целенаправленных и изолированных кибератак на инфраструктуру фиксируются по всему миру. Подписание Федерального закона от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [8] и разработка соответствующих документов считается рациональным ответом на вызовы современной действительности. Субъектами критической информационной инфраструктуры (КИИ) являются компании, работающие в стратегически важных для государства областях, а также организации государственного управления, в том числе исполнительные органы государственной власти (ИОГВ). Информационная среда ИОГВ представляет собой совокупность источников информации, оказывающих воздействие на организацию, региональных информационных систем и сетей связи, в том числе и информационных ресурсов, телекоммуникационных систем. Типовыми информационными процессами в ИОГВ являются:

- ведение документооборота;
- накопление информации;
- анализ информации;
- прогноз и планирование;
- принятие управленческих решений;
- информирование населения.

Приоритетной задачей в данных процессах является обеспечение информационной безопасности (ИБ). Поддержка ИБ в организации включает в себя прежде всего верное определение угроз безопасности соответствующих информационных систем [4], а также адекватный выбор и применение средств защиты информации (СЗИ) для снижения риска, вызванного этими угрозами. Данный процесс может быть достигнут только комплексным использованием СЗИ по каждому виду угроз.

Использование определенных СЗИ в первую очередь начинается с организации централизованной закупки [9]. Рассмотрим существующий механизм управления закупками СЗИ в ИОГВ.

Организация, ответственная за централизованные закупки, информирует путем рассылки писем министерства и их подведомственные учреждения о начале закупки определенного СЗИ. Начальники отделов защиты информации или их заместители проводят в своем учреждении анализ необходимости данного СЗИ. Если текущее СЗИ организации не соответствует СЗИ централизованной закупки, то проводят их сравнение по критериям, необходимым организации, а также с помощью модели угроз анализируют снижение риска угроз ИБ средством защиты, предполагаемым к закупке.

Если же СЗИ совпадают, то учреждения проверяют окончание лицензии текущего средства защиты. Проведя анализ, организация принимает решение об участии в закупке. При подтверждении участия учреждению остается только подсчитать количество необходимых лицензий. После чего обратным письмом передается ответ в виде заявки об участии в централизованной закупке. Диаграмма последовательностей централизованной закупки ИОГВ, выполненная в среде Visual Paradigm for UML 7.1, представлена на рисунке 1.

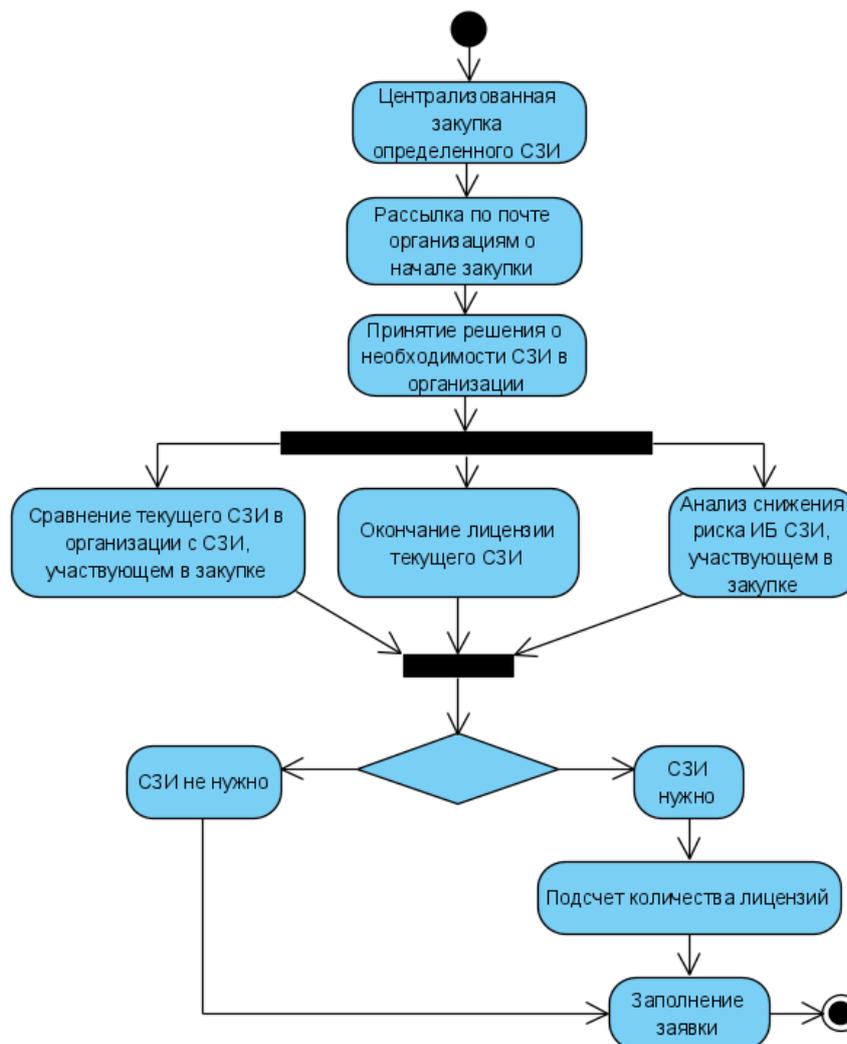


Рисунок 1 – Диаграмма последовательностей централизованной закупки

Как правило, проблема с таким подходом заключается в отсутствии необходимой информации. Часто приходится сталкиваться с ее дублированием в справочниках, неверными и неполными данными, недостаточной систематизацией, отсутствием эффективной технологии и методологии. Кроме этого, в малом числе организаций ведется электронный учет средств СЗИ и средств криптографической защиты информации (СКЗИ) [2], в большинстве случаев он на бумажном носителе, либо его вовсе нет [6].

В результате организация терпит финансовые убытки из-за невыполнимости автоматизированного контроля и анализа информационных процессов, особенно это касается процесса централизованной закупки, где легко можно допустить ошибку при выборе средства защиты, либо при подсчете количества лицензий для организации. Кроме того, при наличии нескольких информационных систем в организации увеличивается объем работ сотрудников на поддержание актуальной информации о СЗИ в них, а также обеспечение информационных стыковок между ними.

Решением этих проблем является внедрение системы поддержки принятия решений (СППР), которая позволит управлять составом СЗИ в организации, а также поможет в централизованной закупке. Кроме того, данная система будет выводить всю информацию о СЗИ в организации, в том числе:

- количество лицензий;
- дата окончания лицензии;
- риск, который будет ликвидирован СЗИ и т. д.

То есть сотруднику отдела ИБ не нужно будет проводить анализ вручную, достаточно воспользоваться системой, занести в нее свои данные об организации и получить всю необходимую информацию, благодаря которой можно будет сделать соответствующие выводы. Диаграмма последовательностей централизованной закупки с применением СППР представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Диаграмма последовательностей централизованной закупки с использованием СППР

Основной целью проекта является повышение эффективности управления составом средств защиты информации в исполнительных органах государственной власти путем создания информационной системы поддержки принятия решений. Функционал СППР для каждой группы пользователей представлен на рисунке 3. Архитектура исполнения системы поддержки принятия решений представлена на рисунке 4.

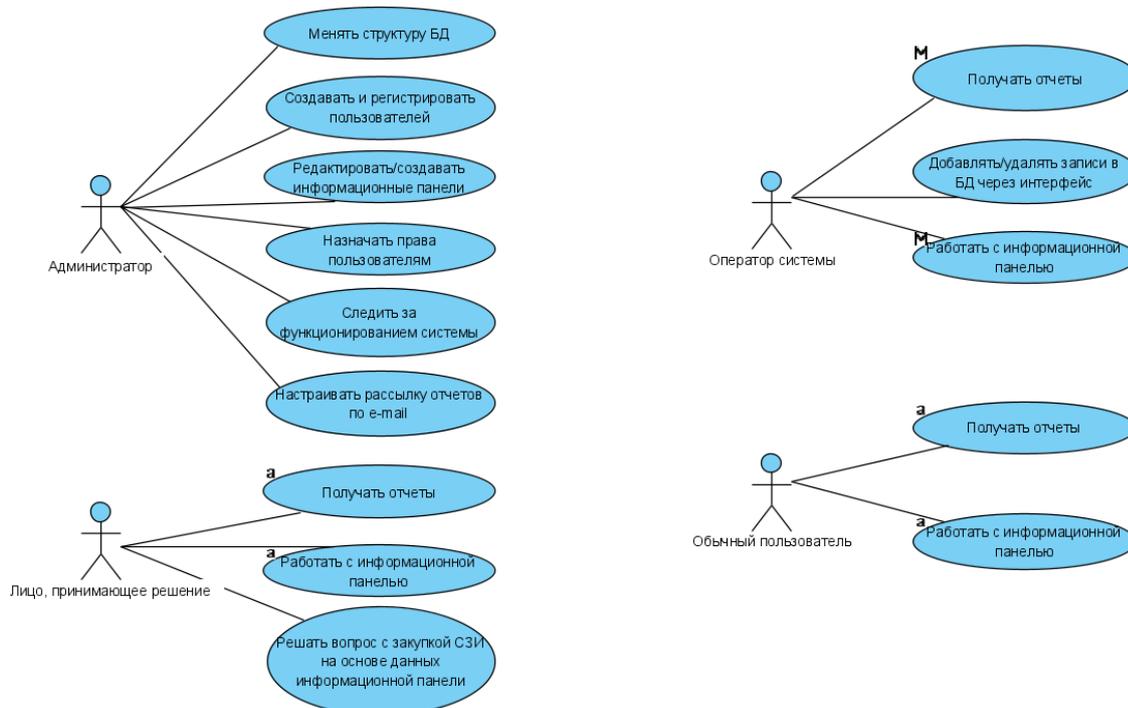


Рисунок 3 – Диаграмма вариантов использования

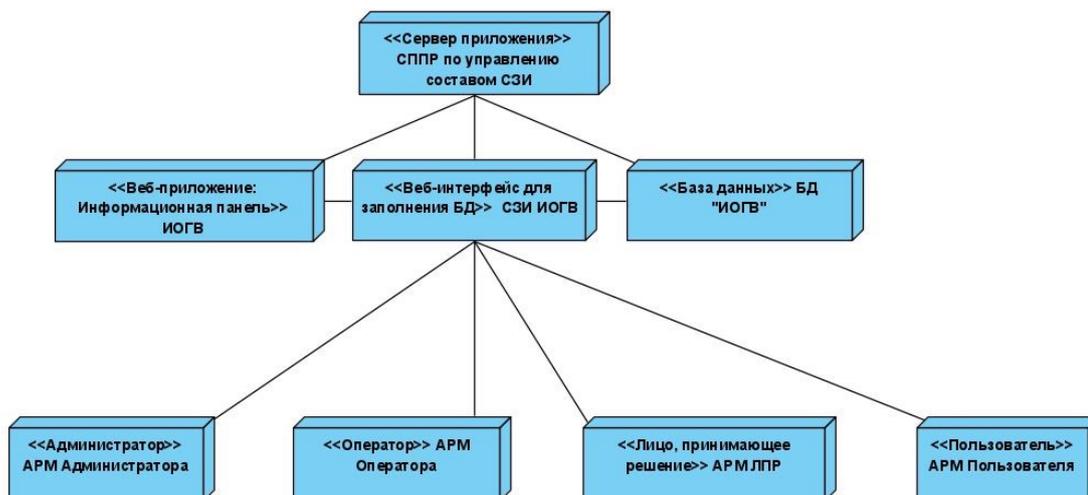


Рисунок 4 – Диаграмма развертывания

Проект необходимо выполнить в несколько этапов. На начальном этапе была разработана модель данных с помощью СУБД PostgreSQL [7], так как в Postgres:

- массивы значений могут храниться для большинства существующих типов данных;
- возможна поддержка JSON;
- возможно создание нового типа данных;
- размер базы данных неограничен;
- реализация целостности данных.

База данных состоит из 17 таблиц. Модель данных представлена на рисунке 5.

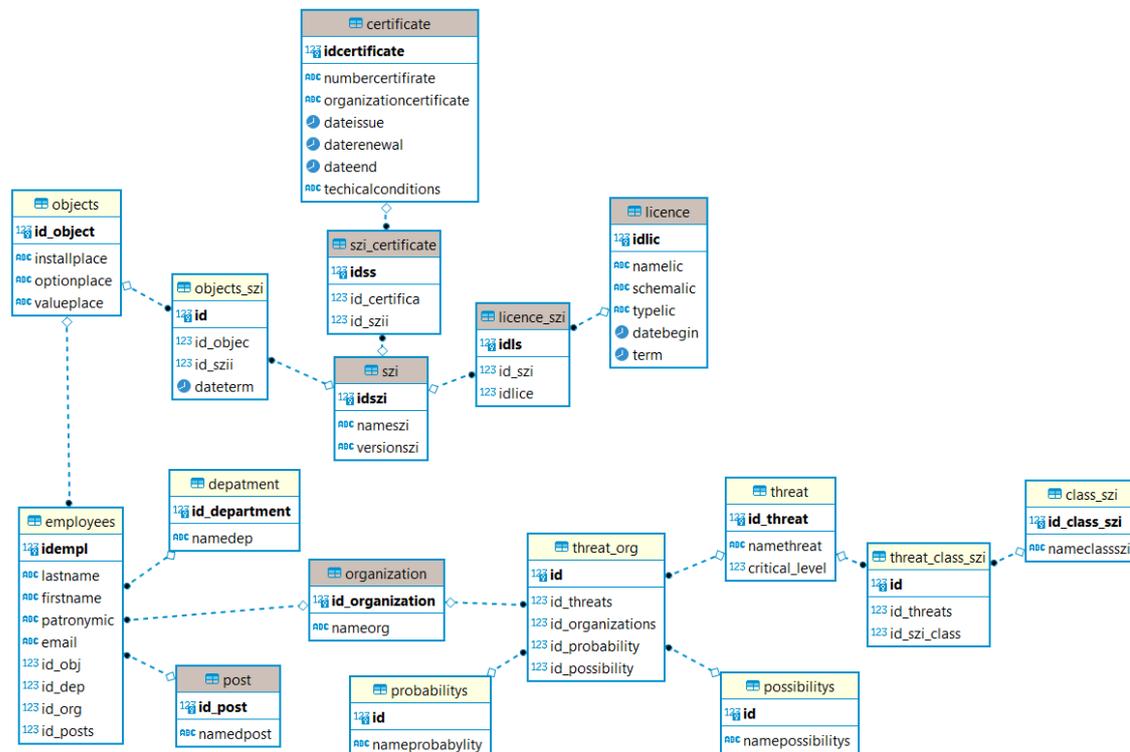


Рисунок 5 – Модель данных

Саму базу данных условно можно поделить на 4 блока:

- СЗИ;
- сотрудники;
- угрозы организации;
- сопоставление угроз к СЗИ.

Первый блок (рис. 6) включает в себя всю информацию о СЗИ, имеющуюся у организации, а именно:

- наименование СЗИ и его версия;
- сертификаты соответствия с датами начала, продления и окончания;
- лицензия СЗИ с датами начала и окончания, а также с типом и схемой лицензии;
- объекты, на которых установлены СЗИ, с датой активации продукта.

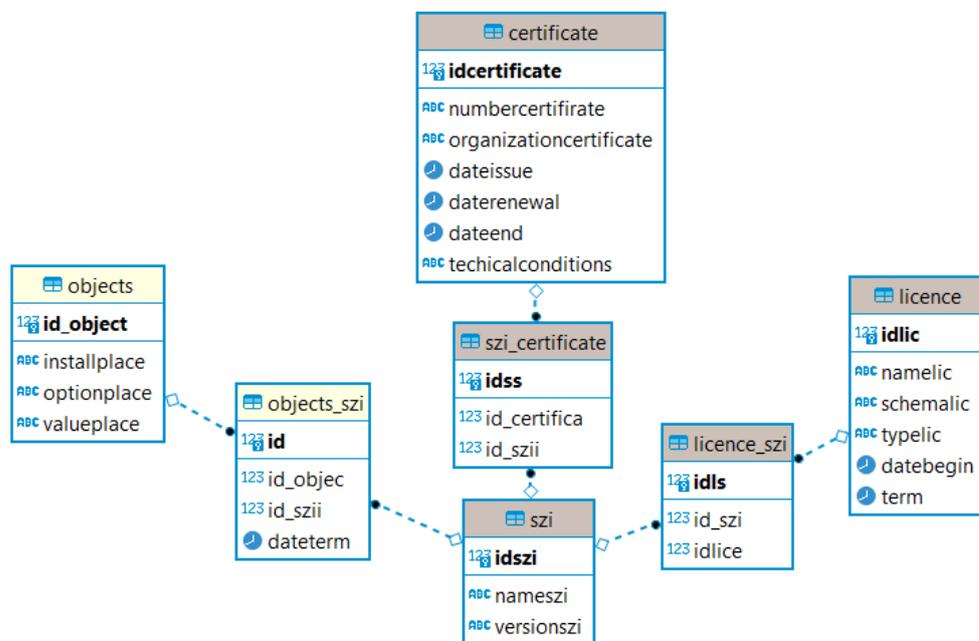


Рисунок 6 – Блок «СЗИ организаций»

Второй блок (рис. 7) включает в себя информацию о сотрудниках организации, а именно:

- ФИО сотрудника;
- должность;
- подразделение;
- организация;
- закрепленное за сотрудником рабочее место, то есть персональный компьютер, на котором установлены СЗИ.

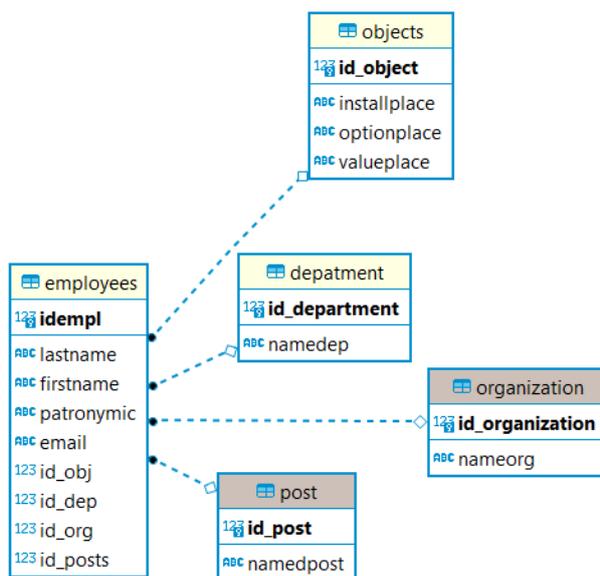


Рисунок 7 – Блок «Информация по сотрудникам»

Третий блок (рис. 8) содержит в себе информацию об угрозах информационной безопасности организации, а именно:

- наименование угроз;
- вероятность реализации угрозы;
- возможность успешной реализации угрозы.



Рисунок 8 – Блок «Угрозы организаций»

Четвертый блок (рис. 9) включает в себя информацию о СЗИ, которая может нейтрализовать угрозу.

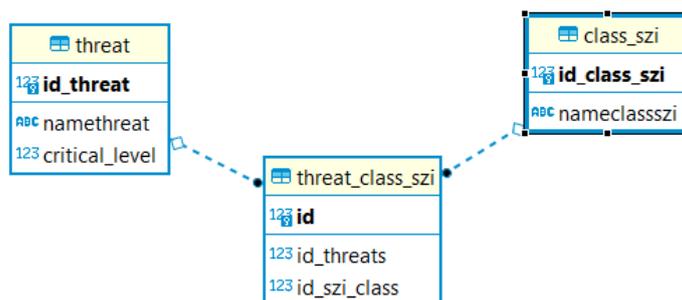


Рисунок 9 – Блок «Сопоставление угроз и СЗИ»

На стороне backend будет оценен риск [3] каждой угрозы для организации.

Риск будет рассчитываться по формуле 1:

$$R = P_{\text{атаки}} * V, \quad (1)$$

где $P_{\text{атаки}}$ – вероятность атаки;

V – ущерб.

Вероятность атаки рассчитывается по следующей формуле 2:

$$P_{\text{атаки}} = P_{\text{вер.возн.}} * P_{\text{уязв.}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{вер.возн.}}$ – вероятность возникновения угрозы;

$P_{\text{уязв.}}$ – вероятность уязвимости.

Вероятность уязвимости будет оцениваться в два значения: 1 и 0. Если у угрозы есть уязвимость, ей присваивается 1, если нет, то соответственно 0.

Для оценки вероятности реализации угрозы будет использоваться трехуровневая качественная шкала (низкая, средняя, высокая), которая сопоставлена со следующими числовыми коэффициентами: 0,2, 0,5, 0,1.

Ущерб оценивается по последствиям угрозы при нарушении характеристик безопасности, а именно конфиденциальность, целостность, доступность.

К примеру, имеется следующая угроза: угроза воздействия на программы с высокими привилегиями. Описанные выше характеристики представлены в таблице.

Таблица – Характеристики угрозы

Угроза	Последствия			Уязвимости	Вероятность реализации
	конфиденциальность	целостность	доступность		
Угроза воздействия на программы с высокими привилегиями	1	1	0	Обладание дискредитируемой программой повышенными привилегиями в системе	Средняя

Следовательно, вероятность атаки равняется:

$$P_{атаки} = 0,5 * 1 = 0,5.$$

Риск угрозы равняется:

$$R = 0,5 * 2 = 1.$$

На основе этих данных можно будет определить приоритетное СЗИ, которое поможет максимально снизить риски.

Для заполнения разработанной базы данных необходим веб-интерфейс, а также расположение БД на сервере, для того чтобы с ней в режиме реального времени могло работать одновременно несколько пользователей.

Для реализации веб-приложения был выбран фреймворк «Django» [1], написанный на языке программирования Python, так как в нем есть:

- развитая экосистема;
- административная панель, она генерируется автоматически при создании приложения;
- расширяемость;
- реализация объектно-реляционного отображения.

Веб-интерфейс будет начинаться со страницы авторизации. В системе не будет функционала регистрации, поэтому администратор системы сам будет создавать логины и пароли для пользователей в Django. Страница входа представлена на рисунке 10.

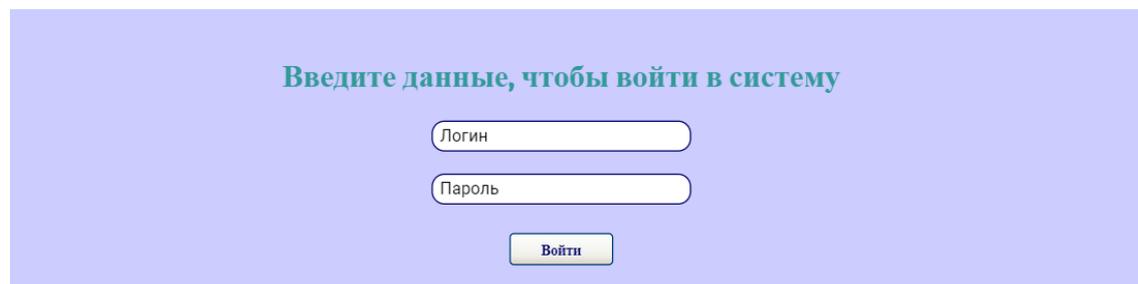


Рисунок 10 – Страница входа

После успешной авторизации веб-приложение перенаправляет нас на главную страницу, где расположены ссылки по блокам заполнения информации в базу данных (рис. 11).



Рисунок 11 – Главная страница

Заполнение блока СЗИ состоит из 4 ссылок, которые содержат в себе формы для заполнения СЗИ, сертификатов соответствия, лицензий и объектов, на которых установлены СЗИ. Главной ссылкой является «Добавить СЗИ», так как все заполнение начинается с нее, и без данной информации нет смысла заполнять другие формы (рис. 12–15).

Главная

СЗИ

Введите СЗИ Укажите версию

СЗИ	Версия
Kaspersky Endpoint Security	11.3.0.1
Secret Net	7.5

Рисунок 12 – Страница «Добавление СЗИ»

Главная

Сертификаты СЗИ

Выберите СЗИ
 Номер сертификата
 Организация (ФСБ, ФСТЭК)
 Выдан
 Продлен
 Дата окончания
 Технические условия

СЗИ	Версия	Номер сертификата	Организация	Выдан	Продлен	Дата окончания	Технические условия
Kaspersky Endpoint Security	11.3.0.1	3166	ФСТЭК России	21.05.2014	21.05.2020	21.05.2017	ЮДИН.408240002

Рисунок 13 – Страница «Добавление сертификатов соответствия»

Главная

Лицензии СЗИ

Выберите СЗИ
 Выберите лицензию
 Ключ
 Схема лицензии
 Тип лицензии
 Начало действия лицензии
 Дата окончания

СЗИ	Версия	Ключ	Схема лицензии	Тип лицензии	Начало действия лицензии	Дата окончания
Kaspersky Endpoint Security	11.0.3.1	AAvSD7-AAVvrR-BB0405-CLaFGW	2000 APM	Годовая	21.05.2021	21.05.2022

Рисунок 14 – Страница «Добавление лицензий СЗИ»

Главная

Объекты СЗИ

Выберите СЗИ Выберите лицензию
 Место установки Вид наименования
 Наименование Дата установки

СЗИ	Версия	Место установки	Вид наименования	Наименование	Дата установки
Kaspersky Endpoint Security	11.0.3.1	APM	DNS-имя	ICEP-Gorbatenko	21.05.2021

Рисунок 15 – Страница «Добавление объектов СЗИ»

Блок заполнения информации по сотрудникам включает себя несколько форм, в первую очередь пользователь должен будет внести данные о своей организации, включая наименование подразделений и должностей. После заполнения информации по сотрудникам (рис. 16).

Главная

Сотрудники

Организация
 Подразделение
 Должность

Фамилия Имя Отчество Email
 Выберите объект Организация Подразделение Должность

Фамилия	Имя	Отчество	Email	Объект	Организация	Подразделение	Должность
Горбатенко	Сергей	Юрьевич	sgrabatanko1996@astrobl.ru	ICEP-Gorbatenko	Инфраструктурный центр электронного правительства	Отдел Информационной безопасности	Начальник отдела

Рисунок 16 – Страница «Добавление сотрудников»

Заключительной формой заполнения будет блок по угрозам ИБ. Здесь достаточно выбрать из уже имеющегося перечня, находящегося в базе данных, угрозы, а также вероятность ее возникновения и уязвимости, если они имеются (рис. 17).

Главная

Угрозы ИБ

Организация Выберите угрозы
 Вероятность возникновения Уязвимость угрозы

Организация	Угрозы	Вероятность возникновения	Уязвимость
Инфраструктурный центр электронного правительства	Угроза несанкционированного доступа	Средняя	Незакрытые кабинеты

Рисунок 17 – Страница «Добавление угроз ИБ»

Заключительным этапом проекта является создание информационной панели (ВИ-приложения), в которой будет выведена ключевая информация по средствам защиты информации, а также по угрозам информационной безопасности. С помощью информационной панели можно проводить мониторинг по средствам защиты, к примеру, выявлять рабочие места, у которых не установлено СЗИ, проверять количество оставшихся лицензий. Система будет сигнализировать об окончании лицензии у СЗИ, сроков действия на сертификаты и иных нормативных документов, например, сертификаты соответствия, а также будет подсчитывать количество лицензий при следующей закупке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После анализа процесса централизованной закупки была выявлена проблема, заключающаяся в недостаточности или отсутствии необходимой информации о СЗИ в организации. Нет единой системы, где бы хранились такие данные и которую можно было бы использовать для мониторинга и учета средств защиты. Решением проблем является разработка СППР. Данная система позволит управлять составом СЗИ в организации, а также поможет в централизованной закупке. На текущий момент разработана модель данных и веб-приложение по ее заполнению. Следующим шагом будет разработка информационной панели.

Список источников

1. Байдыбеков А. А. Современные фреймворки для разработки web-приложений / А. А. Байдыбеков, Р. Г. Гильванов, И. А. Молодкин // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2020. – № 4 (24). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-freymvorki-dlya-razrabotki-web-prilozheniy>.
2. Инструкция по заполнению внутренних нормативных документов по использованию СЗИ и СКЗИ в организации. – URL: https://bcstender.ru/files/instruktsiya_po_zapolneniyu_dokumentov.pdf.
3. Кривякин, К. С. Методический подход к оценке рисков информационной безопасности предприятия / К. С. Кривякин, А. Р. Изотова, В. М. Федоров // ЭКОНОМИНФО. – 2018. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskiy-podhod-k-otsenke-riskov-informatsionnoy-bezopasnosti-predpriyatiya>.
4. Методика оценки угроз безопасности информации (утверждена ФСТЭК России от 5 февраля 2021 г.). – URL: <https://fstec.ru/tehnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/2170-metodicheskij-dokument-utverzhdenn-fstek-rossii-5-fevralya-2021-g>.
5. Мячин, Н. В. Программная реализация методики оценки эффективности деятельности государственного заказчика в сфере закупок / Н. В. Мячин, А. Н. Литвиненко // π-Economy. – 2017. – № 5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmaya-realizatsiya-metodiki-otsenki-effektivnosti-deyatelnosti-gosudarstvennogo-zakazchika-v-sfere-zakupok>.
6. Сухорукова, И. В. Экономическая модель оптимизации при централизованном управлении закупками дочерних компаний государственной корпорации / И. В. Сухорукова, Г. Г. Лихачев // Экономический анализ: теория и практика. – 2016. – № 6 (453). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-model-optimizatsii-pri-tsentralizovannom-upravlenii-zakupkami-dochernih-kompaniy-gosudarstvennoy-korporatsii>.
7. Тортика, А. С. Обзор и сравнительный анализ современных систем управления базами данных / А. С. Тортика, А. С. Ершов // Вестник СГТУ. – 2020. – № 4 (87). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-i-sravnitelnyy-analiz-sovremennyh-sistem-upravleniya-bazami-dannyh>.
8. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ // Консультант Плюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/.
9. Федеральный закон от 05.04.2013 № 44-ФЗ (ред. от 28.12.2022) «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2023) // Консультант Плюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/1b2f0b377563c81357ffcfe750bada74a3c69f37/.

References

1. Baidybekov, A. A., Gilvanov, R. G., Molodkin, I. A. *Sovremennyye framework dly razrabotki web-prilozheniy* [Modern frameworks for web application development]. *Intellektualnyye tekhnologii na transporte* [Intelligent technologies in transport], 2020, no. 4 (24). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-freymvorki-dlya-razrabotki-web-prilozheniy>.
2. *Instruktsiya po zapolneniyu vnutrennikh normativnykh dokumentov po ispolzovaniyu SZI i SKZI v organizatsii* [Instructions for filling in internal regulatory documents on the use of SPI and SCSI in the organization] Available at: https://bcstender.ru/files/instruktsiya_po_zapolneniyu_dokumentov.pdf.
3. Krivyakin, K. S., Izotov, A. R., Fedorov, V. M. *Metodicheskiy podkhod k otsenke riskov informatsionnoy bezopasnosti predpriyatiya* [Methodological approach to assessing the risks of information security of an enterprise]. *EKONOMINFO* [EKONOMINFO], 2018, no. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskiy-podhod-k-otsenke-riskov-informatsionnoy-bezopasnosti-predpriyatiya>.
4. *Metodika otsenki ugroz bezopasnosti (utverzhdena FSTEC Rossii ot 5 fevralay 2021 g.)* [Methodology for assessing information security threats (approved by the FSTEC of Russia on February 5, 2021)]. Available at: <https://fstec.ru/tehnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/2170-metodicheskij-dokument-utverzhdenn-fstek-rossii-5-fevralya-2021-g>.
5. Myachin, N. V., Litvinenko, A. N. *Programmnyy realizatsiya metodiki otsenki effektivnosti deyatelnosti gosudarstvennogo zakazchika v sfere zakupok* [Program implementation of the methodology for evaluating the

effectiveness of the state customer in the field of procurement]. *π-Economy* [π-Economy], 2017, no. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmnyaya-realizatsiya-metodiki-otsenki-effektivnosti-deyatelnosti-gosudarstvennogo-zakazchika-v-sfere-zakupok>.

6. Sukhorukova, I. V., Likhachev, G. G. Economicheskaya model optimizatsii pri tsentralizovannom upravlenii zakupkami dochernikh kompaniy gosudarstvennoy korporatsii [Economic optimization model for centralized procurement management of subsidiaries of the state Corporation]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika* [Economic analysis: theory and practice], 2016, no. 6 (453). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-model-optimizatsii-pri-tsentralizovannom-upravlenii-zakupkami-dochernih-kompaniy-gosudarstvennoy-korporatsii>.

7. Tortika, A. S., Ershov, A. S. Obzor i sravnitelnyy analiz sovremennykh system upravleniya bazami dannykh [Review and comparative analysis of modern database management systems]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of SSTU], 2020, no. 4 (87). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-i-sravnitelnyy-analiz-sovremennyh-sistem-upravleniya-bazami-dannykh>.

8. Federalnyy zakon "O bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii" ot 26.07.2017 N 187-FZ [Federal Law "On the Security of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation" dated 26.07.2017 no. 187-FZ]. *Consultant Plus* [Consultant Plus]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/.

9. Federalnyy zakon ot 05.04.2013 no. 44-FZ (red. ot 28.12.2022) "O kontraktnoy sisteme v sfere zakupok tovarov, rabot, uslug dly obespecheniya gosudarstvennykh i municipalnykh nuzhd" [Federal Law No. 44-FZ of 05.04.2013 (as amended on 12/28/2022) "On the contract system in the field of procurement of goods, works, services for State and municipal needs" (with amendments and additions, intro. Effective from 01.01.2023)]. *Consultant Plus* [Consultant Plus]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/1b2f0b377563c81357ffcfe750bada74a3c69f37/.

Статья поступила в редакцию 20.12.2022; одобрена после рецензирования 11.01.2023; принята к публикации 13.01.2023.

The article was submitted 20.12.2022; approved after reviewing 11.01.2023; accepted for publication 13.01.2023.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.54398/20741707_2023_2_86
УДК 004.001

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ В БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМЕ BITCOIN

Ищукова Евгения Александровна, Южный федеральный университет, 347900, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Чехова, 2,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-6818-1608, e-mail: uaishukova@sfnedu.ru

Романенко Кирилл Сергеевич, Южный федеральный университет, 347900, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Чехова, 2,

аспирант, ORCID: 0000-0003-2651-7529, e-mail: kirromanenko@sfnedu.ru

Филимонова Вероника Владимировна, Южный федеральный университет, 347900, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Чехова, 2,

магистрант, ORCID: 0000-0003-2424-1696, e-mail: verlit@sfnedu.ru

Салманов Вячеслав Дмитриевич, Южный федеральный университет, 347900, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Чехова, 2,

аспирант, ORCID: 0000-0003-4218-5296, e-mail: vsalmanov@sfnedu.ru

Статья посвящена вопросам анализа блокчейн-данных на основе использования открытых источников. В качестве объекта исследования выбрана блокчейн-платформа Bitcoin, как самая популярная. Анализ данных данной платформы лежит в сфере интересов как простых пользователей системы, так и в интересах больших бирж, на которые чаще всего совершаются атаки злоумышленников. Кроме того, данный вопрос представляет интерес и для государственного сектора в сфере расследования киберпреступлений или иных преступлений, совершаемых с использованием криптовалюты. В статье рассмотрены основы построения блокчейн системы Bitcoin, а также различные готовые сервисы, которые позволяют получить текстовую или графическую информацию на основе анализа данных из открытых источников. На основе использования подобных сервисов разработана методика анализа данных в блокчейн-системе Bitcoin. В статье рассматриваются примеры проведения анализа данных в блокчейн-системе Bitcoin на примере разработанной методики. Исходными данными для анализа выступает адрес пользователя в сети Bitcoin, выходными данными является аналитическая справка об активности пользователя и его вовлеченности в нелегитимных схемах, например, в мошенничестве.

Ключевые слова: Bitcoin, блокчейн, транзакция, консенсус, расследование, инцидент, анализ, методика

DATA ANALYSIS METHODOLOGY IN THE BITCOIN BLOCKCHAIN SYSTEM

Ishchukova Evgenia A., Southern Federal University, 2 Chekhov St., Taganrog, 347900, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-6818-1608, e-mail: uaishukova@sfnedu.ru

Romanenko Kirill S., Southern Federal University, 2 Chekhov St., Taganrog, 347900, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0000-0003-2651-7529, e-mail: kirromanenko@sfnedu.ru

Filimonova Veronika V., Southern Federal University, 2 Chekhov St., Taganrog, 347900, Russian Federation,

undergraduate student, ORCID: 0000-0003-2424-1696, e-mail: verlit@sfnedu.ru

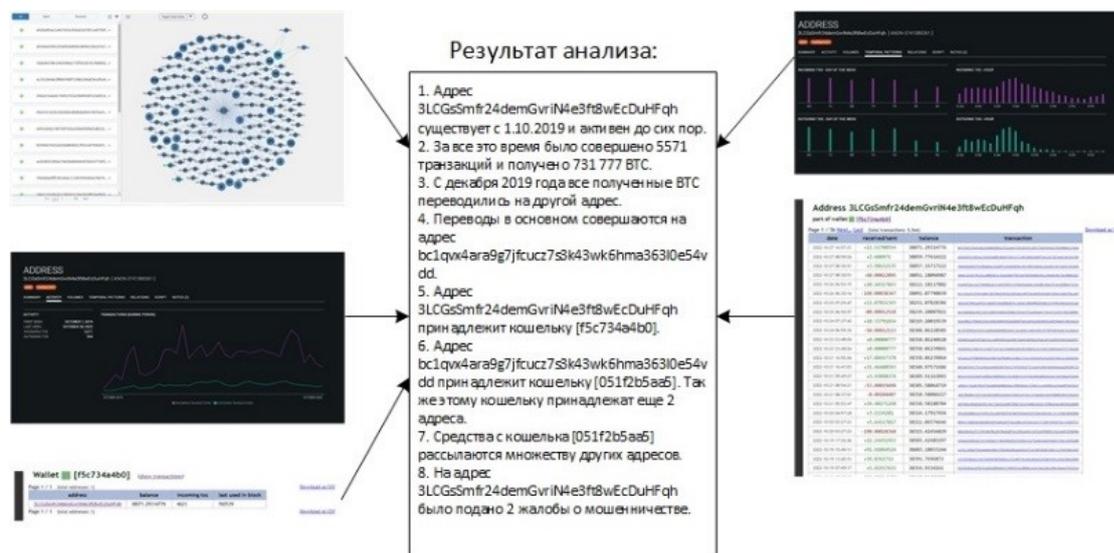
Salmanov Vyacheslav D., Southern Federal University, 2 Chekhov St., Taganrog, 347900, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0000-0003-4218-5296, e-mail: vsalmanov@sfnedu.ru

The article is devoted to the analysis of blockchain data based on the use of open sources. As an object of study, the Bitcoin blockchain platform was chosen as the most popular one. Data analysis of this platform is in the interests of both ordinary users of the system and in the interests of large exchanges, which are most often attacked by intruders. In addition, this issue is also of interest to the public sector in the field of investigating cybercrimes or other crimes committed using cryptocurrency. The article discusses the basics of building a Bitcoin blockchain system, as well as various ready-made services that allow you to get text or graphic information based on data analysis from open sources. Based on the use of such services, a methodology for analyzing data in the Bitcoin blockchain system has been developed. The article discusses examples of data analysis in the Bitcoin blockchain system using the developed methodology as an example. The initial data for the analysis is the user's address in the Bitcoin network, the output data is an analytical report on the user's activity and his involvement in illegitimate schemes, for example, in fraud.

Keywords: Bitcoin, blockchain, transaction, consensus, investigation, incident, analysis, methodology

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Широкое и часто неконтролируемое распространение блокчейн-технологий в последнее десятилетие привело к тому, что государства устанавливают законы по использованию и распространению криптовалюты внутри страны. Так, ряд стран принял требования обязательной регистрации данных на крупнейших криптовалютных биржах. В Российской Федерации данное требование гарантируется Федеральным законом № 259-ФЗ «О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1]. Несмотря на наличие федерального закона, актуальным остается вопрос отслеживания истории переводов внутри блокчейн-системы до того, как средства будут обналичены на бирже.

На сегодняшний день не существует универсальных методик, которые бы позволяли быстро и просто это сделать. В то же время исследователями все время предпринимаются попытки создания различных средств для анализа открытых данных блокчейн-систем. Так, в работе [2] описывается методология для повышения точности отслеживания перевода биткойнов, делая процесс отслеживания адаптируемым к контексту владения адресом и уклонения от отслеживания. В работе проводится эксперимент, чтобы проиллюстрировать применение разработанной методологии, используя исторические случаи кражи биткойнов в качестве примеров. Методология, представленная в этой статье, предлагает адаптировать процесс отслеживания к изменению владельца биткойнов с помощью профилирования адресов.

26 января 2018 г. обманным путем был получен доступ к криптовалюте NEM на сумму 58 миллиардов иен (530 миллионов долларов), а затем она была украдена с биржи Coincheck. Этот инцидент со взломом беспрецедентен не только потому, что это было одно из крупнейших в мире ограблений криптовалют, но и потому, что украденный NEM был продан, а деньги отмыты на крипторынке, который сами хакеры открыли. В статье [3] исследуется, как украденный NEM был отмыт в биткойнах на крипторынке путем расследования транзакций NEM и биткойнов.

В статье [4] описывается основанный на графах метод анализа кластеризации идентификационных данных и свойств валютных потоков транзакций биткойнов.

