

ISSN 2500—0381
Электронная версия

ISSN 0021—3454
Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

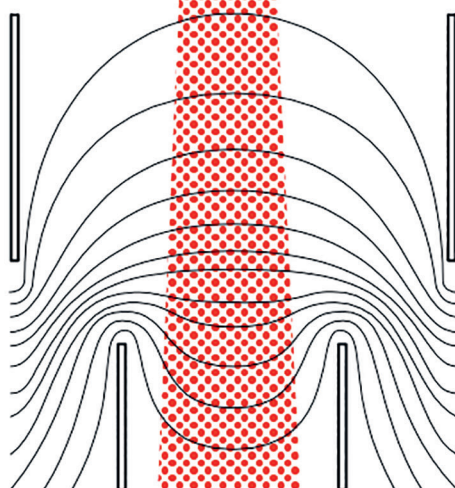
П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ 6

Т. 67
2024



Journal of Instrument Engineering

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*д-р техн. наук, проф. А. А. БОБЦОВ,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*А. П. АЛЕШКИН, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
А. В. БЕЛИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. БЕССМЕРТНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. А. БОГАТЫРЕВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ЕФАНОВ, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
В. В. ЕФИМОВ, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
А. КЛИМЧИК, PhD, доцент, Университет Иннополис, Иннополис, Россия
С. А. КОЛЮБИН, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. КОНЯХИН, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. В. КРИШТОП, д-р физ.-мат. наук, проф., ПНИПУ, Пермь, Россия
Л. С. ЛИСИЦЫНА, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Ю. А. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук, Концерн «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, Россия
В. Д. ЛУКЬЯНОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., ОАО «Авангард», Санкт-Петербург, Россия
А. В. ЛЯМИН, д-р техн. наук, доцент, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. В. МАЛОЛЕТОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет Иннополис, Иннополис, Россия
Ю. Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, ООО «ЦРТ-инновации», Санкт-Петербург, Россия
В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., ООО «Феррум», Санкт-Петербург, Россия
А. Н. МИРОНОВ, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, д-р техн. наук, проф., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия
А. А. ОЖИГАНОВ, д-р техн. наук, проф., АО «НИТИ «Авангард», Санкт-Петербург, Россия
А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. С. СИЗИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Б. В. СОКОЛОВ, д-р техн. наук, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
С. В. СОЛК, д-р техн. наук, НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия
В. Ю. ТЕРТЫЧНЫЙ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ТИТОВ, д-р техн. наук, доцент, ЮЗГУ, Курск, Россия
А. В. ФЕДОРОВ, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
И. Б. ФУРТАТ, д-р техн. наук, доцент, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия
В. П. ХОДУНКОВ, канд. техн. наук, ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия*

Ответственный секретарь М. В. Лебецкая

Редактор Л. Г. Позднякова

Набор, верстка: Е. С. Егорова

Перевод: Ю. И. Копилевич

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО
Телефон: (812) 480-02-73, E-mail: pribor@itmo.ru
[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)

Подписано в печать 03.07.2024 г.

*Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А
Телефон: (812) 915-14-54, E-mail: Prudentov@tibir.ru*

Редколлегия просит авторов и рецензентов отнестись с пониманием к ужесточению требований к рукописям и изменению формы подачи материала в журнале

Аннотация объемом 150—250 слов должна отражать содержание статьи: предмет исследования, цель работы, метод проведения работы, краткое описание экспериментальных или теоретических исследований, полученные результаты и рекомендации по их применению.

Ключевые слова, служащие идентификаторами при предметном поиске, должны однозначно отражать содержание статьи. Основное ключевое слово/словосочетание указывается первым, общее количество ключевых слов — не менее 5.

Список литературы: для обзорной статьи рекомендуется приводить не менее 50 источников, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8.

Требования к оформлению рукописи размещены на сайте журнала <http://pribor.itmo.ru/>



Адрес: 197101, Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., 49, лит. А,
Университет ИТМО
Телефон: (812) 480-02-73
[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)
E-mail: pribor@itmo.ru

Журнал публикует научные обзоры, полнотекстовые статьи и краткие сообщения, отражающие результаты практических и теоретических исследований в области приборостроения.

Журнал содержит следующие разделы:

- информатика и информационные процессы;
- информационно-измерительные и управляющие системы;
- системный анализ, управление и обработка информации;
- приборы навигации;
- вычислительные системы и их элементы;
- оптические и оптико-электронные приборы и комплексы;
- методы и приборы для анализа и контроля материалов, изделий, веществ и природной среды;
- приборы, системы и изделия медицинского назначения;
- проектирование и технология производства приборов;
- метрология и метрологическое обеспечение;
- компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;
- роботы, мехатроника и робототехнические системы.

По договоренности с Редакцией может быть опубликован специальный тематический выпуск, посвященный достаточно узкой проблеме приборостроения.

Рукопись подается по электронной почте: pribor@itmo.ru. Редакция принимает рукопись к рецензированию при условии получения полного комплекта документов, включающего:

- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (формат PDF);
- файлы рукописи статьи, оформленные в соответствии с требованиями журнала;
- сведения об авторах, заполненные по шаблону (на русском и английском языке);
- договор о передаче авторских прав.

Рукопись должна содержать:

- название статьи (на русском и английском языке), индекс УДК;
- аннотацию (150—250 слов, на русском и английском языке), ключевые слова (не менее 5 и не более 25, на русском и английском языке), основной текст, список литературы;
- рисунки: каждый на отдельном листе формата А4 (не заверстывать в текст), таблицы.

Объем текста (оформленного в соответствии с требованиями журнала — шрифт Times New Roman, размер — 14 пт, междустрочный интервал 1,5, поля — сверху и слева 25 мм, снизу 20 мм, справа 10 мм) должен составлять 10—20 страниц, краткого сообщения — 3—5. Объем обзора предварительно согласовывается с Редакцией.

Список литературы (рекомендуется): для обзорной статьи — не менее 50, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 литературных источников (не менее половины из них должны представлять собой ссылки на издания, включенные в международные базы цитирования Scopus и Web of Science). Список литературы должен формироваться в порядке появления ссылок в тексте.

Не допускается выравнивание с помощью пробелов, табуляций и символов конца абзаца. Эти символы при необходимости могут вставляться не более одного раза подряд (**не переносить с помощью дефисов**).

Формулы и отдельные символы набираются с использованием только редактора формул MathType.

Не вставлять формулы из пакетов MathCad и MatLab. Размер шрифта в формулах — по умолчанию. Все переменные набираются курсивом, греческие буквы — прямым шрифтом, полужирные символы в формуле — стилем „матрица вектор“, русские символы — стилем „текст“, векторы следует набирать полужирным шрифтом без стрелок.

Рисунки выполняются в градациях серого в одном из форматов приложений Microsoft (Word, Excel, PowerPoint), предпочтителен векторный формат. Кривые на графиках следует помечать цифрами (1, 2, 3 и т. д.) или/и задавать линиями разного стиля (пунктир, штрихпунктир, жирная); толщина осей должна быть не менее 0,5 пт, иначе качество печати не гарантируется.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

- Аверьянов А. В., Кошель И. Н., Шульгин А. Н. Использование программных моделей учебных ЭВМ при изучении организации и архитектуры вычислительных средств 467

- Коробейников А. Г. Выделение геомагнитных пульсаций типа Pc4 методами Big Data в среде MATLAB 475

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Duzhesheng L., Chepinskiy S. A., Jian W. Comfort Navigation Improvement of Path Planning Task in Human–Robot Interaction 481

- Румянцев В. Л., Ростовцев И. А., Карпов А. Н., Титов Д. В. Алгоритм оптимального обнаружения движущейся цели бортовой РЛС 492

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Waddah Ali, Kolyubin S. A. Modeling Patterns of Sensory-motor Skills for Programming Robots in Contact Manipulation Tasks 500

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

- Безуглый А. М., Бахолдин А. В. Расчет криволинейной фоточувствительной поверхности приемника, согласованной с нормальным объективом 511

- Майоров Е. Е., Курлов В. В., Бородянский Ю. М., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Исследование голографических материалов методом спектрального анализа 519

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

- Аушев А. Ф., Глущенко Л. А. Компактная установка для измерения чувствительности пиро-приемников 525

- Садыков Р. Р., Сафинов Ш. С., Ясовеев В. Х. Разработка шарикового расходомера электропроводной жидкости 533