Новая система визуализации BitAnalysis для интерактивного исследования биткойн-кошелька описана в [5]. Система BitAnalysis содержит новые методы визуализации для представления информации о транзакциях в биткойнах и схему соединений потоков биткойнов как новые способы анализа, отслеживания и мониторинга торговой активности кластера тесно связанных кошельков.

В работе [6] рассматриваются основные функции блокчейна, их устойчивость к отслеживанию, существующие контрмеры, которые пытаются запутать активность пользователей. Кроме того, предлагается прототип программного решения, которое можно было бы использовать для реагирования на преступную деятельность, связанную с криптовалютами.

В настоящей работе предлагается рассмотреть методику выполнения анализа данных блокчейн-сети на основе анализа открытых данных с использованием готовых доступных инструментов визуализации (текстовой и графической).

БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМА BITCOIN

Несмотря на то, что системы распределенных реестров существовали задолго до появления блокчейна, интерес к этой отрасли стал стремительно расти после появления блокчейн-платформы Bitcoin. Первый блок в цепочке был создан 3 января 2009 г. в 18:15:05 по Гринвичу. Основные идеи для блокчейна Bitcoin были опубликованы автором Сатоши Накамото [6]. В настоящий момент платформа Bitcoin является платформой с открытым кодом. Ее исходные коды размещены в репозитории Гитхаб (Github) [7]. Любой желающий может принять участие в обсуждениях в вопросах совершенствования работы платформы, указать на возможные проблемы и уязвимости. Подробное техническое описание работы платформы приведено на ресурсе [8].

Транзакции могут транслироваться любым узлом в системе в любое время. Решение о включении транслируемых транзакций в новый блок зависит от узла (майнера), на котором запущен алгоритм доказательства работы (PoW, Proof of Work). Майнеры определяют выбор транзакции из списка необработанных транзакций, который называется мемпул (mem-pool). Выбор транзакций майнером зависит от комиссии за транзакцию (стандартная комиссия 1,000 Satoshi = 10 μ BTC = 0,01 mBTC = 0,0001 BTC за kB), которая формирует вознаграждение за усилия майнера в дополнение к вознаграждению. Приоритет получения транзакции зависит от майнера; как правило, майнеры предпочитают более высокие комиссии и более мелкие транзакции и часто таким образом расставляют приоритеты. Части транзакции, которые не потрачены на получателя, переводятся или обратно отправителю или включены в качестве комиссии. Комиссионные выплачиваются майнерам и могут быть использованы для увеличения скорости подтверждения транзакций, стимулируя майнеров расставлять приоритеты в выборе транзакций.

В основе создания и обработки транзакций лежит стековый язык программирования Script, который задает условия проверки для данных транзакции и обеспечивает корректность работы платформы. По своему содержанию транзакция может заключаться либо в переводе денежных средств, либо в получении денежных средств от системы. Перевод осуществляется посредством указания входов (тех транзакций, которые доступны пользователю для траты) и выходов (направления денежных средств на адреса пользователей сети). Получение денежных средств от системы возможно за создание нового блока и формирует транзакцию, которая содержит только входы. По способу обработки транзакции делятся на четыре основных типа: плата за хэш открытого ключа (P2PKH, Public Key Hash Fee), плата за хэш скрипта (P2SH, Pay perScript), коллективная подпись (Multisig), только открытый ключ (Pubkey). Подробнее с механизмами работы каждого вида транзакций можно ознакомиться в работе [9].

В сети Bitcoin уже долгое время существуют сервисы микшерования средств для анонимизации переводов и недоступности их к анализу. Основным смыслом заключается в том, что несколько разных пользователей создают единую транзакцию, направляют в нее входы на одинаковую сумму монет и формируют на выход переводы также на одинаковое количество монет. В этом случае становится затруднительным четкое определение траектории перемещения денежных средств. Проблема использования миксеров для смешивания транзакций рассмотрена в [10], при этом авторами предложен алгоритм идентификации транзакций, основанный на использовании нейронных сетей.

БАЗОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ РАБОТЫ С СИСТЕМОЙ BITCOIN

На сегодняшний день существуют различные инструменты для просмотра информации о транзакциях, а также визуализации. Рассмотрим наиболее популярные инструменты, использование которых позволит получить информацию из открытых источников.

К первому типу ресурсов отнесем различные блокчейн-обозреватели, такие как Blockchain Explorer [12] или Blockchain Chair [13]. Обзорщик Blockchain Explorer [12] сосредоточен на предоставлении данных о двух самых распространенных криптовалютах: Bitcoin и Ethereum, в то время как Blockchain Chair [13], помимо двух вышеупомянутых криптовалют, также предоставляет информацию о таких системах, как Litecoin, Corando, Ripple, Polkadot, Dogecoin и др. Такие обозреватели позволяют посмотреть информацию о транзакциях и блоках для разных криптовалют, получить графическое представление динамики изменения технических характеристик сети и многое другое. Также есть обозреватели, нацеленные не на общую аналитику, а отражающие связь транзакций, блоков и кошельков. Примером такого сервиса является онлайн-ресурс walletexplorer [14].

Второй тип ресурсов – сервисы графической аналитики. Частично эту функцию выполняют и блокчейн-обозреватели, но не в полном объеме. Поэтому отдельно можно выделить обозреватели, которые предоставляют в основном графическое представление данных, что удобно для аналитики работы всей блокчейн-системы. Так, сервис oxt.me [15] позволяет визуализировать информацию из системы блокчейн в виде диаграмм и графиков, отражающих изменения во времени для блокчейна.

Третий тип ресурсов – это базы данных, которые накапливают информацию о подозрительных или неблагонадежных адресах блокчейн-сервисов в процессе их эксплуатации. Если адрес был уличен в использовании для мошеннических целей, например, указывался при вымогательстве денег, то данный адрес заносится в базу. Это можно сравнить с тем, как банки регистрируют телефонные

номера, которые используют мошенники для совершения фишинговых атак. Примером такого справочного сервиса служит ресурс Bitcoin Who's Who [16], который предназначен для получения данных об использовании кошельков в противоправной деятельности. Этот сервис «помечает» адреса, используемые в мошеннических действиях. Сервис помогает вернуть украденные биткойны, рассказывает о юридических услугах по продаже биткойнов. Другим примером является сервис Bitcoin Abuse Database, который предназначен для получения данных об использовании кошельков в незаконных действиях. Он отслеживает биткойн-адреса, используемые программами-вымогателями, шантажистами, мошенниками и т. д. Служба с открытым исходным кодом находится по адресу [17]. Еще одним хорошим сервисом для выявления неблагонадежных блокчейн-адресов является сервис scam-alert [18], который накапливает базу адресов в результате жалоб пользователей и позволяет проверить любой адрес сети.

К четвертому типу ресурсов можно отнести те ресурсы, которые позволяют проследить связи между денежными переводами в блокчейн-сети с использованием средств визуализации. К таким сервисам, например, можно отнести приложение Maltego [19], которое предназначено для сбора информации из различных баз данных криптовалют, а также для представления их в графическом формате. Приложение позволяет сводить воедино информацию, полученную из открытых и закрытых источников, позволяет визуализировать агрегированные данные. Одним из главных минусов бесплатной версии является необходимость вручную устанавливать плагины для работы с приложением с целью получения как можно большего объема информации. Приложение позволяет осуществить графическое отображение информации по любому объекту: сайту, криптокошельку, странице человека с точностью до текущей геопозиции и IP-адреса. Также одним из лидеров по качеству представления связей в транзакциях является онлайн-сервис blockpath [20].

Все рассмотренные ресурсы используют простое отображение (текстовое или графическое) открытых данных системы блокчейн и не включают в себя элементы интеллектуальной поисковой системы.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА ДЛЯ РАССЛЕДОВАНИЯ ИНЦИДЕНТОВ В СИСТЕМЕ BITCOIN

Предлагаемая методика основывается на том, что аналитику известен адрес в сети Bitcoin. Его задача – сформировать как можно более полный аналитический отчет об активности данного адреса и легитимности совершаемых адресом действий. Для этого необходимо провести анализ с использованием различных готовых инструментов, следуя следующей последовательности действий:

Шаг 1. С использованием различных блокчейн обозревателей получить информацию об аккаунте, в отношении которого ведется расследование. Определить его баланс, последнюю активность, количество совершенных транзакций и другую полезную информацию.

Шаг 2. С использованием инструментов визуализации построить граф переходов состояний для транзакций адреса. Определить наиболее активные адреса.

Шаг 3. С использованием сервисов для определения связей между кошельками определить адреса сети блокчейн, связанные переводами с исследуемым адресом. Сопоставить полученные данные с данными, полученными на шаге 2.

Шаг 4. С использованием сервисов графической аналитики определить периоды наибольшей и наименьшей активности адреса.

Шаг 5. С использованием сервиса с базой данных подозрительных блокчейн-адресов проверить информацию об исследуемом адресе и всех связанных с ним адресах.

Шаг 6. Провести аналитику полученных данных и подготовить отчет об активности исследуемого адреса.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Рассмотрим на конкретных примерах, какой результат можно получить в результате применения предложенной методики анализа.

Пример 1. Исходные данные для анализа: адрес сети Bitcoin 3LCGsSmfr24demGvriN4e3ft8wEcDuHFqh.

Выполним шаги анализа в соответствии с методикой.

Шаг 1. С помощью сервиса blockchain [12] посмотрим информацию об исследуемом адресе. Определим, что аккаунтом было совершено 6071 транзакция, баланс – 40 205,13 BTC. Было получено 992 981,42 BTC (рис. 1).

Шаг 2. Посмотрим информацию об этом аккаунте в blockpath [20]. Из рисунка 2 видно, что первая активность была 01.10.2019. Аккаунтом до сих пор пользуются (последняя активность была сегодня – 09.02.2022). Построим граф активности (рис. 3), из которого видно, что адрес много майнит. Посмотрим только совершенные транзакции (рис. 4). В основном все биткойны переводятся на единственный адрес bc1qvx4ara9g7jfcucz7s3k43wk6hma363l0e54vdd. Посмотрим операции этого адреса (рис. 5). Видно, что с этого адреса биткойны рассылаются дальше на множество других адресов.

3LCGs-uHFqh
 Base58 (P2SH)
 Биткойн адрес
 3LCGsSmfr24demGvriN4

Биткойн Баланс
 40205.12819846 • \$912 990 112

К

Резюме

Этот адрес потерял 6 071 транзакций на биткойн-цепочках. Всего было получено 992981,54655040 BTC \$22 548 922 853 и отправлено 952776,41835194 BTC \$21 635 932 740. Текущее значение этого адреса: 40205,12819846 BTC \$912 990 112.

Всего получено **992981.54655040 БТД**
 \$22 548 922 853

сделки **6 071**

Рисунок 1 – Информация об аккаунте в blockchain

CGsSmfr2...)
 548,112.35899482
 6117

Add Address Edit Search

CoinCheck
 3LCGsSmfr24demGvriN4e3ft8wEcDuHFqh

TXs 6 117	First Seen 01.10.2019 Last Seen 09.02.2023	Received 399,840.81844363 Sent -148,271.54055119	548,
---------------------	---	---	-------------

Рисунок 2 – Информация об аккаунте в blockpath

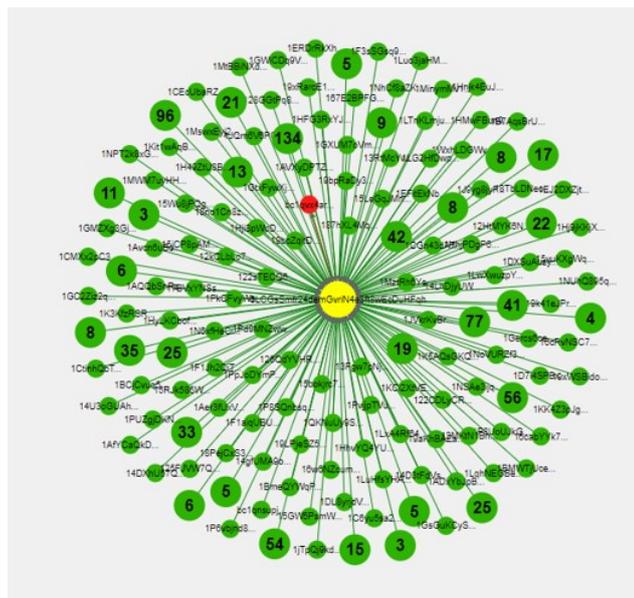


Рисунок 3 – Граф активности

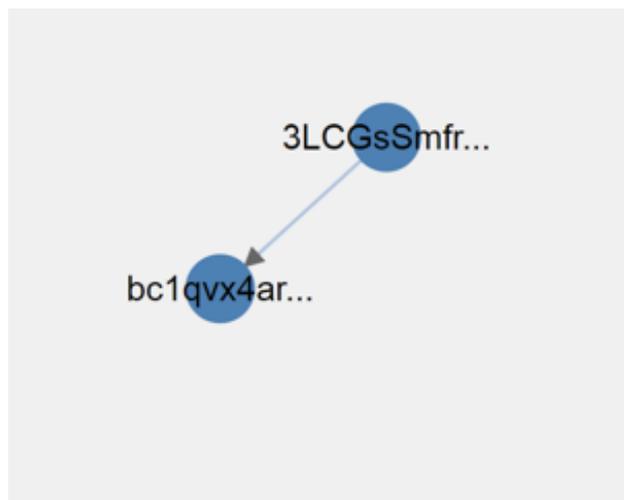


Рисунок 4 – Совершенные транзакции

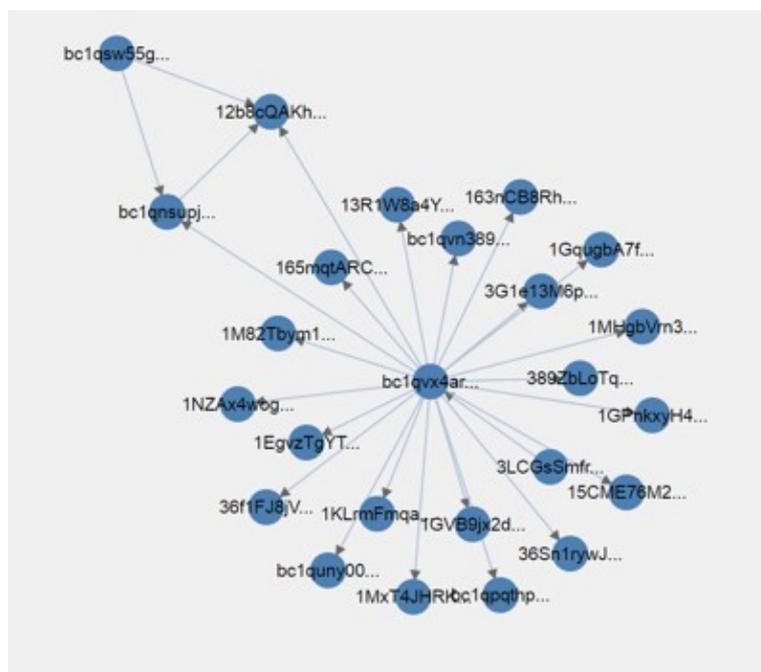


Рисунок 5 – Операции у второго аккаунта

Шаг 3. Посмотрим информацию об адресе в с помощью сервиса walletexplorer [14] (рис. 6). В walletexplorer доступна информация обо всех транзакциях, ее можно скачать для анализа в формате CSV. Из рисунка 6 видно, что этот аккаунт принадлежит кошельку [f5c734a4b0] и что это единственный адрес данного кошелька. Определим транзакции кошелька [f5c734a4b0]. Из рисунка 6 видно, что средства часто переводятся на кошелек [051f2b5aa5]. На рисунке 7 показаны транзакции кошелька [051f2b5aa5]. Видно, что из него выводятся средства на множество других адресов. На рисунке 8 показана группа адресов, которая относится к этому кошельку. Это как раз те адреса, которые были замечены при анализе в сервисе Blockpath.

Страница 1 / 61 Следующая... Последняя (всего транзакции: 6 067) Скачать в формате CSV

дата	получено/отправлено	баланс	сделка
2023-02-08 17:11:29	[0000224081] +46.64544518	40158.90148585	60e98464e26e136e78fd
2023-02-08 17:07:31	[0000224081] +17.54239506	40112.25604067	3e04c4cf9d9995a82f3a
2023-02-08 10:57:37	[0000224081] +8.49606346	40094.71364561	40a007b93a077e2fc889
2023-02-08 09:24:44	-40. [051f2b5aa5] (-0,00068349) платеж	40086.21758215	bf934e2197a8c2ffa03e
2023-02-07 23:24:21	[0000224081] +26.21982256	40126.21826564	6270365bd872e688fefd
2023-02-07 21:29:44	[0000224081] +3.14997631	40099.99844308	425b6bf7349ef7adc85
2023-02-07 21:00:43	[0000224081] +11.95008506	40096.84846677	2eacac9cc008c1f9407b
2023-02-07 20:39:02	[0000224081] +1.15645318	40084.89838171	087405f31d889a6b41a6
2023-02-07 16:16:05	[0000224081] +14.53404215	40083.74192853	22f13a78deded8dc9a03
2023-02-07 11:00:57	[0000224081] +17.7696478	40069.20788638	dca0047fbcce9699ba53
2023-02-06 07:26:14	[0000224081] +42.87905276	40051.43823858	4718d5ae108fb0f9447b
2023-02-04 16:43:55	[0000224081] +10.43481629	40008.55918582	8509ab62b62b68e59f49
2023-02-04 14:29:13	[0000224081] +21.4893773	39998.12436953	4cdfaad77164d70cb20a
2023-02-04 13:36:38	[0000224081] +6.79609826	39976.63499223	d8eeec7d00aacc2a88e63
2023-02-04 11:58:35	[0000224081] +2.92111047	39969.83889397	a53a036114a0a06a433a
2023-02-04 10:15:43	-90. [051f2b5aa5] (-0,00062223) платеж	39966.9177835	e062cd73dbd0c754600e
2023-02-03 12:38:38	[0000224081] +27.79405651	40056.91840573	6064393defa86ce587f2
2023-02-03 12:23:10	[0000224081] +45.92877509	40029.12434922	3a0052a0f579233ac37a
2023-02-03 10:19:42	[0000224081] +30.50008976	39983.19557413	c4eb74a65e8888f8bec2
2023-02-03 07:50:59	[0000224081] +25.30731752	39952.69548437	c4c913d59966fed421d
2023-02-03 06:53:57	[0000224081] +2.17620288	39927.38816685	71da1634cc1db394e0e8
2023-02-03 06:29:44	[0000224081] +3.87828966	39925.21196397	f4bf6e0d0d1cc8ea33d
2023-02-03 06:29:44	-80. [051f2b5aa5] (-0,00020000) платеж	39921.33367431	55c037d56d21cc5f06f3

Рисунок 6 – Информация об адресе в walletexplorer

Страница 1 / 801 Следующая... Последняя (всего транзакции: 800 077) Скачать в формате CSV

дата	получено/отправлено	баланс	сделка
2023-02-08 18:48:38	-0,0013539 [94115bbb65] (-0,0002254) платеж	247.57150148	80b6d28dc3d6602d231d
2023-02-08 18:18:33	-0,035 [00000f693e] (-0,0002285) платеж	247.57287792	88492ccea107e96de102
2023-02-08 18:18:33	-0,0026601 [0000bd8219] (-0,0002254) платеж	247.60790077	7e6d89ecc4d2877ae5ed
2023-02-08 18:00:00	-0,025236 [000000392b] (-0,0002123) платеж	247.61058341	4b530eccc0c255020e0d
2023-02-08 18:00:00	-0,02991232 [000061220f] (-0,0002153) платеж	247.63584064	fe53e2d0f0d7f3d28854
2023-02-08 17:16:17	-0,0010234 [0000bd8219] (-0,0002123) платеж	247.66577449	9a1ebcd55e886798433b
2023-02-08 17:07:31	-0,03337 [0db47d9470] (-0,0002122) платеж	247.66681912	105175bd45cd2d59a608
2023-02-08 17:04:27	-0,014298 [00002affc9] (-0,0001938) платеж	247.70021034	30e159bd4e616a030c7c
2023-02-08 17:04:27	-0,033 [00002affc9] (-0,0001938) платеж	247.71452772	41f09c59bc103924a12dc
2023-02-08 17:04:27	-0,0254 [fa3cf5f716] (-0,0001925) платеж	247.7475471	fbc52173bfa7a3083d72
2023-02-08 17:04:27	-0,0074 [fa3cf5f716] (-0,0001925) платеж	247.77296635	86c34f503cffe6db2858
2023-02-08 17:04:27	-0,01 [04359d0e85] (-0,0001966) платеж	247.7803856	77d59001c0e4d904444b
2023-02-08 17:04:27	-0,00281037 [0000001bce] (-0,0001966) платеж	247.79040526	ef1c7afafcc09130b431

Рисунок 7 – Транзакции кошелька [051f2b5aa5]

Кошелек [051f2b5aa5] (показать транзакции)

Страница 1 / 1 (всего адресов: 3)

[Скачать в формате CSV](#)

адрес	баланс	входящие транзакции	последний использованный в блоке
bc1qnsupj8eqya02nm8v6tmk93zslu2e2z8chlmcj	240.84164788	26818	775613
bc1qsw55gkezdysgy6jg5fuxd6upmrc5r59llefly	6.7298536	28643	775607
bc1qvx4ara9g7jfcucz7s3k43wk6hma363l0e54vdd	0.	1132	775573

Рисунок 8 – Адреса, принадлежащие кошельку [051f2b5aa5]

Шаг 4. Посмотрим информацию об аккаунте в Oxt.me [15]. Видно, что за первый месяц было получено более 31 684 BTC. Резкий скачок был в ноябре, а дальше число BTC равномерно увеличивалось. Построим график активности. Видно, что каждый месяц с декабря адрес отправлял столько же, сколько получал (рис. 9).

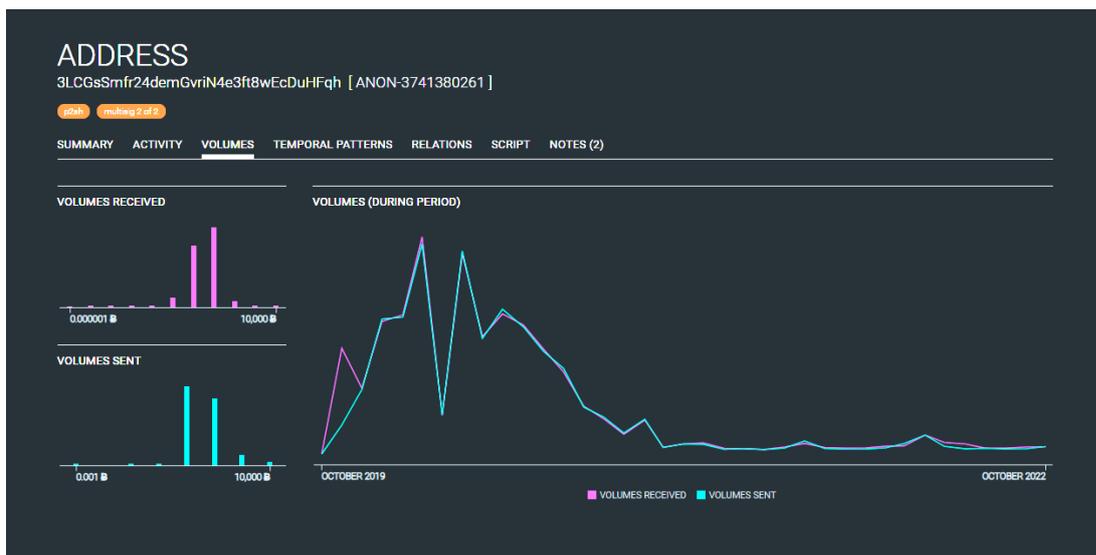


Рисунок 9 – Движение BTC в аккаунте

Шаг 5. Проверим адреса в bitcoinwhoswho [16]. На рисунке 10 описаны мошеннические предупреждения с упоминанием этого адреса, история транзакций.

ОТЧЕТ ОБ АДРЕСАХ BITCOIN Предупреждение о мошенничестве: этот адрес был отмечен как мошеннический (2 раза)

[Смотреть](#) [Сообщить о мошенничестве](#) [Добавить метку](#)

Адрес BTC	3LCGsSmfr24demGvriN4e3ft8wEcDuHFqh	# Внешний вид веб-сайта	6	
Текущий баланс	40226.22529074 = 902 574 723,17 долл. США	Всего получено	993002,64364268 = 22 280 467 026,65 долларов США	
# транзакций	6072	# Выходные транзакции	Загрузка...	
Первая транзакция	30 сен 19	Последняя транзакция	9 фев 23	
Последний известный ввод	15LeGqjMnZ... 9 фев 23	Последний известный вывод	Загрузка... Загрузка...	
Повторяющиеся входы от (50 последних транзакций)	Загрузка...	Повторные выходы на (50 последних транзакций)	Загрузка...	
Теги	3 тега (пожалуйста, войдите, чтобы увидеть теги)			

Предупреждение о мошенничестве

Название мошенничества	URL-адрес	Изображение	Дата
mail exchange14Emailiex	https://www.mailiex.com/tarde.html		16.20 декабря

Рисунок 10 – Проверка адреса 3LCGsSmfr24demGvriN4e3ft8wEcDuHFqh

Шаг 6. Проанализировав полученную информацию, сформируем отчет:

1. Адрес 3LCGsSmfr24demGvriN4e3ft8wEcDuHFqh существует с 01.10.2019 и активен до сих пор.
2. За все это время было совершено 6071 транзакция и получено 992 981,42 BTC.
3. С декабря 2019 г. все полученные BTC переводились на другой адрес.
4. Переводы в основном совершаются на адрес bc1qvx4ara9g7jfcucz7s3k43wk6hma36310e54vdd.
5. Адрес 3LCGsSmfr24demGvriN4e3ft8wEcDuHFqh принадлежит кошельку [f5c734a4b0].
6. Адрес bc1qvx4ara9g7jfcucz7s3k43wk6hma36310e54vdd принадлежит кошельку [051f2b5aa5].

Также этому кошельку принадлежат еще 2 адреса.

7. Средства с кошелька [051f2b5aa5] рассылаются множеству других адресов.
8. На адрес 3LCGsSmfr24demGvriN4e3ft8wEcDuHFqh было подано 2 жалобы о мошенничестве.

Пример 2. Исходные данные для анализа: адрес сети Bitcoin 1LGAVQYU52QemGhbV3SQmy8oLmDwAs7QJu.

Выполним шаги анализа в соответствии с методикой.

Шаг 1. С помощью сервиса blockchain [12] посмотрим информацию об исследуемом адресе. Определим, что аккаунтом было совершено 416 транзакций, баланс – 7 806,17 BTC. Получено было 419 207,52 BTC.

Шаг 2. Посмотрим информацию об этом аккаунте в blockpath [20]. Первая активность адреса была зафиксирована 17.12.2018, и адресом пользуются до сих пор. В обозревателе blockpath [20] видно, что данный адрес в основном взаимодействует с шестью другими (рис. 12).

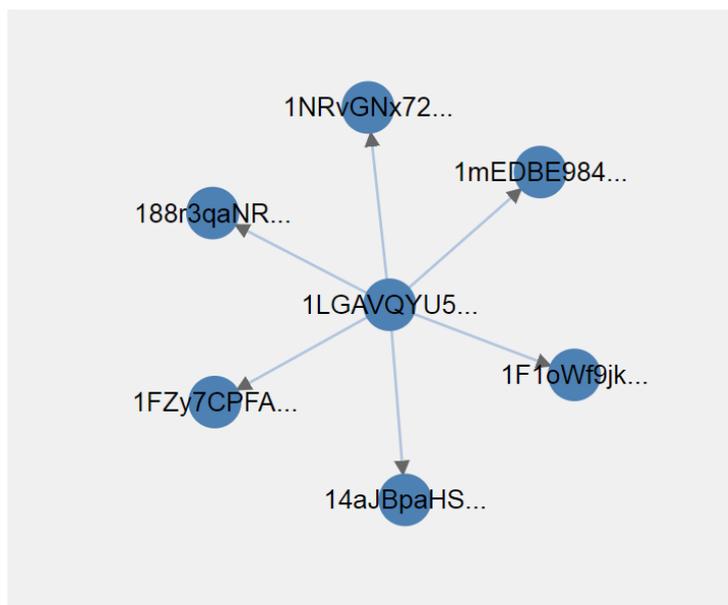


Рисунок 11 – Связь адресов

Шаг 3. С помощью сервиса walletexplorer [14] определим, что анализируемый адрес принадлежит кошельку [7ed62b7a1d]. Сервис позволяет определить, что основное взаимодействие происходит с кошельками (как отправка, так и получение): [fbbe06de40], [3032bef98e], [31a735fc4c], [22e629d463], [f8be5dd82a], к которым принадлежат адреса, замеченные в blockpath.com:

- [fbbe06de40] – 1FZy7CPFA2UqqQJYUA1cG9KvdDFbSMBJYG;
- [3032bef98e] – 1mEDBE984KiShzJcPUM8M4EF61DMUGxWv;
- [31a735fc4c] – 1NRvGNx72TJAw6eJrFxpz7mdxQfxNSBdkk;
- [f8be5dd82a] – 1F1oWf9jkERoyYgUBMbSaw7f6M9LD7tet2;
- [22e629d463] – 188r3qaNRfMvebuPDVEHBzKmWfTSdBj7p.

Проанализировав эти кошельки, мы видим, что эти 5 адресов в основном взаимодействуют друг с другом и принадлежат разным кошелькам. В blockpath.com мы видим, что помимо друг друга эти адреса взаимодействуют еще с 5–7 кошелькам, те, в свою очередь, тоже взаимодействуют с небольшим количеством кошельков и т. д. Оперировать эти кошельки большими суммами. Например, 12.01.2023 адрес 1LGAVQYU52QemGhbV3SQmy8oLmDwAs7QJu получил 1399 BTC, а ранее отправил другому кошельку 1320 BTC.

Если ввести в поисковик адрес 1LGAVQYU52QemGhbV3SQmy8oLmDwAs7QJu находится только статья из новостного сервиса benzinga, где высказываются опасения о сильном влиянии владельца данного адреса на курс биткоина из-за высокой суммы транзакции.

Шаг 4. Посмотрим информацию об аккаунте в Oxt.me [15]. Видно, что с декабря 2018 г. до апреля 2022 г. адрес был практически не активен. Построим график активности. Видно, что каждый месяц с марта 2022 г. адрес получает больше, чем отправляет.

Шаг 5. Проверим адреса в Scam-alert [18]. Сервис показывает, что этот адрес безопасный и никаких жалоб на него не было. Аналогичную информацию выдает сервис bitcoinwhoswho [16].

Шаг 6. Проанализировав полученную информацию, сформируем отчет:

1. Адрес 1LGAVQYU52QemGhbV3SQmy8oLmDwAs7QJu существует с 17.12.2018 и активен до сих пор.

2. За все это время было совершено 416 транзакций и получено 419 207,52 BTC.

3. С марта 2018 г. адрес активно используется, получает BTC больше, чем отправляет.

4. Переводы в основном совершаются на 5 адресов.

5. Адрес 1LGAVQYU52QemGhbV3SQmy8oLmDwAs7QJu принадлежит кошельку [7ed62b7a1d].

6. Адреса и кошельки, которые связаны переводами с анализируемым адресом:

[fbbe06de40] – 1FZy7CPFA2UqqQJYUA1cG9KvdDFbSMBJYG;

[3032bef98e] – 1mEDBE984KiShzJcPUM8M4EF61DMUGxWv;

[31a735fc4c] – 1NRvGNx72TJAw6eJrFxpz7mdxQfxNSBdkk;

[f8be5dd82a] – 1F1oWf9jkERoyYgUBMbSaw7f6M9LD7tet2;

[22e629d463] – 188r3qaNRfFMVebuPDVEHBzKmWfTSdBj7p.

7. На адрес 1LGAVQYU52QemGhbV3SQmy8oLmDwAs7QJu не подавались жалобы о мошенничестве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За 14 лет своего существования блокчейн-платформа Bitcoin получила свое призвание и продолжает свое развитие, совершенствуя механизмы анонимизации и безопасности транзакций своих пользователей. Наряду с этим появляются новые сервисы, помогающие еще сильнее сокрыть информацию о переводах. Параллельно происходит борьба исследователей со злоумышленниками. Для этого создаются сервисы, вырабатываются новые методики для расследования преступлений и деанонимизации переводов. Часто каждая новая задача требует совершенствования сервисов, их доработки, новых подходов к аналитике.

В данной работе была рассмотрена методика, использующая общедоступные сервисы, варианты их использования. Представлены существующие инструменты анализа транзакций и разделены на четыре группы: для общей аналитики, визуализации, базы данных мошеннических адресов, для определения движения средств (графы). Были проанализированы два адреса, на их примере показана методика сбора информации в открытых источниках, сделаны некоторые выводы об этих адресах, их переводах, взаимодействии с другими пользователями. Следующим шагом для данной работы является формирование базы публичных адресов, в том числе бирж, накопление меток об адресах, что позволит различать встречаемые адреса на этапе расследования, делать вывод о случайно встречаемых адресах или целенаправленных сборах средств злоумышленниками, преступными группировками, хакерами.

Список источников

1. Федеральный закон «О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». – 31.07.2020. – № 259-ФЗ. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_358753/.

2. Tironsakkul, T. Context matters: Methods for Bitcoin tracking / T. Tironsakkul, M. Maarek, A. Eross // *Forensic Science International: Digital Investigation*. – 2022. – Vol. 42. – P. 1–22.

3. Tsuchiya, Y. How cryptocurrency is laundered: Case study of Coincheck hacking incident / Y. Tsuchiya, N. Hiramoto // *Forensic Science International: Reports*. – 2021. – Vol. 4. – P. 1–7.

4. Zhao, C. A graph-based investigation of bitcoin transactions / C. Zhao, Y. Guan // *Digital Forensics 2015: Advances in Digital Forensics XI*. – 2015. – P. 79–95.

5. Sun, Y. BitAnalysis: A Visualization System for Bitcoin Wallet Investigation / Y. Sun, H. Xiong, S. Yiu // *IEEE Transactions on Big Data*. – 2015. – Vol. 14, № 8. – P. 1–16.

6. Gagneja, K. Traceability of Cryptocurrency Transactions using Blockchain Analytics / K. Gagneja, A. Goode, D. Rentos // *International Journal of Computing and Digital Systems*. – 2020. – Vol. 9. – P. 1–7.

7. Nakamoto, S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System / S. Nakamoto. – URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.

8. Биткоин. – URL: <https://github.com/bitcoin/bitcoin>.

9. Bitcoin Developer. Blockchain. – URL: https://developer.bitcoin.org/devguide/block_chain.html.

10. Ищукова, Е. А. Криптографические основы блокчейн-технологий / Е. А. Ищукова, С. П. Панасенко, К. С. Романенко, В. Д. Салманов. – Москва : ДМК-Пресс, 2022. – 302 с.

11. Liu, M. Detecting Roles of Money Laundering in Bitcoin Mixing Transactions: A Goal Modeling and Mining Framework / M. Liu, H. Chen, J. Yan // *Frontiers in Physics*. – 2021. – № 9. – Article № 665399. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2021.665399/full>.
12. *BlockchainExploerer*. – URL: <https://www.blockchain.com/ru/explorer>.
13. *Blockchair*. – URL: <https://blockchair.com/ru>.
14. Обзорщик блоков биткоин с группировкой адресов и маркировкой кошельков. – URL: <https://www.walletexplorer.com/>.
15. Блокчейн от людей для людей. – URL: <https://oxt.me/>.
16. Поиск биткоин-адресов. – URL: <https://www.bitcoinwhoswho.com/>.
17. The official repository for BitcoinAbuse.com. – URL: <https://github.com/aarreedd/Bitcoinabuse.com>.
18. Проверка мошенничества ScamAlert. – URL: <https://scam-alert.io/>.
19. Maltego. – URL: <https://www.maltego.com/>.
20. *Blockpath Graphical Exploerer*. – URL: <https://blockpath.com/search/addr?q=1LTvYhbpur5nZMe3hifMGgq28MMBzRgNdC&action=graph>.

References

1. *Federalnyy zakon «O tsifrovyykh finansovykh aktivakh, tsifrovoy valyute i o vnesenii izmeneniy v otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii»* [Federal Law “On Digital Financial Assets, Digital Currency and Amendments into separate legislative acts of the Russian Federation”], 31.07.2020, no. 259-FZ. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_358753/.
2. Tironsakkul, T., Maarek, M., Eross, A. Context matters: Methods for Bitcoin tracking. *Forensic Science International: Digital Investigation*, 2022, vol. 42, pp. 1–22.
3. Tsuchiya, Y., Hiramoto N. How cryptocurrency is laundered: Case study of Coincheck hacking incident // *Forensic Science International: Reports*, 2021, vol. 4, pp. 1–7.
4. Zhao, C., Guan Y. A graph-based investigation of bitcoin transactions. *Digital Forensics 2015: Advances in Digital Forensics XI*, 2015, pp. 79–95.
5. Sun, Y., Xiong, H., Yiu, S. Bit Analysis: A Visualization System for Bitcoin Wallet Investigation. *IEEE Transactions on Big Data*, 2015, vol. 14, no. 8, pp. 1–16.
6. Gagneja, K., Goode A., Rentos D. Traceability of Cryptocurrency Transactions using Blockchain Analytics. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 2020, vol. 9, pp. 1–7.
7. Nakamoto, S. *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. Available at: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
8. *Bitcoin*. Available at: <https://github.com/bitcoin/bitcoin>.
9. *Bitcoin Developer. Blockchain*. Available at: https://developer.bitcoin.org/devguide/block_chain.html.
10. Ishhukova, E. A., Panasenko, S. P., Romanenko, K. S., Salmanov, V. D. *Kriptograficheskie osnovy blokcheyn-tehnologii* [Cryptographic foundations of blockchain technologies] Moscow, DMK-Press, 2022. 302 p.
11. Liu, M., Chen, H., Yan, J. Detecting Roles of Money Laundering in Bitcoin Mixing Transactions: A Goal Modeling and Mining Framework. *Frontiers in Physics*, 2021, no. 9, article № 665399. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2021.665399/full>.
12. *BlockchainExploerer*. Available at: <https://www.blockchain.com/ru/explorer>
13. *Blockchair*. Available at: <https://blockchair.com/ru>
14. *Bitcoin block explorer with address grouping and wallet labeling*. Available at: <https://www.walletexplorer.com/>.
15. *Blockchain from people for people*. Available at: <https://oxt.me/>.
16. *Poisk bitkoin-adresov* [Finding bitcoin addresses]. Available at: <https://www.bitcoinwhoswho.com/>.
17. *The official repository for BitcoinAbuse.com*. Available at: <https://github.com/aarreedd/Bitcoinabuse.com>.
18. *Fraud check ScamAlert*. Available at: <https://scam-alert.io/>.
19. *Maltego*. Available at: <https://www.maltego.com/>.
20. *Blockpath Graphical Exploerer*. Available at: <https://blockpath.com/search/addr?q=1LTvYhbpur5nZMe3hifMGgq28MMBzRgNdC&action=graph>.

Статья поступила в редакцию 10.02.2023; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 16.02.2023.

The article was submitted 10.02.2023; approved after reviewing 15.02.2023; accepted for publication 16.02.2023.

УДК 004.001

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Глебов Виктор Валерьевич, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

магистрант, ORCID: 0000-0002-6691-3297, e-mail: info@glebov-work.ru

Марьенков Александр Николаевич, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-1378-3553, e-mail: marenkovan17@gmail.com

В статье проанализированы наиболее часто применяемые алгоритмы обнаружения человека на изображении, рассмотрены принципы их работы, выявлены их достоинства и недостатки. В качестве рассматриваемых технологий были представлены следующие алгоритмы обнаружения человека на изображении: метод вычитания фона на основе смешанной модели Гаусса, модели на основе нейронных сетей You Only Look Once (YOLO) v3 и YOLOv5. Выполнен подробный разбор указанных алгоритмов, показаны их основные особенности и приведена их техническая реализация. Проведено тестирование моделей на основе нейронных сетей YOLOv3 и YOLOv5, по итогам которого был сделан вывод о возможности применения данных алгоритмов для решения задачи аутентификации человека, в основе которого используются алгоритмы поиска человека на изображении.

Ключевые слова: поиск человека на изображении, YOLO, метод вычитания фона, информационная безопасность, нейросетевые модели, компьютерное зрение

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR DETECTING A PERSON IN AN IMAGE

Glebov Viktor V., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

undergraduate student, 0000-0002-6691-3297, e-mail: info@glebov-work.ru

Marenkov Alexander N., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0003-1378-3553, e-mail: marenkovan17@gmail.com

The article analyzes the most commonly used algorithms for detecting a person in an image, discusses the principles of their work, and identifies their advantages and disadvantages. The following algorithms for detecting a person in an image were presented as technologies under consideration: a background subtraction method based on a mixed Gaussian model, models based on You Only Look Once (YOLO) v3 and YOLOv5 neural networks. A detailed analysis of these algorithms is carried out, their main features are shown, and their technical implementation is given. Models based on YOLOv3 and YOLOv5 neural networks were tested, as a result of which it was concluded that these algorithms can be used to solve the problem of human authentication, which is based on algorithms for searching for a person in an image.