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРИБОРОВ

- Медунецкий В. М., Меркулов Ю. Ю., Солк С. В., Добряков Б. Н. Технологическая возможность применения броневое ситалла в приборостроении 542

EDITOR-IN-CHIEF

*Dr. Sci., Prof. ALEXEY BOBTSOV,
ITMO University, St. Petersburg, Russia*

EDITORIAL BOARD

ALESHKIN ANDREY, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
BELIKOV ANDREY, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BESSMERTNY IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BOGATYREV VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
EFANOV DMITRY, Dr. Sci., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
EFIMOV VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
KHODUNKOV VYACHESLAV, PhD, D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia
KLIMCHIK ALEXANDER, PhD, Ass. Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
KOLYUBIN SERGEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KONYAKHIN IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KRISHTOP VIKTOR, Dr. Sci., Prof., PNRPU, Perm, Russia
LISITSYNA LYUBOV, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
LITVINENKO YULIA, PhD, Concern CSRI Electropribor, JSC, St. Petersburg, Russia
LUKYANOV VALERY, Dr. Sci., Prof., Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
LYAMIN ANDREY, Dr. Sci., Ass. Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
MALOLETOV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
MATVEEV YURIY, Dr. Sci., Speech Technology Center, St. Petersburg, Russia
MEDUNETSKY VIKTOR., Dr. Sci., Prof., Ferrum LLC, St. Petersburg, Russia
MIRONOV ANDREY, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
MUSALIMOV VIKTOR, Dr. Sci., Prof., IPMash RAS, St. Petersburg, Russia
OZHIGANOV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., SRTI Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
PYRKIN ANTON, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, ITMO University, St. Petersburg, Russia
SIZIKOV VALERY, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
SOKOLOV BORIS, Dr. Sci., Prof., SPbFRC RAS, St. Petersburg, Russia
SOLK SERGEY, Dr. Sci., SRI OEP, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia
TERTYCHNY VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
TITOV DMITRY, Dr. Sci., Ass. Prof., SWSU, Kursk, Russia
FEDOROV ALEXEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
FILIMONOV NIKOLAY, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, M. V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia
FURTAT IGOR, Dr. Sci., Ass. Prof., IPMash RAS, St. Petersburg, Russia

Executive secretary Marina V. Lebedskaya

Editor Lidia G. Pozdniakova

Page-proof, makeup Ekaterina S. Egorova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

Address: ITMO University, Kronverksky pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101
Tel: (812) 480-02-73
Site: pribor.ifmo.ru
E-mail: pribor@itmo.ru

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 67

JUNE 2024

№ 6

CONTENTS

INFORMATICS AND INFORMATION PROCESSES

- Averyanov A. V., Koshel I. N., Shulgin A. N.** Using Software Models of Educational Computers in Studying Computing Tools Organization and Architecture 467

- Korobeynikov A. G.** Identification of Pc4 Type Geomagnetic Pulsations Using Big Data Methods In Matlab Environment 475

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

- Duzhesheng L., Chepinskiy S. A., Jian W.** Comfort Navigation Improvement of Path Planning Task in Human–Robot Interaction 481

- Rumyantsev V. L., Rostovtsev I. A., Karpov A. N., Titov D. V.** Algorithm for Optimal Detection of a Moving Target On-Board Radar 492

ROBOTS, MECHATRONICS, AND ROBOTIC SYSTEMS

- Waddah Ali, Kolyubin S. A.** Modeling Patterns of Sensory-motor Skills for Programming Robots in Contact Manipulation Tasks 500

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Bezuglyi A. M., Bakholdin A. V., Tochilina T. V.** Calculation of a Curvilinear Photosensitive Surface of the Receiver Matched with a Normal Lens 511

- Maiorov E. E., Kurlov V. V., Borodiansky Yu. M., Dagaev A. V., Taiurskaya I. S.** Studying Holographic Materials by Spectral Analysis Method 519

METHODS AND INSTRUMENTS FOR ANALYSIS AND MONITORING OF THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

- Aushev A. F., Glushchenko L. A.** Compact Installation for Measuring the Sensitivity of Pyroelectric Receivers 525

- Sadykov R. R., Safinov S. S., Yasoveev V. K.** Development of a Ball Flowmeter for Electrically Conductive Liquid 533

DESIGN AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF INSTRUMENTS

- Medunetskiy V. M., Merkulov Yu. Yu., Solk S. V., Dobryakov B. N.** Technological Possibility of Using Armored Glass Ceramics in Instrument Engineering 542

To the Authors!

The Journal of Instrument Engineering publishes scientific reviews, full-text articles and short messages, reflecting the unpublished results of theoretical and practical research in the field of fundamental instrument making.

The Journal publishes articles on the following themes: information technologies and systems, devices and automatic control systems, computer engineering, gyroscopic and navigation systems, instruments of precision mechanics, electronic and electromagnetic devices, optical and optoelectronic devices and systems, thermal regimes and reliability of devices and systems, technology and instrumentation, scientific and practical development. In agreement with the Editorial Board can be published a special themed issue devoted to a fairly narrow issue of instrumentation.

The material of the article accepted in electronic form and on any media, executed in a text editor Word without formatting along with a hard copy on A4. Electronic version of the paper may be sent by E-mail: **pribor@mail.ifmo.ru**

The size of the article (in printed form) must not exceed eight pages, a short presentation of two. Size scientific review previously agreed with the Editorial Board.

Submission includes two copies of:

— the manuscript text; list of references (recommended): review article — not less than 50, for the full text of the article — no less than 15, for short messages — at least 8 of the literary source (at least half of them should be links to the editions listed in international database of citation Scopus and Web of Science); number citations consecutively as they appear in the text;

— extended abstract (150—250 words);

— keywords (not less than 5 and not more than 25);

— illustrations: each on a separate sheet of A4 (not overestimate in the text) — big, with a maximum fill;

— the recommendation of the Department (laboratory);

— information about the authors on a template (surname, name, patronymic, name of the organization in accordance with the latest edition of the Charter, the address of the organization, academic degree and title, position, e-mail address).

The article must also enclose agreement on the transfer of copyright.

The main text. The following requirements are common to good practice in the design documents.

Font — Times New Roman, size 14, line spacing 1.5, margins — top and left — 25 mm, bottom — 20 mm, right — 10 mm.

Not allowed alignment with spaces, tabs and end of a paragraph (in the layout will need to be cleared). These symbols must be inserted only when necessary, and not more than once in a row (not to carry with dashes).

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

Figures and tables are to be inserted after the list of references. Graphics are accepted in one of Microsoft formats (Word, Excel, and PowerPoint); vector format is preferable. Don't use color graphics; it is better to apply dotted, dash-and dot lines, etc., or mark lines with numerical symbols.

Editorial Staff

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ МОДЕЛЕЙ УЧЕБНЫХ ЭВМ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ОРГАНИЗАЦИИ И АРХИТЕКТУРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

А. В. Аверьянов, И. Н. Кошель, А. Н. Шульгин

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
vka_24kaf@mail.ru*

Аннотация. Предложены программный эмулятор учебной цифровой вычислительной машины и программный симулятор учебного цифрового процессора, обеспечивающие развитие основных принципов построения и функционирования средств вычислительной техники, реализованных в лабораторной установке-тренажере „Учебная цифровая вычислительная машина“. Современные процессоры, микропроцессоры и их программное обеспечение являются исключительно сложными объектами для изучения и практического освоения. Одним из магистральных направлений в преодолении этой проблемы в вузах является использование на начальных этапах обучения основ информационных технологий тренажеров и программных моделей учебных ЭВМ. Предложенные программные модели, обладая сравнительной простотой и наглядным визуальным интерфейсом, помогают обучающимся успешно освоить базовые понятия организации и архитектуры ЭВМ, такие как: система команд, форматы команд и данных, представление данных, способы адресации, основы специального кодирования чисел.

Ключевые слова: учебная электронная вычислительная машина, программный эмулятор, программный симулятор, система команд, процессор, программирование в машинных кодах, практические и лабораторные занятия

Ссылка для цитирования: Аверьянов А. В., Кошель И. Н., Шульгин А. Н. Использование программных моделей учебных ЭВМ при изучении организации и архитектуры вычислительных средств // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 467–474. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-467-474.

USING SOFTWARE MODELS OF EDUCATIONAL COMPUTERS IN STUDYING COMPUTING TOOLS ORGANIZATION AND ARCHITECTURE

A. V. Averyanov, I. N. Koshel, A. N. Shulgin

*A.F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
vka_24kaf@mail.ru*

Abstract. A software emulator of an educational digital computer and a software simulator of an educational digital processor are proposed, ensuring the development of the basic principles of construction and operation of computer equipment implemented in the laboratory simulator “Educational Digital Computer”. Modern processors, microprocessors and their software are extremely complex objects to study and practically master. One of the main directions in overcoming this problem in universities is the use of simulators and software models of educational computers at the initial stages of teaching the basics of information technology. The proposed software models, provided with comparative simple and a clear visual interface, help students successfully master the basic concepts of computer organization and architecture, such as command system, command and data formats, data representation, addressing methods, and the basics of special number coding.

Keywords: educational electronic computer, software emulator, software simulator, command system, processor, programming in machine codes, practical and laboratory classes

For citation: Averyanov A. V., Koshel I. N., Shulgin A. N. Using software models of educational computers in studying computing tools organization and architecture. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 467–474 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-467-474.

Использование на практических и лабораторных занятиях специализированных установок, стендов, тренажеров, обучающих систем и электронных учебников на базе персональных ЭВМ, программных моделей, эмуляторов и других компьютерных технологий и средств индивидуального и группового обучения, в том числе дистанционного, существенно повышает эффективность подготовки специалистов в области вычислительной техники. При этом отпадает необходимость в использовании дорогостоящих, а порой уникальных средств вычислительной техники, и в то же время повышается уровень приобретаемых умений и практических навыков их эксплуатации [1].

Одним из средств имитации построения и функционирования универсальной цифровой вычислительной машины с программным управлением является разработанная на кафедре электронной вычислительной техники ВКА им. А. Ф. Можайского [2] лабораторная установка „Учебная цифровая вычислительная машина“ (УЦВМ), которая в течение продолжительного времени использовалась в лабораторных и практических занятиях при изучении дисциплин кафедры (рис. 1).

УЦВМ обладает следующими возможностями:

- наглядно отображает реализацию принципа программного управления вычислительным процессом — основополагающего для построения и функционирования ЭВМ с дискретным способом представления информации и программным способом управления ее обработкой;

- реализует необходимые механизмы программного управления вычислительным процессом, такие как: хранение в памяти машины программы решаемой задачи и исходных данных, двоичное кодирование команд и операндов, естественная выборка команд из памяти машины при реализации программ решаемых задач, условная и безусловная передача управления вычислениями, модификация отдельных команд без изменения программы в целом и другие свойства;

- лицевая панель установки представляет классическую неймановскую структуру вычислительной машины (рис. 1), состоящую из: устройства управления (УУ), арифметического устройства (АУ), запоминающего устройства (ЗУ), устройства ввода (УВв), устройства вывода (УВыв), а также шинного интерфейса. Каждое устройство представляет собой набор взаимосвязанных функциональных элементов и узлов, необходимых для реализации вычислительного процесса под управлением команд решаемых задач. Это позволяет на занятиях в аудитории и самостоятельно изучать структуру и аппаратный состав машины, а также наблюдать работу и взаимодействие элементов и узлов машины. За счет этого:

- принципы построения и функционирования элементов, узлов, устройств и машины в целом эффективно усваиваются;

- система управления вводом-выводом, выбором режимов работы, пуском, прерыванием, продолжением и остановкой работы машины (пользовательский интерфейс) обеспечивает достаточно простое взаимодействие с машиной и отслеживает все этапы выбранного режима функционирования („Такт“, „Цикл“, „Автомат“);

- разветвленная система индикации, отражающая состояние элементов, узлов, устройств и органов управления работой машины, позволяет детально „увидеть изнутри“ процессы ввода, выборки, получения и передачи результатов обработки информации от узла к узлу, от устройства к устройству на каждом этапе работы машины (по тактам и циклам). Эта возможность отображать состояние и работу „машины в разрезе“ является уникальной, поскольку в современных программных моделях подобных процессов и устройств все взаимодействия отображаются на уровне „черных ящиков“.

Однако, обладая большим набором положительных свойств, позволяющих эффективно ис-

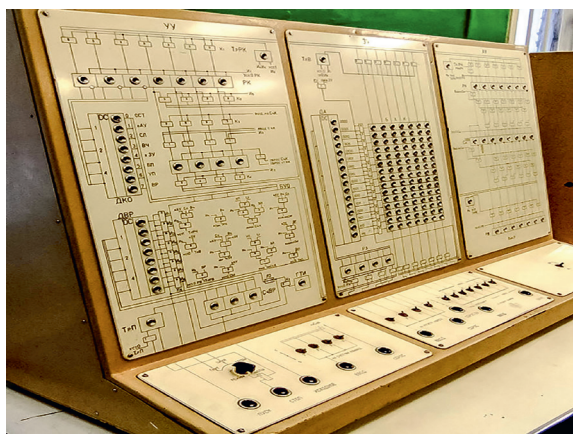


Рис. 1

пользовать УЦВМ в учебном процессе, эта установка-тренажер имеет существенные недостатки, ограничивающие ее возможности при длительной эксплуатации:

- использование при ее построении электронных микросхем, неизбежное „старение“ которых служит причиной сбоев, искажений результатов вычислений и отказов в работе УЦВМ;
- для поддержания работоспособного состояния, устранения неисправностей и подготовки установки к работе требовались дополнительные затраты времени и материальных средств;
- ограниченное число учебных мест в аудиториях, определяемое количеством имеющихся лабораторных установок на кафедре.

Поэтому встала задача устранения указанных недостатков УЦВМ, сохранения ее „обучающего“ потенциала с одновременным расширением набора достоинств, таких как: наглядность, тиражируемость, гибкость управления, открытость для модификации и модернизации, перемещаемость в пространстве, сокращение эксплуатационных затрат [3].

На кафедре информационно-вычислительных систем и сетей разработан программный эмулятор учебной цифровой вычислительной машины (эмулятор Молчанова) [4–7], позволяющей воспроизводить систему команд УЦВМ на персональном компьютере. При этом на структурной схеме (рис. 2) программной модели УЦВМ наглядно отображаются процессы взаимодействия узлов и устройств при выполнении машинных циклов.

Система команд эмулятора Молчанова представлена в табл. 1 (а — адрес; АЧ — адресная часть; КОп — код операции; См — сумматор; АУ — арифметическое устройство; (См₀) — код, находящийся в сумматоре арифметического устройства до выполнения данной команды; (См) — код, образующийся в сумматоре АУ в результате выполнения данной команды; СчК — счетчик команд; (СчК₀) — код, образующийся в счетчике команд в начале машинного цикла; (СчК) — код, находящийся в счетчике команд в конце машинного цикла; Вых.У — выходное устройство; (РВ) — код, образующийся в регистре выхода выходного устройства; ЗУ — запоминающие устройство; ω — признак результата операции). Если результат операции отрицательный, $\omega = 1$. Сигнал снимается с младшего дополнительного (знакового) разряда сумматора и подается в УУ (устройство управления), где используется при выполнении команды условной передачи управления (рис. 2).