Keywords: search for a person in an image, YOLO, background subtraction method, information security, neural network models, computer vision

ВВЕДЕНИЕ

Технологии поиска людей в кадре, и в частности распознавание лиц, применяются в различных сферах: в системах аутентификации пользователей, при обеспечении безопасности в местах большого скопления людей, в криминалистике, для автоматизации процесса подсчета людей на проходной, телеконференциях, для поиска людей по фото в различных базах фотоснимков и др. В то же время существующие решения обладают рядом недостатков, которые критичны в некоторых сферах применения. Например, для задачи подсчета количества людей на проходной можно пренебречь точностью распознавания человека, в то время как для задачи аутентификации человека точностью распознавания пренебрегать нельзя [1], поскольку извлеченные из объекта признаки могут обладать недостаточной информацией, что повлечет увеличение количества ошибок распознавания как первого, так и второго рода. В связи с этим поиск оптимального алгоритма обнаружения человека на изображении для различных задач является актуальным [2, 3]. Наиболее распространенными подходами к обнаружению объектов является методика вычитания фона и модели на основе нейронных сетей YOLOv3 и YOLOv5. В данной статье будет приведен подробный разбор указанных подходов и сделаны выводы о их применимости для решения задачи аутентификация человека.

МЕТОД ВЫЧИТАНИЯ ФОНА

Вычитание фона – популярный метод обнаружения объекта на переднем плане путем сегментации из кадров камеры наблюдения. Камера при этом может быть стационарной, чисто трансляционной или же мобильной по своей природе [4]. Данный метод предназначен для попытки обнаружения движущихся объектов при помощи разницы между текущим кадром и эталонным кадром попиксельно или поблочно. Система отсчета широко известна как «фоновое изображение», «фоновая модель» или «модель среды». Основной характеристикой фоновой модели считается адаптивность к изменениям в динамических сценах. Обновление фоновой информации через регулярные промежутки времени является распространенным решением [5], но также распространено решение без обновления фоновой информации [6]. Наиболее распространенным подходом, используемым в данном методе, является смесь гауссовой модели. Штауффер и Гримсон [7] представили смешанную модель Гаусса, которая чувствительна к изменениям в динамических сценах, происходящих из-за изменений освещения, посторонних событий и т. д. Вместо моделирования значений всех пикселей изображения как одного конкретного типа распределения были смоделированы значения каждого пикселя как смесь гауссианов. Со временем новые значения пикселей обновляют смесь Гаусса (MOG) с использованием сплайн-аппроксимаций К-средних. В литературе предлагается множество подходов к улучшению MOG [8]. В общем случае при построении фона в данной методике считается, что для любых пикселей изображения известна история изменения его интенсивности на всех предшествующих кадрах. Тогда вероятность, что наблюдаемое значение может быть представлено смесью из гауссовых распределений, вычисляется по формуле (1):

$$P(x_k) = \sum_{j=1}^8 \omega_j^k N(x_k | \mu_j^k, \Sigma_j^k), \quad (1)$$

где ω_j^k – вес j -го распределения Гаусса для видеокadra с порядковым номером k ; μ_j^k – математическое ожидание; Σ_j^k – среднеквадратичное отклонение; $N(x_k | \mu_j^k, \Sigma_j^k)$ – функция плотности нормального распределения, вычисляемая по формуле (2):

$$N(x_k | \mu_j^k, \Sigma_j^k) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{D}{2}}} e^{-\frac{1}{2}(x_k - \mu_j^k)^T \Sigma_j^k^{-1} (x_k - \mu_j^k)}. \quad (2)$$

Предполагается, что компоненты цвета являются независимыми и имеют одинаковое среднеквадратичное отклонение. Именно поэтому матрица имеет вид $\Sigma_j^k = (\sigma_j^k)^2 E$, где E – единичная матрица. Данное предположение позволяет снизить вычислительную трудоемкость метода за счет отсутствия необходимости вычислять матрицу, которая будет обратной к матрице ковариации в формуле 2. Таким образом, задано распределение наблюдаемых значений цвета для каждого пикселя. Новое значение будет представляться одной из основных компонент построенной смеси гауссовых распределений и использоваться для обновления параметров модели [9]. Распределения сортируются в порядке уменьшения величины. Такая сортировка предполагает, что пиксель фона отвечает распределению с большим весом и малой дисперсией. На рисунке 1 представлен пример работы системы с применением метода представления фона смесью гауссовых распределений.

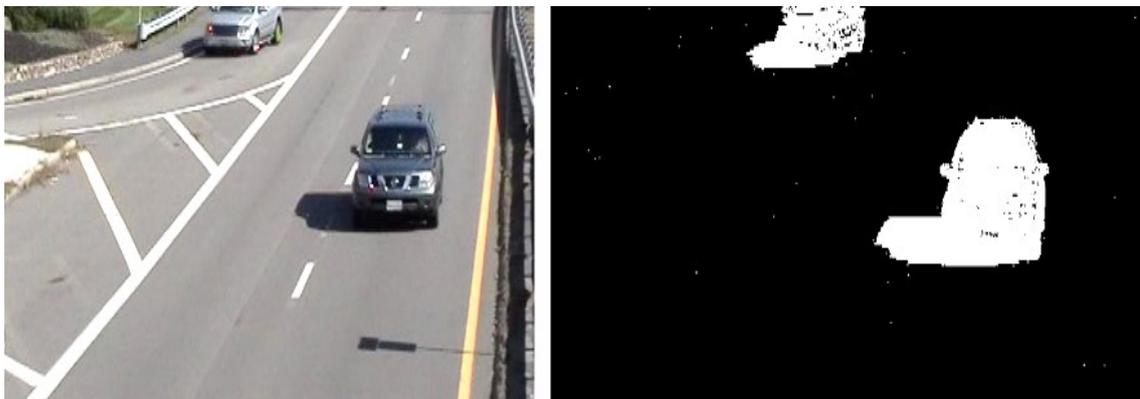


Рисунок 1 – Применение метода вычитания фона с применением метода представления фона смесью гауссовых распределений

Метод представления модели фона смесью гауссовых распределений обладает рядом недостатков. Главным недостатком данного метода является неприспособленность к резкому изменению освещения, что является естественным для некоторых участков. Также начальная инициализация параметров распределений является достаточно трудоемкой задачей. Относительно большое количество параметров требует организации подбора наиболее оптимальных значений для конкретных данных.

YOLOv3

Основной особенностью YOLO [10] является классификация объектов с использованием логистической регрессии. Во время обучения моделей YOLO изменяет размер входящих изображений до определенного размера, который можно задать в программе. Также в модели установлено нелинейное сопоставление между признаками изображения и параметрами нейронной сети. Структура сети YOLO использует структуру сети GoogLeNet для классификации и заменяет начальные модули GoogLeNet сверточными слоями 1x1 и 3x3 для упрощения структуры и повышения скорости обучения. Структура сети YOLO представлена на рисунке 2.

YOLOv3 использует фреймворк DarkNet [11], а сеть использует остаточный модуль и многомасштабное предсказание. Многомасштабный прогноз аналогичен сетям в Feature Pyramid Networks (FPN). По сравнению с предыдущей моделью (YOLOv2), третья версия использует больше остаточного пропуска модулей, представленных в нейросетевой модели для классификации изображений Residual Network (ResNet), что снижает потери информации, вызванные сверткой и объединением, делает сеть глубже, что позволяет извлекать более продвинутые семантические признаки и повышать точность распознавания.

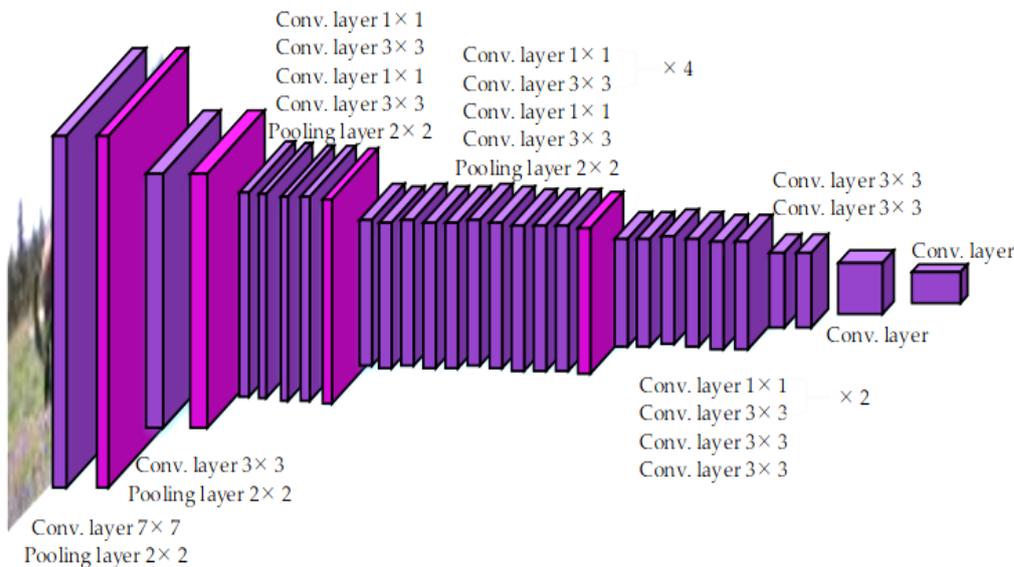


Рисунок 2 – Структура сети YOLO

YOLOv3 использует многомасштабное предсказание для повышения точности обнаружения. В DarkNet окончательный результат обнаружения синтезируется при помощи Scale1, Scale2 и Scale3, что продемонстрировано на рисунке 3.

Также YOLOv3 не использует полносвязный уровень, что снижает сложность сетевых вычислений и повышает скорость обнаружения объекта в кадре. Благодаря вышеуказанным методам YOLOv3 обеспечивает большую точность обнаружения. Точность обнаружения DarkNet53 такая же, как и у ResNet152, но скорость обнаружения намного выше, чем у ResNet152. YOLOv3 использует свертку вместо пула для понижения частоты дискретизации, что уменьшает потерю информации при итерации нейронной сети. Обычно потери информации при объединении могут быть большими, поскольку операция объединения производит объединение нескольких пикселей в один.

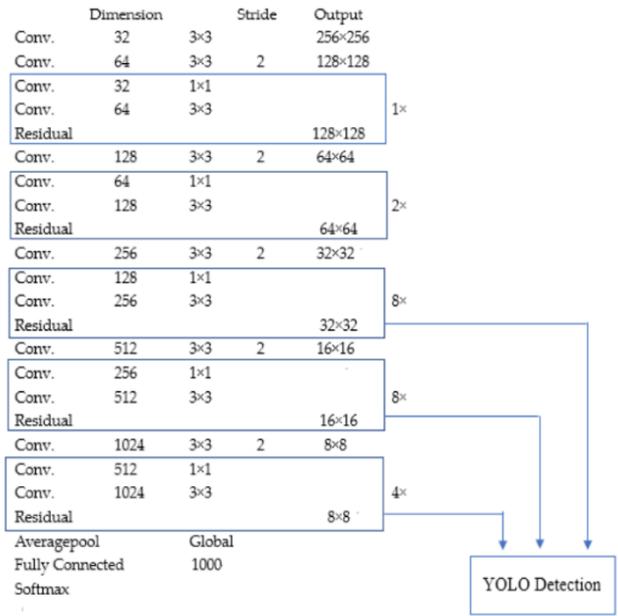


Рисунок 3 – Структура сети YOLOv3

YOLOv5

Скорость работы и точность обнаружения YOLOv5 по сравнению с YOLOv3 значительно лучше [12]. Модель YOLOv5 в своей структуре использует три компонента: CSP-Darknet53 в основе модуля «Backbone», SPP и PANet в качестве моделей в модуле «Neck» и YOLOv4 в качестве модуля «Head». Общая структура модели показана на рисунке 4.

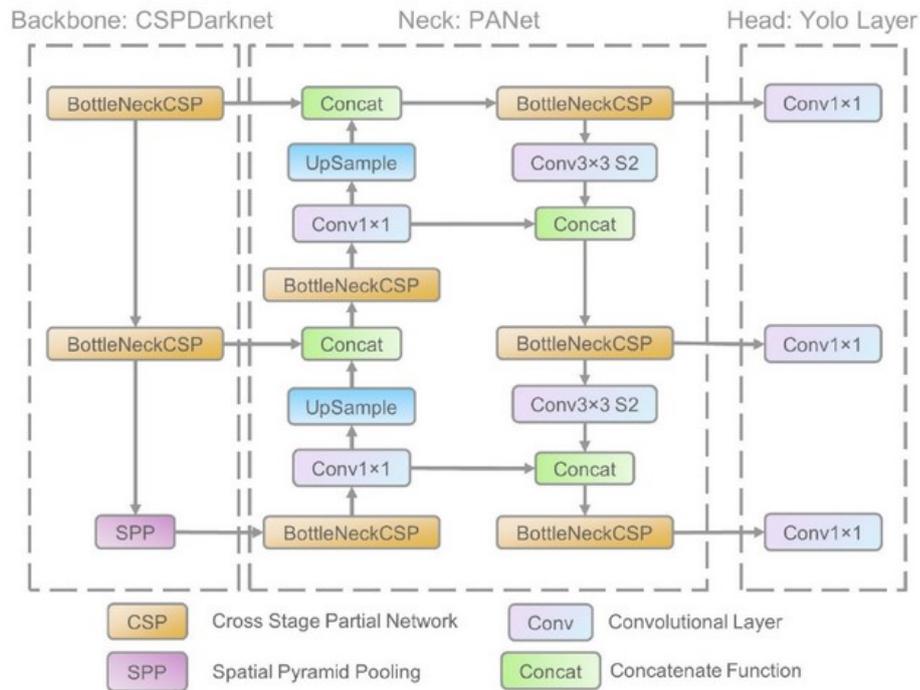


Рисунок 4 – Структура сети YOLOv5

CSP-Darknet53, которая используется в модуле «Backbone», – простая сверточная сеть Darknet53, используемая в модуле «Backbone» еще в YOLOv3, к которой применили стратегию Cross Stage Particak (CSP). Использование данной стратегии позволило избавиться от проблемы избыточных градиентов путем отсечения градиентного потока.

В модуле «Neck» в модели YOLOv5 сначала использовался вариант объединения пространственных пирамид (SPP), а сеть объединения путей (PANet) была изменена путем включения в ее архитектуру BottleNeckCSP. PANet – функциональная пирамидальная сеть, используемая в YOLOv4 для улучшения потока информации и для корректной локализации пикселей в задаче прогнозирования масок. В YOLOv5 данная сеть была изменена путем применения к ней стратегии CSPNet (рис. 4).

В модуле «Head» YOLOv5 использует ту же модель, что и в YOLOv3 и YOLOv4. Существенным отличием является изменение уравнений для вычисления координат для ограничивающих рамок. Разница уравнений представлена на рисунке 5. В левой части показаны уравнения, используемые в предыдущих моделях YOLO, в правой – в YOLOv5.

$$\begin{array}{ll}
 b_x = \sigma(t_x) + c_x & b_x = (2 \cdot \sigma(t_x) - 0.5) + c_x \\
 b_y = \sigma(t_y) + c_y & b_y = (2 \cdot \sigma(t_y) - 0.5) + c_y \\
 b_w = p_w \cdot e^{t_w} & b_w = p_w \cdot (2 \cdot \sigma(t_w))^2 \\
 b_h = p_h \cdot e^{t_h} & b_h = p_h \cdot (2 \cdot \sigma(t_h))^2
 \end{array}$$

Рисунок 5 – Уравнения для вычисления координат ограничивающих рамок

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для определения наиболее подходящей технологии в обнаружении человека на изображении был проведен эксперимент на основе публичного датасета Human Detection Dataset [13] с использованием нейросетевых моделей в качестве алгоритмов, результаты которого представлены в таблице 1. Метод вычитания фона в эксперименте не рассматривался, поскольку данный подход подразумевает наличие заднего фона изображения в качестве шаблона для последующего поиска разницы между изображениями. Поскольку выбирается технология для решения задачи аутентификации человека, то основными параметрами при сравнении нейросетевых моделей будут скорость обработки изображения и точность распознавания человека на изображении.

В представленном датасете имеется разделение изображений на две группы: «without_human» и «humans», где папка «without_human» подразумевает, что на изображении отсутствуют люди, а «humans» – присутствует минимум один человек. Пример изображений из группы «without_human» и группы «humans» представлены на рисунке 6 соответственно. При проведении эксперимента на представленном наборе данных коэффициент mAP не вычисляется, поскольку разметки расположения людей на изображении не было произведено. Также изначально представленные изображения были сохранены в формате PNG, что является недопустимым для предобученных моделей, поскольку основным отличием формата PNG от JPG является наличие четвертого измерения, прозрачности изображения, поэтому первоначальной задачей является переформатирование формата PNG в JPG.

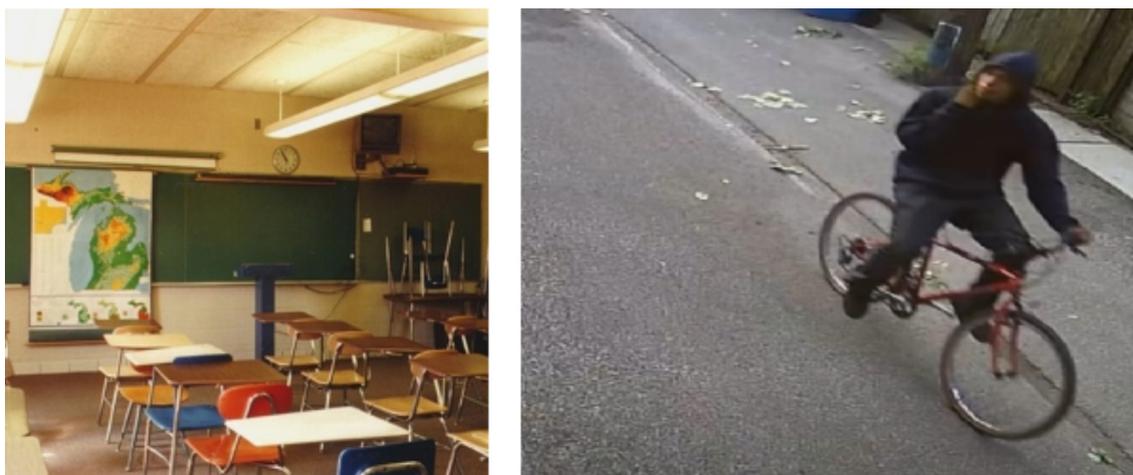


Рисунок 6 – Пример изображений в наборе данных

Для того чтобы результаты эксперимента получились более точными, было принято решение проанализировать датасет на наличие изображений, которые могли бы исказить конечный результат. В результате были обнаружены изображения, на которых присутствовали различные помехи, значительно закрывающие основное изображение: преимущественно белый фон, различные водяные знаки и т. п. Пример фиктивных изображений представлен на рисунке 7. Изображения, на которых был белый фон, были уменьшены до размера реального кадра, а изображения с водяными знаками были обрезаны таким образом, чтобы водяной знак занимал минимальное количество места. Также было выявлено, что после изменения формата изображения некоторые изображения были перевернуты на 90°. Данные изображения были возвращены в исходный формат.

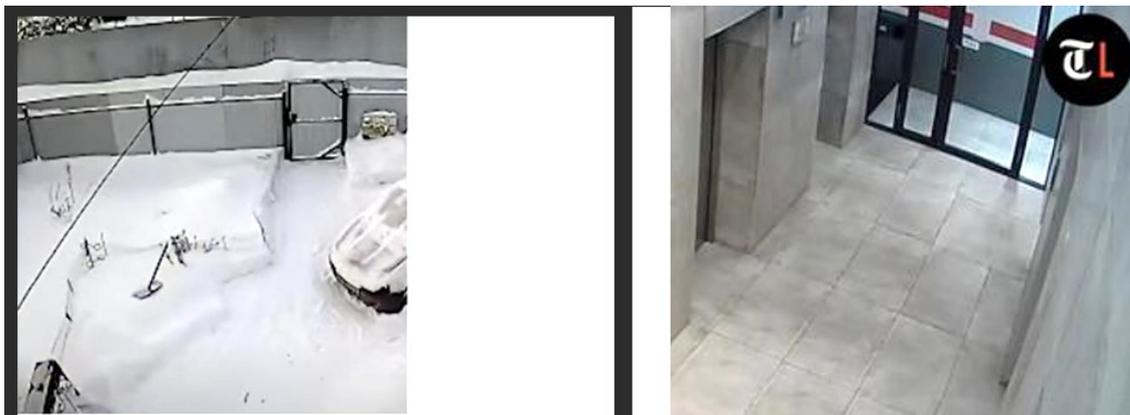


Рисунок 7 – Пример некорректных изображений

Для проведения эксперимента использовалась следующая конфигурация ПК:

- CPU: Intel® Core™ i7-8700 @3.20GHz;
- GPU: NVIDIA® GeForce® RTX 2060 SUPER;
- RAM: 32 GB DDR4 2667 MHz;
- Storage: 512 Gb SSD;
- OS: Windows 10.

Также в папке «without_human» были обнаружены фотографии, содержащие на изображении людей. Данные фотографии были оставлены в папке, поскольку качество силуэта человека было крайне мало. Пример таких изображений представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Пример изображений с фигурами людей в датасете «without_human»

Поскольку нейросетевые модели YOLO предобучены для распознавания нескольких классов изображений одновременно (к примеру: человека, машины, мотоцикла и т. п.), то в качестве исходных настроек моделей было выставлено обнаружение только класса «человек» и пороговое значение обнаружения объектов в 70 %, поскольку опытным путем было установлено, что именно с такой вероятностью можно сказать, присутствует человек на изображении или нет.

Первоначально был подан датасет «without_human». Результаты сравнения процента распознавания на датасете с людьми на изображении представлены на рисунке 9.

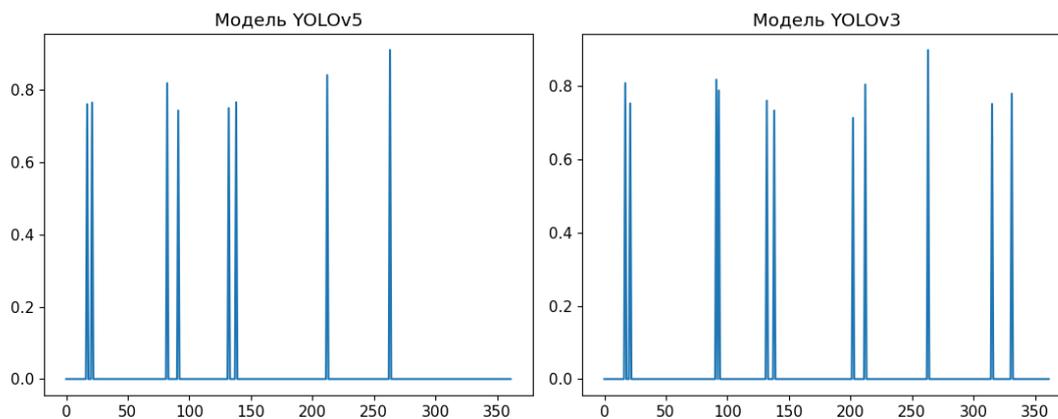


Рисунок 9 – Процент распознавания людей при использовании датасета «without_human»

Также было измерено время, которое потребовалось моделям для обработки изображения. Данные результаты приведены в сравнительной таблице 1.

Таблица 1 – сравнение основных показателей на датасете «without_human»

Параметры сравнения	YOLOv3	YOLOv5
Средняя точность правильного распознавания (%)	97	97,7
Время распознавания (с/кадр)	0,023	0,031

Как видно из приведенных результатов, предположение о том, что силуэт человека недостаточно четкий для его нахождения, оказался ложным. Также имеют места ложные срабатывания распознавания человека на изображении. Пример таких изображений представлен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Пример изображений, на которых модель YOLOv3 распознала человека

Далее был использован датасет «humans». Время обработки изображений с людьми представлено на рисунке 11.

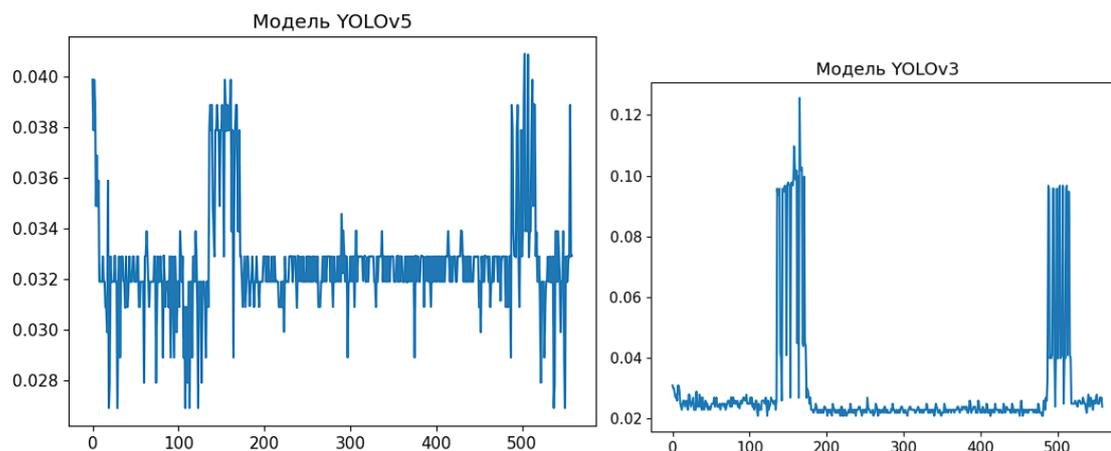


Рисунок 11 – Время обработки изображения нейросетевых моделей при использовании датасета «humans»

Как видно из представленного рисунка, некоторые изображения в датасете содержали на переднем плане лишние предметы либо человек частично находился в кадре, что видно по увеличению времени обработки изображения, а именно изображения с порядковым номером от 135 до 172, а также от 487 до 517. На данных изображениях были представлены: фотографии с видеокамер в парках, на переднем плане которых были ветки деревьев, на входе в помещение, где человек не полностью появился в кадре и т. п. Пример изображений, которые нейросетевые модели распознавали дольше среднего, представлен на рисунке 12. В таблице 2 приведен сравнительный анализ времени и средней точности распознавания моделями изображений в представленном датасете: все изображения, изображения без кадров с «визуальным шумом» и только изображения с «визуальным шумом».

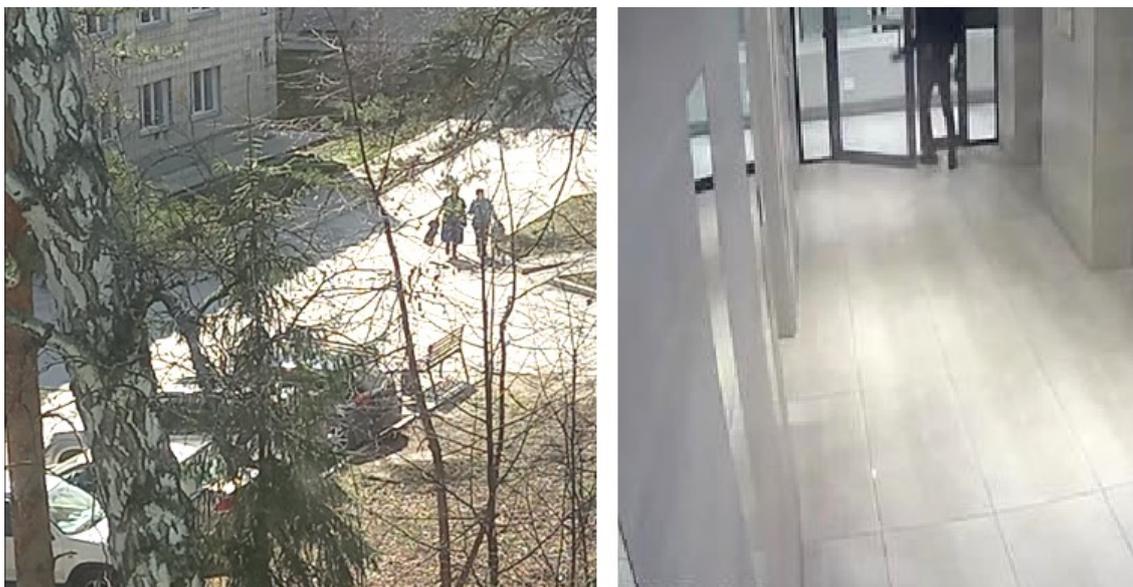


Рисунок 12 – Пример изображений, которые нейросетевые модели распознавали дольше среднего

Таблица 2 – Сравнение основных показателей нейросетевых моделей на датасете «humans»

Параметры сравнения	YOLOv3	YOLOv5
Средняя точность распознавания всех изображений (%)	70,200	71,300
Средняя точность распознавания изображений с «визуальным шумом» (%)	22,000	19,000
Средняя точность распознавания с исключением изображений с «визуальным шумом» (%)	76,000	78,000
Среднее время распознавания всех изображений (с/кадр)	0,029	0,032
Среднее время распознавания изображений с «визуальным шумом» (с/кадр)	0,073	0,03
Среднее время распознавания с исключением изображений с «визуальным шумом» (с/кадр)	0,023	0,030

Как видно из приведенной таблицы, нейросетевая модель YOLOv5 в среднем значительно быстрее справилась с обработкой изображений, на которых присутствовал «визуальный шум», но при этом показала меньший процент обнаружения человека на изображении, где человек присутствовал. Кроме того, у данной модели средний процент распознавания без изображений с «визуальным шумом» превышает средний процент модели YOLOv3. Таким образом, нейросетевая модель YOLOv5 является наиболее подходящей моделью для задачи аутентификации человека по сравнению с нейросетевой моделью YOLOv3.

Как видно из проведенного анализа, на данных изображениях имеется множество факторов, влияющих на точность распознавания, а именно:

- 1) на переднем фоне находится множество посторонних объектов, закрывающих человека;
- 2) высокая степень искажения изображения (например, из-за низкого разрешения камеры, плохого освещения, плохого качества объектива и т. п.);
- 3) человек расположен в зоне, где присутствуют сильные искажения (например, если человек стоит боком, то на заднем фоне можно увидеть только часть его тела);
- 4) объект, расположенный в зоне освещения, сильно бликует и затемняется, в результате чего объект не распознается;
- 5) низкая степень детализации изображения (часто это случается при плохих погодных условиях, когда изображение человека на общем фоне становится плохо различимым).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного анализа набора данных был сделан вывод, что камеру требуется располагать таким образом, чтобы исключить негативные факторы, влияющие на процесс распознавания человека на изображении, и были определены следующие требования для корректной работы системы аутентификации:

- 1) чистый задний фон, например, белая стена;
- 2) фон не должен содержать мелкие объекты, к примеру: надписи на стенах, вывески, цветы и т. п.;
- 3) не должно быть никаких посторонних предметов, людей, животных и т. д.;
- 4) фон не должен перекрывать объект, чтобы он не оказался за пределами поля зрения камеры. Это необходимо для того, чтобы не создавать ложных срабатываний;
- 5) человек должен полностью находиться в кадре камеры во время процесса распознавания;
- 6) у человека должен оставаться свободный путь (очерченный белым фоном) для движения.

Анализ результатов работы нейросетевых алгоритмов YOLOv3 и YOLOv5 показал, что точность обнаружения человека на изображении и время обработки всех изображений (как с «визуальным шумом», так и без него) у представленных моделей приблизительно одинаково. Но поскольку модель YOLOv5 выдала меньше ошибок на наборе данных, где людей не было, чем YOLOv3, данная модель лучше подходит для проведения дальнейших исследований при решении задачи аутентификации человека с использованием биометрических признаков.

Список источников

1. Выборнова, О. Н. Аутентификация пользователя по лицу и мимике / О. Н. Выборнова, А. А. Приходько, Е. М. Сологубова // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 9. – С. 87–91. – DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_9_87.
2. Демина, Р. Ю. Повышение качества классификации объектов на основе введения новой метрики кластеризации / Р. Ю. Демина, И. М. Ажмухамедов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 4. – С. 106–114. – DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-106-114.
3. Ажмухамедов, И. М. Оценка состояния защищенности данных организации в условиях возможности реализации угроз информационной безопасности / И. М. Ажмухамедов, О. М. Князева // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 3 (31). – С. 24–39.
4. Sharma, Lavanya. Object Detection using Background Subtraction / Sharma Lavanya. – 2018.
5. Pan, Hongpeng. Background Subtraction for Night Videos / Pan, Hongpeng & Zhu, Guofeng & Peng, Chengbin & Xiao, Qing // Peer J Computer Science. – 2021. – Vol. 7, no. e592. – DOI: 10.7717/peerj-cs.592.
6. Wang, C. Chrono-Gait image: A novel temporal template for gait recognition / C. Wang, J. Zhang, P. Xiaoru, and L. Wang // European Conference on Computer Vision. Washington, DC, USA, December 2011.
7. Paul, Manoranjan. Human detection in surveillance videos and its applications / Paul Manoranjan, Haque Shah & Chakraborty Subrata // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2013. – Vol. 25. – DOI: 10.1186/1687-6180-2013-176.
8. Ying, Li Tian. Robust Detection of Abandoned and Removed Objects in Complex Surveillance Videos / Ying Li Tian, R. S. Feris, Haowei Liu, A. Hampapur, Ming-Ting Sun // Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews : IEEE Transactions. – Sept. 2011. – Issue 41 (5). – P. 565–576.
9. Heikkilä, M. A texture-based method for modeling the background and detecting moving objects / M. Heikkilä, M. Pietäikinen // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2006. – № 28. – P. 657–662,

10. Redmon, J. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016. – P. 779–788.
11. Redmon, J. YOLO9000: Better, Faster, Stronger / J. Redmon, A. Farhadi // Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017. – P. 6517–6525.
12. Martinez-Alpiste, Ignacio. A dynamic discarding technique to increase speed and preserve accuracy for YOLOv3 / Martinez-Alpiste Ignacio & Golkarnarenji Gelayol & Wang Qi & Alcaraz Calero Jose // Neural Computing and Applications. – 2021. – № 33. – DOI: 10.1007/s00521-021-05764-7.
13. Human Detection Dataset: CCTV footage of humans // Kaggle. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/constantinwerner/human-detection-dataset>.

References

1. Vybornova, O. N., Prikhodko, A. A., Sologubova, E. M. Autentifikatsiya polzovatelya po litsu i mimike [User authentication by face and mimik]. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technology and engineering], 2021, no. 3, p. 87–91. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_9_87.
2. Demina, R. Yu., Azhmikhamedov, I. M. Povyshenie kachestva klassifikatsii obektov na osnove vvedeniya novoy metriki klasterizatsii [Increasing quality of classifying objects using new metrics of clustering]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics], 2019, no. 4, pp. 106–114. DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-106-114.
3. Azhmukhamedov, I. M., Knyazeva, O. M. Otsenka sostoyaniya zashchishchennosti dannykh organizatsii v usloviyakh vozmozhnosti realizatsii ugroz informatsionnoy bezopasnosti [Assessment of status for data security of organization in conditions of realization possibility for information security threats]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 3(31), pp. 24–39.
4. Sharma, Lavanya. *Object Detection using Background Subtraction*, 2018.
5. Pan, Hongpeng & Zhu, Guofeng & Peng, Chengbin & Xiao, Qing. Background Subtraction for Night Videos. *Peer J Computer Science*, 2021, vol. 7, no. e592. DOI: 10.7717/peerj-cs.592.
6. Wang, C., Zhang, J., Xiaoru, P. and Wang, L. Chrono-Gait image: A novel temporal template for gait recognition. *European Conference on Computer Vision*. Washington, DC, USA, December 2011.
7. Paul, Manoranjan & Haque, Shah & Chakraborty, Subrata. Human detection in surveillance videos and its applications. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2013, vol. 25. DOI: 10.1186/1687-6180-2013-176.
8. Ying Li, Tian, Feris, R. S., Haowei, Liu, Hampapur, A., Ming-Ting, Sun. Robust Detection of Abandoned and Removed Objects in Complex Surveillance Videos. *Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions*, Sept. 2011, vol. 41, issue 5, pp. 565–576.
9. Heikkilä, M., Pietäikinen, M. A texture-based method for modeling the background and detecting moving objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, no. 28, pp. 657–662.
10. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016*, pp. 779–788.
11. Redmon, J., Farhadi, A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. *Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017*, pp. 6517–6525.
12. Martinez-Alpiste, Ignacio & Golkarnarenji, Gelayol & Wang, Qi & Alcaraz Calero, Jose. A dynamic discarding technique to increase speed and preserve accuracy for YOLOv3. *Neural Computing and Applications*, 2021, no. 33. DOI: 10.1007/s00521-021-05764-7.
13. Human Detection Dataset: CCTV footage of humans. *Kaggle*. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/constantinwerner/human-detection-dataset>.

Статья поступила в редакцию 12.01.2023; одобрена после рецензирования 09.02.2023; принята к публикации 09.02.2023.

The article was submitted 12.01.2023; approved after reviewing 09.02.2023; accepted for publication 09.02.2023.

УДК 004.932, 51-76, 57.087

**ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОЦЕНКИ
ФИЗИЧЕСКИХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БИОЛОГИЧЕСКИХ МАКРООБЪЕКТОВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ¹**

Ручай Алексей Николаевич, Челябинский государственный университет, 454000, Российская Федерация, г. Челябинск, ул. Бр. Кашириных, 129; Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН, 460000, Российская Федерация, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-5996-669X, e-mail: ran@csu.ru

Важное значение в биологии, биотехнологии, сельском хозяйстве и других научно-технических областях имеет задача оценки биологических макрообъектов, к которым относятся биологические объекты размером от 1 см до 10 м. Ежегодно в мире проводится экспертная оценка более 1 млрд сельскохозяйственных животных на предмет их племенной и коммерческой стоимости, здоровья и перспектив использования. При этом оценка физических и морфологических характеристик биологических макрообъектов является трудоемкой и субъективной. Традиционный подход к оценке животного основан на результатах визуального осмотра, ощупывания и, как правило, контактных измерениях. Для формирования комплексной оценки животного, его состояния и поведения двумерной информации недостаточно, так как в этом случае не учитываются трехмерные морфологические характеристики обмеряемого животного, изменения положения животного именно в трехмерном пространстве. Учитывая трудоемкость и неточность из-за субъективности традиционных методов экспертной оценки, разработка новых методов автоматической экспертной оценки биологических макрообъектов с учетом современных высоких технологий в области инженерии является значимой научной и практически важной задачей. В работе представлен обзор современного состояния исследований в области оценки физических и морфологических характеристик биологических макрообъектов по изображениям.

Ключевые слова: компьютерное зрение, оценка физических и морфологических характеристик, изображения, биологические макрообъекты

**REVIEW OF STUDIES IN THE ASSESSMENT
OF PHYSICAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS
OF BIOLOGICAL OBJECTS USING IMAGES**

Ruchay Alexey N., Chelyabinsk State University, 129, Br. Kashirinykh St. Chelyabinsk, 454 001, Russian Federation; Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of RAS, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000 Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-5996-669X, e-mail: ran@csu.ru

Of great importance in biology, biotechnology, agriculture and other scientific and technical fields is the task of evaluating biological objects, which include biological objects of size from 1 cm to 10 m. Each year, more than 1 billion farm animals are expertly evaluated worldwide for their breeding and commercial value, health, and prospects for use. At the same time, the assessment of physical and morphological characteristics of biological objects is labor-intensive and subjective. The traditional approach to animal evaluation is based on the results of visual inspection, groping and, as a rule, contact measurements. Two-dimensional information is insufficient to form a comprehensive assessment of the animal, its condition and behavior, as it does not consider three-dimensional morphological characteristics of the measured animal, changes in the position of the animal in three-dimensional space. Given the labor-intensiveness and inaccuracy due to the subjectivity of traditional methods of expert evaluation, the development of new methods of automatic expert evaluation of biological objects, considering modern high technology in the field of engineering, is a significant scientific and practically important task. This paper presents a review of the current state of research in the field of evaluation of physical and morphological characteristics of biological objects using images.

Keywords: computer vision, assessment of physical and morphological characteristics, images, biological objects

ВВЕДЕНИЕ

Растущие потребности населения в мясе и молочных продуктах привели к быстрому росту животноводства во всем мире. Для повышения производительности в животноводстве необходима объективная и каждодневная оценка физиологического состояния, поведения и продуктивности животных на промышленных животноводческих комплексах.

Особенно это касается мониторинга здоровья животного, поскольку именно этот фактор определяет эффективность данной отрасли животноводства. Диагностика генетических заболеваний –

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-76-20014.

это настоящая проблема для племенных хозяйств, поскольку многие заболевания могут протекать в скрытой или рецессивной форме, а раннее выявление заболеваний (скрининговые обследования) необходимо проводить для всего поголовья скота, что является весомой статьей расходов. Для избежания рутинной работы и больших затрат необходимо разработать новые методы автоматического обнаружения заболеваний и предсказания их развития на основе внешних признаков. Это позволит улучшить качественные и количественные характеристики в животноводстве: снизить количество больных животных, не использовать их в разведении и проводить лечение обнаруженных заболеваний на раннем этапе.