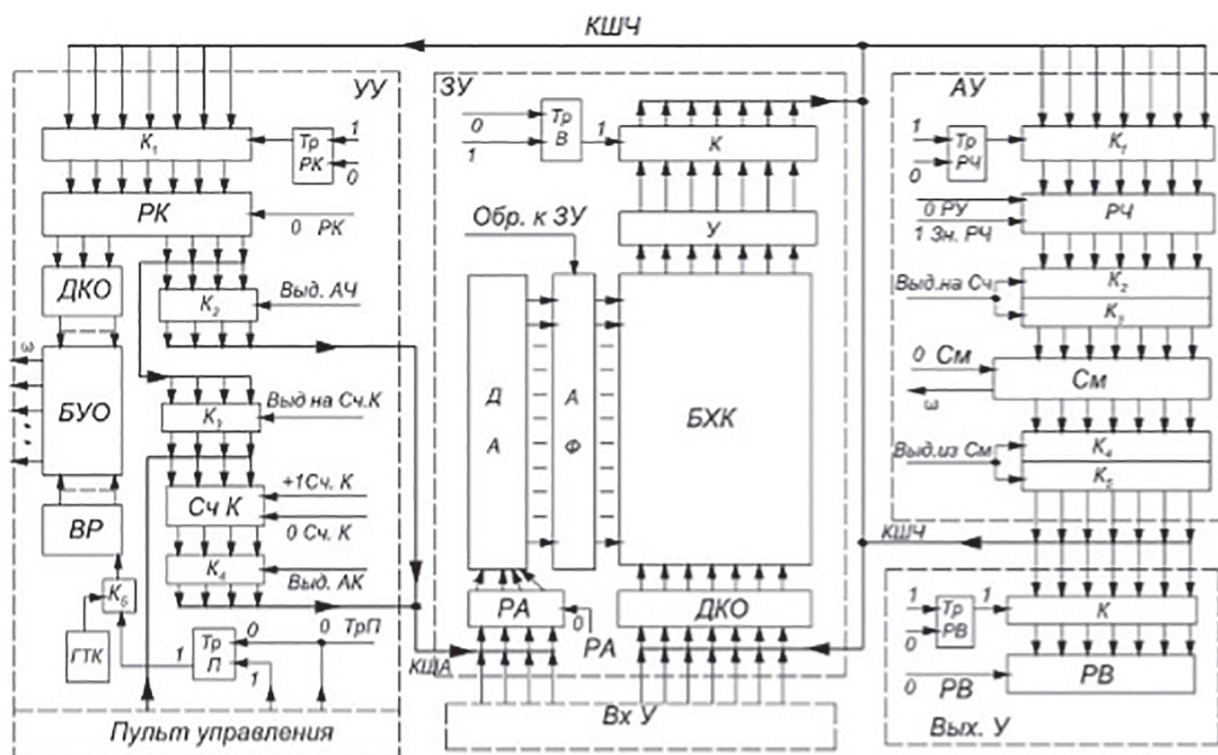


Рис. 2

Таблица 1

№ п/п	Наименование команды	Поле команды		Содержание команды
		КОп	АЧ	
1	Посылка в АУ	1	а	$(C_m) = (a)$
2	Сложение	2	а	$(C_m) = (C_{m0}) + (a)$
3	Вычитание	3	а	$(C_m) = (C_{m0}) - (a)$
4	Посылка в ЗУ	4	а	$(a) = (C_{m0})$
5	Безусловный переход	5	а	$(CчК) = (a)$
6	Условный переход	6	а	Если $\omega = 0$, то $(CчК) = (CчК_0) + 1$, если $\omega = 1$, то $(CчК) = a$
7	Посылка в Вых.У	7	00	$(PВ) = (C_{m0})$
8	Останов	0	00	Прекращение выполнения программы

Система команд программного эмулятора УЦВМ содержит команды: *арифметические* — 2 (сложение, вычитание), *пересылки и загрузки* — 3 (посылка в АУ, посылка в ЗУ, посылка в Вых.У), *передачи управления* — 2 (условный, безусловный переход), *системные* — команда останова. Несмотря на ограниченное количество инструкций, система команд программного эмулятора учебной ЦВМ обладает функциональной полнотой для программного описания в машинных кодах любого алгоритма. Именно поэтому предложенный программный эмулятор целесообразно использовать на подготовительном и начальном этапах обучения основам информационных технологий [8–10].

В эмуляторе Молчанова используется только прямая адресация (одноадресные команды № 1–6), а команды 7 и 8 являются безадресными (табл. 1). Это делает невозможным практическое освоение других способов адресации. Блок хранения кодов (БХК) содержит 15 ячеек памяти, что соответствует 105 битам. Семиразрядные операнды заносятся в память в прямом коде, а выполнение операций осуществляется в сумматоре с использованием модифицированного дополнительного кода. Диапазон представления целых чисел от -127 до $+127$, а дробных от $-63/64$ до $+63/64$.

Эти особенности ограничивают возможность глубокого изучения основ организации вычислительных процессов в современных ЭВМ. Для продолжения обучения в этом направлении необходимо использовать более сложные программные модели ЭВМ. Поэтому на кафедре информационно-вычислительных систем и сетей разработан программный симулятор учебного цифрового процессора [11], служащий усовершенствованием программного эмулятора УЦВМ. Он представляет собой шестнадцатиразрядный двоичный процессор с естественной формой представления чисел. В данном процессоре реализовано использование одноадресных и двухадресных команд с непосредственной и прямой адресацией. Программный симулятор выполнен в виде оконного приложения с интуитивно понятным интерфейсом (рис. 3). Интерфейс программного симулятора позволяет осуществлять:

- ввод и редактирование данных в памяти;
- управление режимами выполнения команд;
- контроль взаимодействия основных элементов процессора при выполнении различных операций;
- анализ тракта прохождения информации;
- использование специальных кодов в командном цикле процессора.

Использование программного симулятора возможно на всех типах персональных ЭВМ, кроме мобильных. Для его работы требуются:

- операционная система — Windows (версии XP, 7, 10);
- минимальный объем ОЗУ — 100 МБ;
- разрешение экрана монитора 920×1080 пикселей и выше;

- возможность подключения внешних носителей информации;
- возможность подключения внешних средств отображения информации;
- для корректного отображения „справки“ должно быть установлено приложение для просмотра pdf-файлов.

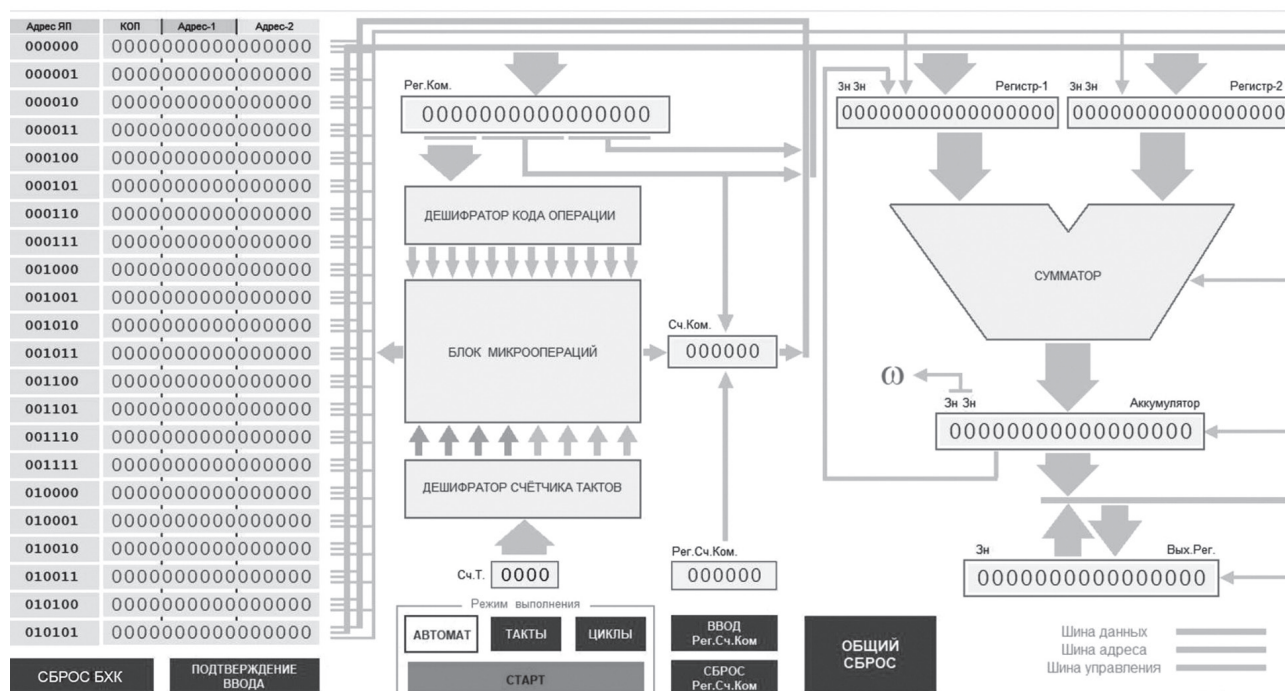


Рис. 3

Система команд програмного симулятора включає одинадцять команд (табл. 2).