Перспективная технология экспертного оценивания, мониторинга состояния и поведения животных должна опираться на новые решения по бесконтактному измерению морфологических характеристик животного, оценивания его локомоции с последующей обработкой данных. Предлагаемый подход к разработке технологии экспертного оценивания, мониторинга состояния и поведения животных является принципиально новым, так как используются современные инженерные и научные достижения в области компьютерных наук, и из процесса полностью исключается человеческий фактор.

Как правило, обслуживающий персонал и специалисты в животноводстве не обладают знаниями в сфере современных информационных технологий для использования их в селекционно-племенной работе. Кроме того, преобладающие на рынке лицензионные зарубежные программные продукты имеют высокую стоимость и, зачастую, не адаптированы к российским условиям хозяйствования и учетной политики, что приводит к снижению эффективности их применения. Другим фактором, негативно сказывающимся на функционировании инструментальных способов племенной оценки, является необходимость построения постоянной информационно-технологической поддержки, квалифицированного мониторинга фенотипического и функционального состояния животных.

ОЦЕНКА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Развитие новых, быстрых и качественных методов экспертной оценки животных вызвано растущими потребностями народного хозяйства. Так, для повышения производительности в сельском хозяйстве необходимы объективные и ежедневные оценки физиологического состояния и продуктивности животных на промышленных животноводческих комплексах. Учитывая трудоемкость и неточность из-за субъективности традиционных методов экспертной оценки, разработка новых методов автоматической экспертной оценки животных с учетом современных высоких технологий в области инженерии является значимой научной и практически важной задачей [1, 2].

Перспективная технология экспертизы должна опираться на новые решения по бесконтактному измерению характеристик животного с последующей обработкой данных. Этот подход к разработке технологии экспертной оценки животных является принципиально новым.

Система автоматической экспертной оценки животных, основанная на методах бесконтактной трехмерной реконструкции поверхности тела животных, позволит:

- 1) сократить затраты времени на проведение ручной и субъективной бонитировки;
- 2) исключить контактные измерения линейных промеров, живой массы и др.;
- 3) оценить каждое животное с учетом всех прижизненных измерений морфологических характеристик по конституции и экстерьеру, породности и происхождению, продуктивности и развитию, качеству потомства и воспроизводительной способности;
- 4) выполнить последующую обработку данных и сопоставление полученных материалов со вновь созданными базами данных, включающими результаты генетической экспертизы, оценки физиологического состояния и здоровья животных;
- 5) применить методы анализа данных для постоянного мониторинга и прогнозирования роста сельскохозяйственных животных.

В существующих системах для бесконтактного измерения животных используют исключительно линейные характеристики [3]. Для выполнения комплексной точной оценки животных требуется использовать трехмерные морфологические характеристики. Таким образом, в настоящее время экспертные оценки проводятся субъективно специалистами с учетом только линейных измерений. Точность таких оценок зависит как от опыта конкретного специалиста, так и от его физического состояния. Технология экспертной оценки животных на основе бесконтактного измерения морфологических характеристик принципиально новая, потому что используются современные инженерные и научные достижения в области компьютерной науки и человеческий фактор полностью исключен из процесса оценки животных.

Использование современных технологий позволило улучшить производство и состояние животных. Существуют различные методы, которые могут быть использованы в коммерческих инструментах и технологиях для мониторинга питания, локомоции, агрессивного и репродуктивного поведения крупного рогатого скота. Большинство исследований были сосредоточены на использовании нескольких ПЗС-камер (ПЗС-камера (сокр. от «прибор с зарядовой связью») или CCD-

камера): 5 ПЗС-камер [3], 8 ПЗС-камер [4], 16 ПЗС-камер [4]. Применение современных цифровых технологий в системах 3D изображений (например, Kinect, TOF камер) предлагает дополнительные возможности для улучшения точности систем: одна ПЗС-камера и одна 3D камера [5], одна 3D камера [6–11], две 3D камеры [12, 13], три 3D камеры [14–17], четыре 3D камеры [1, 2], шесть 3D камер. Современные технологии позволяют использовать высокоточные лазерные камеры [10, 21].

Проект [4] рассматривает создание 3D моделей крупного рогатого скота для оценки их состояния тела с использованием восьмикamerной системы. Из экспериментальных результатов [4] авторы показали, что оценка веса коров возможна с помощью предлагаемой восьмикamerной системы. Кроме того, система с 16 камерами может генерировать более качественные данные 3D модели коровы, чем система с восемью камерами. Однако проблема предлагаемой системы заключается в том, что трехмерная модель крупного рогатого скота генерируется вручную. Авторы считают, что невозможно автоматически создать идеальную 3D модель крупного рогатого скота из-за различного фона и влияния солнечного света.

Автор [5] предложил автоматизированный алгоритм для измерения позы спины и обнаружения хромоты в молочных фермах на основе 3D камеры. Экспериментальные результаты показали, что подход с использованием 3D камеры можно использовать для преодоления ограничений 2D подхода, а подход с использованием 3D камеры можно использовать для обнаружения хромоты коров. Кроме того, 3D камера от вида сверху может быть полезна для автоматического измерения положения спины, чтобы преодолеть проблемы сегментации, такие как тени и динамический фон, которые возникают при подходе 2D вида сбоку. Метод 3D камеры также оказался пригодным для автоматизированной системы обнаружения хромоты, поскольку он достиг результатов, сравнимых с методом 2D камеры, когда сегментация была выполнена вручную.

Система мониторинга отела коров с использованием 3D камеры была предложена для определения возрастающего числа изменений позы перед отелом и прогнозирования времени отела [10]. Предлагаемая система может работать в ночное время при различных условиях освещения. Следовательно, систему можно применять для измерения других характеристик отела. Однако предлагаемая система не может обнаружить ненормальное поведение в процессе отела коров, и точность распознавания при использовании большего количества коров и использовании нескольких камер не обсуждается [10].

В работе [11] была предсказана масса тела молочной коровы с помощью автоматически измеренных линейных признаков с помощью 3D камеры и достигла точности, аналогичной ручным и полуавтоматическим методам. Точный прогноз зависит от качества автоматического измерения морфологических признаков, выбора входных переменных модели и типа модели прогнозирования. Мониторинг кратковременного изменения массы тела или выявление аномалий в состоянии здоровья коровы невозможны в предлагаемой системе [11].

Полностью автоматическая система компьютерного зрения для мониторинга локомоции молочных коров была предложена в [7]. Недостатком системы является трафик коров, который влияет на частоту успешных действий системы, а также ежедневные и индивидуальные вариации, связанные с трафиком коров. Кроме того, на производительность системы влияют соотношение коров, стадия лактации и продолжительность записи.

Система распознавания трехмерных объектов была представлена в [1] и применяется к частям тела молочных коров. Было предложено автоматизированное измерение функциональных признаков с помощью ЭБ-камер. Результаты могут рассматриваться как успешный подход к автоматизации регистрации.

Система расчета признаков от молочных коров с использованием сканирующего прохода с несколькими Kinect камерами представлена в [2]. В работе [16] был предложен недорогой инструмент для бесконтактного извлечения количественных параметров для трехмерного анализа тела коровы. Новый надежный метод выделения признаков был разработан в [9] с использованием автоматических систем для оценки измерений тела с минимальным вмешательством в повседневную деятельность животных.

Новый прорыв в поиске точного, объективного способа оценки линейных признаков живых животных с помощью трехмерной визуализации обсуждался в [13]. В статье [12] была предложена система измерения жира у коров и самцов породы ангус, использующая кривизну как форму представления формы тела.

В работе [18] показана новая система захвата данных 3D модели коровы с использованием нескольких камер. Исследование [6] показало успешность использования 3D камер для оценки массы тела и свойств молока с помощью измерений спины у молочных коров. Система измерения формы и температуры тела крупного рогатого скота представлена в [15].

Новый подход бесконтактного измерения размеров тела крупного рогатого скота с помощью 3D камеры был предложен в [8]. Подход [8] – это возможность бесконтактного измерения для взрослых животных крупного телосложения, подход позволяет автоматически отслеживать развитие животных, их рост, улучшение качественных и генетических характеристик, кроме того,

позволяет проводить автоматическое точное кормление. Однако измерительная система [8] не учитывает разные размеры – от телят до крупного рогатого скота.

Интерактивное 3D программное обеспечение для измерения тела скота с похожими формами коров было предложено в [13]. Новая идея интеграции нормализации и сегментации поз в конвейер обработки входных данных является основным отличием по сравнению с традиционными измерительными приборами. Однако метод нормализации позы не является устойчивым к различным положениям головы скота и отсутствующим данным.

Новая технология сканирования для оценки морфологии животных была предложена в [17]. Метод измерения тела коров голштинской породы был предложен в [3] с использованием цифрового анализа изображений для оценки морфологии голштинских коров и оценки их живой массы. Технология машинного зрения, учитывающая оценку состояния тела и включающая в себя все извлеченные линейные признаки из нескольких 3D камер в 3D модель, представлена в [17].

Для построения трехмерной модели животного можно использовать четыре варианта системы измерения:

1) несколько камер закреплены на платформе, движущейся по известной траектории вокруг объекта, в этом случае появляются следующие проблемы: должно быть точно известно положение камеры, и сложно зафиксировать животное;

2) камера находится в руках человека, который обходит объект, в этом случае появляются следующие проблемы: необходимо использовать негибкие алгоритмы восстановления трехмерной модели, и сложно зафиксировать животное;

3) несколько камер одновременно фиксируют животное и фиксируются на платформе вокруг ворот, через которые животное быстро проходит, при этом нет проблемы фиксации животного;

4) камера расположена на беспилотном летательном аппарате.

В зависимости от целей, которые ставятся при измерении, берут большее или меньшее число промеров. В России для оценки племенной ценности при ежегодной бонитировке быков-производителей, коров и молодняка по экстерьеру и конституции используется шкала, включающая в себя промер высоты в крестце, в см. Для контроля за ростом и развитием животных в производственных условиях берут 5–8 промеров; в условиях же научного эксперимента, связанного с изучением особенностей весового и линейного роста, число промеров может быть значительно увеличено. Для записи крупного рогатого скота в книги племенных животных берут обычно 12 промеров: высоту в холке, высоту спины, высоту в крестце, глубину груди, ширину груди, ширину в маклоках, ширину в тазобедренных суставах, косую длину туловища, боковую длину зада, ширину зада в седалищных буграх, обхват груди, обхват пясти. При обследовании больших групп скота, связанных с породой и породообразованием, число промеров увеличивают до 28, а иногда до 52 и более.

НОРМАЛИЗАЦИЯ ПОЗЫ

Камеры глубины широко используются в животноводстве. Поэтому для точного животноводства трехмерная информация используется с целью измерения формы животного и становится все более популярной. Для точных измерений по трехмерной модели животного необходимо автоматически определить соответствующие облака точек в предопределенной канонической системе координат. Однако облака точек содержат множество объектов различной формы и размеров, сложные и неполные структуры, окклюзии, различную плотность точек и большие объемы данных, и все это создает серьезные проблемы для надежного автоматического извлечения полезной информации. За последние несколько десятилетий было проведено множество исследований, посвященных обработке трехмерного облака точек, большинство из которых были разработаны для картографирования, автономной навигации транспортных средств, оценки лесов, информационного моделирования зданий и промышленных приложений. Однако автоматической обработке облаков точек животных для точного животноводства уделяется меньше внимания.

Проблема нормализации позы для трехмерных облаков точек была широко исследована, особенно для поиска фигур и поиска сходства. Существует интерес к поиску осей симметрии, которые затем можно использовать для переориентации объектов. Нахождение подходящих ориентаций часто помогает в автоматизированном поиске и обработке трехмерных объектов. Кроме того, нормализация позы помогает алгоритмам машинного обучения учитывать информацию о позе, что делает надежность распознавания объектов более точной. Другие сценарии использования нормализации позы можно увидеть в области животноводства. Многие из этих алгоритмов не специализируются на нормализации позы синтетических объектов, но подчеркивается, что поиск подходящих плоскостей симметрии играет ключевую роль. Многие работы в области нормализации позы обычно рассматривают выравнивание как этап предварительной обработки для сопоставления форм или обсуждают его в контексте извлечения признаков объекта. Анализ главных компонент PCA используется для извлечения признаков, но также представляет собой стандартный способ вычисления главной оси объекта.

В работе [14] был предложен метод нормализации позы и определения симметрии для облаков точек животных с целью автоматизации измерений объекта. Билатеральная симметрия является

важным и универсальным понятием для животных. Симметричная двухсторонняя плоскость животного используется для получения осей X, Y, Z. Предложенный метод нормализации позы с использованием определения двухсторонней симметрии основан на принципиально отличной от глобальной схемы парного голосования. Метод не требует затрат на исчерпывающий поиск первых приближенных плоскостей, используя схему парного голосования только после резкого уменьшения числа всех потенциальных симметричных плоскостей [14].

Методы нормализации позы трехмерных объектов в виде облаков точек можно разделить на три типа [15]:

- 1) методы, основанные на анализе главных компонент PCA;
- 2) методы, использующие симметрию характеристик;
- 3) методы, основанные на выравнивании с помощью дескриптора формы.

В работе [15] был предложен метод нормализации позы, основанный на отражательной симметрии трехмерных объектов. Предложенный метод представляет собой глобальный метод нормализации позы общего назначения, который используется для повышения эффективности поиска трехмерных объектов. Изначально выровненное по оси минимальное граничное поле трехмерного объекта имеет минимальную угловую разницу относительно нормалей к граням его граничного поля. Набор предопределенных плоскостей симметрии используется для оценки модифицированной осевой границы, и вычисляется комбинированное пространственное и угловое расстояние между трехмерным объектом и симметричным ему объектом. Трехмерный объект помещается в модифицированную осевую границу, а выравнивание по системе координат достигается путем минимизации комбинированного расстояния. Использование предложенного метода увеличивает точность примерно на 3 % по сравнению с лучшим подходом и обеспечивает высококачественное стабильное и последовательное выравнивание трехмерных объектов, независимо от их класса или морфологии самого объекта.

В статье [16] был предложен метод нормализации положения трехмерной модели, основанный на панорамном представлении поверхности с точки зрения пространственности, ориентации и свойств отражательной симметрии. Предложенный метод нормализации позы основан на информации, извлеченной из трехмерной модели путем проецирования их на очерченный цилиндр. Более того, точное выравнивание достигается независимо от класса или морфологии трехмерной модели. Качество этого метода выравнивания подтверждается результатами поиска трехмерных объектов.

В работе [17] был предложен метод обнаружения плоскостей симметрий трехмерных объектов в виде облаков точек. Метод основан на сочетании надежного подхода к подгонке симметрии с точным этапом фильтрации, что позволяет получить точные плоскости симметрии для объектов, как синтетических, так и реальных. Однако предложенный метод [17] не был применен на более сложных объектах, которые могут быть перекрыты друг другом или видны частично. В продолжение работы [17] был предложен фреймворк глубокого обучения для определения симметрии на облаках точек, в которых объекты могут быть загромождены и некоторые сильно перекрыты. Предложенная система оказалась лучше метода. Более того, метод требует карту глубины перекрытий, в отличие от работы не требуется дополнительной информации кроме RGB-D изображений. Однако метод требует, чтобы хотя бы часть плоскости симметрии не была перекрыта.

В работе [18] был представлен алгоритм обнаружения симметрии для трехмерной модели в виде облака точек на основе взвешенного анализа главных компонент PCA. Предлагаемый алгоритм работает следующим образом: сначала, используя площадь элемента точки в качестве начального веса, выполняется взвешенный PCA и выбирается плоскость в качестве начальной плоскости симметрии; затем используется итерационный метод для пошаговой корректировки приближенной плоскости симметрии, чтобы она стремилась к идеальной плоскости симметрии (доминирующей плоскости симметрии). На каждой итерации сначала обновляется вес каждой точки на основе метрики расстояния, а затем новые веса используются для выполнения взвешенного PCA для определения новой плоскости симметрии. Если текущая плоскость симметрии достаточно близка к плоскости симметрии на предыдущей итерации или если количество итераций превышает заданный порог, итерация завершается. После завершения итерации плоскость симметрии последней итерации принимается за доминирующую плоскость симметрии модели. Предложенный алгоритм может найти итоговую плоскость симметрии для симметричных моделей, а также хорошо работает для неидеально симметричных моделей.

В статье [19] был предложен надежный подход к поиску глобальной плоскости симметрии для симметричного трехмерного объекта с отсутствующими частями и содержащего аномальные точки в виде выбросов [19]. Проблема обнаружения симметрии отражения является невыпуклой и нелинейной оптимизационной задачей. Представлен быстрый рандомизированный алгоритм поиска приближенной плоскости симметрии для инициализации решения невыпуклой задачи. Предложенный алгоритм устойчив к выбросам, возмущениям в каждой точке симметричного объекта и отсутствующим частям симметричного объекта. Кроме того, предложенный алгоритм не зависит

от каких-либо дескрипторов – признаков, что делает его применимым к любой форме входных данных, таких как облака точек, отобранных с поверхности симметричного объекта, и плотные облака точек. Однако предложенный алгоритм применим только к одиночной плоскости симметрии объекта и не может обнаружить множественные трехмерные плоскости симметрии.

Была обучена 3D сверточная нейронная сеть PRS-Net [47], которая может обнаружить плоскость симметрии трехмерных объектов в виде облаков точек. Потери расстояния симметрии вместе с потерями регуляризации используются для того, чтобы избежать генерации дублированных плоскостей симметрии. Также был предложен метод удаления недопустимых и дублирующихся плоскостей и осей вращения. Сеть устойчива в случае, если на входе подаются зашумленные или неполные поверхности. Однако сеть обнаруживает три неортогональные плоскости симметрии, но не может обнаружить все плоскости симметрии, если фигура имеет более трех плоскостей симметрии.

В недавней работе [20] представлена методология обнаружения симметрии трехмерных объектов на основе трех методов: собственные значения и собственные векторы, локальный разрыв поверхности и ориентация пикселей. Первые два метода дают лучшую надежность при оценке сигнатуры симметрии в 98 % для сложных моделей и до 100 % для примитивных моделей.

С развитием искусственного интеллекта технология глубокого обучения быстро совершенствуется и имеет широкий спектр применения в обнаружении объектов на двухмерных изображениях. Существуют следующие модели обнаружения объектов на двухмерных изображениях на основе глубокого обучения: R-CNN [49], Fast R-CNN [50], Faster R-CNN [51], и YOLO [52], которые имеют заметные преимущества как по скорости, так и точности перед трехмерными методами обнаружения. Комбинирование 2D и 3D методов позволяет решать более сложные практические задачи [53–55]. Объединив визуальную информацию и информацию о глубине в вероятностную схему на основе усеченного конуса, Гонг и др. решили проблему разреженности и шума в данных LiDAR-SLAM [56], в которой используется только несколько дескрипторов облака точек. Сао и др. представили новый автоматизированный подход к обнаружению изменений в трехмерных зданиях, который использует облака точек, полученных с датчиков LiDAR [57]. В частности, при сегментации трехмерного объекта исследователи чаще всего используют технологию обнаружения двухмерных объектов на двухмерных изображениях, тем самым сокращая трехмерное пространство поиска и вычисления, необходимые для обработки трехмерных данных [58–60]. Вместо того, чтобы полагаться только на трехмерные предложения, предложенный метод использует двухмерные детекторы объектов для локализации объектов на основе глубокого обучения, достигая высокой точности даже для небольших объектов [58]. Шен и др. сначала обнаруживали объекты в двухмерном пространстве, а затем определяли трехмерные объекты в трехмерных усеченных конусах, которые были определены двухмерными детекторами. Таким образом, обеспечивается высокое разрешение представления трехмерных объектов, а требования к памяти снижаются [59]. Аналогично в статье [60] используется новейшая технология обнаружения двухмерных объектов, позволяющая полностью использовать двухмерную информацию для сокращения трехмерного пространства поиска.

ОЦЕНКА ЖИВОЙ МАССЫ

Технология автоматической экспертной оценки животных может быть использована при ежегодной оценке более 300 млн голов крупного рогатого скота по племенной и товарной ценности по всему миру. Использование технологии существенно сократит временные затраты на проведение ручной и субъективной бонитировки, исключит необходимые контактные измерения линейных промеров, живой массы и др. Отметим, что только взвешивание животного из-за стресса ведет к потере его массы и продуктивности на 5–10 %.

В работе [20] было выделено четыре подхода к моделированию для прогнозирования живого веса крупного рогатого скота с разными уровнями сложности. Для всех моделей можно выделить три основных компонента, такие как извлечение признаков, выбор признаков для моделирования и модель обучения. Все компоненты можно автоматизировать.

Первый подход

Это традиционный подход, в котором предварительные модели для прогнозирования живой массы тела основаны на ручном сборе морфометрических измерений. Некоторые из наиболее информативных морфометрических измерений включают обхват груди, высоту в холке, ширину/высоту бедер и длину тела. Эти измерения выбираются вручную и используются в качестве признаков для традиционных регрессионных моделей, что приводит к уравнениям прогнозирования с одной или несколькими переменными на основе количества выбранных измерений у различных видов. Однако это ручное измерение размеров тела животных занимает много времени, трудоемко и дорого, что может приводить к потере его массы и продуктивности на 5–10 % из-за стресса.

Второй подход

Чтобы снизить уровень стресса у животных и значительные затраты и трудозатраты, связанные

с традиционным подходом, второй подход (подход CV) использует системы CV и использует изображения, полученные с помощью 2D (например, RGB и тепловизионные камеры) или 3D (например, глубина и Microsoft), датчики Kinect, стереосистемы) электрооптические датчики как альтернативный способ захвата морфометрических измерений. Эти подходы включают дополнительный этап, состоящий в ручной или автоматической предварительной обработке полученных изображений и ручном выборе биометрических и морфометрических измерений животных, которые затем используются в качестве переменных-предикторов в статистических моделях для прогнозирования массы тела. Когда 2D изображения получают для предварительной обработки с одной камеры, третье измерение отсутствует и ограничивает то, какие морфометрические измерения могут быть захвачены и выбраны для моделирования. Например, окружность HG уменьшается до диаметра HG или заменяется измерениями глубины грудной клетки при экстраполяции боковых или верхних изображений [64]. Это ограничение можно устранить с помощью 3D камер, но их чрезмерная стоимость и более сложные этапы обработки данных представляют собой текущее узкое место для более масштабного внедрения. В качестве альтернативы использование 2D изображений источников для морфометрических измерений поддерживает использование измерений на основе периметра и площади, которые могут служить признаками модели и не могут быть легко оценены с помощью ручных измерений.

В исследовании [21] было показано, что цифровой анализ изображений является очень надежной системой для оценки живого веса самок телят голштинской породы. По сравнению с традиционными методами измерения использование цифрового анализа изображений уменьшит проблемы, затраты, трудности, риски работодателей и стресс, возникающие при измерении и взвешивании телят. Фермерам и исследователям будет очень полезно записывать данные, которые можно использовать для долгосрочного анализа и статистических исследований в будущем.

Третий подход

Поскольку выбор признаков может быть сложной задачей, особенно при большом количестве морфометрических измерений, предпочтительнее автоматизировать этот процесс. Таким образом, третий подход (подход CV+ML) включает системы, использующие методы CV, как описано в подходе CV, и методы машинного обучения (ML) для автоматизации выбора признаков. И подход CV, и подход CV+ML включают (объединяют) некоторый уровень ручных операций, таких как выбор изображений и признаков, сегментация изображений и извлечение морфометрических измерений. Поскольку ручные операции будут препятствовать (прерывать) интеграции таких подходов в высокопроизводительные приложения, способные обрабатывать тысячи животных, полная автоматизация является ключевым фактором для коммерческих решений.

В статье [22] предложена ненавязчивая добровольная система взвешивания цыплят-бройлеров на основе 3D камеры. Тем не менее требуется дальнейшее развитие сегментации бройлеров, так как плохая сегментация приводит к плохому прогнозированию веса. Улучшенная сегментация также может решить проблему отслеживания бройлеров, что также может привести к лучшему прогнозированию веса отдельного бройлера за счет постепенного уточнения оценок веса по нескольким изображениям. В исследовании [9] был разработан и применен новый надежный метод извлечения признаков в рамках системы компьютерного зрения V3D для автоматической оценки роста и массы тела телок.

В работе [14] предлагается подходящая недорогая глубинная камера (Microsoft Kinect v1) для бесконтактного извлечения размеров тела свиньи и последующей оценки веса на основе двух возможных моделей (линейной регрессии и регрессии второй степени), адаптированных и примененных к Kinect, и ручные измерения.

Четвертый подход

Четвертый подход, основанный на CV и DL (подход CV+DL), представляет собой первый шаг к полной автоматизации процесса прогнозирования BW с использованием цифровых изображений. Компонент моделирования DL обычно включает в себя выбор изображений, извлечение морфометрических признаков и выбор признаков как часть сложных архитектур нейронных сетей, таких как сверточные нейронные сети – CNN, рекуррентные сверточные нейронные сети – RCNN/RNN, модели рекуррентного внимания – RAM. Предварительные исследования на животноводстве, в которых применялся этот подход, показали значительные улучшения в прогнозировании массы тела по сравнению с более традиционными подходами, тем не менее есть много возможностей для улучшений, особенно в точной автоматической сегментации животных на изображениях со сложным фоном, смешанным фоном (похожий цвет на объекты) или нескольких предметов.

В статье [23] метод фотограмметрии «структура из движения» (SfM) предлагается в качестве неинвазивного и недорогого подхода к трехмерной реконструкции тела свиньи.

Авторы статьи [24] разрабатывают серию алгоритмов предварительной обработки, включая сегментацию экземпляров, независимость от расстояния, шумоподавление и коррекцию вращения, они могут сохранять информацию о теле свиней и устранять влияние окружающей среды. После обработки изображения передаются в модель прогнозирования веса. Их модель прогнозирования

веса разрабатывается в BotNet.

Авторы статьи [25] предложили методы глубокого обучения для прогнозирования живой массы крупного рогатого скота. Их эксперименты показывают, что сверточные нейронные сети хорошо справляются с задачей расчета веса в 2D изображениях. Тем не менее, сети очень подвержены неверным данным. Хотя авторы достигли гораздо более низкой частоты ошибок, чем у моделей, обученных на отобранных вручную функциях, еще предстоит проделать большую работу, чтобы устранить большие ошибки, которые могут возникнуть из-за этих неверных точек данных, поскольку они могут возникнуть при реализации модели в практическом использовании.

Авторы работы [26] предложили метод оценки веса свиней по изображениям без ограничения позы и освещения. Метод оценки веса свиньи без ограничений на позу свиньи и среду захвата изображения использовал только 2D функции для модели оценки веса и последние достижения в области машинного обучения. Для описания осанки были введены новые признаки: искривление и отклонение. Эти результаты не впечатляют, но примечательны, если учесть непринужденную позу, отсутствие вмешательства человека в выбор изображения и использование только 2D функций, при которых предыдущие работы даже не могли работать. Однако такие изображения могут иметь проблемы, связанные с появлением нескольких свиней или захватом только части тел. В работе [12] представлена система измерения жира у коров и быков породы ангус, которая использует кривизну для описания формы тела.

В работе [6] показана успешность использования 3D камер для оценки массы тела и свойств молока с помощью измерений характеристик спины у молочных коров.

ОЦЕНКА СКЕЛЕТА

Поскольку в настоящее время на фермах применяются датчики глубины потребительского класса, облака точек как тип трехмерной структуры данных показывают много преимуществ для измерения тела животного, которыми не обладают традиционные двухмерные данные. Все большее число исследований по сканированию и обработке данных в виде облаков точек животного было разработано. Системы трехмерного сканирования для получения потоков облаков точек поверхностей тела животных в сложных условиях фермы были реализованы в различных исследованиях. Измерение тела животного и определение хромоты могут быть далее исследованы на основе таких систем. Однако для задач, в которых используются только некоторые свойства исходной формы животного, хранение и обработка всего набора данных о поверхности тела животного может не требоваться. Использование признаков для оценки размеров тела было применено во многих исследованиях.

Скелеты как абстрактные представления, которые совместно описывают геометрию, топологию и свойства симметрии фигуры с помощью компактных и интуитивно понятных способов, полезны в приложениях моделирования и анимации. Выбор кадров, содержащих подходящие позы для измерения тела животного, может быть эффективно реализован с помощью скелета. Было предложено множество алгоритмов извлечения скелета. Многочисленные методы извлечения скелета из двухмерных фигур были подробно исследованы, и эти методы приводят к удовлетворительным результатам. Бай и др. предложили надежные методы для обрезки лишних ветвей, и они используются как часть разработанного алгоритма. Алгоритмы извлечения скелета для трехмерных фигур более трудоемки, чем двухмерные подходы, из-за очень сложных пространственных отношений в трехмерных данных. Скелеты трехмерных фигур можно условно разделить на поверхностные и криволинейные. Криволинейный скелет в виде серединной оси определяется как множество центров максимальных, вписанных в область трехмерного пространства шаров. Криволинейные скелеты трубчатых форм с локальными, осевыми, круговыми сечениями могут быть определены как одномерные структуры, которые, по крайней мере, сохраняют исходную топологию формы.

Авторы [27] предложили средний криволинейный скелет для трехмерной поверхности в виде сетки. Однако подходы на основе сужения сетки применяются для замкнутых поверхностей. В реальных условиях трудно получить такие высококачественные облака точек из-за окклюзии внутренней части тела животного и отсутствия части поверхности. Наиболее эффективными являются методы, которые могут напрямую извлекать скелет из неполного облака точек. Они вычисляют точки скелета из локальных наборов точек как ветви, а затем соединяют различные ветви для формирования криволинейного скелета. Полученные скелеты с помощью этих методов могут применяться в различных приложениях, таких как сопоставление форм, деформации и поиска. Вычисление оси вращательной симметрии с помощью алгоритма в работе основывается на предварительной цилиндрической форме и точных нормалях точек. Подход Li-среднего скелета является репрезентативным методом скелетизации, который может непосредственно проецировать образцы точек на их локальные центры без построения связности точек или оценки нормалей точек. Однако различные ветви облаков точек животного, рассчитанные с помощью Li-среднего подхода, должны быть извлечены с использованием различных параметров, что делает процесс нестабильным и трудоемким. Метод переноса скелета, предложенный Сейланом и др., позволяет избежать потерь

времени, связанных с извлечением всех скелетов из последовательности, и найти соответствие между скелетами кривых каждого кадра. Однако источник скелетов, используемый для переноса, все равно должен быть извлечен методом скелетизации. Point2skeleton – это метод извлечения скелета без учителя, который может изучать представления скелетов из облаков точек. Эти два метода могут быть реализованы на облаках точек общих форм (включая домашний скот) и поэтому будут сравниваться с предложенным методом.

Обычные методы извлечения скелета разработаны для общей формы без учета топологии. Поэтому для облаков точек домашнего скота наиболее подходящим является метод «сверху вниз». Зная, что большинство домашних животных имеют фиксированную топологию и симметричную структуру, можно улучшить скорость и надежность подходов к извлечению скелета. Уже есть несколько исследований, использующих предварительные знания о строении человека для оценки положения суставов или вычисления скелетов исходных фигур. Авторы [28] определяют модель скелета и подгоняют скелет к соответствующим частям тела. В статье [29] добавили ограничения сохранения длины и симметрии для повышения точности извлеченного скелета. Подход к извлечению скелета растений также был предложен в области фенотипирования растений. Однако нет исследований, посвященных методу извлечения скелета специально для домашнего скота.

Был предложен новый метод, который использует существующий метод извлечения двухмерного скелета и предварительные данные о животном для извлечения криволинейных скелетов. Так как скелет вычисляется по контуру проецируемого облака точек, то это позволяет избежать трудоемкого процесса вычисления большого количества облаков точек. Согласно [30], извлеченный скелет общими методами без связанных с движением данными является абстрактной формой одной статической модели и не может быть применен к другим приложениям. Предлагаемый метод основан на нормализации позы [40], и извлеченный криволинейный скелет может быть сопоставлен с той же системой координат. Кроме того, извлеченный скелет разделен на несколько ветвей, включая четыре ветви ног и ветвь туловища. Далее сортируются точки скелета на каждой ветви по их пространственным отношениям, а целевые точки скелета конкретной ветви извлекаются в соответствии с их приближительным положением. Полученный скелет обладает отличным потенциалом для обнаружения ориентиров измерения тела и задач, связанных с движением, таких как определение хромоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные тенденции развития технологий промышленного производства в мире связаны с максимальной автоматизацией производства с целью минимизации производственных затрат при соблюдении общепринятых экологических норм. Создаваемые новые технологии и автоматизированные системы позволяют решать следующие актуальные задачи: экстерьерная оценка, постоянный мониторинг поведения и здоровья животных; регулярная автоматическая оценка живого веса (оценка суточного прироста), размера и формы животных для планирования потребления кормов и конечной продукции предприятия; адаптивное индивидуальное кормление в зависимости от оценки состояния животных.

Общий подход к оценке скота основан на результатах визуального осмотра, ощупывания животного и, как правило, получения измерений вручную. В то же время большинство измерений и сама экспертная оценка являются трудоемкими и субъективными. Только взвешивание животного из-за стресса ведет к потере его массы и продуктивности на 5–10 %.

Актуальной задачей является разработка технологии и системы автоматической комплексной оценки (ценности) каждого животного с учетом всех прижизненных измерений морфологических характеристик по конституции и экстерьеру, породности и происхождению, продуктивности и развитию, качеству потомства и воспроизводительной способности.

Существующие системы для бесконтактных измерений животного используют, как правило, линейные характеристики и работают в контролируемых условиях. Использование камер для наблюдения за животными и их поведением вручную доступно уже несколько десятилетий. Однако для проведения комплексной оценки скота и измерений его тела двухмерной информации (линейных характеристик) недостаточно, поскольку не учитываются трехмерные морфологические характеристики животного и его движение в трехмерном пространстве. Отсутствуют готовые системы автоматического мониторинга широкого спектра формы тела и экспертной оценки животного на основе бесконтактного измерения трехмерных морфологических характеристик.

Остается открытой задача точной оценки физических и морфологических параметров биологических макрообъектов на основе анализа изображений. В известных работах, посвященных задаче оценки физических и морфологических параметров, отсутствуют универсальность и апробация результативности моделей, методов и алгоритмов. Кроме того, известные алгоритмы имеют достаточно высокую вычислительную сложность и низкую точность.

Кроме того, актуальной задачей является надежный алгоритм нормализации позы трехмерной модели биологических макрообъектов, а также надежный и универсальный алгоритм извлечения скелета биологических макрообъектов.

Список источников

1. Salau, Jennifer. Automated calculation of udder depth and rear legB angle in Holstein- Friesian cows using a multi-Kinect cow scanning system / Jennifer Salau, Jan H. Haas, Wolfgang Junge, Georg Thaller // *Biosystems Engineering*. – 2017. – Vol. 160. – P. 154–169.
2. Salau, Jennifer. A multi-Kinect cow scanning system: Calculating linear traits from manually marked recordings of Holstein-Friesian dairy cows / Jennifer Salau, Jan H. Haas, Wolfgang Junge, Georg Thaller // *Biosystems Engineering*. – 2017. – Vol. 157. – P. 92–98.
3. Vazquez-Arellano, Manuel 3-D Imaging Systems for Agricultural Applications: A Review / Manuel Vazquez-Arellano, Hans W. Griepentrog, David Reiser, Dimitris S. Paraforos // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16, no. 5.
4. Nasirahmadi, Abozar. Implementation of machine vision for detecting behaviour of cattle and pigs / Abozar Nasirahmadi, Sandra A. Edwards, Barbara Sturm // *Livestock Science*. – 2017. – Vol. 202. – P. 25–38.
5. Tasdemir, Sakir. Determination of body measurements on the Holstein cows using digital image analysis and estimation of live weight with regression analysis / Sakir Tasdemir, Abdullah Urkmez, Seref Inal // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2011. – Vol. 76, no. 2. – P. 189–197.
6. Xiang, Y. 3D Model Generation of Cattle by Shape-from-Silhouette Method for ICT Agriculture / Y. Xiang, S. Nakamura, H. Tamari et al. // *2016 10th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS)*. – 2016. – P. 611–616.
7. Viazzi, S. Image feature extraction for classification of aggressive interactions among pigs / S. Viazzi, G. Ismayilova, M. Oczak et al. // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2014. – Vol. 104. – P. 57–62.
8. Kuzuhara, Yukako. A preliminarily study for predicting body weight and milk properties in lactating Holstein cows using a three-dimensional camera system / Yukako Kuzuhara, Kensuke Kawamura, Rena Yoshitoshi et al. // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2015. – Vol. 111. – P. 186–193.
9. Van Hertem, Tom. Implementation of an automatic 3D vision monitor for dairy cow locomotion in a commercial farm / Tom Van Hertem, Andrés Schlageter Tello, Stefano Viazzi et al. // *Biosystems Engineering*. – 2018. – Vol. 173. – P. 166–175.
10. Huang, Lvwen. Non-Contact Body Measurement for Qinchuan Cattle with LiDAR Sensor / Lvwen Huang, Shuqin Li, Anqi Zhu et al. // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18, no. 9.
11. Nir, Oron. 3D Computer-vision system for automatically estimating heifer height and body mass / Oron Nir, Yisrael Parmet, Daniel Werner et al. // *Biosystems Engineering*. – 2018. – Vol. 173. – P. 4–10.
12. Sumi, K. Framework of Cow Calving Monitoring System Using a Single Depth Camera / K. Sumi, T. T. Zin, I. Kobayashi, Y. Horii // *2018 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*. – 2018. – P. 1–7.
13. Song, X. Automated body weight prediction of dairy cows using 3-dimensional vision / X. Song, E. A. M. Bokkers, P. P. J. van der Tol et al. // *Journal of Dairy Science*. – 2018. – Vol. 101, no. 5. – P. 4448–4459.
14. McPhee, M. J. Live animal assessments of rump fat and muscle score in Angus cows and steers using 3-dimensional imaging / M. J. McPhee, B. J. Walmsley, L. M. Cafe et al. // *Journal of Animal Science*. – 2017. – Vol. 95, no. 4. – P. 1847–1857.
15. Guo, Hao LSSA CAU: An interactive 3d point clouds analysis software for body measurement of livestock with similar forms of cows or pigs / Hao Guo, Xiaodong Ma, Qin Ma et al. // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2017. – Vol. 138. – P. 60–68.
16. Kawasue, Kikuhito. Three-Dimensional Shape Measurement System for Black Cattle Using KINECT Sensor / Kikuhito Kawasue, T. Ikeda, Tadaaki Tokunaga, H. Harada // *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. – 2013. – Vol. 7, № 01. – P. 222–230.
17. Kawasue, Kikuhito. Black cattle body shape and temperature measurement using thermography and KINECT sensor / Kikuhito Kawasue, Khin Dagon Win, Kumiko Yoshida, Tadaaki Tokunaga // *Artificial Life and Robotics*. – 2017 Dec. – Vol. 22, no. 4. – P. 464–470.
18. Pezzuolo, Andrea A Feasibility Study on the Use of a Structured Light Depth-Camera for Three-Dimensional Body Measurements of Dairy Cows in Free- Stall Barns / Andrea Pezzuolo, Marcella Guarino, Luigi Sartori, Francesco Marinello // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18, no. 2.
19. Song, X. Automated body condition scoring of dairy cows using 3 dimensional feature extraction from multiple body regions / X. Song, E. A. M. Bokkers, S. van Mourik et al. // *Journal of Dairy Science*. – 2019. – Vol. 102, no. 5. – P. 4294–4308.
20. Maki, Naoto. 3D Model Generation of Cattle Using Multiple Depth-Maps for ICT Agriculture / Naoto Maki, Shohei Nakamura, Shigeru Takano, Yoshihiro Okada // *Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems* / ed. by Leonard Barolli, Olivier Terzo. – Cham : Springer International Publishing, 2018. – P. 768–777.
21. Guo, Hao. A bilateral symmetry based pose normalization framework applied to livestock body measurement in point clouds / Hao Guo, ZhenBo Li, Qin Ma et al. // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2019. – Vol. 160. – P. 59–70.
22. Ruchay, Alexey. Accurate body measurement of live cattle using three depth cameras and non-rigid 3-D shape recovery / Alexey Ruchay, Vitaly Kober, Konstantin Dorofeev et al. // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2020. – Vol. 179. – P. 105821.

23. Sfikas, Konstantinos. Pose normalization of 3D models via reflective symmetry on panoramic views / Konstantinos Sfikas, Theoharis Theoharis, Ioannis Pratikakis // *The Visual Computer*. – 2014. — Vol. 30, № 11. – P. 1261–1274.
24. Ecins, Aleksandrs. Detecting Reflectional Symmetries in 3D Data Through Symmetrical Fitting / Aleksandrs Ecins, Cornelia Ferm Iler, Yiannis Aloimonos // *2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*. – 2017. – P. 1779–1783.
25. Wu, Zhelun. Symmetry detection of occluded point cloud using deep learning / Zhelun Wu, Hongyan Jiang, Siyun He // *Procedia Computer Science : Proceedings of the 10th International Conference of Information and Communication Technology*. – 2021. – Vol. 183. – P. 32–39.
26. He, Chen Dominant Symmetry Plane Detection for Point-Based 3D Models / Chen He, Lei Wang, Yonghui Zhang, Chunmeng Wang // *Advances in Multimedia*. – 2020. – Vol. 10. – P. 1–8.
27. Nagar, Rajendra. 3DSymm: Robust and Accurate 3D Reflection Symmetry Detection / Rajendra Nagar, Shanmuganathan Raman // *Pattern Recognition*. – 2020. – Vol. 107. – P. 107483.
28. Gao, Lin. PRS-Net: Planar Reflective Symmetry Detection Net for 3D Models / Lin Gao, Ling-Xiao Zhang, Hsien-Yu Meng et al. // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. – 2020. – Vol. 06. – P. 1–1.
29. Gothandaraman, Rajkumar. Virtual models in 3D digital reconstruction: detection and analysis of symmetry / Rajkumar Gothandaraman, M. Sreekumar // *Journal of Real-Time Image Processing*. – 2021. – Vol. 05.
30. Girshick, R. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation / R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, J. Malik // *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2014. – P. 580–587.