В табл. 2 приняты следующие обозначения: D_1, D_2 — первый и второй операнды при непосредственной адресации; A_1, A_2 — исполнительные адреса операндов при прямой адресации; A_1 — исполнительный адрес в условном, безусловном переходе или пересылке из ЗУ в выходной регистр; A_2 — исполнительный адрес при сложении с содержимым аккумулятора; (Ак) — код, содержащийся в аккумуляторе; (СчК) — код, содержащийся в счетчике; (СчК₀) — предыдущее значение кода счетчика команд; (ВыхРег) — код, содержащийся в выходном регистре.

Запоминающее устройство программного симулятора, так же как и программного эмулятора УЦВМ, представляет собой адресное ЗУ с произвольным доступом, построенное по одномерной схеме, оно выполнено в виде блока хранения кодов. БХК состоит из двадцати двух ячеек памяти.

В случае неправильного ввода команд программным симулятором выдается сообщение об ошибке.

Программный симулятор в процессе обучения позволяет:

- исследовать особенности построения и реализации алгоритмов, определенных системой команд ЭВМ;
- программировать в машинных кодах линейные, разветвляющиеся и циклические алгоритмы;
- представлять числовые данные в естественной форме в разрядной сетке ЭВМ;
- использовать прямой и специальные коды чисел при выполнении машинных операций;
- проводить сравнительный анализ алгоритмов, реализуемых командами различных форматов;
- проводить сравнительный анализ операций с использованием различных видов адресации.

Таблица 2

№ п/п	Наименование команды	Адресация	Поле команды		Содержание команды
			КОп	АЧ	
1	Сложение	Непосредственная	0001	D ₁ , D ₂	(Ак) = D ₁ + D ₂
2	Вычитание		0010		(Ак) = D ₁ – D ₂
3	Сложение	Прямая	0011	A ₁ , A ₂	(Ак) = (A ₁) + (A ₂)
4	Вычитание		0100		(Ак) = (A ₁) – (A ₂)
5	Пересылка из ЗУ в выходной регистр	Прямая	0101	A ₁	(A ₁) → (BP)
6	Пересылка в ЗУ из аккумулятора	Прямая	0111	A ₁	(Ак) → (A ₁)
7	Безусловный переход	Прямая	1000	A ₁	(СчК) = (A ₁)
8	Условный переход	Прямая	1001	A ₁	Если ω = 00, то (СчК) = (СчК ₀) + 1, если ω = 11, то (СчК) = A ₁
9	Сложение с содержимым аккумулятора	Прямая	1010	A ₂	(Ак) = (Ак) + (A ₂)
10	Пересылка из аккумулятора в выходной регистр	—	1011	—	(Ак) → (ВыхРег)
11	Останов	—	1111	—	Прекращение выполнения программы

Программный симулятор разработан на языке высокого уровня Python. Возможности данного средства программирования позволили реализовать не только расширенный, по сравнению с эмулятором Молчанова, функционал, но и создать интуитивно понятный и наглядный интерфейс приложения. Уникальность данной программной разработки состоит также и в том, что возможности Python позволили реализовать бинарные функции при выполнении основных арифметических операций в машинных кодах [12]. Ниже приведен пример фрагмента программного кода преобразования прямого кода в модифицированный дополнительный двоичный код (МДДК) при выполнении операции сложения с прямой адресацией (код операции 0011).

```

if a[0:4] == '0011': #СЛОЖЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЙ АДРЕСАЦИИ
a1 = Sp[int(a[4:10], base=2)]
a2 = int(a1, base=2)
a2 = f'{a2:017b}'
if a1[0] == '0': #МДК для положительного первого слагаемого
a2 = list(a2)
a2[0:2] = '00'
a2 = ''.join(a2)
reg1['text'] = a2
if a1[0] == '1': #МДДК для отрицательного первого слагаемого
a3 = int(a1, base=2)
mask = (1 << 17) - 1
a3 = ((abs(a3) ^ mask) + 1)
a3 = list(f'{a3:017b}')
a3[0:2]='11'
a3 = ''.join(a3)
reg1['text'] = a3

```

Характеристики данного симулятора позволили расширить круг решаемых учебных задач. Результаты сравнительного анализа основных показателей эмулятора Молчанова и симулятора учебного цифрового процессора приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные показатели	Эмулятор Молчанова	Симулятор УЦП
Ширина разрядной сетки	7	16
Объем БХК (число ячеек памяти)	15	22
Количество команд	8	11
Виды адресации	1	2
Форматы основных команд	1	2
„Дружественность“ интерфейса	–	+
Анализ трактов прохождения информации	–	+
Анализ преобразования информации	+	+
Анализ кодов в командном цикле	+	+
Сравнительный анализ видов адресации	–	+
Сравнительный анализ форматов команд	–	+
Выбор режимов выполнения программы	+	+

Вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы. Современные процессоры, микропроцессоры и их программное обеспечение являются исключительно сложными объектами для изучения и практического освоения. Одним из магистральных направлений в решении этой задачи является создание и использование на начальных этапах обучения тренажеров и программных моделей учебных ЭВМ [13, 14].

Рассмотренные в настоящей статье программный эмулятор учебной ЦВМ и программный симулятор учебного цифрового процессора являются примером успешного решения сформулированной выше задачи. Обладая сравнительной простотой и удобным интерфейсом, они помогают обучающимся успешно освоить базовые понятия организации и архитектуры ЭВМ, такие как: система команд, форматы команд и данных, представление данных, способы адресации, основы специального кодирования чисел. Эти программные модели обеспечивают удобный и наглядный доступ к различным блокам, модулям, узлам и элементам ЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вычислительные машины и системы / Под ред. проф. В. А. Смагина. СПб: МО РФ, 1998. 342 с.
2. Учебная ЦВМ. Руководство к практическим занятиям. СПб: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1980. 78 с.
3. Гребнев В. В., Молчанов О. Е. Основы теории вычислительных машин. Ч. 3. Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1979. 125 с.
4. Кузьмичев В. А., Молчанов О. Е. Эмулятор учебной ЦВМ // Современные тенденции в образовании и науке: сб. науч. тр. по матер. Междунар. науч.-практ. конф. 28 декабря 2012 г. Ч. 3. Тамбов: „Бизнес-Наука-Общество“, 2013. 163 с.
5. Аверьянов А. В., Молчанов О. Е., Белая Т. И. Имитационное моделирование процесса функционирования универсальной цифровой вычислительной машины с программным управлением м// Научный обозреватель (науч.-аналит. журн.). 2015. № 3(51). С. 35–39.
6. Белая Т. И., Молчанов О. Е., Казанцев Д. И. Моделирование различных режимов работы ЭВМ на имитационной модели „УЦВМ“ // Журнал научных и прикладных исследований. 2015. № 5. С. 116–118.
7. Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017617992. Программный эмулятор учебной цифровой вычислительной машины (эмулятор Молчанова) / В. А. Кузьмичёв, О. Е. Молчанов, А. В. Аверьянов, Т. И. Белая. Заяв. № 2017612340, зарег. 19.07.2017.
8. Аверьянов А. В., Белая Т. И., Молчанов О. Е. Анализ программных моделей учебных ЭВМ с использованием принципа Парето // Естественные и технические науки. 2016. № 6. С. 160–164.
9. Аверьянов А. В., Кошель И. Н., Кузнецов В. В., Нгуен В. Т. Статистическое оценивание метрик машинных команд ЭВМ и реализующих их микрокоманд на основе анализа Парето // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 259–265.
10. Аверьянов А. В., Эсаулов К. А. Тестовый контроль в высшем учебном заведении знаний обучающихся по направлению „Информатика и вычислительная техника“ // Вопросы образования и науки: теоретический и методические аспекты: сб. науч. тр. Ч. 5. Тамбов: „Бизнес-Наука-Общество“, 2012. 164 с.

11. Шульгин А. Н. Программный симулятор учебного цифрового процессора. Руководство пользователя. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2023. 19 с.
12. Лутц М. Программирование на Python. Т. I. СПб: Символ-Плюс, 2011. 992 с.
13. Жмакин А. П. Архитектура ЭВМ. СПб: БХВ-Петербург, 2010. 352 с.
14. Басыров А. Г. Организация ЭВМ и систем: практикум. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2012. 83 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Алексей Васильевич Аверьянов** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; доцент; E-mail: aver957@mail.ru
- Игорь Николаевич Кошель** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: kin1470@mail.ru
- Альберт Николаевич Шульгин** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: alex_grid69@mail.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024; одобрена после рецензирования 22.03.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Smagin V. A., ed., *Vychislitel'nyye mashiny i sistemy* (Computers and Systems), St. Petersburg, 1998, 342 p. (in Russ.)
2. *Uchebnaya tsifrovaya vychislitel'naya mashina. Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam* (Educational Digital Computer. Guide to Practical Exercises), St. Petersburg, 1980, 78 p. (in Russ.)
3. Grebnev V. V., Molchanov O. E. *Osnovy teorii vychislitel'nykh mashin* (Fundamentals of the Theory of Computers), Leningrad, 1979, Pt. 3, 125 p. (in Russ.)
4. Kuzmichev V. A., Molchanov O. E. *Sovremennyye tendentsii v obrazovanii i nauke* (Modern Trends in Education and Science), Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the International Scientific and Practical Conference, December 28, 2012, Tambov, Pt. 3, 2013, 163 p. (in Russ.)
5. Averyanov A. V., Molchanov O. E., Belaya T. I. *Nauchnyy obozrevatel' (nauchno-analiticheskiy zhurnal)*, 2015, no. 3(51), pp. 35–39. (in Russ.)
6. Belaya T. I., Molchanov O. E., Kazantsev D. I. *Journal of Scientific and Applied Research*, 2015, no. 5, pp. 116–118. (in Russ.)
7. Certificate on the state registration of the computer programs 2017617992, *Programmnyy emulyator uchebnoy tsifrovoy vychislitel'noy mashiny (emulyator Molchanova)* (Software Emulator for Educational Digital Computers (Molchanov Emulator)), V. A. Kuzmichev, O. E. Molchanov, A. V. Averyanov, T. I. Belaya, Application 2017612340, Published 19.07.2017. (in Russ.)
8. Averyanov A. V., Belaya T. I., Molchanov O. E. *Natural and technical sciences*, 2016, no. 6, pp. 160–164. (in Russ.)
9. Averyanov A. V., Koshel I. N., Kuznetsov V. V., Nguyen V. T. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 4(66), pp. 259–265, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-259-265. (in Russ.)
10. Averyanov A. V., Esaulov K. A. *Voprosy obrazovaniya i nauki: teoreticheskiy i metodicheskiye aspekty* (Issues of Education and Science: Theoretical and methodological aspects), Collection of Scientific Works, Tambov, 2012, Part 5, 164 p. (in Russ.)
11. Shulgin A. N. *Programmnyy simulyator uchebnogo tsifrovogo protsessora. Rukovodstvo pol'zovatelya* (Software Simulator of Educational Digital Processor. User Guide), St. Petersburg, 2023, 19 p. (in Russ.)
12. Lutz M. *Programming Python*, O'Reilly Media, Inc., 2010.
13. Zhmakin A. P. *Arkhitektura EVM* (Computer Architecture), St. Petersburg, 2010, 352 p. (in Russ.)
14. Basyrov A. G. *Organizatsiya EVM i sistem: praktikum* (Organization of Computers and Systems: Workshop), St. Petersburg, 2012, 83 p. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Aleksey V. Averyanov** — PhD, Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; E-mail: Aver957@mail.ru
- Igor N. Koshel** — PhD, Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; Head of the Faculty; E-mail: kin1470@mail.ru
- Albert N. Shulygin** — PhD, Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; Lecturer; E-mail: alex_grid69@mail.ru

Received 12.03.2024; approved after reviewing 22.03.2024; accepted for publication 16.04.2024

**ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ТИПА PC4 МЕТОДАМИ BIG DATA
В СРЕДЕ MATLAB****А. Г. Коробейников**

*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
Korobeynikov_A_G@mail.ru*

Аннотация. Геомагнитные пульсации, под которыми обычно понимается изменение напряженности геомагнитного поля в определенном частотном диапазоне под действием времени и разных факторов, формально можно представлять в виде магнитогидродинамических волн, распространяющихся в околоземной плазме. На поверхности Земли пульсации можно выделять из ультранизкочастотных электромагнитных колебаний, зарегистрированных, например, в геомагнитных обсерваториях. По геомагнитным пульсациям возможно получать информацию, например, о параметрах среды в области их генерации, об особенностях развития геомагнитных бурь и суббурь. Проанализированы особенности работы с одним из самых распространенных видов геомагнитных пульсаций — Pc4, имеющих период колебаний 45–150 с. Обработываемые данные получены от международной сети INTERMAGNET. Поскольку объем таких данных превышает объем оперативной памяти компьютера, применены технологии BigData, реализованные в среде MATLAB.

Ключевые слова: *BigData, FilterDesign, INTERMAGNET, MATLAB, Pc4, высокие массивы, геомагнитная обсерватория, магнитное поле Земли, полосовой фильтр, хранилище данных*

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-27-00011.

Ссылка для цитирования: *Коробейников А. Г. Выделение геомагнитных пульсаций типа Pc4 методами Big Data в среде MATLAB // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 475–480. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-475-480.*

**IDENTIFICATION OF PC4 TYPE GEOMAGNETIC PULSATIONS USING BIG DATA METHODS
IN MATLAB ENVIRONMENT****A. G. Korobeynikov**

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS,
St. Petersburg Branch, St. Petersburg, Russia
Korobeynikov_A_G@mail.ru*

Abstract. Geomagnetic pulsations, which usually mean a change in the strength of the geomagnetic field in different frequency ranges depending on time and various factors, can be formally represented as magnetohydrodynamic waves in the near-Earth plasma. On the Earth's surface, geomagnetic pulsations can be isolated from ultra-low-frequency electromagnetic oscillations recorded, for example, in geomagnetic observatories. Geomagnetic pulsations contain various information, for example, about environmental parameters in the areas of their generation; about the features of the development of geomagnetic storms and substorms. The features of working with one of the most common types of geomagnetic pulsations — type Pc4, with an oscillation period of 45–150 s, are analyzed. The processed data is obtained from the international INTERMAGNET network. Since the volume of such data exceeds the amount of computer RAM, BigData technologies implemented in the MATLAB environment are used.

Keywords: *Big Data, Filter Design, INTERMAGNET, MATLAB, Pc4, tall array, geomagnetic observatory, Earth's magnetic field, bandpass filter, data storage*

Acknowledgment: The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-27-00011.

For citation: Korobeynikov A. G. Identification of Pc4 type geomagnetic pulsations using big data methods in matlab environment. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 475–480 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-475-480.

Введение. Геомагнитное поле (ГМП) обычно представляют суммой нескольких полей, которые имеют разную физическую природу*:

$$B_T = B_0 + B_a + \delta B,$$

где B_0 — главное поле; B_a — поле земной коры (литосферное); δB — поле геомагнитных вариаций (пульсаций).

Под геомагнитными пульсациями (ГП) обычно понимается изменение напряженности ГМП в определенном частотном диапазоне под действием времени и разных факторов. ГП принято представлять в виде магнитогидродинамических (МГД) волн, распространяющихся в околоземной плазме. Эти волны возбуждаются различными физическими процессами, протекающими, например, в солнечном ветре, магнитосфере, плазмосфере или ионосфере [1]. На поверхности Земли ГП регистрируются как ультранизкочастотные (УНЧ) электромагнитные колебания. МГД-волны можно фиксировать во время геомагнитных бурь, суббурь, а также в магнитоспокойное время. ГП обладают высокой информативностью. Анализируя ГП, можно получать много информации, например, о параметрах среды в области их генерации; об особенностях развития геомагнитных бурь и суббурь; о потоках высыпавшихся частиц и пути их распространения к земной поверхности. Отсюда следует, что анализ ГП связан с решением как прикладных задач, например диагностикой текущего состояния околоземной среды и прогнозом космической погоды, так и фундаментальных, включая дальнейшее развитие теории ГП.

В настоящей статье исследуется работа с ГП типа Pc4, т.е. ГП с периодом колебаний в диапазоне 45–150 с, такой вид ГП — один из самых распространенных. В работе показано, как можно выделять ГП Pc4 из данных, полученных в геомагнитных обсерваториях, в частности, международной сети INTERMAGNET (International Real-Time Magnetic Observatory Network) [2, 3].** Большой объем обрабатываемых данных невозможно поместить в оперативную память компьютера, поэтому необходимо применять технологии BigData [4]. В качестве программного инструментария использовался MATLAB, при помощи которого можно решать задачи в различных предметных областях [5–8].