References

1. Salau, J., Haas, J. H., Junge, W., Thaller, G. Automated calculation of udder depth and rear B angle in Holstein-Friesian cows using a multi-Kinect cow scanning system. *Biosystems Engineering*, 2017, vol. 160, pp. 154–169.
2. Salau, J., Haas, J. H., Junge, W., Thaller, G. A multi-Kinect cow scanning system: Calculating linear traits from manually marked recordings of Holstein-Friesian dairy cows. *Biosystems Engineering*, 2017, vol. 157, pp. 92–98.
3. Vazquez-Arellano, M., Griepentrog, H. W., Reiser, D., Paraforos, D. S. 3-D Imaging Systems for Agricultural Applications: A Review. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 5.
4. Nasirahmadi, A., Edwards, S. A., Sturm, B. Implementation of machine vision for detecting behaviour of cattle and pigs. *Livestock Science*, 2017, vol. 202, pp. 25–38.
5. Tasdemir, S., Urkmez, A., Inal, S. Determination of body measurements on the Holstein cows using digital image analysis and estimation of live weight with regression analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, vol. 76, no. 2, pp. 189–197.
6. Xiang, Y., Nakamura, S., Tamari, H., Takano, S., Okada, Y. 3D Model Generation of Cattle by Shape-from-Silhouette Method for ICT Agriculture. *2016 10th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS)*, 2016, pp. 611–616.
7. Viazzi, S., Ismayilova, G., Oczak, M., Sonoda, L. T., Fels, M., Guarino M., et al. Image feature extraction for classification of aggressive interactions among pigs. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, vol. 104, pp. 57–62.
8. Kuzuhara, Y., Kawamura, K., Yoshitoshi, R., Tamaki, T., Sugai, S., Ikegami, M., et al. A preliminarily study for predicting body weight and milk properties in lactating Holstein cows using a three-dimensional camera system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, vol. 111, pp. 186–93.
9. Hertem, T. V., Tello, A. S., Viazzi, S., Steensels, M., Bahr, C., Romanini CEB, et al. Implementation of an automatic 3D vision monitor for dairy cow locomotion in a commercial farm. *Biosystems Engineering*, 2018, vol. 173, pp. 166–175.
10. Huang, L., Li, S., Zhu, A., Fan, X., Zhang, C., Wang, H. Non-Contact Body Measurement for Qinchuan Cattle with LiDAR Sensor. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 9.
11. Nir, O., Parmet, Y., Werner D., Adin G., Halachmi I. 3D Computer-vision system for automatically estimating heifer height and body mass. *Biosystems Engineering*, 2018, vol. 173, pp. 4–10.
12. Sumi, K., Zin, T. T., Kobayashi, I., Horii, Y. Framework of Cow Calving Monitoring System Using a Single Depth Camera. *2018 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*, 2018, pp. 1–7.
13. Song, X., Bokkers, E. A. M., van der Tol P. P. J., Koerkamp, P. W. G. G., van Mourik, S. Automated body weight prediction of dairy cows using 3-dimensional vision. *Journal of Dairy Science*, 2018, vol. 101 (5), pp. 4448–4459.
14. McPhee, M. J., Walmsley, B. J., Café, L. M., Oddy, V. H., McPhee, M. J., Alempijevic, A., et al. Live animal assessments of rump fat and muscle score in Angus cows and steers using 3-dimensional imaging. *Journal of Animal Science*, 2017, vol. 95, no. 4, pp. 1847–1857.
15. Guo, H., Ma, X., Ma, Q., Wang, K., Su, W., Zhu, D. LSSA CAU: An interactive 3d point clouds analysis software for body measurement of livestock with similar forms of cows or pigs. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, vol. 138, pp. 60–68.
16. Kawasue, K., Ikeda, T., Tokunaga, T., Harada, H. Three-Dimensional Shape Measurement System for Black Cattle Using KINECT Sensor. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2013, vol. 7, no. 01, pp. 222–230.
17. Kawasue, K., Win, K. D., Yoshida, K., Tokunaga, T. Black cattle body shape and temperature measurement using thermography and KINECT sensor. *Artificial Life and Robotics*, 2017 Dec, vol. 22, no. 4, pp. 464–470.
18. Pezzuolo, A., Guarino, M., Sartori, L., Marinello, F. A Feasibility Study on the Use of a Structured Light Depth-Camera for Three-Dimensional Body Measurements of Dairy Cows in Free-Stall Barns. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 2.

19. Song, X., Bokkers, E. A. M., van Mourik, S., Koerkamp, P. W. G. G., van der Tol, P. P. J. Automated body condition scoring of dairy cows using 3dimensional feature extraction from multiple body regions. *Journal of Dairy Science*, 2019, vol. 102, no. 5, pp. 4294–308.
20. Maki, N., Nakamura, S., Takano, S., Okada, Y. 3D Model Generation of Cattle Using Multiple Depth-Maps for ICT Agriculture. *Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*. Cham, Springer International Publishing, 2018, pp. 768–77.
21. Guo, Hao, Li, ZhenBo, Ma, Qin et al. A bilateral symmetry based pose normalization framework applied to livestock body measurement in point clouds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, vol. 160, pp. 59–70.
22. Ruchay, Alexey, Kober, Vitaly, Dorofeev, Konstantin et al. Accurate body measurement of live cattle using three depth cameras and non-rigid 3-D shape recovery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, vol. 179, p. 105821.
23. Sfikas, Konstantinos, Theoharis, Theoharis, Pratikakis, Ioannis. Pose normalization of 3D models via reflective symmetry on panoramic views. *The Visual Computer*, 2014, vol. 30, no. 11, pp. 1261–1274.
24. Ecins, Aleksandrs, Ferm Iler, Cornelia, Aloimonos, Yiannis. Detecting Reflectional Symmetries in 3D Data Through Symmetrical Fitting. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, 2017, pp. 1779–1783.
25. Wu, Zhelun, Jiang, Hongyan, He, Siyun. Symmetry detection of occluded point cloud using deep learning. *Procedia Computer Science : Proceedings of the 10th International Conference of Information and Communication Technology*, 2021, Vol. 183, pp. 32–39.
26. He, Chen, Wang, Lei, Zhang, Yonghui, Wang, Chunmeng. Dominant Symmetry Plane Detection for Point-Based 3D Models. *Advances in Multimedia*, 2020, vol. 10, pp. 1–8.
27. Nagar, Rajendra, Raman, Shanmuganathan 3DSymm: Robust and Accurate 3D Reflection Symmetry Detection. *Pattern Recognition*, 2020, vol. 107, p. 107483.
28. Gao, Lin, Zhang, Ling-Xiao, Meng, Hsien-Yu et al. PRS-Net: Planar Reflective Symmetry Detection Net for 3D Models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2020, vol. 06, p. 1–1.
29. Gothandaraman, Rajkumar, Sreekumar, M. Virtual models in 3D digital reconstruction: detection and analysis of symmetry. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2021, vol. 05.
30. Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., Malik, J. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 580–587.

Статья поступила в редакцию 01.03.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 14.03.2023.

The article was submitted 01.03.2023; approved after reviewing 13.03.2023; accepted for publication 14.03.2023.

УДК 004.021

ПОДХОД К КЛАССИФИКАЦИИ МЕТОДОВ ТЕГИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДОКУМЕНТОВ

Семёночкин Дмитрий Олегович, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28, магистрант, ORCID: 0009-0008-2352-4313, e-mail: semm0202@yandex.ru

Кравец Алла Григорьевна, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-1675-8652, e-mail: AllaGKravets@yandex.ru

Тегирование документов является важным процессом в управлении и организации цифрового контента. Ручной процесс тегирования документов становится все более сложным с ростом объема цифрового контента. Для решения этой проблемы были разработаны различные методы автоматизации процесса тегирования документов. В этой статье представлен обзор существующих методов тегирования документов, выявлены сильные и слабые стороны, а также области применения рассмотренных методов. В статье обсуждаются два подхода к решению проблемы тегирования документов – методы классификации документов на основе известного набора тегов и методы кластеризации документов, где набор тегов изначально отсутствует. Цель статьи – систематизировать методы, которые можно использовать для тегирования документов, и предложить рекомендации для разработчиков систем автоматической обработки документов, чтобы они могли принимать обоснованные решения при выборе метода для проектируемой системы.

Ключевые слова: тегирование, электронный документ, методы классификации, методы кластеризации

APPROACH TO THE CLASSIFICATION OF TAGGING METHODS IN AUTOMATIC DOCUMENT PROCESSING SYSTEMS

Semjonochkin Dmitriy O., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, undergraduate student, ORCID: 0009-0008-2352-4313, e-mail: semm0202@yandex.ru

Kravec Alla G., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1675-8652, e-mail: AllaGKravets@yandex.ru

Document tagging is an important process in managing and organizing digital content. The manual process of document tagging is becoming increasingly complex as the volume of digital content grows. To solve this problem, various methods have been developed to automate the document tagging process. This article provides an overview of existing document tagging methods, identifies the strengths and weaknesses, as well as the areas of application of the considered methods. The article discusses two approaches to solving the document tagging problem – methods of document classification based on a known set of tags, and methods of document clustering where a set of tags is initially absent. The aim of the article is to systematize the methods that can be used for tagging documents and to offer recommendations to developers of automatic document processing systems so that they can make informed decisions when choosing a method for the system being designed.

Keywords: tagging, electronic document, blocking methods, clustering methods

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

С ростом текстовой информации из электронных источников и из интернета правильное тегирование огромного количества данных стало важным шагом на пути к упрощению манипуляции документами, используемыми в предметных областях. Тегирование документа – это процесс добавления меток или тегов к документу для его классификации [1], организации и идентификации. Примером может служить тегирование научных статей с помощью ключевых слов, связанных с областью исследования, методологией или выводами, чтобы помочь исследователям быстро находить соответствующие статьи для своей работы. Для решения проблемы тегирования электронных документов были разработаны различные методы автоматизации процесса тегирования документов. Хотя методы тегирования документов упростили задачу [2], они по-прежнему сопряжены со специфичными проблемами. Некоторые из распространенных проблем включают низкую точность, отсутствие масштабируемости и необходимость ручной корректировки [3]. Кроме того, в разных областях задач требуются разные методы тегирования, что усложняет выбор правильного метода для конкретной задачи.

Тегирование документов может происходить по двум сценариям: тегирование документов с использованием подготовленного набора тегов [4] и тегирование документов на основе выделяемых тегов в процессе обработки документов. Эти два сценария относятся к проблемам классификации и кластеризации документов соответственно [5]. Классификация и кластеризация в данном случае – два популярных подхода, используемых при анализе и организации документов.

Классификация, или ещё этот процесс называют категоризацией, – это процесс присвоения документам predeterminedных категорий или тегов. Этот процесс основан на характеристиках документов [6], таких как содержание, стиль, автор и т. д. Цель классификации – разделить документы на заранее определенные классы, при этом каждый документ может принадлежать как к одному классу (классификация по одному признаку), так и к нескольким классам одновременно (классификация по нескольким признакам). Основное различие между классификацией и кластеризацией заключается в том, что классификация – это метод обучения с учителем [7], а это означает, что для обучения и прогнозирования требуются размеченные обучающие данные. Кластеризация – это метод обучения без учителя, который группирует похожие документы в кластеры без предварительного определения категорий или классов. Целью кластеризации является обнаружение базовой структуры и взаимосвязей между документами на основе их сходства или различия. В отличие от классификации, кластеризация не требует маркированных обучающих данных, вместо этого она использует алгоритмы для поиска закономерностей [8] и взаимосвязей в данных. В статье рассматриваются как методы классификации, так и методы кластеризации.

МЕТОДЫ КЛАССИФИКАЦИИ

Существует несколько категорий методов классификации документов (рис. 1), рассмотрим каждую категорию вместе с самыми популярными алгоритмами.

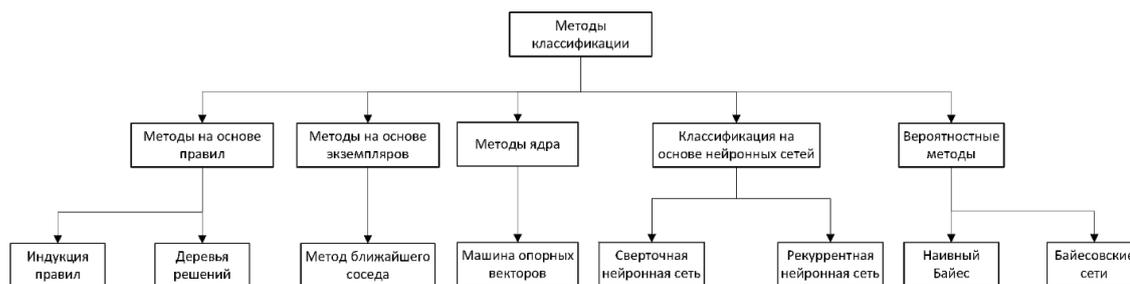


Рисунок 1 – Структура методов классификации

1. Методы, основанные на правилах [9]. Методы, основанные на правилах, используют predeterminedные правила или условия для категоризации документов. Например, правило может заключаться в том, что все документы, содержащие слово «финансы», должны быть отнесены к категории «относящиеся к финансам». Методы, основанные на правилах, просты и понятны, но они имеют ограниченную точность и могут быть подвержены ошибкам из-за ограниченного числа predeterminedных правил. Они лучше всего подходят для небольших, четко определенных задач классификации. Сюда можно отнести методы деревьев решений и методы индукции правил. Деревья решений используются для классификации документов путем построения древовидной модели, которая предсказывает класс документа на основе его функций или атрибутов. Деревья решений просты для понимания и интерпретации [14], но могут быть подвержены переобучению и нестабильности, особенно для больших и сложных наборов данных.

2. Методы на основе экземпляров – это тип алгоритма машинного обучения, который обучается, сохраняя обучающие примеры и делая прогнозы на основе сходства между новыми тестовыми экземплярами и сохраненными обучающими примерами. Одним из популярных методов на основе экземпляров является алгоритм k ближайших соседей (k -NN), который используется для задач классификации и регрессии. Алгоритм k -NN работает, сначала сохраняя весь набор обучающих данных в памяти. Когда представлен новый тестовый экземпляр, алгоритм ищет k наиболее похожих экземпляров из набора обучающих данных на основе некоторой метрики расстояния. Затем он предсказывает класс (или значение) нового экземпляра на основе класса (или значений) k ближайших соседей. Алгоритм k -NN [15] – это простой, но мощный алгоритм, который можно использовать для различных задач классификации и регрессии. Однако для больших наборов данных и многомерных пространственных объектов это может быть дорогостоящим с точки зрения вычислений, и оно может работать неэффективно, если набор данных имеет несбалансированность классов или если метрика расстояния не подходит для данных.

3. Методы ядра – это тип алгоритма машинного обучения, который преобразует данные в многомерное пространство признаков, чтобы упростить разделение на классы. Одним из популярных методов ядра для задач классификации является алгоритм машины опорных векторов (SVM). SVM – это линейный классификатор, который разделяет документы на категории [13], находя оптимальную границу между классами. Это мощный метод, который может обрабатывать нелинейные отношения между функциями и классами. Он требует больше вычислительных ресурсов по сравнению с наивным Байесом и может потребовать больше времени для обучения модели.

4. Классификация на основе нейронных сетей – это подход к машинному обучению, который использует искусственные нейронные сети для распознавания закономерностей и классификации данных. Нейронные сети – это тип алгоритма машинного обучения, вдохновленный структурой и функциями человеческого мозга. Их можно использовать для классификации документов, обучая сеть идентифицировать шаблоны и отношения между функциями и классами [11]. Однако они могут потребовать значительных вычислительных ресурсов и трудны для интерпретации. Сверточные нейронные сети (CNN) – это тип нейронной сети, который превосходно справляется с задачами классификации изображений. Они используют серию сверточных слоев и слоев объединения для изучения функций из входных данных, а затем используют полностью связанные слои для прогнозирования. Рекуррентные нейронные сети (RNN) – это еще один тип нейронных сетей, обычно используемых для задач классификации последовательностей, таких как распознавание текста или речи.

5. Методы вероятностной классификации – это подходы к машинному обучению, использующие теорию вероятностей для прогнозирования вероятности того, что заданные входные данные принадлежат каждому возможному выходному классу. Эти методы часто используются для задач классификации, когда существует неопределенность или когда входные объекты имеют некоторую степень перекрытия между классами. Наивный байесовский алгоритм – это вероятностный алгоритм машинного обучения, который часто используется для классификации текста. Он использует теорему Байеса [10] для оценки вероятности принадлежности документа к определенному классу с учетом его характеристик или атрибутов. Наивный Байес делает предположение о том, что признаки независимы, что не всегда может быть так, что снижает его точность. Байесовские сети – это еще один тип метода вероятностной классификации, который может моделировать сложные зависимости между входными признаками. Байесовские сети представляют совместное распределение вероятностей по всем входным и выходным переменным в виде ориентированного ациклического графа, где каждый узел представляет собой переменную, а каждое ребро представляет собой вероятностную зависимость между переменными. Алгоритм использует теорему Байеса для вычисления апостериорного распределения вероятностей по выходным классам с учетом входных признаков.

Таким образом, выбор метода системы тегирования документов определяется спецификой предметной области, которая включает в себя следующие характеристики [12]:

- размер и характер данных;
- требуемая точность;
- доступные вычислительные ресурсы.

МЕТОДЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

На рисунке 2 визуализированы существующие типы методов кластеризации.

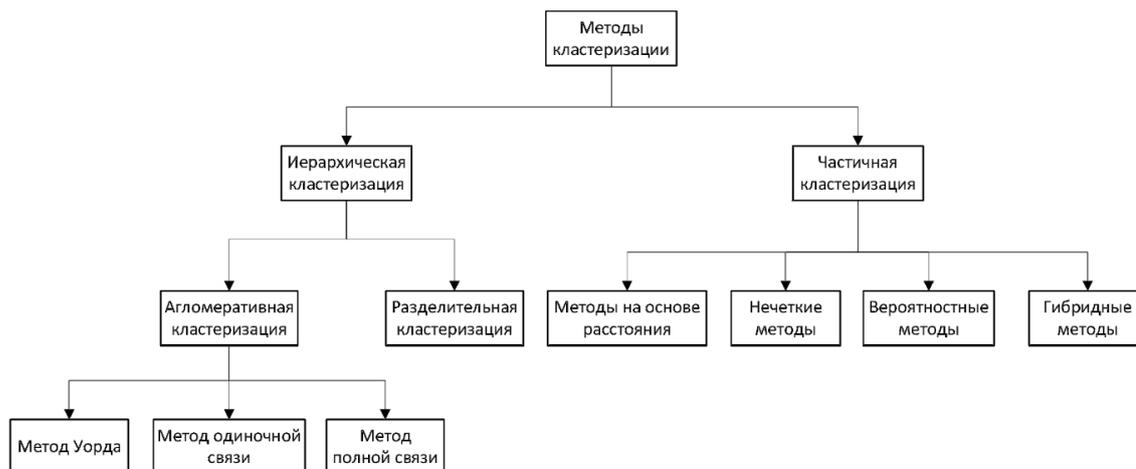


Рисунок 2 – Иерархическая структура методов кластеризации

Методы кластеризации можно условно разделить на две категории: иерархическая и частичная кластеризация. Иерархическая кластеризация происходит последовательно либо путем слияния меньших кластеров в более крупные, либо путем разделения более крупных кластеров [16]. Частичная кластеризация приводит к кластеризации объектов в predetermined количество кластеров. Рассмотрим подробнее все из категорий.

При иерархической кластеризации для тегирования документов документы обычно представляются в виде векторов признаков или терминов, а для измерения сходства между документами используется метрика сходства [23] или расстояния. Алгоритм начинается с каждого документа как отдельного кластера и итеративно объединяет ближайшие кластеры, пока не будет выполнен критерий остановки.

Для тегирования документов используются следующие алгоритмы иерархической кластеризации:

1. Агломеративная иерархическая кластеризация (Agglomerative Hierarchical Clustering, АНС): АНС – это восходящий подход к иерархической кластеризации, при котором алгоритм начинается с каждого документа как отдельного кластера и объединяет ближайшие кластеры до тех пор, пока не будет выполнен критерий остановки. АНС обычно используется для тегирования документов из-за его способности обрабатывать большие наборы данных и фиксировать отношения между документами на разных уровнях детализации.

2. Разделительная иерархическая кластеризация (Divisive Hierarchical Clustering, ДНС): ДНС – это нисходящий подход к иерархической кластеризации, при котором алгоритм начинает работу со всеми документами в одном кластере и последовательно разбивает кластер на более мелкие кластеры, пока не будет достигнут критерий остановки. ДНС реже используется для тегирования документов по сравнению с АНС, но может быть полезен для поиска структуры в наборах данных, которые трудно кластеризовать другими методами.

3. Метод Уорда (Ward's Method). Метод Уорда – это тип АНС, целью которого является минимизация общей внутрикластерной дисперсии. Он обычно используется для тегирования документов из-за его способности обрабатывать большие наборы данных и создавать компактные, хорошо разделенные кластеры.

4. Метод одиночной связи (Single Linkage). Метод одиночной связи – это тип АНС, который связывает два кластера по расстоянию между ближайшей парой точек в двух кластерах. Известно, что метод одиночной связи – удлиненные кластеры, похожие на струны, но она может быть полезна для поиска структуры в наборах данных, которые трудно кластеризовать другими методами.

5. Метод полной связи (Complete Linkage). Метод полной связи – это тип АНС, который связывает два кластера по расстоянию между самой дальней парой точек в двух кластерах [18]. Известно, что метод полной связи приводит к образованию компактных сферических кластеров, но оно может быть чувствительно к наличию точек-выбросов.

Частичная кластеризация – это тип метода кластеризации, целью которого является разделение данных на фиксированное количество кластеров, как правило, путем минимизации целевой функции, которая измеряет сходство между документами в кластере [19]. Методы частичной кластеризации

зации обычно используются для тегирования документов из-за их способности создавать компактные, хорошо разделенные кластеры и возможности масштабирования до больших наборов данных. При частичной кластеризации для тегирования документов документы обычно представляются в виде векторов признаков или терминов, а метрика подобия или расстояния используется для измерения сходства между документами.

Иерархию методов частичной кластеризации можно организовать следующим образом:

1. Методы частичной кластеризации на основе расстояния (Distance Based Partitional Clustering Methods). В эту категорию входят самые простые и основные алгоритмы частичной кластеризации, такие как k-Means и k-Medoids [20]. Эти алгоритмы направлены на разделение данных на k кластеров путем минимизации целевой функции, такой как сумма квадратов внутри кластера или сумма различий между точками и центроидами кластера.

2. Методы нечеткой раздельной кластеризации (Fuzzy Partitional Clustering Methods). Эта категория включает алгоритмы частичной кластеризации, которые позволяют мягко распределять документы по кластерам, такие как алгоритмы нечетких C-средних (FCM) и Густафсона – Кесселя (GK). Эти алгоритмы могут создавать [22] более гибкие и надежные кластеры, чем базовые методы частичной кластеризации, но они также могут требовать больших вычислительных ресурсов.

3. Методы вероятностной частичной кластеризации (Probabilistic Partitional Clustering Methods). Эта категория включает в себя алгоритмы частичной кластеризации, которые моделируют распределение данных с использованием вероятностных моделей, таких как максимизация ожидания (EM) и смешанные модели Гаусса (GMM) [17]. Эти алгоритмы могут создавать более точные и надежные кластеры, чем нечеткие методы и методы на основе расстояния, но они также могут требовать больших вычислительных ресурсов.

4. Методы гибридной раздельной кластеризации (Hybrid Partitional Clustering Methods). Эта категория включает алгоритмы частичной кластеризации, которые объединяют несколько методов кластеризации для создания более точных и надежных кластеров, таких как ансамбли кластеризации на основе разделов (PVC) и гибридная кластеризация по разделам (HPC). Эти алгоритмы могут создавать более точные и надежные кластеры [21], чем вероятностные, нечеткие методы и методы на основе расстояния, но они также могут требовать больших вычислительных ресурсов.

На основе рассмотренных методов для классификации и кластеризации для задачи тегирования электронных документов создана обобщающая интеллектуальная карта (рис. 3).

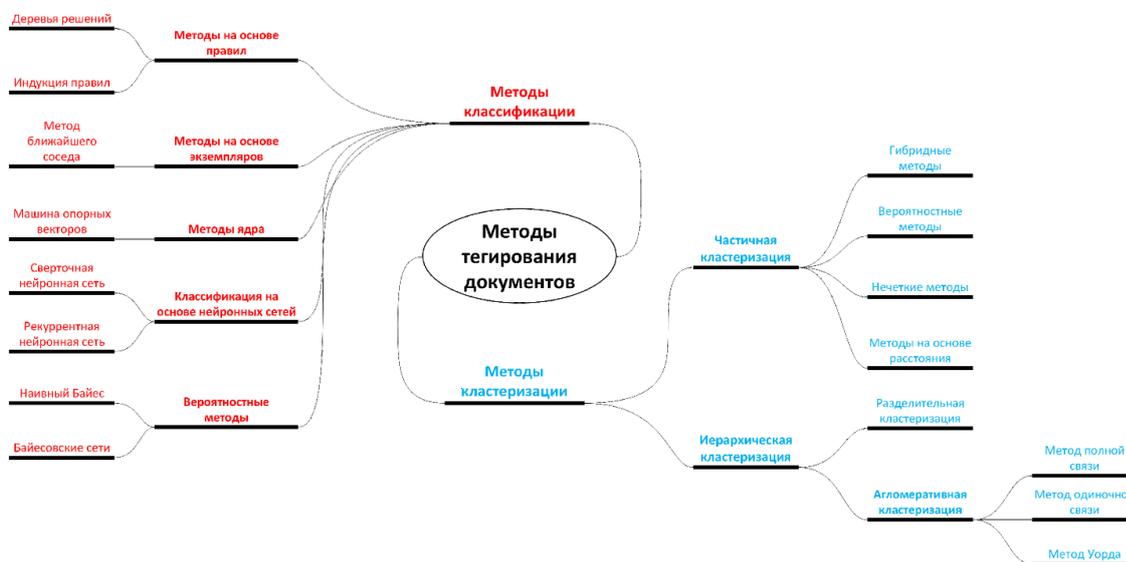


Рисунок 3 – Интеллектуальная карта методов тегирования документов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача тегирования документов является важнейшим компонентом в области управления и анализа информации, поскольку она позволяет классифицировать и организовывать обширные коллекции документов. В этой статье было рассмотрено два основных подхода, используемых в этой области, – кластеризация и классификация, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Алгоритмы кластеризации группируют документы с похожим содержанием в кластеры, а алгоритмы классификации присваивают документам predetermined категории на основе их характеристик и содержания. Разработка алгоритмов как для кластеризации, так и для классификации документов была тщательно исследована, что привело к появлению огромного количества алгоритмов.

Как разработчики систем тегирования документов, при выборе подходящего метода необходимо учитывать конкретные требования поставленной задачи. Это включает в себя такие соображения, как размер и характер данных, желаемый уровень детализации в процессе тегирования и доступные вычислительные ресурсы. Базовые алгоритмы частичной кластеризации эффективны в вычислительном отношении, но могут не давать оптимальных результатов. И наоборот, вероятностные алгоритмы частичной кластеризации, такие как максимизация ожидания (EM) и смешанные модели Гаусса (GMM), могут привести к более точным и надежным результатам, хотя и за счет увеличения вычислительных требований.

Область тегирования документов динамична и постоянно развивается, и для этой задачи не существует универсально применимого решения. На основе выделенных в статье методов тегирования документов разработчики систем автоматической обработки документов могут принимать обоснованные решения о наиболее подходящих методах для конкретных требований.

Список источников

1. Chen, S. Doctag2vec: An embedding based multi-label learning approach for document tagging / S. Chen // arXiv. – 2017. – arXiv:1707.04596.
2. Hassan, H. A. M. Semantic-based tag recommendation in scientific bookmarking systems / H. A. M. Hassan et al. // Proceedings of the 12th ACM Conference on Recommender Systems. – 2018. – P. 465–469.
3. Mukalov, P. Development of System for Auto-Tagging Articles, Based on Neural Network / P. Mukalov et al. // COLINS. – 2019. – P. 106–115.
4. Lei, K. Tag recommendation by text classification with attention-based capsule network / K. Lei et al. // Neurocomputing. – 2020. – Vol. 391. – P. 65–73.
5. Belém, F. M. A survey on tag recommendation methods / F. M. Belém, J. M. Almeida, M. A. Gonçalves // Journal of the Association for Information Science and Technology. – 2017. – Vol. 68, no. 4. – P. 830–844. – DOI: 10.1002/asi.23736.
6. Bagheri, E. Semantic tagging and linking of software engineering social content / E. Bagheri, F. Ensan // Autom. Softw. Eng. – 2016. – Vol. 23. – P. 147–190. <https://doi.org/10.1007/s10515-014-0146-2>.
7. Nakamura, S. Document Tagging Method for Low-resolution Medical Documents in Hospital Information Systems / S. Nakamura et al. // 2012 Fifth International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. – Himeji, Japan, 2012. – P. 105–109. – DOI: 10.1109/ICETET.2012.67.
8. Pandya, M. R. Method for customizable automated tagging: Addressing the problem of over-tagging and under-tagging text documents / M. R. Pandya, J. Reyes, B. Vanderheyden // 2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). – IEEE, 2020. – P. 4710–4714.
9. Jayashree, R. Text Document Summarization Using POS tagging for Kannada Text Documents / R. Jayashree, B. S. Anami, B. K. Poornima // 2021 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence). – IEEE, 2021. – P. 423–426.
10. Rasjid, Z. E. Performance comparison and optimization of text document classification using k-NN and naïve bayes classification techniques / Z. E. Rasjid, R. Setiawan // Procedia computer science. – 2017. – Vol. 116. – P. 107–112.
11. Hartmann, J. Comparing automated text classification methods / J. Hartmann et al. // International Journal of Research in Marketing. – 2019. – Vol. 36, № 1. – P. 20–38.
12. Kowsari, K. Hdltext: Hierarchical deep learning for text classification / K. Kowsari et al. // 2017 16th IEEE international conference on machine learning and applications (ICMLA). – IEEE, 2017. – P. 364–371.
13. Kowsari, K. Text classification algorithms: A survey / K. Kowsari et al. // Information. – 2019. – Vol. 10, № 4. – P. 150.
14. Liang, J. Efficient and secure decision tree classification for cloud-assisted online diagnosis services / J. Liang et al. // IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. – 2019. – Vol. 18, № 4. – P. 1632–1644.
15. Moldagulova, A. Document Classification Based on KNN Algorithm by Term Vector Space Reduction / A. Moldagulova and R. B. Sulaiman // 2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). – PyeongChang, Korea (South), 2018. – P. 387–391.
16. Murtagh, F. Algorithms for hierarchical clustering: an overview, II / F. Murtagh, P. Contreras // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. – 2017. – Vol. 7, № 6. – P. e1219.
17. Janani, R. Text document clustering using spectral clustering algorithm with particle swarm optimization / R. Janani, S. Vijayarani // Expert Systems with Applications. – 2019. – Vol. 134. – P. 192–200.
18. Abualigah, L. M. A new feature selection method to improve the document clustering using particle swarm optimization algorithm / L. M. Abualigah, A. T. Khader, E. S. Hanandeh // Journal of Computational Science. – 2018. – Vol. 25. – P. 456–466.
19. Abualigah, L. M. A combination of objective functions and hybrid krill herd algorithm for text document clustering analysis / L. M. Abualigah, A. T. Khader, E. S. Hanandeh // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2018. – Vol. 73. – P. 111–125.
20. Cutting, D. R. Scatter/gather: A cluster-based approach to browsing large document collections / D. R. Cutting et al. // ACM SIGIR Forum. – New York, USA : ACM, 2017. – Vol. 51, № 2. – P. 148–159.
21. Нгуен, Т. В. Анализ и прогноз тенденций использования терминов в компьютерных науках на основе нейросетевых моделей / Т. В. Нгуен, К. Х. Т. Зьонг, А. Г. Кравец // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2021. – Vol. 18, № 2 (200). – С. 24–38. – P. 024–038. – DOI: 10.14489/vkit.2021.02.
22. Вьет, Н. Т. Алгоритм работы веб-краулера для решения задачи сбора данных из открытых интернет-источников / Н. Т. Вьет, А. Г. Кравец // Известия Санкт-петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2019. – № 51 (77). – С. 115–119. – DOI: 10.36807/1998-9849-2019-51-77-115-119.

23. Кравец, А. Г. Экспериментальное определение оптимальных параметров рекуррентной нейронной сети для задач классификации патентов / А. Г. Кравец, А. С. Бурмистров, П. А. Задорожный // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Vol. 7, № 2 (25). – С. 325–338. – DOI: 10.26102/2310-6018/2019.25.2.027.

References

1. Chen, S., Zhang, X., & Liu, J. Doctag2vec: An embedding based multi-label learning approach for document tagging. *arXiv*, 2017, arXiv:1707.04596.
2. Hassan, H. A. M., Amer, M., & Wanas, N. A. (2018). Semantic-based tag recommendation in scientific book-marking systems. *Proceedings of the 12th ACM Conference on Recommender Systems*, pp. 465–469.
3. Mukalov, P., Datsenko, I., & Rudin, D. Development of System for Auto-Tagging Articles, Based on Neural Network. *COLINS*, 2019, pp. 106–115.
4. Lei, K., Zhang, Y., & Cai, Z. Tag recommendation by text classification with attention-based capsule network. *Neurocomputing*, 2020, vol. 391, pp. 65–73.
5. Belém, F. M., Almeida, J. M., & Gonçalves, M. A. A survey on tag recommendation methods. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2017, vol. 68, no. 4, pp. 830–844. DOI: 10.1002/asi.23736.
6. Bagheri, E., & Ensan, F. Semantic tagging and linking of software engineering social content. *Automated Software Engineering*, 2016, vol. 23, pp. 147–190. <https://doi.org/10.1007/s10515-014-0146-2>.
7. Nakamura, S., Takahashi, H., Morita, M., & Yoshikawa, H. Document tagging method for low-resolution medical documents in hospital information systems. *2012 Fifth International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*. Himeji, Japan, 2012. pp. 105–109. DOI: 10.1109/ICETET.2012.67.
8. Pandya, M. R., Reyes, J., & Vanderheyden, B. Method for customizable automated tagging: Addressing the problem of over-tagging and under-tagging text documents. *2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. IEEE, 2020, pp. 4710–4714.
9. Jayashree, R., Anami, B. S., & Poornima, B. K. Text document summarization using POS tagging for Kannada text documents. *2021 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)*. IEEE, 2021, pp. 423–426.
10. Rasjid, Z. E., & Setiawan, R. Performance comparison and optimization of text document classification using k-NN and naïve Bayes classification techniques. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 116, pp. 107–112.
11. Hartmann, J., Shukla, R., & Hofacker, C. F. Comparing automated text classification methods. *International Journal of Research in Marketing*, 2019, vol. 36, no. 1, pp. 20–38.
12. Kowsari, K., Brown, D. E., Heidarysafa, M., Jafari Meimandi, K., & Barnes, L. E. Hdtex: Hierarchical deep learning for text classification. *2017 16th IEEE international conference on machine learning and applications (ICMLA)*. IEEE, 2017, pp. 364–371.
13. Kowsari, K., Heidarysafa, M., Brown, D. E., Meimandi, K. J., Gerber, M. S., & Barnes, L. E. Text classification algorithms: A survey. *Information*, 2019, vol. 10, no. 4, p. 150.
14. Liang, J., Zhang, Y., Ren, K., & Zheng, K. Efficient and secure decision tree classification for cloud-assisted online diagnosis services. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2019, vol. 18, no. 4, pp. 1632–1644.
15. Moldagulova, A., & Sulaiman, R. B. Document Classification Based on KNN Algorithm by Term Vector Space Reduction. *2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. PyeongChang, Korea (South), 2018, pp. 387–391.
16. Murtagh, F., & Contreras, P. Algorithms for hierarchical clustering: an overview, II. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2017, vol. 7, no. 6, p. e1219.
17. Janani, R., & Vijayarani, S. Text document clustering using spectral clustering algorithm with particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications*, 2019, vol. 134, pp. 192–200.
18. Abualigah, L. M., Khader, A. T., & Hanandeh, E. S. A new feature selection method to improve the document clustering using particle swarm optimization algorithm. *Journal of Computational Science*, 2018, vol. 25, pp. 456–466.
19. Abualigah, L. M., Khader, A. T., & Hanandeh, E. S. A combination of objective functions and hybrid krill herd algorithm for text document clustering analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, vol. 73, pp. 111–125.
20. Cutting, D. R., Karger, D. R., Pedersen, J. O., & Tukey, J. W. Scatter/gather: A cluster-based approach to browsing large document collections. *ACM SIGIR Forum*, 2017, vol. 51, no. 2, pp. 148–159.
21. Nguen, T., Zyong, K. H., & Kravets, A. G. Analiz i prognoz tendentsiy ispolzovaniya terminov v kompyuternykh naukakh na osnove neyrosetevykh modeley [Analysis and forecast of trends in the use of terms in computer science based on neural network models]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2021, vol. 18, no. 2, pp. 24–38. DOI: 10.14489/vkit.2021.02.
22. Nguen, T., & Kravets, A. G. Algoritm raboty veb-kraulera dlya resheniya zadachi sbora dannykh iz otkrytykh internet-istochnikov [Web crawler algorithm for solving the problem of collecting data from open Internet sources]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Proceedings of the St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University)], 2019, vol. 51, no. 77, pp. 115–119. DOI: 10.36807/1998-9849-2019-51-77-115-119.
23. Kravets, A. G., Burmistrov, A. S., & Zadorozhnyy, P. A. Eksperimentalnoe opredelenie optimalnykh parametrov rekurrentnoy neyronnoy seti dlya zadach klassifikatsii patentov [Experimental determination of the optimal parameters of a recurrent neural network for patent classification problems]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technologies], 2019, vol. 7, no. 2 (25), pp. 325–338. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.25.2.027.

Статья поступила в редакцию 20.03.2023; одобрена после рецензирования 08.04.2023; принята к публикации 10.04.2023.

The article was submitted 20.03.2023; approved after reviewing 08.04.2023; accepted for publication 10.04.2023.

DOI 10.54398/20741707_2023_2_126

УДК 681.3

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ОБЪЕМА СТЕГОКОНТЕЙНЕРА ДЛЯ АССОЦИАТИВНОЙ ЗАЩИТЫ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ И ТЕКСТОВЫХ СЦЕН. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА

Вершинин Игорь Сергеевич, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой, ORCID: 0000-0001-5166-2862, e-mail: ISVershinin@kai.ru

Дается понятие ассоциативной стеганографии. В предыдущих исследованиях для рассматриваемого подхода объем стегоконтейнера определялся условием, что количество битовых вкраплений не должно превышать одного процента от объема носителя, что характерно для стеганографии. Поэтому эти исследования проводились при размерах бинарных матриц-эталонов кодовых символов $m \times n = 119 \times 60$, что обеспечивало требуемый показатель. В статье формулируется критерий полноты покрытия при ограничении перебора временными рамками создания базы данных текстовых сцен с ассоциативной защитой и анализа сообщений. Обоснована возможность снижения объемов носителя при выборе $n = 40$ и 30 с сохранением стойкости к «лобовой» атаке, стегостойкости и помехоустойчивости. Даются практические рекомендации выбора n в зависимости от критерия быстрействия.