Подготовка данных. Исходные данные состояния ГМП за 2023 год с частотой дискретизации $f_d = 1 \text{ с}^{-1}$ взяты из базы INTERMAGNET. Файлы данных содержат четыре столбца — LYCX, LYCY, LYCZ и LYCF, где LYCX, LYCY, LYCZ — компоненты вектора ГМП, LYCF — модуль вектора ГМП. Из-за большого объема данных применяются специальные средства, такие как Datastore (хранилище данных). Код на MATLAB приведен в [2], после небольшой модификации за счет его выполнения будет построен график (на рис. 1 представлены исходные данные с LYC за 01.01.2023–31.12.2023).

Из рис. 1 видно, что в исходных данных имеется несколько выбросов, связанных, вероятнее всего, с прекращением работы магнитометрических сенсоров. В таких случаях общепринятой практикой считается занесение числа 99999 в соответствующую базу данных. Для дальнейшей работы такие данные необходимо удалить. Это можно сделать, например, так:

```
toDelete_XYZF = (LYC.LYCX == 99999) | (LYC.LYCY == 99999) ...
| (LYC.LYCZ == 99999) | (LYC.LYCF == 99999);
LYC(toDelete_XYZF, :) = [];
clearvars toDelete_XYZF;
stackedplot(LYC);
```

Обработанные таким кодом данные представлены на рис. 2.

* ГОСТ 25645.126-85. Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников. М.: Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1989. 23 с.

** <https://www.intermagnet.org>.

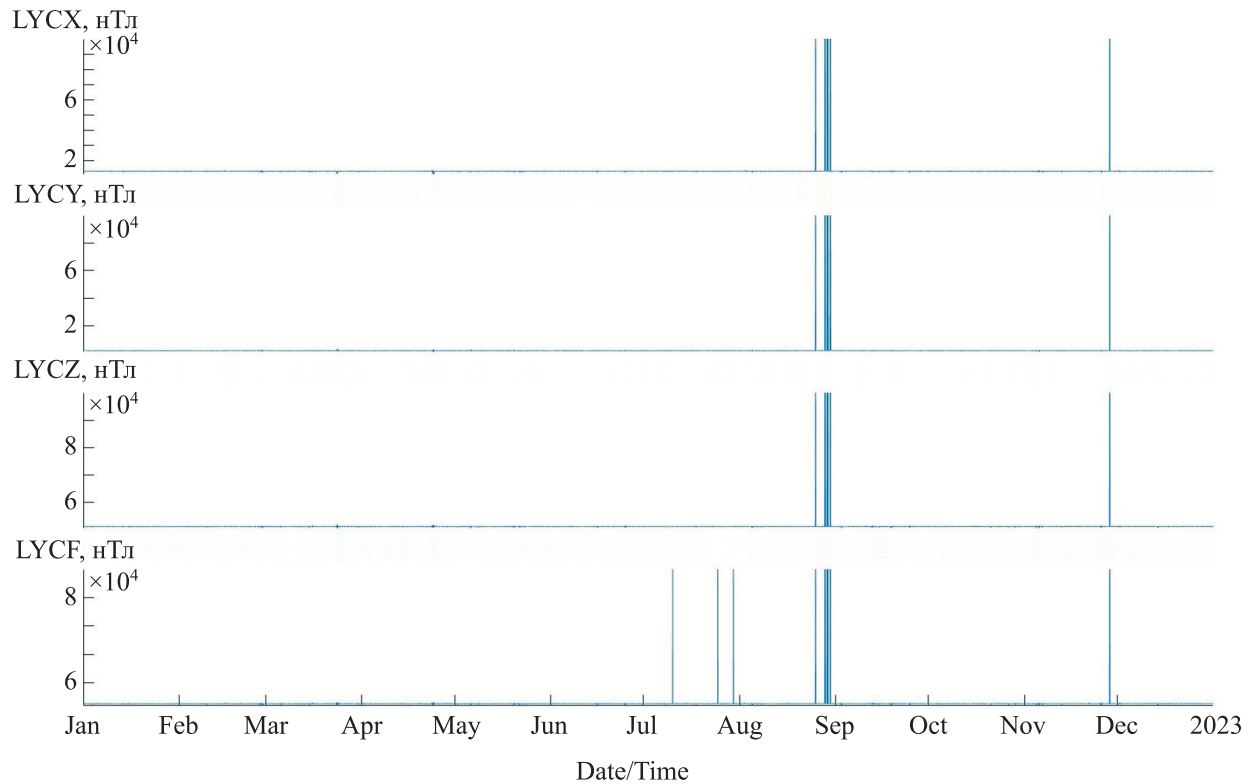


Рис. 1

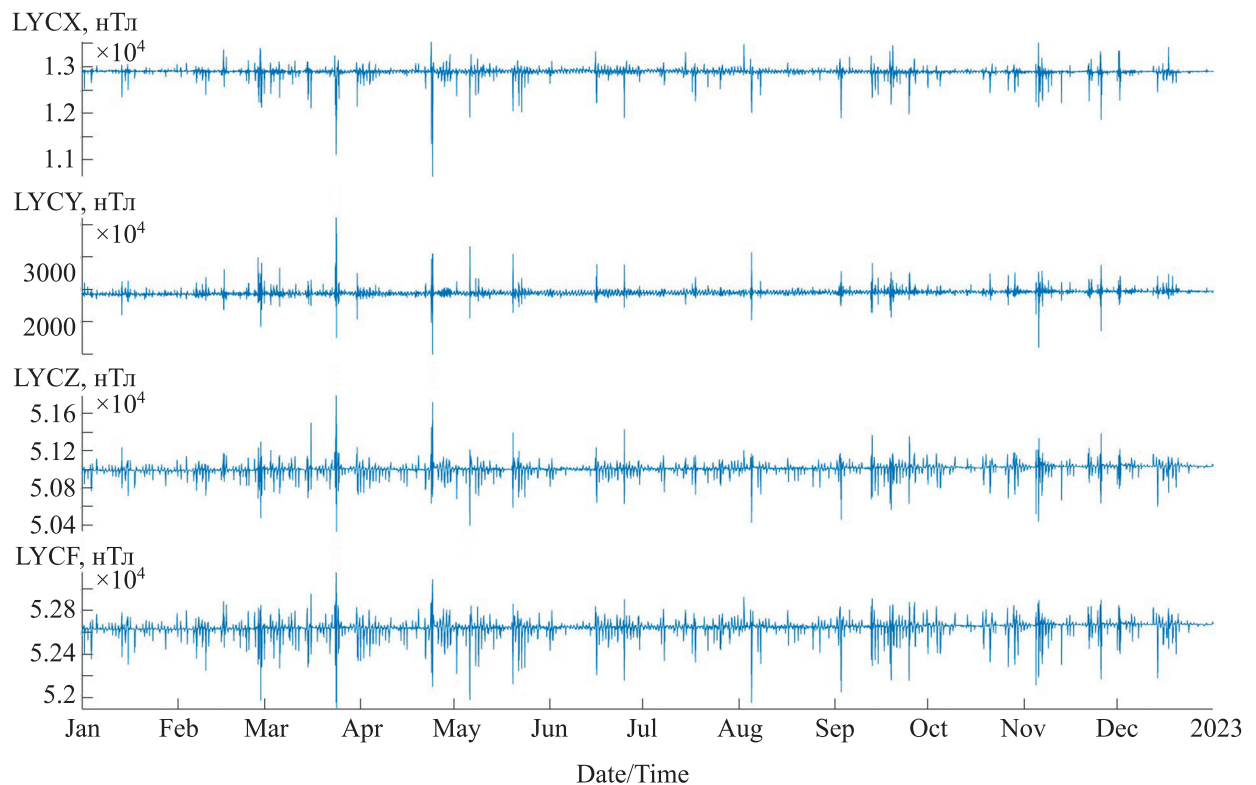


Рис. 2

Решение задачи выделения ГП типа Pc4. В качестве первого шага необходимо удалить тренд из данных. Это можно сделать, например, при помощи одной такой команды:

```
LYC_detrend=detrend(LYC,3);
```

Цифра 3 задает тренд в виде кубического сплайна.