Ключевые слова: ассоциативная стеганография, помехоустойчивость, стойкость, ассоциативная защита картографических и текстовых сцен

CHOOSING THE OPTIMAL STEGOCONTAINER VOLUME FOR ASSOCIATIVE PROTECTION OF CARTOGRAPHIC AND TEXT SCENES. JUSTIFICATION OF THE CHOICE

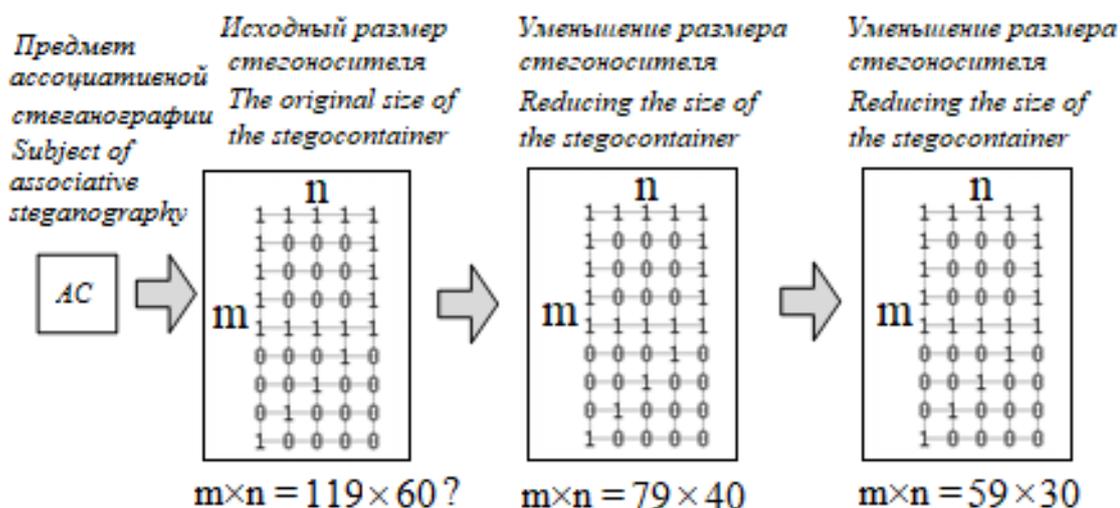
Vershinin Igor S., Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, 10 K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Head of the department, ORCID: 0000-0001-5166-2862, e-mail: ISVershinin@kai.ru

The concept of associative steganography (AS) is given. In previous research for the considered approach, the volume of the stegocontainer was determined by the condition that the number of bit inclusions should not exceed 1 % of the carrier volume, which is typical for steganography. Therefore, these studies were carried out at the sizes of binary matrices-standards of code symbols $m \times n = 119 \times 60$, which provided the required indicator. The article formulates a criterion for completeness of coverage when limiting the search to the time frame of creating a database of text scenes with associative protection and message analysis. The possibility of reducing the volume of the carrier when choosing $n = 40$ and 30 while maintaining resistance to a "frontal" attack, quilting resistance and noise immunity is substantiated. Practical recommendations for selecting n depending on the performance criterion are given.

Keywords: associative steganography, noise immunity, durability, associative protection of cartographic and text scenes

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Предметом ассоциативной стеганографии (АС) является анализ защищенных двумерных сцен. Под сценой понимают картину (изображение) с множеством объектов. Задача анализа сцен – одна из задач распознавания образов, когда не интересуются «тонкой структурой» изображения, а всего лишь укрупненным описанием того, что на нем представлено, в терминах «объекты – координаты» [1]. Элементы теории и практики ассоциативной стеганографии развиты в работах [2–7].

Используется k-разрядное десятичное кодирование координат и имен объектов. Исходная информация на сцене представляется как таблица с множеством записей (рис. 1). Каждая десятичная цифра отображается своей двоичной матрицей-эталоном размерами $m \times n$, $m = 2n - 1$. На рисунке 2 показан пример представления цифры 9 для $n = 5$.

Код объекта	Координата X	Координата Y
-------------	--------------	--------------

Рисунок 1 – Структура таблицы

1	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	0	1
1	0	0	0	1
1	1	1	1	1
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0

Рисунок 2 – Представление символа 9

Множество таких матриц мощностью $\gamma = 10$ подвергается маскированию. Процесс генерации масок случаен. Для каждой матрицы создается своя матрица масок тех же размеров, которая сохраняет в эталоне биты, существенные для его дальнейшей идентификации. Замаскированные биты подвергаются рандомизации. В итоге исходные бинарные матрицы-эталон трансформируются в троичные матрицы, элементы которых принадлежат $\{0, 1, -\}$. Для повышения стойкости защиты алгоритм маскирования должен удовлетворять условию возможной минимизации числа сохраненных бит в каждой исходной матрице-эталоне. Распознавание десятичных цифр каждого кода выполняется сравнением на множестве троичных эталонов по позициям сохраненных бит. В этом суть ассоциативности в данном случае.

Каждый код (объекта или координаты) в итоге матричной бинаризации десятичных цифр с последующим маскированием и рандомизацией трансформируется в k-секционный стегоконтейнер, который формируется следующим образом. Сначала создается так называемый пустой контейнер (носитель стегосообщения) длиной $L = k(9n - 12)$ по числу существенных бит бинарных эталонов десятичных цифр, располагаемых по внешнему контуру и внутреннему «зигзагу» соответствующих бинарных матриц (рисунок 3: $a - n = 3$, $b - n = 7$).

Он заполняется отрезком псевдослучайной последовательности (ПСП) – ГАММЫ. Затем в него внедряются случайно (по позициям) сохраненные маскированием биты исходного сообщения о наличии объекта с определенными координатами. Независимо от n среднее число таких бит $q = 5k \ll L$.

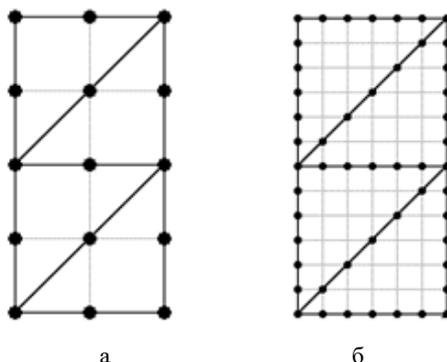


Рисунок 3 – Контур + «зигзаг»: а – $n = 3$; б – $n = 7$

Как было отмечено, в основе ассоциативного подхода лежит процесс маскирования стилизованных бинарных изображений. Маски используются:

- для *нейтрализации противодействия санкционированному распознаванию*. Необходимость такой нейтрализации связана с возможными искажениями изображений при ненадлежащем хранении, передаче или воспроизведении. Однако такое противодействие может выполняться и специально. Осуществляется путем инверсии несвязанных подмножеств битов изображения, которые должны быть замаскированы;
- для *противодействия несанкционированному распознаванию*. Процесс рандомизации вносит случайные искажения в изображение. В данном случае первична процедура маскирования, действие помех рандомизации – полезно, но вторично.

Распознавание принимаемой информации осуществляется путем ее сопоставления с полным множеством троичных эталонов кодовых цифр по позициям сохраняемых бит. Для рассматриваемого подхода полезная информация – случайно (по позициям) сохраненные маскированием *малочисленные биты исходного сообщения, внедренные в ПСП-носитель сравнительно большого объема*, что связывается с понятием «стеганография».

Выбор размеров бинарных матриц десятичных кодовых символов и генератора ПСП для заполнения пустых контейнеров должен удовлетворять критерию полноты покрытия. Суть этого критерия состоит в обеспечении распознавания в каждом стегоконтейнере сообщения в целом полного множества кодов имен объектов и их координат, возможных для данной сцены, с первой случайной попытки формирования ГАММЫ при ограниченном переборе ключей.

Единичность попытки формирования ГАММЫ и ограничение числа испытываемых ключей диктуется снижением времени генерации и криптоанализа сокрытых сообщений базы данных ассоциативно защищенных сцен. Этот критерий определяет направленность процедуры шифрования и означает следующее. Если число всевозможных кодов объектов/координат анализируемой сцены равно T/Γ и на ней сосредоточено M объектов (включая «пустые», которые вводятся для повышения уровня защиты), то в результате ограниченного перебора код каждого из M объектов может быть «любым из T возможных», а коды координат – «любыми из Γ возможных». В данном случае $T = \Gamma = 10^k$ (в случае картографических сцен, с учетом введения двух координатных сеток, значение $\Gamma = 10^{k+x}$, $x > 1$).

Насколько удовлетворение требований данного критерия может помочь повышению стойкости защиты? Запросы к базе данных сцен носят селективный характер: какие объекты и по каким координатам присутствуют на определенном участке сцены? А объектов на таком участке обычно немало. Втрое больше число стегоконтейнеров для этого участка, образующих сообщение: каждый контейнер содержит зашифрованную k -аду десятичного кода – только имени объекта или только одной из его координат. Истинные коды всех объектов сообщения и их координат в совокупности проявятся только на правильном ключе.

Общее число всевозможных кодовых последовательностей в данном случае $ЧКП = (10^k)^{3M}$, где M – число объектов анализируемого участка сцены (включая «пустые»). При $k = 3$, $M = 30$ (обычно значение M гораздо больше) получаем $ЧКП = 10^{270}$, что может превысить число возможных ключей. Тогда множество допустимых кодовых последовательностей сузится. Но в силу случайности выбора ГАММЫ для заполнения контейнера, оно останется случайным подмножеством этого общего множества.

Велика вероятность того, что проявление последовательностей сущностей, кодируемых элементами распознаваемого при ограниченном переборе ключей подмножества, позволит выделить среди них неединичное подмножество правдоподобных по критерию соответствия характеру сцены сообщений.

Характер сцены определяется семантически (например, кит не может сидеть на дереве, а кот – плавать в море). Однозначно выявить истинный ключ при наличии неединичного подмножества

правдоподобных сообщений путем практически достижимого перебора ключей теоретически невозможно. Конечно, не следует забывать о действии возможных криптоатак, которые могут снизить уровень защиты до доказуемого непреодолимой вычислительной сложности.

Приведем пример из области картографии. Тестовая карта: участок местности 300 x 300 км² Республики Чувашия (рис. 4а). Содержит 1035 точечных объектов четырех разных типов (лес, растительность, сад, остановка). Предоставлена ООО «Геодзическая компания «Зенит», г. Казань. Результаты визуализации тестового картографического слоя средствами ГИС MapInfo после его ассоциативного сокрытия и распознавания на истинном ключе представлены на рисунке 4б. Но при ограниченном переборе вероятность получения такой картины исчезающе мала.



Рисунок 4 – Пример из области картографии: а – тестовая карта; б – картина, полученная на истинном ключе

Результаты анализа на двух ложных ключах показаны на рисунке 5. Точечные объекты обозначены на рисунках их условными знаками (рис. 6). Картины разные, но в равной степени правдоподобные, если заведомо не известно, что находится на интересующем нас участке местности.

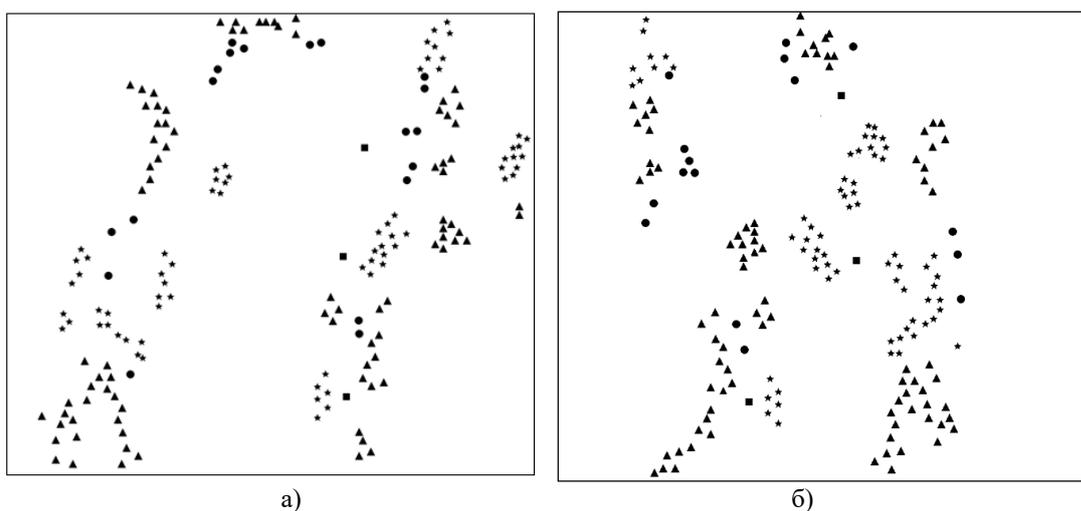


Рисунок 5 – Результаты анализа: а – вид на одном ложном ключе; б – вид на другом ложном ключе

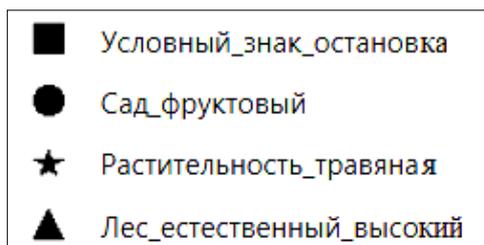


Рисунок 6 – Условные обозначения

Размеры носителя стегосообщений были определены ранее условием, что объем битовых вкраплений не должен превышать 1 % объема носителя, что характерно для стеганографии. Соответственно предыдущие исследования помехоустойчивости, крипто- и стегостойкости проведены при размерах бинарных матриц-эталонов кодовых символов $m \times n = 119 \times 60$. Это определило весьма значительные размеры стегосообщений, намного превышающие размеры шифров, которые могут быть использованы для анализа сцен с десятичным кодированием имен объектов и их координат. Анализ возможностей снижения стегоразмеров при сохранении хорошей помехоустойчивости, стойкости к атаке перебором ключей и стегостойкости – предмет дальнейшего рассмотрения.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ СТЕГОСОБЩЕНИЙ

Важность снижения объемов стегосообщений с ассоциативной защитой определена следующим образом. Этот объем $V_{\text{стего}}$ (в битах) определится:

$$V_{\text{стего}} = 3M \cdot L = 3M \cdot k(9n-12).$$

Если не предъявлять жестких требований к помехоустойчивости и стегостойкости при передаче зашифрованных сообщений по открытым каналам связи, то шифры ГОСТ 34.12-2018 и AES можно считать вполне приемлемыми для анализа сцен. При использовании ГОСТ 34.12-2018 и AES-256 в 128-битном блоке размещаются 12 кодов (10 битов отводятся для хранения одного трехразрядного десятичного кода, остальные 8 бит блока заполняются псевдослучайными значениями). Соответственно,

$$V_{\text{крипто}} = 3M \cdot 128/12 = 32M, \quad V_{\text{стего}} = [3k(9n-12)/32] \cdot V_{\text{крипто}}.$$

В случае $k = 3$, $n = 60$ получаем $V_{\text{стего}} = 148,5 \cdot V_{\text{крипто}}$. Выбор $n = 40$ позволяет существенно снизить объем передаваемых стегосообщений – примерно на 33 %. При $n = 30$ получаем снижение объема стегопередач примерно в два раза. Теперь для $k = 3$ имеем $V_{\text{стего}} = 72,56 \cdot V_{\text{крипто}}$. Это – серьезное улучшение сравнительной оценки. Необходимо выяснить, может ли обеспечить на практике удовлетворение критерия полноты покрытия, безусловную стегостойкость и высокую помехоустойчивость выбор $n = 40$ и 30.

УДОВЛЕТВОРЕНИЕ КРИТЕРИЯ ПОЛНОТЫ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ РАЗМЕРОВ НОСИТЕЛЯ

Исследование этого вопроса велось при условии, что секретный ключ, подмножество перебираемых ключей и ГАММА генерируются по отдельности для каждого контейнера. В действительности единственная ГАММА и единственный секретный ключ всегда генерируются для всей базы данных в целом. Поэтому найденная оценка требует уточнения. Покажем, что при $n = 60$, 40 и 30 критерий полноты покрытия как таковой практически удовлетворяется, если число случайно перебираемых ключей равно 10^5 , 10^6 и 10^7 соответственно. Как и в ранее проведенных исследованиях, рандомизация выполняется с использованием генератора ПСП «Вихрь Мерсенна» [8]. Исследование для указанных значений ‘n’ проводится с использованием следующего алгоритма:

1. Сформировать случайную перестановку 1000 различных 3-разрядных десятичных кодов.
2. Для этой перестановки провести сокрытие на истинном ключе с использованием 100 различных случайных ГАММ для сообщения в целом, генерируя для каждой ГАММЫ новый набор случайных ключей, число которых для данного ‘n’ указано ранее.
3. Подсчитать число A_{i1} контейнеров, удовлетворяющих условию полноты для каждой i -ГАММЫ, и вероятность полноты $P_i(A)$ на сформированной случайной перестановке:

$$P_i(A) = 10^{-2} \cdot \sum A_{i1}, \quad i = 1, 2, \dots, 10^2.$$

4. Повторить эксперимент для 10^3-1 других случайных перестановок кодов и получить вероятность полноты P^* на всем множестве перестановок:

$$P^* = 10^{-3} \cdot \sum P_j(A) = 10^{-5} \cdot \sum \sum A_{ji}; \quad j = 1, 2, \dots, 10^3.$$

Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения P* при различных значениях n

Значение n	Объем перебора случайных ключей	Значение P*
60	10 ⁵	0,996
40	10 ⁶	0,950
30	10 ⁷	0,814

ДОПУСТИМОСТЬ СНИЖЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПОЛНОТЫ ДЛЯ КРИПТОАНАЛИТИКА

Объем перебора случайных ключей ограничен для криптоаналитика временными рамками, ибо всякий раз ему приходится анализировать получаемую тем или иным способом сценическую картину. Скорее всего, такое испытание одного ключа потребует не менее 1 секунды. Тогда на проверку 10⁵ ключей придется затратить примерно 28 часов. Испытание 10⁶ ключей займет около 12 суток, а 10⁷ ключей – около 4 месяцев. Поэтому выбор числа перебираемых ключей =10⁵ для криптоаналитика достаточно целесообразен. Такой объем практически обеспечивает полноту покрытия при n = 60. В соответствии с данными таблицы 1, вероятность полноты при n = 40 и 30 будем оценивать значениями P* = 0,95 и 0,814 соответственно.

В этих случаях, с учетом способа получения P*, имеем двухстороннее ограничение на число всевозможных кодовых последовательностей:

$$(10^k)^{3M} > \text{ЧКП} > (10^k)^{3M \cdot P^*}.$$

Нижняя граница для ЧКП определена тем, что в 3M(1-P*) контейнерах некоторые из 10^k кодов не проявляются.

При k = 3, M = 30, P* = 0,950 (n = 40) получаем ЧКП > (10^k)^{2,85M} = 10²⁵⁶, что остается весьма большой величиной с вытекающей отсюда справедливостью сделанного в предыдущих исследованиях вывода о безусловной стойкости к «лобовой» атаке. Вывод останется справедливым и при дальнейшем снижении P* до уровня P* = 0,814 (n = 30), когда ЧКП > 10²²⁰.

Правда, верхняя оценка для числа ключей при переходе от n = 60 к n = 40 и 30 снижается от 10²⁹ до 10²⁷ и 10²⁵ соответственно. Но это не должно повлиять на сделанный вывод, так как ограничение перебора в процессе криптоанализа проверкой 10⁵ ключей, присутствие среди которых истинного ключа совсем не обязательно, должно все же проявить в процессе распознавания неединичное подмножество равноправдоподобных картин, что позволит криптоаналитику сделать вывод о несостоятельности «лобовой» атаки. Для картографических сцен это весьма вероятно.

Вопрос с текстовыми сценами оставим открытым, ограничившись для них анализом стегостойкости для указанных значений ‘n’.

СОХРАНЕНИЕ СТЕГОСТОЙКОСТИ ТЕКСТОВЫХ СЦЕН ПРИ n = 40 и 30

Тестирование включало 1000 опытов для разных текстовых сообщений длиной 1800 символов с разными масками. Проводилось на кластере из 12-ядерных вычислительных узлов. Символы (русский алфавит, английский алфавит, цифры, знаки препинания, специальные символы) кодировались трехзначными десятичными кодами согласно таблице символов ASCII [9] на множестве {000 ... 255}. Использовалась многопоточная программа генерации стегосообщения со случайным выбором гаммы.

Оценивалась вероятность P{T} того, что один из T параллельно запущенных потоков сгенерирует стегосообщение, успешно проходящее тест NIST [10]:

$$P\{T\} = 10^{-3} \cdot \sum V_i, \quad i = 1, 2, \dots, 10^3.$$

Здесь V_i = 1, если тест NIST успешно пройден в i-опыте, и V_i = 0 в противном случае. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Оценки вероятности P{T}

n T	P{T}			
	12	24	36	48
40	0,993	0,996	1	1
30	0,98	0,994	0,999	1

Таким образом, используя кластер с соответствующим числом многоядерных узлов, при n = 40 и 30 всегда можно сгенерировать стегосообщение, удовлетворяющее требованию безусловной стегостойкости.

СОХРАНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

Предыдущее исследование не учитывало влияния ГАММЫ. Поэтому несколько изменим условия эксперимента: число стегоконтейнеров – 10³, число ГАММ (генерируемых ГПСЦ «Вихрь МЕРСЕННА») – 10². Результаты, полученные для n = 60 при Q = 5, существенно уступают полученным ранее без учета влияния ГАММЫ. Попытаемся поправить ситуацию повышением избыточности, т. е. увеличением Q.

На рисунках 7–9 показаны графики, полученные при $Q = 7$ для $n = 60, 40$ и 30 . Ось ординат – статистика распознавания на множестве стегоконтейнеров в процентах, ось абсцисс – число искаженных бит в одном байте. Ряд 1 соответствует правильным распознаваниям, ряд 2 – неправильным, ряд 3 – отказам от распознавания (детектирование возможной ошибки). В таблицах 3–5 представлены данные (в процентах), положенные в основу рисунков 7–9.

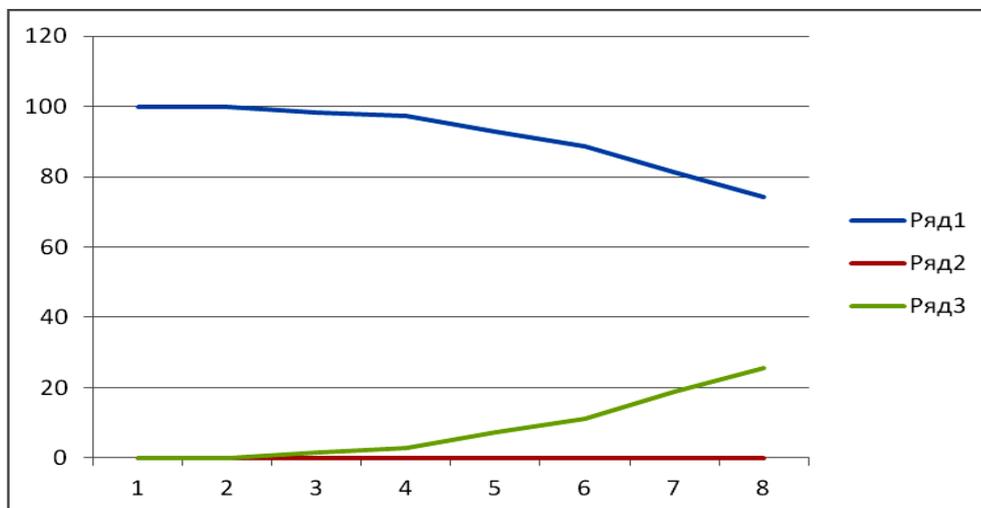


Рисунок 7 – $n = 60$, $Q = 7$, искажение 16 байт каждого из 10^3 контейнеров

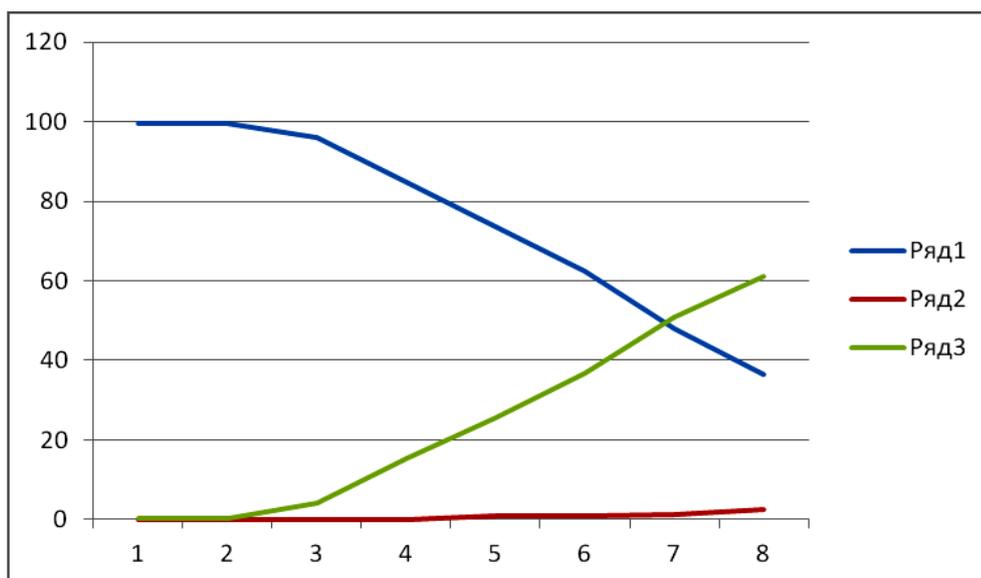


Рисунок 8 – $n = 40$, $Q = 7$, искажение 16 байт каждого из 10^3 контейнеров

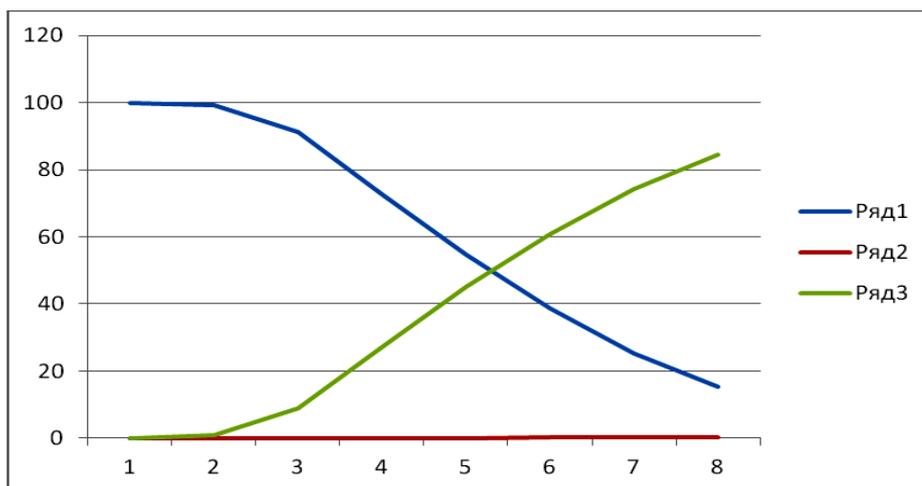


Рисунок 9 – $n = 30$, $Q = 7$, искажение 16 байт каждого из 10^3 контейнеров

Таблица 3 – Результаты распознавания при $n = 60$, $Q = 7$

Количество верных распознаваний	Количество неверных распознаваний	Количество отказов от распознавания
100	0	0
100	0	0
98,4	0	1,6
97,2	0	2,8
92,8	0	7,2
88,8	0	11,2
81,2	0	18,8
74,4	0	25,6

Таблица 4 – Результаты распознавания при $n = 40$, $Q = 7$

Количество верных распознаваний	Количество неверных распознаваний	Количество отказов от распознавания
99,6	0	0,4
99,6	0	0,4
96	0	4
84,8	0	15,2
73,6	0,8	25,6
62,4	0,8	36,8
48	1,2	50,8
36,4	2,4	61,2

Таблица 5 – Результаты распознавания при $n = 30$, $Q = 7$

Количество верных распознаваний	Количество неверных распознаваний	Количество отказов от распознавания
100	0	0
99,2	0	0,8
91,2	0	8,8
72,8	0	27,2
54,8	0	45,2
38,8	0,4	60,8
25,2	0,4	74,4
15,2	0,4	84,4

Они говорят о следующем. Использование мажоритарного принципа обеспечивает более 90 % правильных распознаваний и менее 10 % отказов от распознавания при полном отсутствии неверных распознаваний, если для $n = 60$ искажены от одного до пяти бит в любых 16 байтах каждого контейнера, для $n = 40$ и 30 – до трех бит. С учетом разницы в размерах контейнеров, в процентном отношении по сравнению с известными шифрами имеем улучшение в 5 раз для $n = 60$ и 40, в 6 раз – для $n = 30$.

Так что сравнительное улучшение помехоустойчивости при переходе от $n = 60$ к $n = 40$ и 30 сохраняется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С уменьшением n необходимый для удовлетворения критерия полноты объем перебора нарастает. Но стойкость метода к «лобовой» криптоатаке при выборе $n = 40$ и 30 сохраняется. Такой выбор позволяет снизить объем стегосообщений на 33–50 % по сравнению со случаем $n = 60$ при сохранении сравнительно высоких уровней стегостойкости и помехоустойчивости, что и определяет обоснованность выбора указанных значений n . Таким образом, если в практических приложениях по критерию быстрейшего допустимо его снижение, связанное с увеличением времени перебора большего количества ключей, то целесообразно использование значения $n = 40$ либо 30.

Список источников

1. Duda, R. O. *Pattern Classification and Scene Analysis* / R. O. Duda and P. E. Hart. – Wiley, New York, 1973.
2. Raikhlin, V. A. The Elements of Associative Steganography Theory / V. A. Raikhlin, R. F. Gibadullin, I. S. Vershinin // *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics*. – 2019. – Vol. 43, issue 1. – P. 40–46.
3. Vershinin, I. S. Associative Steganography. Durability of Associative Protection of Information / I. S. Vershinin, R. F. Gibadullin, S. V. Pystogov, V. A. Raikhlin // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2020. – № 3. – P. 439–449.
4. Raikhlin, V. A. Reliable Recognition of Masked Binary Matrices. Connection to Information Security in Map Systems / V. A. Raikhlin, I. S. Vershinin, R. F. Gibadullin, S. V. Pystogov // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2013. – Vol. 34, № 4. – P. 319–325.
5. Vershinin, I. S. Associative Steganography of Text Messages / I. S. Vershinin, R. F. Gibadullin, S. V. Pystogov, V. A. Raikhlin // *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics*. – 2021. – Vol. 45, № 1. – P. 1–11.
6. Raikhlin, V. A. Is it possible to reduce the sizes of stegomessages in associative steganography? / V. A. Raikhlin, R. F. Gibadullin, I. S. Vershinin // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2022. – Vol. 43, № 2. – P. 455–462.
7. Райхлин, В. А. Конструктивное моделирование процессов синтеза / В. А. Райхлин, И. С. Вершинин, Р. К. Классен, Р. Ф. Гибадуллин, С. В. Пыстогов / под ред. В. А. Райхлина. – Казань : Изд-во «ФЭН» (Наука) АН РТ, 2020. – 248 с.
8. What is Mersenne Twister (MT)? – URL: <http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/mmat/MT/ewhat-is-mt.html> (дата обращения: 17.03.2023).
9. Таблица символов ASCII. – URL: <https://www.industrialnets.ru/files/misc/ascii.pdf> (дата обращения: 17.03.2023).
10. Sadique, J. K. M. Review on fifteen Statistical Tests proposed by NIST / J. K. M. Sadique, Uz Zaman, R. Ghosh // *IJTPC*. – 2012. – Vol. 1. – P. 18–31.

References

1. Duda, R. O. and Hart, P. E. *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley, New York, 1973.
2. Raikhlin, V. A., Gibadullin, R. F., Vershinin I. S. The Elements of Associative Steganography Theory. *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics*, 2019, vol. 43, issue 1, pp. 40–46.
3. Vershinin, I. S., Gibadullin, R. F., Pystogov, S. V., Raikhlin, V. A. Associative Steganography. Durability of Associative Protection of Information. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2020, no. 3, pp. 439–449.
4. Raikhlin, V. A., Vershinin, I. S., Gibadullin, R. F., Pystogov, S. V. Reliable Recognition of Masked Binary Matrices. Connection to Information Security in Map Systems. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2013, vol. 34, no. 4, pp. 319–325.
5. Vershinin, I. S., Gibadullin, R. F., Pystogov, S. V., Raikhlin, V. A. Associative Steganography of Text Messages. *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics*, 2021, vol. 45, no. 1, pp. 1–11.
6. Raikhlin, V. A., Gibadullin, R. F., Vershinin, I. S. Is it possible to reduce the sizes of stegomessages in associative steganography? *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2022, vol. 43, no. 2, pp. 455–462.
7. Raikhlin, V. A., Vershinin, I. S., Klassen, R. K., Gibadullin, R. F. *Konstruktivnoe modelirovanie protsessov sinteza* [Constructive modeling of synthesis processes]. Kazan, «FEN» Publ. (Nauka) AN RT, 2020. 248 p.
8. *What is Mersenne Twister?* Available at: <https://www.educative.io/answers/what-is-mersenne-twister> (accessed 17.03.2023).
9. *Tablitsa simvolov ASCII* [ASCII symbol table]. Available at: <https://www.industrialnets.ru/files/misc/ascii.pdf> (accessed 17.03.2023).
10. Sadique, J. K. M., Zaman, Uz, Ghosh, R. Review on fifteen Statistical Tests proposed by NIST. *IJTPC*, 2012, vol. 1, pp. 18–31.

Статья поступила в редакцию 06.04.2023; одобрена после рецензирования 10.04.2023; принята к публикации 12.04.2023.

The article was submitted 06.04.2023; approved after reviewing 10.04.2023; accepted for publication 12.04.2023.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ)

УДК 004.421.4

АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА РАДИОСИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ЛИЦЕНЗИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Коновской Алексей Сергеевич, Филиал «Взлет» МАИ, 416501, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5,

студент, ORCID: 0000-0001-6439-2822, e-mail: konovskoy01@mail.ru

Нестеров Сергей Васильевич, Филиал «Взлет» МАИ, 416501, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0009-0003-8143-0730, e-mail: nesterov.vzlet@mail.ru

Существующие методики по изучению студентами оптимального приема радиосигналов в рамках обучения по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» ограничены по возможностям и опираются на зарубежное программное обеспечение, в том числе разработанная в филиале «Взлет» МАИ в г. Ахтубинске компьютерная модель оптимального приемника радиосигналов. Указанная модель используется при изучении дисциплины «Статистическая радиотехника» по радиотехническим специальностям. В работе представлена новая реализация математической модели оптимального приемника радиосигналов при помощи языка программирования общего назначения Delphi версии 11.0. Приводятся результаты экспериментов по построению кривых обнаружения с использованием предлагаемой реализации математической модели оптимального приемника и сравнение точности расчетов с помощью предлагаемых численных методов интегрирования и интегрированием «напрямую» в пакете прикладных программ для технических вычислений MATLAB. Также в работе приведены соответствующие математические выкладки в достаточном для понимания объеме и представлена часть программного кода разработанной модели.

Ключевые слова: статистическая радиотехника, обучение, MATLAB, Graphic User Interface, App Designer, вероятностные характеристики, итерационные методы, Delphi

ADAPTATION OF THE OPTIMAL RADIO RECEIVER MODEL UNDER LICENSE RESTRICTIONS

Konovskoi Alexey S., Branch "Vzlet" of MAI, 5 Dobrolyubov St., Akhtubinsk, Astrakhan region, 416501, Russian Federation,

student, e-mail: konovskoy01@mail.ru

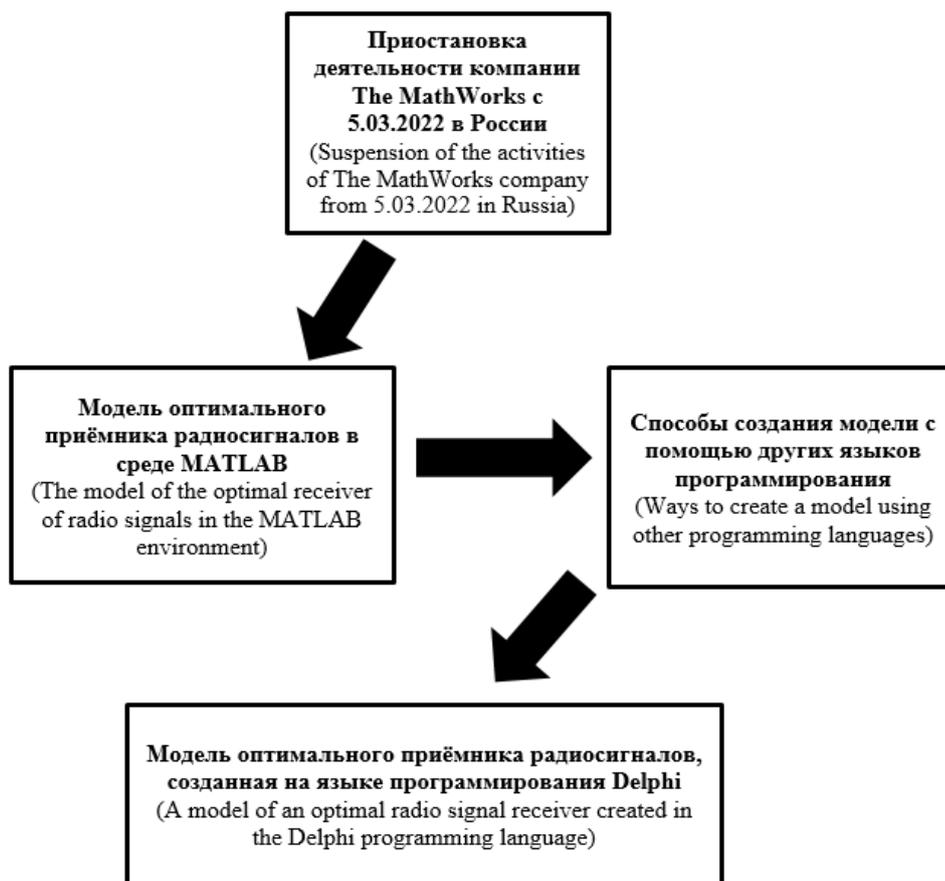
Nesterov Sergey V., Branch "Vzlet" of MAI, 5 Dobrolyubov St., Akhtubinsk, Astrakhan region, 416501, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: nesterov.vzlet@mail.ru

The existing methods for students to study the optimal reception of radio signals within the framework of training in the specialty "Radio Electronic systems and complexes" are limited in capabilities and rely on foreign software, including a computer model of the optimal receiver of radio signals developed in the "Vzlet" branch of MAI in Akhtubinsk. This model is used in the study of the discipline "Statistical radio engineering" in radio engineering specialties. The paper presents a new implementation of the mathematical model of the optimal receiver of radio signals using the general-purpose programming language Delphi version 11.0. The results of experiments on the construction of detection curves using the proposed implementation of the mathematical model of the optimal receiver and a comparison of the accuracy of calculations using the proposed numerical methods of integration and integration "directly" in the package of applications for technical computing MATLAB. Also, in the work the corresponding mathematical calculations are given in sufficient volume for understanding and a part of the program code of the developed model is presented.

Keywords: statistical radio engineering, training, MATLAB, Graphic User Interface, App Designer, probabilistic characteristics, iterative methods, Delphi

Графическая аннотация (Graphical annotation)



ВВЕДЕНИЕ

Процесс подготовки инженерных кадров в аэрокосмической отрасли является непрерывным [1], при этом использование математических моделей различных систем авиационного и специального оборудования является общепринятым [2].

Однако изучение оптимального приема радиосигналов в рамках обучения студентов по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» часто проводится по моделям, которые ограничены по возможностям и опираются на зарубежное программное обеспечение, в том числе разработанная в филиале «Взлет» МАИ в г. Ахтубинске компьютерная модель оптимального приемника радиосигналов [3]. Для работы с зарубежным программным обеспечением необходима лицензия на его использование, кроме того, в условиях санкций его могут в любой момент заблокировать. Инженер отвечает за правильное и обоснованное определение общественной потребности в создании того или иного устройства [4], и потому немаловажным является обеспечение доступности модели специалистам при разработке принципов и параметров функционирования любых радиосистем, связанных с передачей и приемом сигналов [5].

Так, разработанная филиалом «Взлет» компьютерная модель оптимального приемника радиосигналов, используемая в учебных целях студентами и преподавателями филиала, функционирует в среде MATLAB (рис. 1) для формирования у будущих инженеров необходимого уровня компетенций в радиотехнике [6–8].

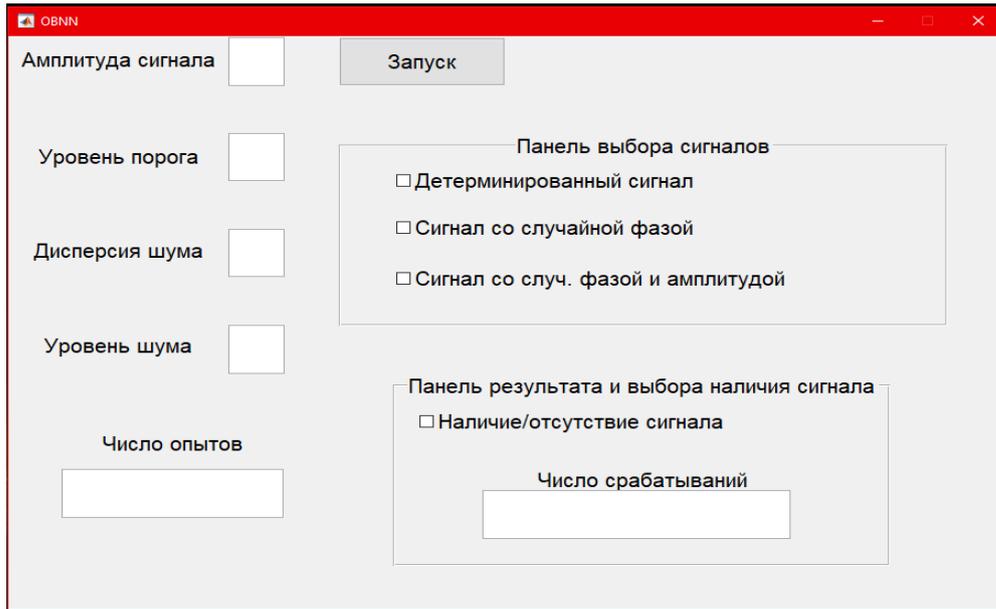


Рисунок 1 – Пользовательское окно компьютерной модели оптимального обнаружителя радиосигналов

Однако компания The MathWorks (США) с 5 марта 2022 г. приостановила деятельность в России и отозвала лицензии у российских студентов и университетов [9]. Чтобы имелась возможность дальнейшего использования разработанной модели, необходимо было разработанную модель написать в новой среде, на ином языке программирования, который популярен среди программистов и имеется в широком доступе.

Было решено использовать язык программирования общего назначения Delphi. Основной причиной его использования является понятный синтаксис, так как этот язык близок к языку программирования Pascal, а также он имеет встроенный компилятор, т. е. на выходе имеется готовый «файл-установщик» [10–12].

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ

В модели оптимального приемника радиосигналов при получении вероятностных характеристик радиоприемника производятся расчеты вероятностей ложной тревоги $p_{лт}$ и правильного обнаружения $p_{по}$ для различных типов сигналов [13–17] по формулам:

для детерминированных сигналов –

$$p_{лт} = 1 - \Phi(h),$$

$$p_{по} = \Phi(q - h);$$

для сигналов со случайной начальной фазой –

$$p_{лт} = e^{-\left(\frac{h^2}{2}\right)},$$

$$p_{по} = 1 - Q\left(\sqrt{-2 \ln p_{лт}}, q\right);$$

для сигналов со случайными амплитудой и начальной фазой –

$$p_{лт} = e^{-\left(\frac{h^2}{2}\right)},$$

$$p_{по} = p_{лт}^{\frac{1}{1+q^2}};$$

где h – нормированный порог;

q – параметр обнаружения;

$\Phi(x)$ – интеграл вероятности, вычисляемый с помощью выражения (1):

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt; \quad (1)$$

$Q(u, v)$ – табулированная Q-функция Маркума (интегральное распределение Релея – Райса), вычисляемая по выражению (2):

$$Q(u, v) = \int_0^u t e^{-\left(\frac{t^2+v^2}{2}\right)} I_0(vt) dt, \quad (2)$$

где $I_0(x)$ – интегральное представление модифицированной функции Бесселя нулевого порядка, вычисляемое по выражению (3):

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{x \cos \varphi} d\varphi. \quad (3)$$

Язык программирования общего назначения Delphi не позволяет напрямую записать интегральные функции, соответственно, было принято решение найти другие способы вычисления интегралов. Для этого понадобились приемы численного интегрирования. Было решено использовать метод Симпсона за его достаточную точность [18, 19]. Так как для сигналов со случайными амплитудой и начальными фазами не требуется расчет интегральных функций, расчет вероятностных характеристик для этого типа сигналов не требовал использования приемов численных методов интегрирования.

Для детерминированных сигналов представление в виде программного кода с использованием метода Симпсона не вызвало затруднений (рис. 2).

```
// Начальные данные
a := 0; // Нижний предел интегрирования
b := u; // Верхний предел интегрирования
nn := 1000; // Число разбиений
hh := (b-a)/(2*nn); // Шаг интегрирования

// Решение 1ого члена
na1 := a*exp(-((sqr(a)+sqr(q))/2));
ko1 := b*exp(-((sqr(b)+sqr(q))/2));
s11 := 0; //Первая сумма
for i := 1 to (nn-1) do begin
  k := a + hh*2*i;
  s11 := s11 + (k * exp(-((sqr(k)+sqr(q))/2)) * (2*hh)/3);
end;

s12 := 0; // Вторая сумма
for i := 1 to nn do begin
  k := a + hh*(2*i - 1);
  s12 := s12 + (k * exp(-((sqr(k)+sqr(q))/2)) * (4*hh)/3);
end;

S1integ := s11 + s12 + (hh/3 * (na1 + ko1)); // Значение 1ого члена
```

Рисунок 2 – Программное представление интеграла вероятности с помощью приема численного интегрирования – метода Симпсона

РЕШЕНИЕ ТАБУЛИРОВАННОЙ Q-ФУНКЦИИ МАРКУМА

Для решения табулированной Q-функции Маркума (2) методами численного интегрирования необходимо было провести математические манипуляции, так как итоговая формула была не пригодна для программного решения и имела следующий вид:

$$Q(\sqrt{-2 \ln p_{лт}}, q) = \int_0^{\sqrt{-2 \ln p_{лт}}} \frac{t}{2\pi} e^{-\frac{t^2+q^2}{2}} \left(\int_{-\pi}^{\pi} e^{qt \cos(\varphi)} d\varphi \right) dt.$$

Было решено экспоненту, входящую в интеграл в модифицированной функции Бесселя (3), представить в виде бесконечного степенного ряда Тейлора [20]. Эта функция при разложении имеет вид:

$$e^{qt \cos(\varphi)} = 1 + \frac{qt \cos(\varphi)}{1!} + \frac{[qt \cos(\varphi)]^2}{2!} + \frac{[qt \cos(\varphi)]^3}{3!}.$$

Для нужной точности функцию достаточно разложить до девятого члена включительно.

Интеграл в модифицированной функции Бесселя (3) по свойствам определенных интегралов приведен к виду:

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} e^{qt \cos(\varphi)} d\varphi &= \int_{-\pi}^{\pi} 1 d\varphi + \int_{-\pi}^{\pi} \frac{qt \cos(\varphi)}{1!} d\varphi + \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^2}{2!} d\varphi + \\ &+ \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^3}{3!} d\varphi + \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^4}{4!} d\varphi + \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^5}{5!} d\varphi + \\ &+ \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^6}{6!} d\varphi + \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^7}{7!} d\varphi + \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^8}{8!} d\varphi. \end{aligned}$$

После несложных преобразований выражение сокращено как

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} e^{qt \cos(\varphi)} d\varphi &= \int_{-\pi}^{\pi} 1 d\varphi + \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^2}{2!} d\varphi + \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^4}{4!} d\varphi + \\ &+ \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^6}{6!} d\varphi + \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[qt \cos(\varphi)]^8}{8!} d\varphi. \end{aligned}$$

Проведя ряд достаточно простых, но громоздких математических операций, был получен итоговый вид интегрального распределения Релея – Райса, который, в свою очередь, было достаточно просто решить методом Симпсона.

Итоговое представление интегрального распределения Релея – Райса (2) имеет вид:

$$Q(\sqrt{-2 \ln p_{лт}}, q) = \int_0^{\sqrt{-2 \ln p_{лт}}} t e^{-\left(\frac{t^2+q^2}{2}\right)} dt + \frac{q^2}{4} \int_0^{\sqrt{-2 \ln p_{лт}}} t^3 e^{-\left(\frac{t^2+q^2}{2}\right)} dt + \\ + \frac{q^4}{64} \int_0^{\sqrt{-2 \ln p_{лт}}} t^5 e^{-\left(\frac{t^2+q^2}{2}\right)} dt + \frac{0,313q^6}{720} \int_0^{\sqrt{-2 \ln p_{лт}}} t^7 e^{-\left(\frac{t^2+q^2}{2}\right)} dt + \\ + \frac{0,273q^6}{40320} \int_0^{\sqrt{-2 \ln p_{лт}}} t^9 e^{-\left(\frac{t^2+q^2}{2}\right)} dt.$$

Программное представление этого выражения соответствует представленному (рис. 2), лишь с той разницей, что число «расчетных блоков» соответствует числу слагаемых в итоговом представлении интегрального распределения Релея – Райса.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ

Были проведены эксперименты по оценке точности расчетов с помощью предлагаемых численных методов интегрирования и интегрированием «напрямую» в пакете прикладных программ для технических вычислений MATLAB. Оценка производилась путем сравнения кривых обнаружения (зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения «сигнал – шум» при фиксированных значениях вероятности ложной тревоги).

Результаты экспериментов показывают, что для детерминированных сигналов расчеты вероятности правильного обнаружения совпадают полностью (рис. 3), а для сигналов со случайной фазой (рис. 4) результаты по расчету вероятности правильного обнаружения очень близки, максимальное расхождение составляет около 1 %.

Пользовательское окно компьютерной модели оптимального обнаружителя радиосигналов не претерпело серьезных изменений (рис. 5).

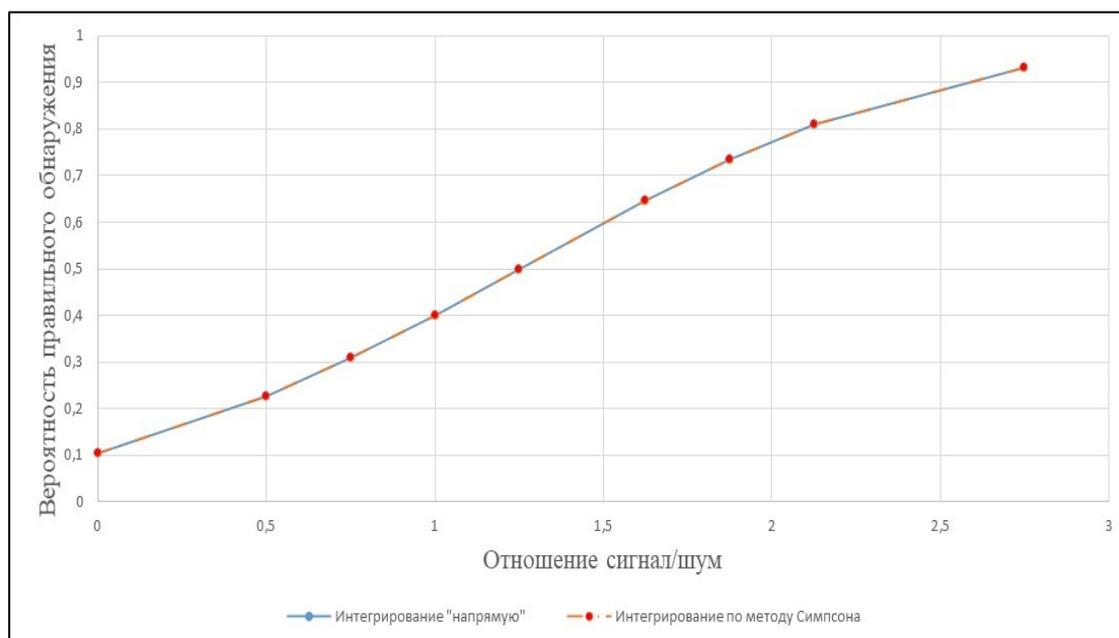


Рисунок 3 – Результаты эксперимента по построению кривых обнаружения для детерминированных сигналов при различных способах расчета интеграла

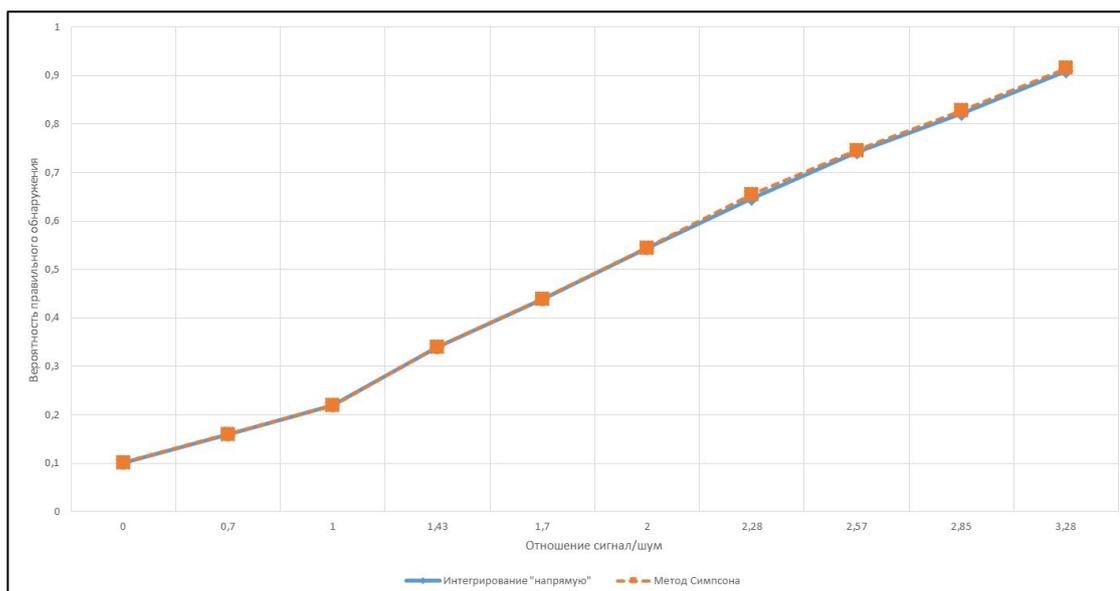


Рисунок 4 – Результаты эксперимента по построению кривых обнаружения для сигналов со случайной фазой при различных способах расчета интеграла

Рисунок 5 – Пользовательское окно компьютерной модели оптимального обнаружителя радиосигналов, созданная на языке Delphi

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Адаптация программы позволила без снижения качества модели оптимального обнаружителя исключить необходимость получения лицензии от зарубежного разработчика и устранить опасения блокировки программного обеспечения.

Список источников

1. Качалин, А. М. Комплексная система для целевой подготовки и повышения квалификации в аэрокосмической отрасли / А. М. Качалин, О. Н. Задорожная // Труды МАИ. – 2014. – № 75. – URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/dd9/dd96a8e481505e575a8259b567908756.pdf?lang=ru&referer=https%3A%2F%2Fclick.mail.ru%2F>.
2. Князев, А. С. Использование имитатора многофункционального индикатора самолета в учебном процессе вуза / А. С. Князев, А. С. Антоненко, Е. Д. Арбузов, А. Д. Чеботарев // Труды МАИ. – 2022. – № 123. – URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/6f3/z1kymam3ikxw7m5zjfwwxnp1vfst5hl3/Knyazev_i-dr..pdf?lang=ru&referer=https%3A%2F%2Fclick.mail.ru%2F.
3. Коновской, А. С. Использование модели оптимального (субоптимального) обнаружителя в рабочем процессе / А. С. Коновской, С. В. Нестеров // Сборник трудов научно-исследовательских работ студентов МАИ – 2021. – С. 91–99. – URL: <https://cp.mai.ru/e-0eCnI>.

4. Косарукин, В. А. Основы формирования инженерной этики / В. А. Косарукин // Труды МАИ. – 2010. – № 37. – URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/244/osnovy-formirovaniya-inzhenernoy-etiki.pdf?lang=ru&issue=37>.
5. Серкин, Ф. Б. Сравнительный анализ алгоритмов оценки сигнал-шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала / Ф. Б. Серкин, Н. А. Важенин, В. В. Вейцель // Труды МАИ. – 2015. – № 83. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/c80/serkin_vazhenin_veytsel_rus.pdf?lang=ru&issue=83.
6. Кутарова, Е. И. Модель процесса обучения студентов радиотехнического направления подготовки дисциплинам естественнонаучного цикла / Е. И. Кутарова, М. Н. Рыжкова // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2017. – № 2. – С. 68–75.
7. Поляные, Ю. В. Разработка и реализация программ формирования компетенций выпускников ВУЗа / Ю. В. Поляных, И. А. Санников, Леонтьев В. Л., Шабалкин Д. Ю. Евсеев А. Н. // Труды МАИ. – 2013. – № 71. – URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/0e2/0e2ddabc1735cce06f3ec5bd75e7e7f5.pdf?lang=ru&issue=71>.
8. Чекушкин В. В. Система имитации радиолокационной информации и тренировки операторов / В. В. Чекушкин, М. А. Царьков, А. В. Антуфьев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 1. – С. 15–21.
9. The MathWorks (Matlab) приостановил деятельность в России с 05 марта 2022 г. – URL: <https://всезапомнин.рф/company/704-the-mathworks-matlab.html> (дата обращения 29.08.2022 г.).
10. Язык программирования Delphi: зачем нужен и стоит ли учить новичкам. – URL: <https://checkroi.ru/blog/yazyk-programirovaniya-delphi/> (дата обращения 30.08.2022 г.).
11. Delphi 7 / А. Д. Хомоненко, В. Э. Гофман, Е. В. Мещеряков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : БХВ – Петербург, 2010. – 1136 с.: ил. – ISBN 978-5-9775-0425-6.
12. Фаронов, Ф. В. Delphi. Программирование на языке высокого уровня : учебник для вузов – Санкт-Петербург, 2009. – 640 с.: ил. – ISBN 978-5-8046-0008-3.
13. Радиотехнические системы : учебник для студ. высш. учебн. заведений / [Ю. М. Казаринов и др.] ; под ред. Ю. М. Казаринова – Москва : Издательский центр «Академия», 2008. – 592 с. – ISBN 978-5-7695-3767-7.
14. Статистическая теория радиотехнических систем : учеб. пособие по специальности «Радиотехника» / А. И. Перов. – Москва : Радиотехника, 2003. – 398 с.: ил. – ISBN 5-93108-047-3.
15. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных : пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – Москва : Мир, 1989. – 540 с. – ил. – ISBN 5-03-001071-8.
16. Сенин А. И. Статистическая радиотехника. Примеры и задачи : учеб. пособие / А. И. Сенин. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 71 с. : ил.
17. Информационные технологии в радиотехнических системах : учебное пособие / В. А. Васин, И. Б. Власов, Ю. М. Егоров и др. ; под ред. И. Б. Фёдорова. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 672 с.: ил. – (Сер. Информатика в техническом университете). – ISBN 5-7038-2263-7.
18. Мэтьюз, Джон Г. Численные методы. Использование MATLAB : пер. с англ. / Джон Г. Мэтьюз, Куртис Д. Финк. – 3-е изд. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2001. – 720 с.: ил. – ISBN 5-8459-0162-6.
19. Агапова, Е. Г. Вычислительная математика : учебное пособие / Е. Г. Агапова ; [науч. ред. Т. М. Попова]. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. – 92 с. – ISBN 978-5-7389-2354-8. – URL: https://pnu.edu.ru/media/file_public/6f/6f67923d-f9e9-4fe7-8173-4ec240b420ed/agarova16.pdf.
20. Зорич, В. А. Математический анализ. Часть 1 / В. А. Зорич. – 6-е изд., доп. – Москва : МЦНМО, 2012. – 702 с. – ISBN 978-5-94-057-891-8 ; ISBN 978-5-94057-892-5 (часть I). – URL: https://vk.com/doc53055_1121_611241130?hash=TOQXqVqWnAVIvsZyiUnhdjfxJjgAtsqllfcT5IIOA40&dl=SAZHcx2ZCU0vt2KCEtNbHntoe67kbV6Rwccq19Pzuio.

References

1. Kachalin, A. M., Zadorozhnaya, O. N. Kompleksnaya sistema dlya tselevoy podgotovki i povysheniya kvalifikatsii v aerokosmicheskoy otrasli [Complex system for targeted training and advanced training in the aerospace industry]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2014, no. 75. Available at: <https://trudymai.ru/upload/iblock/dd9/dd96a8e481505e575a8259b567908756.pdf?lang=ru&referer=https%3A%2F%2Fclick.mail.ru%2F>.
2. Knyazev, A. S., Antonenko, A. S., Arbuzov, E. D., Chebotarev, A. D. Ispolzovaniye imitatora mnogofunktionalnogo indikatora samoleta v uchebnom protsesse vuza [The use of a multifunctional aircraft indicator simulator in the educational process of a university]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2022, no. 123. Available at: https://trudymai.ru/upload/iblock/6f3/z1kymam3ikxw7m5zfwwxnp1vfst5hl3/Knyazev_i-dr..pdf?lang=ru&referer=https%3A%2F%2Fclick.mail.ru%2F.
3. Konovskoy, A. S., Nesterov, S. V. Ispolzovaniye modeli optimalnogo (suboptimalnogo) obnaruzhitelya v rabochem protsesse [Using the model of an optimal (suboptimal) detector in the workflow]. *Sbornik trudov nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov MAI* [Proceedings of research papers of students of MAI], 2021. pp. 91–99. Available at: <https://cp.mai.ru/e-0eCnI>.
4. Kosarukin, V. A. Osnovy formirovaniya inzhenernoy etiki [Fundamentals of engineering ethics formation]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2010, no. 37. Available at: <https://trudymai.ru/upload/iblock/244/osnovy-formirovaniya-inzhenernoy-etiki.pdf?lang=ru&issue=37>.
5. Serkin, F. B., Vazhenin, N. A., Weitzel, V. V. Sravnitelnyy analiz algoritmov otsenki signal-shum na osnove kvadraturnykh komponent prinyimayemogo signala [Comparative analysis of signal-to-noise estimation algorithms based on quadrature components of the received signal]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2015, no. 83. Available at: https://trudymai.ru/upload/iblock/c80/serkin_vazhenin_veytsel_rus.pdf?lang=ru&issue=83.

6. Kutarova, E. I., Ryzhkova, M. N. Model protsessa obucheniya studentov radiotekhnicheskogo napravleniya podgotovki distsiplinam yestestvennonauchnogo tsikla [Model of the process of teaching students of the radio engineering direction of training disciplines of the natural science cycle]. *Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnyye sistemy* [Radio engineering and telecommunication systems], 2017, no. 2, pp. 68–75.

7. Polyanskov, Yu. V., Sannikov, I. A., Leontiev, V. L., Shabalkin, D. Yu., Evseev, A. N. Razrabotka i realizatsiya programm formirovaniya kompetentsiy vypusknikov VUZa [Development and implementation of programs for the formation of competencies of university graduates]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2013, no. 71. Available at: <https://trudymai.ru/upload/iblock/0e2/0e2ddabc1735cce06f3ec5bd75e7e7f5.pdf?lang=ru&issue=71>.

8. Chekushkin, V. V., Tsarkov, M. A., Antufyev, A. V. Sistema imitatsii radiolokatsionnoy informatsii i trenirovki operatorov [System of imitation of radar information and training of operators]. *Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnyye sistemy* [Radio engineering and telecommunication systems], 2016, no. 1, pp. 15–21.

9. *The MathWorks (Matlab) priostanovil deyatel'nost v Rossii s 05 marta 2022 g.* [The MathWorks (Matlab) has suspended operations in Russia since March 05, 2022]. Available at: <https://vsezapomnim.rf/company/704-the-math-works-matlab.html>.

10. *Yazyk programirovaniya Delphi: zachem nuzhen i stoit li uchit novichkam* [Delphi programming language: why is it needed and is it worth teaching to beginners]. Available at: <https://checkroi.ru/blog/yazyk-programirovaniya-delphi/>.

11. Khomonenko, A. D., Hoffman, V. E., Meshcheryakov, E. V. *Delphi 7*. 2nd ed., reprint. and additional. St. Petersburg, BHV – Petersburg, 2010, 1136 p.: ill. ISBN 978-5-9775-0425-6.

12. Faronov, F. V. *Delphi. Programirovaniye na yazyke vysokogo urovnya : uchebnik dlya vuzov* [Delphi. Programming in a high-level language : textbook for universities]. St. Petersburg, 2009, 640 p.: ill. ISBN 978-5-8046-0008-3.

13. Kazarinov, Yu. M. (ed.) et al. *Radiotekhnicheskiye sistemy : uchebnik dlya studentov vysshykh uchebnykh zavedeniy* [Radio engineering systems : textbook for students of higher educational institutions]. Moscow, Publishing Center "Academy", 2008, 592 p. ISBN 978-5-7695-3767-7.

14. Perov, A. I. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem : uchebnoe posobiye po spetsialnosti «Radiotekhnika»* [Statistical theory of radio engineering systems : study guide on speciality "Radio engineering"]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 398 p.: ill. ISBN 5-93108-047-3.

15. Bendat, J., Pearsol, A. *Prikladnoy analiz sluchaynykh dannykh* [Applied analysis of random data]. Moscow, Mir Publ., 1989. 540 p.: ill. ISBN 5-03-001071-8.

16. Senin, A. I. *Statisticheskaya radiotekhnika. Primery i zadachi : uchebnoe posobie* [Statistical radio engineering. Examples and tasks : manual]. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2010. 71 p.: ill.

17. Vasin, V. A., Vlasov, I. B., Egorov, Yu. M. etc. *Informatsionnyye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh : uchebnoye posobiye* [Information technologies in radio engineering systems : textbook]. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2003, 672 p.: ill. (Ser. Informatics in Technical University). ISBN 5-7038-2263-7.

18. Mathews, John G., Fink, Curtis, D. *Chislennyye metody. Ispolzovaniye MATLAB* [Numerical methods. The use of MATLAB], 3rd ed. Moscow, Publishing House "Williams", 2001, 720 p.: ill. ISBN 5-8459-0162-6.

19. Agapova, E. G. *Vychislitel'naya matematika : uchebnoye posobiye* [Computational Mathematics : a textbook] Khabarovsk, Publishing House of the Pacific State University, 2017, 92 p. ISBN 978-5-7389-2354-8. Available at: https://pnu.edu.ru/media/filer_public/6f/6f/6f67923d-f9e9-4fe7-8173-4ec240b420ed/agapova16.pdf.

20. Zorich, V. A. *Matematicheskyy analiz. Chast I* [Mathematical analysis. Part I]. 6th ed. Moscow: ICNMO, 2012. 702 p. ISBN 978-5-94-057-891-8; ISBN 978-5-94057-892-5 (part I). Available at: https://vk.com/doc530551121_611241130?hash=TOQXqVqWnAVivsZyiUnhdfjxJgAtsqllfcT5II0A40&dl=SAZHCx2ZCU0vt2KCEtNbHntoe67kbV6Rwccq19Pzuio.

Статья поступила в редакцию 02.03.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 15.03.2023.

The article was submitted 02.03.2023; approved after reviewing 13.03.2023; accepted for publication 15.03.2023.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

DOI 10.54398/20741707_2023_2_143
УДК 623.746; 681.5.013

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ФИЛЬТРАЦИИ В МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Полтавский Александр Васильевич, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 117342, Российская Федерация, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65,

доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-8884-9591, e-mail: avp57avp@yandex.ru

Юрков Николай Кондратьевич, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры», ORCID: 0000-0002-2425-3470, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Мельничук Антон Иванович, учебная авиационная база Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков МО РФ, 412032, Российская Федерация, Саратовская область, г. Ртищево, ул. Котовского 1/1,

инженер группы обслуживания и ремонта бортовой контрольно-записывающей аппаратуры, e-mail: pelmenio@mail.ru

Избасов Аскар Гадылиевич, Военный институт Сил воздушной обороны имени дважды Героя Советского Союза Т. Я. Бегельдинова, 030012, Республика Казахстан, г. Актобе, просп. Алии Молдагуловой, 39,

заместитель начальника Военного института, e-mail: iag1973@mail.ru

Рыбаков Илья Михайлович, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры», ORCID: 0000-0002-3008-5821, e-mail: rybakov_im@mail.ru

Цель настоящей статьи заключается в исследовании и оптимизации оптико-электронной системы для информационно-измерительной и управляющей системы беспилотных летательных аппаратов. Более 80 % всех современных беспилотных летательных аппаратов оснащены многоспектральными оптико-электронными системами в связи с высокой актуальностью внедренных в программную часть алгоритмов оптимизации. Алгоритмы оптимизации основаны на ретрансляции сигналов с привязкой к объектам и конкретной местности применения, в качестве телекоммуникационных каналов приема/передачи информации используется радио- или оптическая связь. Такие оптико-электронные системы не рассматриваются на ранней стадии исследования эргодических и сложных технических систем двойного назначения. Предлагается реализация модели фильтрации сигналов оптико-электронных систем информационно-измерительной и управляющей системы беспилотных летательных аппаратов, отличающейся оценкой основных показателей качества на ранней стадии разработки таких оптико-электронных систем. Разработать информационную технологию фильтрации оптического сигнала оптико-электронных систем и предварительного проектирования объектов в задачах текущих и перспективных комплексов беспилотных летательных аппаратов и рассмотреть один из подходов построения алгоритмов фильтрации оптического канала связи и передачи информации в оптико-электронных системах беспилотных летательных аппаратов на ранней стадии предварительных испытаний и проектирования. Применялись подходы и действующие алгоритмы автоматизированного проектирования объектов, пространственно-частотная характеристика оптимального фильтра для осуществления задачи фильтрации оптико-электронных систем. Оценивалась возможность дальнейшего использования алгоритмов многофункциональных беспилотных летательных аппаратов в задачах математической обработки входных сигналов. Разработана информационная технология фильтрации оптического сигнала оптико-электронных систем и предварительного проектирования объектов в задачах текущих и перспективных комплексов беспилотных летательных аппаратов. Анализ полученных результатов показывает, что алгоритмы оптимизации для многоспектральных оптико-электронных систем могут быть модернизированы благодаря разработанной модели фильтрации информационно-измерительной и управляющей системы сигналов при условии значения оптимального фильтра больше 1 и увеличении радиуса изображения объекта в фокальной плоскости оптической системы многоспектральной оптико-электронной системы.

Ключевые слова: информационно-измерительная и управляющая система, оптико-электронная система, состав, пункт управления, структура, оптическая система, беспилотные летательные аппараты, алгоритмическое обеспечение информационно-измерительной и управляющей системы, аппаратно-программное обеспечение информационно-измерительной и управляющей системы

**ALGORITHMIZATION OF THE FILTRATION PROBLEM IN THE MODEL
OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM
OF UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Poltavsky Alexander V., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya St., Moscow, 117342, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Leading Researcher, ORCID: 0000-0001-8884-9591, e-mail: avp57avp@yandex.ru

Yurkov Nikolay K., Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department "Design and Manufacture of Radio Equipment", ORCID: 0000-0002-2425-3470, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Melnichuk Anton I., Training Aviation Base of the Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 1/1 Kotovsky St., Rtishchevo, Saratov region, 412032, Russian Federation,

engineer of the on-board control and recording equipment maintenance and repair group, e-mail: pelmenio@mail.ru

Izbasov Askar G., Military Institute of Air Defense Forces named after twice Hero of the Soviet Union T. Ya. Begeldinov, 39 Aliya Moldagulova Ave., Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan,

Deputy Head of the Military Institute, e-mail: iag1973@mail.ru

Rybakov Ilya M., Penza State University, Penza, 40 Krasnaya St., 440026, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Radio Equipment Design and Production, ORCID: 0000-0002-3008-5821, e-mail: rybakov_im@mail.ru

The purpose of this article is to study and optimize the optoelectronic system for information-measuring and control system of unmanned aerial vehicles. More than 80 % of modern unmanned aerial vehicles are equipped with multispectral optoelectronic systems due to the high relevance of optimization algorithms implemented in the software. Optimization algorithms are based on the retransmission of signals with reference to objects and a specific application area, radio or optical communication is used as telecommunication channels for receiving/transmitting information. Such optoelectronic systems are not considered at the early stage of the study of ergodic and complex technical systems of dual use. It is proposed to implement a model for filtering signals of unmanned aerial vehicle information-measuring and control system, which differs in the assessment of the main quality indicators at an early stage of the development of such UES. To develop an information technology for filtering the optical signal of the optoelectronic systems and preliminary design of objects in the tasks of current and prospective unmanned aerial vehicle complexes and to consider one of the approaches to constructing algorithms for filtering the optical communication channel and transmitting information to the optoelectronic systems of the unmanned aerial vehicles at an early stage of preliminary testing and design. Approaches and operating algorithms of computer-aided design of objects, the spatial-frequency characteristic of the optimal filter and for the implementation of the optoelectronic system filtration task were applied. The possibility of further use of algorithms of multifunctional unmanned aerial vehicles in problems of mathematical processing of input signals was evaluated. An information technology for filtering the optical signal of the optoelectronic systems and preliminary design of objects in the tasks of current and prospective unmanned aerial vehicle complexes has been developed. The analysis of the obtained results shows that optimization algorithms for multispectral optoelectronic system can be upgraded thanks to the developed information-measuring and control system signal filtering model, provided the optimal filter value is greater than 1 and an increase in the image radius of the object in the focal plane of the optical system of the multispectral optoelectronic system.

Keywords: information-measuring and control system, optoelectronic system, composition, control point, structure, optical system, of unmanned aerial vehicles, information-measuring and control system algorithmic software, information-measuring and control system hardware and software

ВВЕДЕНИЕ

Семейство современных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (беспилотных воздушных судов) имеет в своем структурном составе для информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) многоспектральные оптико-электронные приборы (ОЭП). В информационном моделировании приборов, как и для многих объектов оптико-электронных систем (ОЭС) моделей современных многоцелевых БПЛА, задача решения оптимальной пространственно-частотной и спектральной фильтрации в оптических системах ИИУС состоит в том, чтобы найти необходимые характеристики и параметры в модели для фильтра, обеспечивающего наилучшее соотношение между полезным выходным сигналом $Y = Y(\alpha, \beta, \lambda, t)$ и его помехой $N = N(\alpha, \beta, \lambda, t)$, в которых α, β – угловые пространственные координаты для изображения объекта-цели в фокальной плоскости оптической системы ОЭС, λ – длина волны, t – время. Подобные задачи решались и ранее, но применительно к многоспектральным ОЭС в составе современных БПЛА нет. Как видим, в такой постановке вопроса имеется целый комплекс сложных технических систем (БПЛА, ОЭС, ИИУС, объект-цель

и условия их применения). Известно, что это прежде всего автоматические системы, а в теории автоматических систем широкое распространение получил метод для синтеза оптимальных фильтров многомерных систем по критерию минимума средней квадратической ошибки воспроизведения полезного сигнала ОЭС. Данный критерий получен для стационарных случайных процессов и достаточно известен в научных кругах, его часто упоминают во многих источниках. Критерий минимума средней квадратической ошибки (СКО), также его называют «критерий точности» в автоматических системах (АС) управления и обработки информации, для многомерного объекта АС имеет следующий общепринятый вид [1–2]:

$$\eta(t) = m_E^T(t) \Gamma m_E(t) + tr[\Gamma \theta_E(t)], \quad (1)$$

где $m_E(t) = M[E(t)]$ – вектор математических ожиданий; Γ – заданная числовая матрица; E – вектор ошибки измерений; $\theta_E(t) = M[(E(t) - m_E(t))(E(t) - m_E(t))^T]$ – корреляционная матрица моментов.

Критерий СКО, как правило, приводит к построению объектов ИИУС действующих алгоритмов определения оптимальных оценок входного сигнала в многоспектральных ОЭС [3–4]. Как правило, сам сигнал представляют в виде аддитивной смеси – помехи и полезной части, который далее усиливается, например, в предварительном усилителе промежуточной частоты, если обработка сигналов в устройствах ИИУС осуществляется на промежуточной частоте. В свою очередь, такая смесь сигнала может разделяться на два одинаковых сигнала любым известным способом, например, в схемах коммутационно-распределительных устройств-разветвителей. Решение задачи разделения для сигнала – это отдельная постановка задачи и самого вопроса, связанная с обработкой информации и учетом внутренних и внешних шумовых факторов, которые всегда действуют на входе ИИУС. Как правило, в модели пространственно-временные характеристики и сами параметры связаны с низкочастотной компонентой, например, положением объекта-цели, а спектральная – с высокочастотной. Полученные таким образом входные сигналы в модели ИИУС при учтенных допущениях (внутренние же шумы в модели ИИУС могут не учитываться) компоненты умножаются друг на друга. Многие подобные задачи решаются о возможном упрощении и допущении к самой модели сигнала – стационарности и эргодичности информационного процесса. С учетом этих принимаемых допущений, прежде всего, о «линейности» процессов следует опираться на фундаментальные теоремы Винера – Хопфа и известные теоремы из систем автоматического управления и обработки информации.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пусть на вход квазилинейного фильтра прибора ОЭС в составе многоцелевого БПЛА поддается оптический сигнал, равный сумме случайного полезного сигнала $X(\alpha, \beta, \lambda, t)$ и его помехи $N(\alpha, \beta, \lambda, t)$ в виде:

$$Z(\alpha, \beta, \lambda, t) = X(\alpha, \beta, \lambda, t) + N(\alpha, \beta, \lambda, t). \quad (2)$$

Необходимо найти такую весовую функцию оптимального пространственного фильтра, которая обеспечивает минимальную среднюю квадратическую ошибку между требуемым Y_T и возможным значением выходного сигнала Y , а также и соответствующую ей пространственную частотную характеристику. Поскольку сама, как отмечено выше, пространственно-частотная и спектральная фильтрация осуществляется совершенно различными элементами в оптической системе, и, принимая допущение, что они некоррелированы, возможно разделение переменных во входном сигнале для ОЭС, т. е.

$$Z(\alpha, \beta, \lambda, t) = X_1(\alpha, \beta, t) X_2(\lambda) + N_1(\alpha, \beta, t) N_2(\lambda). \quad (3)$$

Такая многомерная задача поиска оптимальных решений и оптимальной фильтрации в этом случае распадается на две условно принятые независимые задачи – оптимальной пространственно-частотной фильтрации и оптимальной фильтрации непосредственно по оптическому спектру для ОЭС. Минимальные значения СКО между требуемыми и возможными значениями выходных сигналов в ОЭС при допущении о их стационарности и эргодичности определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= M[(Y'_T - Y')^2] = \lim_{T\alpha, T\beta \rightarrow \infty} \frac{1}{4T\alpha T\beta} \int \int_{-T\alpha}^{T\alpha} \int_{-T\beta}^{T\beta} [(Y'_T(\alpha, \beta, t) - Y'(\alpha, \beta, t))]^2 d\alpha d\beta, \eta_2 \\ &= M[(Y''_T - Y'')^2] = \lim_{T\lambda \rightarrow \infty} \frac{1}{2T\lambda} \int_{-T\lambda}^{T\lambda} [Y''_T(\lambda) - Y''(\lambda)]^2 d\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

где $T\alpha, T\beta$ – границы фокальной плоскости оптической системы ОЭС; $T\lambda$ – граница спектрального диапазона пропускания оптического фильтра.

Выходной сигнал определяется интегралом Дюамеля [2], тогда имеем формулы:

$$\eta_1 = \lim_{T\lambda \rightarrow \infty} \int_{-T\alpha-T\beta}^{T\alpha T\beta} \left[Y_T'(\alpha, \beta, t) - \int_{-\infty}^{\infty} Z'(\alpha - \mu, \beta - \nu, t) g(\mu, \nu) d\mu d\nu \right]^2 d\alpha d\beta, \quad (5)$$

$$\eta_2 = \lim_{T\lambda \rightarrow \infty} \int_{-T\lambda}^{T\lambda} \left[Y_T''(\lambda) - \int_{-\infty}^{\infty} Y''(\lambda - \gamma) \omega(\gamma) d\gamma \right]^2 d\lambda,$$

где $g(\mu, \nu)$ – обобщенная весовая функция пространственно-частотного фильтра; $\omega(\gamma)$ – весовая функция спектрального фильтра. Преобразуя это выражение, получим формулы

$$\eta_1 = M \left[(Y_T' - Y')^2 \right] = \lim_{T\alpha, T\beta \rightarrow \infty} \frac{1}{4T\alpha T\beta} \left\{ \int_{-T\alpha T\beta}^{T\alpha T\beta} Y_T'^2(\alpha, \beta, t) - 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(\mu, \nu) d\mu d\nu \times \right.$$

$$\times \lim_{T\alpha, T\beta \rightarrow \infty} \int_{-T\alpha-T\beta}^{T\alpha T\beta} Y_T'(\alpha, \beta, t) Z'(\alpha - \mu, \beta - \nu, t) d\alpha d\beta + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(\mu, \nu) d\mu d\nu \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\xi, \zeta) d\xi d\zeta \times$$

$$\left. \times \lim_{T\alpha, T\beta \rightarrow \infty} \frac{1}{4T\alpha T\beta} \int_{-T\alpha-T\beta}^{T\alpha T\beta} Y_T'(\alpha - \mu, \beta - \nu, t) Z'(\alpha - \xi, \beta - \zeta, t) d\alpha d\beta \right\}, \quad (6)$$

$$\eta_2 = M \left[(Y_T'' - Y'')^2 \right] = \lim_{T\lambda \rightarrow \infty} \frac{1}{2T\lambda} \int_{-T\lambda}^{T\lambda} Y_T''^2(\lambda) - 2 \int_{-\infty}^{\infty} Y_T''(\lambda) Z''(\lambda - \gamma) \omega(\gamma) d\gamma + \int_{-\infty}^{\infty} Z''^2(\lambda - \gamma) \omega(\gamma) d\gamma$$

Пределы для выражения (6) представляют собой корреляционные функции соответствующих случайных сигналов: $K_{y_m}(\mu, \nu)$, $K_z(\mu, \nu)$, $K_{y_m z}(\mu, \nu)$, $K_\lambda(\gamma)$. Следовательно, ошибка будет

$$\eta_1 = \left[K_{y_t}(0,0) - 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(\mu, \nu) K_{y_t z}(\mu, \nu) d\mu d\nu + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(\mu, \nu) d\mu d\nu \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\xi, \zeta) K_z(\mu - \xi, \nu - \zeta) d\xi d\zeta \right] = \min, \quad (7)$$

$$\eta_2 = \left[K_{z_t}(0,0) - 2 \int_{-\infty}^{\infty} \omega(\gamma) K_\gamma(\gamma) d\gamma + \int_{-\infty}^{\infty} \omega(\gamma) d\gamma \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(\xi) K_z(\gamma - \xi) d\xi \right] = \min.$$

Для пространственно-частотных фильтров оптического сигнала условие «физической осуществимости» условно не является столько «жестким», как для спектральных фильтров. Поэтому весовая функция g_1 пространственно-частотного фильтра может быть отлична от нуля не только при положительных, но и при отрицательных значениях аргументов ξ и ζ [4].

Выражение (7) показывает необходимое и достаточное условие для того, чтобы функция $g(\mu, \nu)$ и $\omega(\gamma)$ при рассматриваемых условиях зависела не от самих функций Z и Y_m , а непосредственно от корреляционных функций. Получим интегральное уравнение для оптимального фильтра. Покажем, что необходимое и достаточное условие для того, чтобы функции $g(\mu, \nu)$ и $\omega(\gamma)$ обращали выражение (7) в минимум, заключается в том, чтобы они представляли собой решение полуинтегрального уравнения. Применим прием вариационного исчисления [6]

$$\begin{cases} g(\mu, \nu) = g_0(\mu, \nu) + \beta_1 g_{11}(\mu, \nu), \\ \omega(\gamma) = \omega_0(\gamma) + \beta_2 \omega_{11}(\gamma) \end{cases}, \quad (8)$$

где β_1 и β_2 – соответствующие параметры, не зависящие от μ, ν и γ ; $g_{11}(\mu, \nu)$, $\omega_{11}(\gamma)$ – произвольные функции.

При этом величина $\eta = M [(Y_T' - Y')^2]$ получит вариацию δ_η , и полное среднее значение квадрата ошибки будет равным как $\eta + \delta_\eta$. Необходимым условием для того, чтобы величина СКО η имела минимум [6], будет связь

$$\frac{\partial}{\partial \beta_1 \partial \beta_2} [\eta + \delta_\eta] \Big|_{\beta_1=0, \beta_2=0} = 0. \quad (9)$$

Подстановкой в (7) выражения из (8) получим соотношения:

$$\begin{aligned} \eta_1(g_0 + \beta_1 g_{11}) &= K_{y_t}(0,0) - 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [g_0(\mu, \nu) + \beta_1 g_{11}(\mu, \nu)] K_{y_t z}(\mu, \nu) d\mu d\nu + \\ &+ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [g_0(\mu, \nu) + \beta_1 g_{11}(\mu, \nu)] d\mu d\nu \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [g_{10}(\xi, \zeta) + \beta_1 g_{11}(\xi, \zeta)] K_z(\mu - \xi, \nu - \zeta) d\xi d\zeta = \\ &= \eta_1(g) - 2\beta_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_{y_t z}(\mu, \nu) g_{11}(\mu, \nu) d\mu d\nu + 2\beta_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{11}(\mu, \nu) d\mu d\nu \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{11}(\xi, \zeta) K_z(\mu - \xi, \nu - \zeta) d\xi d\zeta \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \eta_2(\omega_0 - \beta_1\omega_{11}) &= K_{\lambda T}(0,0) - 2 \int_{-\infty}^{\infty} [\omega_0(\gamma) + \beta_2\omega_{11}(\gamma)] K_{\lambda}(\gamma) d\gamma + \int_{-\infty}^{\infty} [\omega_0(\gamma) + \beta_2\omega_{11}(\gamma)] d\gamma \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} [\omega_{10}(\aleph) + \beta_2\omega_{11}(\aleph)] K_{\lambda}(\gamma - \aleph) d\aleph = \mu_2(\omega) - 2\beta_2 \int_{-\infty}^{\infty} K_{\lambda}(\gamma)\omega(\gamma) d\gamma + 2\beta_2 \int_{-\infty}^{\infty} \omega(\gamma) d\gamma \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \omega_{11}(\aleph) K_{\lambda}(\gamma - \aleph) d\aleph + \beta_2^2 \int_{-\infty}^{\infty} \omega(\gamma) d\gamma \int_{-\infty}^{\infty} \omega_{11}(\aleph) K_{\lambda}(\gamma - \aleph) d\aleph. \end{aligned}$$

Запишем, что

$$\eta_{1g} = \int \int_{-\infty}^{\infty} g_{11}(\mu, \nu) d\mu d\nu \left[K_{\gamma, z}(\mu, \nu) - \int_{-\infty}^{\infty} K_z(\mu - \xi, \nu - \varsigma) g_{qq}(\xi, \varsigma) d\xi d\varsigma \right], \quad (11)$$

$$\eta_{1\omega} = \int \omega(\gamma) d\gamma \left[K_{\lambda}(\gamma) - \int K_{\lambda}(\gamma - ae) dae \right],$$

$$\eta_{2g} = \int \int_{-\infty}^{\infty} g_{11}(\mu, \nu) d\mu d\nu \int K_z(\mu - \xi, \nu - \varsigma) g_{11}(\xi, \varsigma) d\xi d\varsigma,$$

$$\eta_{2\omega} = \int_0^{\infty} \omega_{11}(\gamma) d\gamma \int_0^{\infty} K_{\lambda}(\gamma - ae) \omega_{11}(ae) dae. \quad (12)$$

Подставим формулы (11) и (12) в уравнение (10), отсюда получим выражение вида

$$\begin{cases} \eta_1(g_0 + \beta_1 g_{11}) = \eta_1(g) - 2\beta_1 \eta_{1g} + \beta_1^2 \eta_{2g} \\ \eta_2(\omega_0 + \beta_2 \omega_{11}) = \eta_2(\omega) - 2\beta_2 \eta_{1\omega} + \beta_2^2 \eta_{2\omega} \end{cases}. \quad (13)$$

Дифференцируя по β_1 и β_2 , и полагая, что $\beta_1 = 0, \beta_2 = 0$, получим $\eta_2(\omega_0 + \beta_2 \omega_{11}) = 0$.

Подставляя эти условия в (10), получим далее

$$\begin{cases} K_{\gamma T}(\mu, \nu) \int_{-\infty}^{\infty} K_z(\mu - \xi, \nu - \varsigma) g(\xi, \varsigma) d\xi, d\varsigma = 0 \\ K_{\lambda}(\gamma) - \int_0^{\infty} K_{\lambda}(\gamma - ae) \omega(ae) dae, \quad \text{при } \gamma \geq 0 \end{cases}. \quad (14)$$

Следовательно, система уравнений (14) является необходимым условием для того, чтобы величина $\eta_{1,2}$ имела минимум. Покажем также, что если равенство есть $\eta_1 = 0$ и $\eta_2 = 0$, то как бы мы не выбирали $g_{11}(\mu, \nu)$ и $\omega_{11}(\gamma)$, всегда будут иметь место следующие неравенства:

$$\begin{cases} \eta_1(g_0 + \beta_1 g_{11}) \geq \eta_1(g) \\ \eta_2(\omega_0 + \beta_2 \omega_{11}) \geq \eta_2(\omega) \end{cases}. \quad (15)$$

Таким образом, система интегральных уравнений (14) будет являться необходимым [5–7] и достаточным условием для того, чтобы величина η имела минимум. Далее рассмотрим первое неравенство (15) при наблюдении $\eta_{1g} = 0$,

$$\eta_1(g_0 + \beta_1 g_{11}) = \eta_1(g) + \beta_1^2 \eta_{2g}, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \eta_{2g} &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{11}(\mu, \nu) d\mu d\nu \int_{-\infty}^{\infty} K_z(\mu - \xi, \nu - \varsigma) g_{11}(\xi, \varsigma) d\xi d\varsigma = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{11}(\mu, \nu) d\mu d\nu \int_{-\infty}^{\infty} g_{11}(\xi, \varsigma) d\xi d\varsigma \lim_{T_{\mu} \rightarrow \infty, T_{\nu} \rightarrow \infty} \int_{-T_{\mu}-T_{\nu}}^{T_{\mu}T_{\nu}} \int \int Z(\omega - \xi) Z'(v - \xi) d\mu d\nu = \\ &= \lim_{T_{\mu} \rightarrow \infty, T_{\nu} \rightarrow \infty} \frac{1}{4T_{\mu}T_{\nu}} \int_{-T_m-T_g}^{T_m, T_g} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{11}(\xi, \varsigma) Z(\mu - \xi) Z'(v - \varsigma) d\xi d\varsigma \right\}^2 d\mu d\nu > 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда $\eta_1(g_0 + \beta_1 g_{11}) + \beta_1^2 \eta_{2g} > \eta_1(g_0 + \beta_1 g_{11})$, отсюда и неравенство (15) также доказано.

Аналогичный подход имеет место для доказательства и второго неравенства. Приведенные выше доказательства показали, что необходимое и достаточное условие минимума ошибки заключается в том, чтобы весовые функции стационарных пространственных фильтров $g(\xi, \varsigma)$ и $\omega(\gamma)$ представляли

собой решение системы интегральных уравнений в (14). Определим частотную характеристику оптимального фильтра. С этой целью далее умножим обе части первого уравнений (14) на $\exp(-jt(\omega_\alpha + \omega_\beta))$, $\exp(-it\omega_\lambda) e^{-j(\omega_\alpha + \omega_\beta)}$, затем интегрируя, получим выражение в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_{YIZ}(\mu, \nu) e^{-j(\omega_\mu + \omega_\nu)} d\mu d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega_\mu + \omega_\nu)} d\mu d\nu \int_{-\infty}^{\infty} K_z(\mu - \xi, \nu - \zeta) g(\xi, \zeta) d\xi d\zeta, \quad (18)$$

$$K_{\lambda T}(\gamma) e^{-j\omega_\lambda \gamma} d\gamma = \int_0^{\infty} e^{-j\omega_\lambda \gamma} d\gamma \int_0^{\infty} K_\lambda(\gamma - ae) \omega(ae) dae,$$

где $\omega_a = 1/a$; $\omega_\beta = 1/\beta$; $\omega_\lambda = 1/\lambda$.

Обозначим: $\varepsilon = \mu - \xi$; $\vartheta = \nu - \zeta$; $\chi = -ae$, заменяя интегралы их значениями для спектральных плотностей, а также используя известную связь в АС для весовой функции с передаточной функцией (ПФ), получим выражение:

$$S_{YIZ}(\omega_\alpha, \omega_\beta) = H_1(\omega_\alpha, \omega_\beta) S_Z(\omega_\alpha, \omega_\beta), \quad (19)$$

$$\int_0^{\infty} K_{\lambda T}(\chi) e^{-j\omega_\lambda \chi} d\chi = \int_0^{\infty} \omega(\chi) e^{-j\omega_\lambda \chi} d\chi \int_0^{\infty} K_\lambda(\cdot Y) e^{-j\omega_\lambda \chi} d\chi. \quad (20)$$

Частотная характеристика оптического пространственного фильтра равна

$$H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda) = \frac{S_Z(\omega_\alpha, \omega_\beta) [S_{\lambda T}(\omega_\lambda)]}{S_Z(\omega_\alpha, \omega_\beta) [S_\lambda(\omega_\lambda)]_+} = \frac{S(\omega_\alpha, \omega_\beta)}{S_x(\omega_\alpha, \omega_\beta) + S_N(\omega_\alpha, \omega_\beta)} \frac{[S_{\lambda T}(\omega_\lambda)]}{[S_\lambda(\omega_\lambda)]_+}. \quad (21)$$

Конструктивно в ОЭС возможно совмещение пространственного фильтра (модулирующего диска) и спектрального фильтра [13, 16]. Воспользуемся упрощенным подходом представления функций нескольких переменных, в котором имеем методику среднеквадратичного приближения

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda) - \tilde{H}_1(\omega_\alpha, \omega_\beta) \tilde{H}_2(\omega_\lambda)]^2 d\omega_\alpha d\omega_\beta d\omega_\lambda. \quad (22)$$

Решение при $J = J_{max}$ находится из известных уравнений Эйлера

$$\frac{\partial j}{\partial [\tilde{H}_1(\omega_\alpha, \omega_\beta)]} = extrem; \quad \frac{\partial j}{\partial [\tilde{H}_2(\omega_\alpha, \omega_\beta)]} = extrem \quad (23)$$

по общепринятым формулам:

$$\tilde{H}_1(\omega_\alpha, \omega_\beta) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda) \tilde{H}_2(\omega_\lambda) d\omega_\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{H}_1(\omega_\lambda)|^2 d\omega_\lambda}, \quad (24)$$

$$\tilde{H}_2(\omega_\lambda) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda) \tilde{H}_1(\omega_\alpha, \omega_\beta) d\omega_\alpha d\omega_\beta}{\int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{H}_1(\omega_\alpha, \omega_\beta)|^2 d\omega_\alpha d\omega_\beta}. \quad (25)$$

Представленные выражения (24) и (25) показывают, что наибольший вес при осреднении придется тем значениям частотных характеристик, которые соответствуют максимуму этой характеристики по другой переменной [17]. В первом приближении может быть использована поочередная интерполяция по одному из аргументов как

$$\tilde{H}_1(\omega_\alpha, \omega_\beta) \cong H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda),$$

$$\tilde{H}_2(\omega_\lambda) \cong H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda), \quad (26)$$

или поочередное осреднение в виде

$$\tilde{H}_1(\omega_\alpha, \omega_\beta) = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda) d\omega_\lambda,$$

$$\tilde{H}_2(\omega_\lambda) = \frac{1}{\Delta\omega_\alpha \Delta\omega_\beta} \int_{-\omega_\alpha - \omega_\beta}^{\omega_\alpha \omega_\beta} H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda) d\omega_\alpha d\omega_\beta. \quad (27)$$

Следующие приближения в модели выполняются по формулам (24) и (25) с подстановкой под интегралы выражений (26) или (27). Число циклов итераций зависит от переменных $\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda$ в частотной характеристике. При слабой корреляции может оказаться практически приемлемым второе или даже первое приближение. Покажем практическое применение на примерах.

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Изложенные теоретические аспекты позволяют провести алгоритм через информационное моделирование ОЭС. Покажем такое действие приведенных выкладок на практических примерах [18]. Пусть на вход многомерного фильтра ОЭС подается полезный сигнал, спектральная плотность которого имеет следующий вид:

$$S_x(\omega_\alpha, \omega_\beta) = S_{x_0} \exp\left\{-\frac{\mu^2}{4}(\omega_\alpha^2 + \omega_\beta^2)\right\}, \tag{28}$$

где $\mu^2 = \frac{r^2}{\beta^2}$; r – радиус изображения в фокальной плоскости; β – радиус корреляции и помеха – принятый пространственный «белый шум» со спектральной плотностью вида

$$S_N(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda) = S_{N_0}. \tag{29}$$

Пространственная частотная характеристика фильтра для данного случая имеет следующий вид:

$$H(\omega_\alpha, \omega_\beta) = \frac{1}{1 + \frac{S_{N_0}}{S_{x_0}} \exp\left\{\frac{\mu^2}{4}(\omega_\alpha^2 + \omega_\beta^2)\right\}}, \tag{30}$$

$$\frac{S_{x_0}}{S_{N_0}} \gg 1, \quad H(\omega_\alpha, \omega_\beta) \approx 1. \tag{31}$$

Если

$$\frac{S_{x_0}}{S_{N_0}} \ll 1, \quad \text{имеем } H(\xi_\alpha, \omega_\beta) \cong \frac{S_{x_0}}{S_{N_0}} \exp\left\{-\frac{\mu^2}{4}(\omega_\alpha^2 + \omega_\alpha^2)\right\}.$$

Так как функция в (25) изотропная частотных координат, то можно пространственные координаты ω_α и ω_β записать для одномерного случая в виде

$$\omega^2 = \omega_\alpha^2 + \omega_\beta^2. \tag{32}$$

Оптимальная пространственная частотная характеристика фильтра (26) запишется в виде:

$$H(\omega, \omega_\lambda) = \frac{S_{x_0}}{S_{N_0}} \exp\left(-\frac{\mu^2}{4} \omega^2\right). \tag{33}$$

Зная оптимальную пространственную частоту характеристики в ОЭС, можно определить непосредственно и диаметр изображения объекта d в фокальной плоскости, а следовательно, и предъявить требования к оптической системе [7]. Одномерная весовая функция оптимального пространственного фильтра определяется с помощью обратного преобразования Фурье пространственной частотной характеристики

$$g(\varepsilon) = \frac{S_{x_0}}{S_{N_0}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{\mu^2}{4} \omega^2\right) \exp(2\pi j \varepsilon \omega) d\omega. \tag{34}$$

Интеграл в формуле (34) является табличным и находится как

$$g(\varepsilon) = \frac{\sqrt{\pi}}{\mu} \frac{S_{x_0}}{S_{N_0}} \exp\left(-\frac{\pi^2 \varepsilon^2}{\mu^2}\right) \tag{35}$$

или при равнозначности весовой функции и функции пропускания $\tau(\varepsilon)$, тогда имеем

$$\tau_{\text{опт.им}}(\varepsilon) = \frac{S_{x_0}}{S_{N_0}} \frac{2\rho\sqrt{\pi}}{r} \exp\left(-\frac{4\pi^2 \varepsilon^2 \rho^2}{r^2}\right). \tag{36}$$

Минимальное значение функция $\tau_{\text{опт.им}}(\varepsilon) = 1$ принимает при $\varepsilon = 0$. Отсюда находим

$$\tau_{optimum_{max}} = \frac{S_{x0}}{S_{N0}} \frac{2\rho\sqrt{\pi}}{r} = 1, \quad (37)$$

$$r = \frac{d}{2} = 2\rho\sqrt{\pi} \frac{S_{x0}}{S_{N0}}. \quad (38)$$

Покажем еще один вариант моделирования в ОЭС. Определим частотную характеристику оптимального фильтра, на вход которого подаются полезный сигнал и помеха, спектральные плотности имеют одинаковую форму:

$$S_x(\omega_x, \omega_\rho, \omega_\lambda) = \frac{4S_{x0}a_x b_x c_x}{(\omega_\alpha^2 + a_x^2)(\omega_\beta^2 + b_x^2)(\omega_\lambda^2 + c_x^2)}, \quad (39)$$

$$S_N(\omega_x, \omega_\beta, \omega_\lambda) = \frac{4S_{N0}a_\pi b_\pi c_\pi}{(\omega_\alpha^2 + a_\pi^2)(\omega_\beta^2 + b_\pi^2)(\omega_\lambda^2 + c_\pi^2)}. \quad (40)$$

Используя формулу (21), получим очередное выражение

$$H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda) = \frac{1}{1 + \frac{S_{N0}a_\pi b_\pi c_\pi (\omega_\alpha^2 + a_x^2)(\omega_\beta^2 + b_x^2)(\omega_\lambda^2 + c_x^2)}{S_{x0}a_x b_x c_x (\omega_\alpha^2 + a_\pi^2)(\omega_\beta^2 + b_\pi^2)(\omega_\lambda^2 + c_\pi^2)}}. \quad (41)$$

Из полученного выражения (41) также следует, что в случае больших значений для спектральной плотности полезного сигнала $\frac{S_{x0}}{S_{N0}} \gg 1$, частотная характеристика фильтра

$$H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda) \approx 1, \quad (42)$$

при соотношениях $S_{N0}/S_{x0} \gg 1$ имеет вид

$$H(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\lambda) = \frac{S_{x0}a_x b_x c_x (\omega_\alpha^2 + a_\pi^2)(\omega_\beta^2 + b_\pi^2)(\omega_\lambda^2 + c_\pi^2)}{S_{N0}a_\pi b_\pi c_\pi (\omega_\alpha^2 + a_x^2)(\omega_\beta^2 + b_x^2)(\omega_\lambda^2 + c_x^2)}. \quad (43)$$

Предварительный анализ соотношений между спектрами полезных сигналов (39) и помех (40) показывает, что возможны три случая фильтрации в многоспектральных системах ОЭС для многофункциональных БПЛА [8]:

- 1) спектры сигнала и помехи не перекрываются;
- 2) спектры сигнала и помехи перекрываются частично;
- 3) спектр сигнала полностью перекрывается спектром помехи.

В первом случае частотная характеристика для оптимального фильтра ОЭС на участке спектра полезного сигнала равняется единице, а на остальной части пространства – равна нулю. Ошибка фильтрации в модели системы ОЭС при этом равняется нулю, так как помеха полностью подавляется фильтром [9–12]. При частичном перекрывании спектра сигнала и помехи частотная характеристика оптимального фильтра равняется единице только на том участке, где спектры не перекрываются. На границе спектра полезного сигнала частотная характеристика фильтра становится равной нулю. Если спектр полезного сигнала полностью перекрывается спектром помехи, тогда возможность выделения сигнала на выходе фильтра многоспектральной ОЭС определяется интенсивностью помехи. Когда интенсивность помехи ниже интенсивности сигнала, тогда при использовании оптимального фильтра отношение на его выходе больше единицы [15].

Для данных начальных условий определим диаметр изображения объекта d в фокальной плоскости оптической системы ОЭС. Запишем частотную характеристику оптимального фильтра в одномерном варианте, функция является симметричной, т. е. $S_{x0} \ll S_x$

$$H(\omega) = \frac{S_{x0}}{S_{N0}} \frac{(\omega^2 + \mu^2) J_1(2\pi\omega)}{2\pi\omega}. \quad (44)$$

Одномерная функция пропускания оптимального фильтра в информационно-измерительной системе многоспектральной ОЭС определится

$$\tau_{opt}(ε) = \frac{S_{x0}}{2\pi\tau S_{N0}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_1(2\pi\omega)}{\omega} (\omega^2 + \mu^2) \exp(2\pi j\epsilon\omega) d\omega. \quad (45)$$

Функция пропускания реального фильтра в оптической системе ОЭС является действительной. Имеем

$$\tau_{onm}(\varepsilon) = \frac{S_{x0}}{2\pi r S_{N0}} \int_{-\infty}^{\infty} J_1(2\pi r \omega) \frac{(\omega^2 + \mu^2)}{\omega} \cos(2\pi \varepsilon \omega) d\omega. \quad (46)$$

Обозначим интеграл в формуле (41) через J_0 и выразим его в виде суммы двух интегралов J_1 и J_2 .

$$J_0 = J_1 + J_2 = \int_{-\infty}^{\infty} J_1(2\pi r \omega) \omega \cos(2\pi \varepsilon \omega) d\omega + \mu^2 \int_{-\infty}^{\infty} J_2(2\pi r \omega) \frac{1}{\omega} \cos(2\pi \varepsilon \omega) d\omega. \quad (47)$$

Интегралы являются табличными и вычисляются в следующем виде [5]

$$J_1 = \frac{r \Gamma\left(\frac{3}{2}\right)}{\pi^{5/2} (r^2 - \varepsilon^2)^{3/2}} = \frac{0,05r}{(r^2 - \varepsilon^2)^{3/2}}, \quad (48)$$

$$J_2 = 2\mu^2 \cos \arcsin \frac{\varepsilon}{r} = \frac{2\mu^2}{r} (r^2 - \varepsilon^2)^{1/2}. \quad (49)$$

Далее подставим формулы (48) и (49) в (47), получим

$$J_0 = \frac{2\mu^2}{r} \left[1 + \frac{0,05r^2}{(r^2 - \varepsilon^2)^2} \right] (r^2 - \varepsilon^2)^{1/2}. \quad (50)$$

Функция пропускания пространственного фильтра при входных сигналах со спектральными плотностями сигнала из (39) и помехи из (40) будет представлять

$$\tau_{onm}(\varepsilon) = \frac{S_{x0}}{S_{N0}} \frac{\mu^2}{\pi r^2} (r^2 - \varepsilon^2)^{1/2} \left[1 + \frac{0,05r^2}{(r^2 - \varepsilon^2)^2} \right]. \quad (51)$$

При допущении о нулевом значении $\varepsilon = 0$, функция $\tau_{onm}(0) = \tau_{max} = 1$, откуда следует

$$\tau_{max} = \frac{S_{x0}}{S_{N0}} \frac{\mu^2}{\pi r} \left(1 + \frac{0,05}{r^2} \right) = 1, \quad (52)$$

тогда радиус изображения в фокальной плоскости оптической системы определяется из:

$$\frac{\pi r^2}{\mu^2 (r^2 + 0,05)} = \frac{S_{x0}}{S_{N0}}. \quad (53)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны подход и информационная технология фильтрации оптического сигнала ОЭС и предварительного проектирования объектов в задачах текущих и перспективных комплексов БПЛА.

При проведении первичного анализа для функций пропускания результат радиуса изображений в фокальной плоскости ОС (53) показывает, что для сохранения условий $\tau_{max} = 1$ и обеспечения $S_{x0} \ll S_{N0}$ необходимо увеличить радиус для изображения объекта в фокальной плоскости оптической системы многоспектральной ОЭС или величина μ должна быть больше единицы.

На основе предложенных алгоритмов и информационной технологии фильтрации оптического сигнала ОЭС с возможностью дальнейшего использования в задачах математической обработки входных сигналов доказано, что при определении размеров для элементарных ячеек пространственного фильтра необходимо разрешить (50). Решение дает результат $\Sigma = \pm r$, соответствующий законам о соотношениях между спектрами полезных сигналов и их помехах в моделировании ИИУС.

Анализ зависимости соотношений полезных сигналов и помех для элементарных ячеек пространственного фильтра показывает, что сами размеры элементарных ячеек оптимального пространственного фильтра должны быть равны размерам изображения объекта в фокальной плоскости оптической системы в многоспектральной ОЭС БПЛА.

Практическая ценность полученных первичных результатов способствует также решению научно-технической задачи разработки информационной модели многоспектральной ОЭС в составе БПЛА с точки зрения изучения основных свойств, действующих алгоритмов и адекватных моделей процессов ОЭС БПЛА.

Список источников

1. Казаков, И. Е. Анализ стохастических систем в пространстве состояний / И. Е. Казаков, С. В. Мальчиков. – Москва : Наука, 1983. – 384 с.
2. Жумабаева, А. С. К проблеме модельного синтеза комплексов беспилотных летательных аппаратов / А. С. Жумабаева, А. В. Полтавский, Н. К. Юрков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 73–81.
3. Кульба, В. В. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В. В. Кульба, Е. Н. Микрин, Б. В. Павлов, В. Н. Платонов ; Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – Москва : Наука, 2006. – 579 с.
4. Полтавский, А. В. Модель измерительной системы в управлении БПЛА / А. В. Полтавский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С. 73–77.
5. Полтавский А. В. Оптико-электронная система мониторинга окружающего пространства / А. В. Полтавский, А. А. Бурба, Е. Ю. Русяева // Изобретательство. – 2012. – Т. 12, № 8. – С. 28–31.
6. Полтавский, А. В. Информационная модель распознавания образов / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков, Д. И. Нефедьев, А. В. Гриншкун // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – 2017. – Т. 2. – С. 114–117.
7. Никулин, В. А. Методика построения математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования / В. А. Никулин, А. И. Лоскутов, В. А. Клыков, Е. А. Ряхова, А. В. Столяров // Надежность и качество сложных систем : труды Международного симпозиума. – 2021. – № 1. – С. 31–40. – DOI: 10.21685/2307-4205-2021-1-3.
8. Мельничук, А. И. Способы и средства противодействия беспилотным летательным аппаратам / А. И. Мельничук, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем : труды Международного симпозиума. – 2020. – № 4 (32). – С. 131–138. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-14.
9. Затучный Д. А., Гилко В. С. Методы борьбы с угрозами, вызванными внешними воздействиями на навигационные системы беспилотных летательных аппаратов / Д. А. Затучный, В. С. Гилко // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – 2021. – Т. 1. – С. 15–18.
10. Гузаиров М. Б. Поддержка принятия решений в задаче обеспечения информационной безопасности авиационных систем телеметрии / М. Б. Гузаиров, А. И. Фрид, А. М. Вульфин, В. В. Берхольц // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – 2020. – Т. 1. – С. 178–183.
11. Yurkov, N. K. Designing Aircraft Simulators / N. K. Yurkov, N. I. Romancheva, D. A. Zatuchny, E. Y. Goncharov. – Springer Nature – Springer Aerospace Technology, 2022. – 146 p. – DOI: 10.1007/978-981-19-6187-8.
12. Нгуен, Т. Л. К проблеме классификации беспилотных летательных аппаратов / Т. Л. Нгуен, И. М. Рыбаков, Н. К. Юрков // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – 2022. – Т. 1. – С. 122–126.
13. Нгуен, Т. Л. К проблеме формирования облика перспективных беспилотных летательных аппаратов / Т. Л. Нгуен, Н. А. Кузин, Н. К. Юрков // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – 2022. – № 1(37). – С. 55–66. – DOI: 10.21685/2307-4205-2022-1-7.
14. Крянев, А. В. Классификация и кластеризация моделей беспилотных воздушных судов / А. В. Крянев, А. В. Полтавский, С. Г. Климанов, С. С. Семенов // Надежность и качество : труды Международного симпозиума – 2021. – Т. 1. – С. 62–74.
15. Никулин, В. А. Методика построения математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования / В. А. Никулин, А. И. Лоскутов, В. А. Клыков [и др.] // Надежность и качество : труды Международного симпозиума – 2021. – № 1 (33). – С. 31–40. – DOI: 10.21685/2307-4205-2021-1-3.
16. Бростилов, С. А. К вопросу о создании и внедрении волоконно-оптических систем и датчиков давления на изделия ракетно-космической и авиационной техники / С. А. Бростилов, Т. Ю. Бростилова, Н. С. Бростилов [и др.] // Надежность и качество : труды Международного симпозиума – 2020. – Т. 2. – С. 60–62.
17. Дарьина, А. Н. Метод оптимизации параметров контроллера беспилотного транспортного средства на основе оптимизации роя частиц / А. Н. Дарьина, И. В. Прокопьев // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – 2020. – № 3 (31). – С. 80–87. – DOI: 10.21685/2307-4205-2020-3-10.
18. Куатов, Б. Ж. Задача синтеза модели для контроля и диагностики при производстве электротехнического оборудования летательных аппаратов / Б. Ж. Куатов, А. Н. Коптев, С. Ж. Куртаев, Ю. В. Мясникова // Надежность и качество : труды Международного симпозиума – 2019. – № 1 (25). – С. 77–87. – DOI: 10.21685/2307-4205-2019-1-9.

References

1. Kazakov, I. Ye., Malchikov, S. V. *Analiz stokhasticheskikh sistem v prostranstve sostoyaniy* [Analysis of stochastic systems in the state space]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 384 p.
2. Zhumabaeva, A. S., Poltavsky, A. V., Yurkov, N. K. K probleme modelnogo sinteza kompleksov bespilotnykh letatelnykh apparatov [To the problem of model synthesis of unmanned aerial vehicle complexes]. *Monitoring. Upravleniye. Kontrol* [Measurement. Monitoring. Management. Control], 2017, no. 1 (19), pp. 73–81.
3. Kulba, V. V., Mikrin, E. N., Pavlov, B. V., Platonov, V. N. *Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya informatsionno-upravlyayushchikh sistem kosmicheskikh apparatov* [Theoretical foundations of designing information and control systems of spacecraft]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 579 p.

4. Poltavskiy, A. V. Model izmeritelnoy sistemy v upravlenii BPLA [Model of a measuring system in UAV control]. *Informatsionno-izmeritelnyye i upravlyayushchiye sistemy* [Information-measuring and control systems], 2009, no. 10, pp. 73–77.
5. Poltavskiy, A. V., Burba, A. A., Rusyaeva, E. Yu. Poltavskiy A. V. Optiko-elektronnaya sistema monitoringa okruzhayushchego prostranstva [Optoelectronic monitoring system of the surrounding space]. *Izobretatelstvo* [Invention], 2012, vol. 12, no. 8, pp. 28–31.
6. Poltavskiy, A. V., Yurkov, N. K., Nefediev, D. I., Grinshkun, A. V. Informatsionnaya model raspoznavaniya obrazov [Information model of pattern recognition]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality : Proceedings of the International Symposium], 2017, vol. 2, pp. 114–117.
7. Nikulin, V. A., Loskutov, A. I., Klykov, V. A., Ryakhova, E. A., Stolyarov, A. V. Metodika postroyeniya matematicheskoy modeli protsessa funktsionirovaniya bespilotnogo aviatsionnogo kompleksa s tselyu resheniya zadachi tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Methodology for constructing a mathematical model of the process of functioning of an unmanned aircraft complex in order to solve the problem of technical diagnostics]. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2021, no. 1, pp. 31–40. DOI: 10.21685/2307-4205-2021-1-3.
8. Melnichuk, A. I., Goryachev, N. V. Yurkov, N. K. Sposoby i sredstva protivodeystviya bespilotnym letatelnyim apparatam [Methods and means of countering unmanned aerial vehicles]. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2020, no. 4 (32), pp. 131–138. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-4-14.
9. Zatuchnyy, D. A., Gilko, V. S. Metody borby s ugrozami, vyzvannymi vneshnimi vozdeystviyami na navigatsionnyye sistemy bespilotnykh letatelnykh apparatov [Methods of combating threats caused by external influences on navigation systems of unmanned aerial vehicles]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2021, vol. 1, pp. 15–18.
10. Guzairov, M. B., Fried, A. I., Vulfin, A. M., Berholts, V. V. Podderzhka prinyatiya resheniy v zadache obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti aviatsionnykh sistem telemektrii [Decision support in the task of ensuring information security of aviation telemetry systems]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2020, vol. 1, pp. 178–183.
11. Yurkov, N. K., Romancheva, N. I., Zatuchny, D. A., Goncharov E. Y. *Designing Aircraft Simulators*. Springer Nature - Springer Aerospace Technology, 2022. 146 p. DOI: 10.1007/978-981-19-6187-8.
12. Nguyen, T. L., Rybakov, I. M., Yurkov, N. K. K probleme klassifikatsii bespilotnykh letatelnykh apparatov [On the problem of classification of unmanned aerial vehicles]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2022, vol. 1, pp. 122–126.
13. Nguyen, T. L., Rybakov, I. M., Yurkov N. K. K probleme formirovaniya oblika perspektivnykh bespilotnykh letatelnykh apparatov [On the problem of shaping the appearance of promising unmanned aerial vehicles]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2022, no. 1 (37), pp. 55–66. DOI: 10.21685/2307-4205-2022-1-7.
14. Kryanev, A. V., Poltavsky, A. V., Klimanov, S. G., Semenov S. S. Klassifikatsiya i klasterizatsiya modeley bespilotnykh vozдушnykh sudov [Classification and clustering of unmanned aircraft models]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2021, vol. 1, pp. 62–74.
15. Nikulin, V. A., Loskutov, A. I., Klykov, V. A. [et al.] Metodika postroyeniya matematicheskoy modeli protsessa funktsionirovaniya bespilotnogo aviatsionnogo kompleksa s tselyu resheniya zadachi tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Methodology for constructing a mathematical model of the process of functioning of an unmanned aviation complex in order to solve the problem of technical diagnostics]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2021, no. 1 (33), pp. 31–40. DOI: 10.21685/2307-4205-2021-1-3.
16. Brostilov, S. A., Brostilova, T. Yu., Brostilov, N. S. [et al.] K voprosu o sozdanii i vnedrenii volokonno-opticheskikh sistem i datchikov davleniya na izdeliyakh raketno-kosmicheskoy i aviatsionnoy tekhniki [On the issue of the creation and implementation of fiber-optic systems and pressure sensors on products of rocket, space and aviation equipment]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2020, vol. 2, pp. 60–62.
17. Daryina, A. N., Prokopyev, I. V. Metod optimizatsii parametrov kontrollera bespilotnogo transportnogo sredstva na osnove optimizatsii roya chastits [Method of optimizing the parameters of an unmanned vehicle controller based on particle swarm optimization]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2020, no. 3 (31), pp. 80–87. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-3-10.
18. Kvatov, B. Zh., Koptev, A. N., Kurtayev, S. Zh., Myasnikova, Yu. V. Zadacha sinteza modeli dlya kontrolya i diagnostiki pri proizvodstve elektrotekhnicheskogo oborudovaniya letatelnykh apparatov [The task of synthesizing a model for monitoring and diagnostics in the production of electrical equipment of aircraft]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : Proceedings of the International Symposium], 2019, no. 1 (25), pp. 77–87. DOI: 10.21685/2307-4205-2019-1-9.

Статья поступила в редакцию 16.03.2023; одобрена после рецензирования 27.03.2023; принята к публикации 29.03.2023.

The article was submitted 16.03.2023; approved after reviewing 27.03.2023; accepted for publication 29.03.2023.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. В журнале публикуются материалы на английском и русском языках по тематике, соответствующей утвержденным для журнала отраслям наук, группам специальностей.

2. В список соавторов работ включаются только те лица, которые внесли творческий вклад в подготовку представленных материалов. Лицам, оказавшим только техническую помощь, можно выразить благодарность в конце статьи. Один человек может быть автором (соавтором) не более чем двух статей в одном номере журнала, причем единственным автором он может быть только в одной статье.

3. Объем публикаций для научных статей должен быть не менее 8 страниц, а количество источников в библиографическом списке (списке литературы) – не менее 10 позиций.

4. Содержание каждой статьи должно включать следующие элементы: УДК; название статьи; сведения об авторах, включая их место работы, должность, адрес электронной почты; аннотацию объемом от 100 до 250 слов, ключевые слова (от 9 до 13); графическую аннотацию, отражающую содержание статьи; название статьи, сведения об авторах, аннотацию и ключевые слова на английском языке (для англоязычных статей – на русском языке); введение – оно должно заканчиваться формулировкой цели работы в явной форме; собственно текст статьи – очень желательна его сегментация на разделы, имеющие содержательные заголовки; выводы или заключение (должны соответствовать формулировке цели статьи).

5. Для русскоязычных статей приводится два библиографических списка: на языке оригинала статьи; список с транслитерацией русскоязычных источников на латиницу и (дополнительно) приведением в квадратных скобках переводов названий статей и названий источников на английский язык.

В «русскоязычном» библиографическом списке (списке литературы) порядок следования источников – по алфавиту фамилий авторов (сначала русскоязычные источники, потом иноязычные). На все источники, включенные в библиографический список, должны быть даны ссылки в тексте статьи в квадратных скобках. При необходимости авторы могут указывать номера страниц в источниках, на которые даются ссылки. Приветствуются ссылки на иноязычные источники, а также на материалы, опубликованные ранее в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии». Однако в последнем случае количество таких ссылок не должно превышать 20 % от общего количества источников, включенных в библиографический список. Для источников, имеющих DOI, целесообразно его указывать. При ссылках на статьи, опубликованные в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии», целесообразно в конце библиографического описания источника в круглых скобках указывать гиперссылку, указывающую на место размещения статьи на страничке сайта Астраханского государственного университета.

Ссылки в библиографическом списке на материалы, размещенные в интернете, допускаются при соблюдении следующих условий: если у материала, на который дается ссылка, имеется автор и/или название, то они должны быть указаны для этого источника; должен быть приведен полный маршрут доступа к источнику в интернете; должна быть указана дата обращения (доступа) к источнику.

Ограничения по списку литературы: доля самоцитирований для любого из авторов статьи, а также по совокупности всех авторов статьи, не должна превышать 25 %; доля ссылок на статьи с участием одного автора, не являющегося автором (соавтором) статьи, не должна превышать 25 %.

6. Суммарная доля таблиц и иллюстраций в общем объеме представляемой статьи не должна превышать 40 %. Под иллюстрациями понимаются следующие объекты: диаграммы; графики; рисунки; эскизы; фотографии; карты и т.п.

7. Доля оригинального текста в статьях (оцениваемого через систему «Антиплагиат» на сайте www.antiplagiat.ru) должна быть не менее 80 %.

8. Указание на то, что работа финансируется по какому-либо гранту, в рамках Федеральной целевой программы, государственного заказа и пр. дается в виде постраничной сноски после заголовка (названия) работы.

9. В сведения об авторах работ помимо места работы и должности целесообразно включать ORCID автора и гиперссылку на страничку с его личными наукометрическими показателями на сайте www.elibrary.ru. По желанию можно привести также ссылки на странички с наукометрическими показателями на Scopus, в ResearchGate; на личную страничку, размещенную на сайте организации.

10. Основные технические требования к оформлению статей (материалов):

10.1. Текст должен быть расположен по ширине страницы формата А4 с учётом полей (все поля по 2,5 см), набран шрифтом Times New Roman, кегль 10, межстрочный интервал 1,0. В таблицах, подрисуночных надписях допускается уменьшенный шрифт – вплоть до 8 кегля. Альбомная ориентация страниц допускается только в порядке исключения для следующих случаев: широкоформатные таблицы с большим количеством колонок; иллюстрации большого размера, которые не умещаются на странице с книжной ориентацией.

Абзацные отступы одинаковы по всему тексту – 0,75 см. Кавычки («»), скобки ([], ()), маркеры и другие знаки должны быть аналогичными на протяжении всего предоставляемого для публикации материала.

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2023
№ 2 (62)**

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Федеральной службы по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия
ПИ № ФС77-31932 от 16 мая 2008 г.

Учредитель
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева»
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Адрес редакции:
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20

Адрес издателя:
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Издание включено в Интернет-каталог
ООО «Агентство «Книга-Сервис» 2022/1

Главный редактор И.М. Ажмухамедов

Редактирование,
компьютерная правка, верстка *Н. Н. Сахно*

Дата выхода в свет 17.07.2023 г.

Цена свободная
Уч.-изд. 12,0. Усл. печ. л. 16,8.
Заказ № 4518. Тираж 500 экз. (первый завод – 22 экз.)

Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а
тел. (8512) 24-66-60 (доб. 3; издательско-полиграфический отдел)
E-mail: asupress@yandex.ru
Отпечатано в Астраханской цифровой типографии
414040, г. Астрахань, пл. К. Маркса, 33
тел./факс (8512) 54-00-11, 73-40-40,
E-mail: a-d-t@mail.ru