На следующем шаге зададим параметры для полосового цифрового фильтра (ЦФ) в соответствии с нашими условиями:

```
Fs_45_s=1/45; Fs_150_s=1/150; % Диапазон частот Pc4
Fs=1; % Частота дискретизации
Fpass1 = Fs_150_s; % Левая граница частоты полосы пропускания (ПП)
Fpass2 = Fs_45_s; % Правая граница частоты ПП
Fstop1=0.99*Fpass1; % Левая граничная частота полосы задержки (ПЗ)
Fstop2=1.01*Fpass2; % Правая граничная частота ПЗ
Astop1=120; % Величина затухания в левой ПЗ (дБ)
Astop2=120; % Величина затухания в правой ПЗ (дБ)
Apass=0.01; % Величина затухания в ПП (дБ)
```

Создаем полосовой ЦФ с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтр) при помощи следующей команды.

```
digital_filter_Pc4= designfilt('bandpassiir', ... % Response type
'StopbandFrequency1', Fstop1, ... % Frequency constraints
'PassbandFrequency1', Fpass1, ...
'PassbandFrequency2', Fpass2, ...
'StopbandFrequency2', Fstop2, ...
'StopbandAttenuation1', Astop1, ...% Magnitude constraints
'PassbandRipple', Apass, ...
'StopbandAttenuation2', Astop2, ...
'DesignMethod','ellip', ... % Design method
'MatchExactly','passband', ... % Design method options
'SampleRate', Fs) % Samplerate
```

Далее, применяя функцию `filtfilt`, пропускаем данные через спроектированный ЦФ с учетом фазовой задержки.

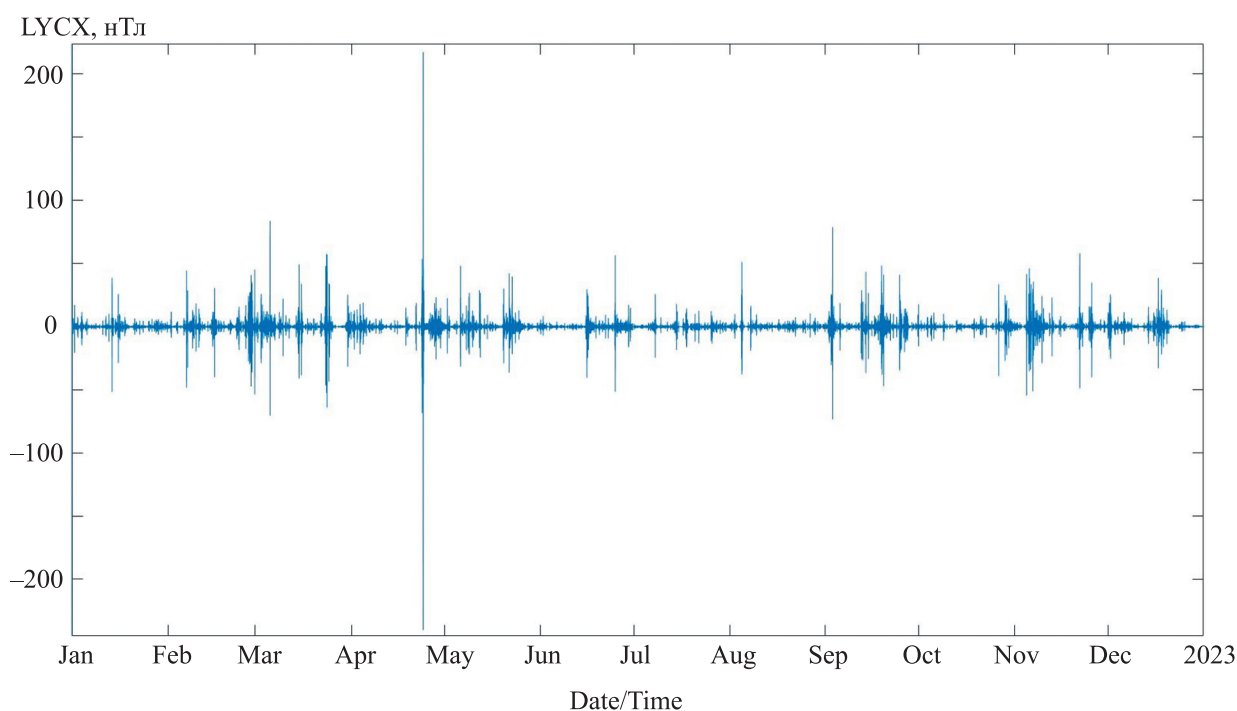


Рис. 3


```
LYC.LYCX = filtfilt(digital_filter_Pc4, LYC_detrend.LYCX);  
LYC.LYCY = filtfilt(digital_filter_Pc4, LYC_detrend.LYCY);  
LYC.LYCZ = filtfilt(digital_filter_Pc4, LYC_detrend.LYCZ);  
LYC.LYCF = filtfilt(digital_filter_Pc4, LYC_detrend.LYCF);
```

Результат такой фильтрации для LYCX за 01.01.2023–31.12.2023 представлен на рис. 3.

Для того чтобы убедиться, что полученные результаты попадают в диапазон ГП Pc4, можно, например, представить данные на небольшом промежутке времени (рис. 4, 03.06.2023 с 03:42 по 03:56).

Анализ рис. 4 показывает, что, обработав предлагаемым кодом исходные данные большого объема, можно выделять колебания с периодами, соответствующими диапазону ГП Pc4.

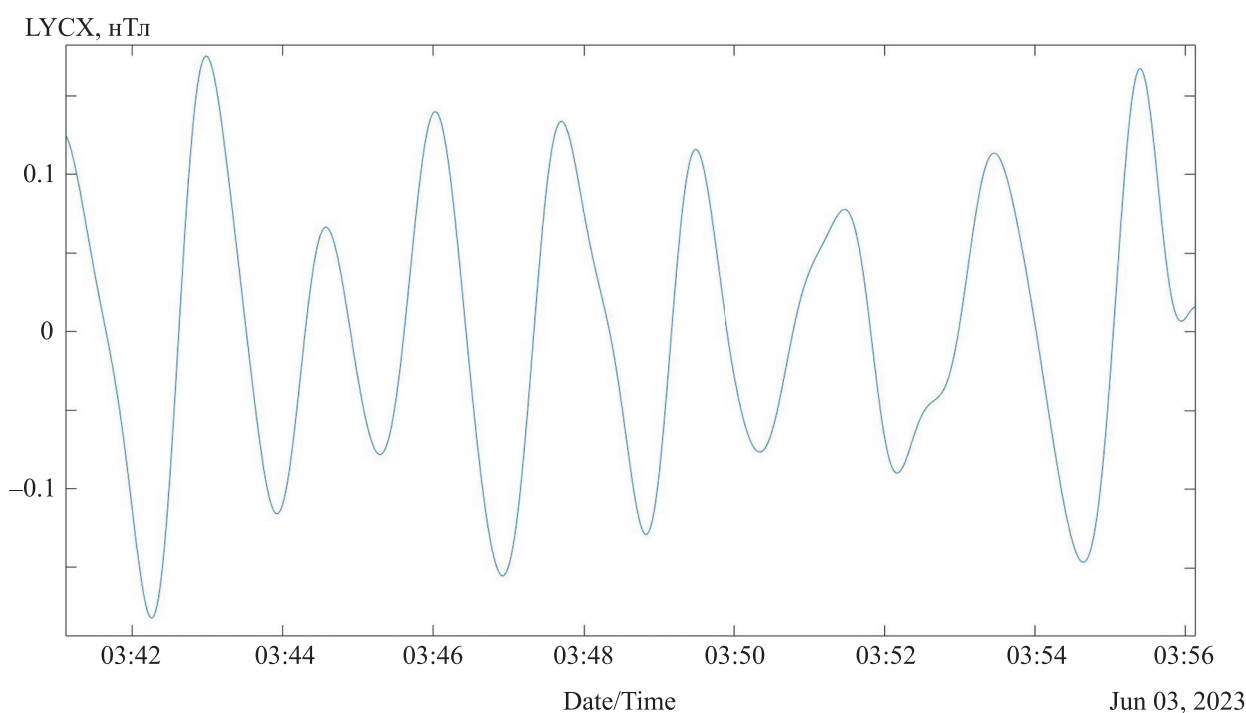


Рис. 4

Заключение. Таким образом, в настоящей работе предложен и реализован подход к решению задачи выделения ГП Pc4 из исходных данных при помощи цифровой фильтрации. Визуальный анализ полученных результатов показывает, что можно хорошо разделять „спокойные“ и „возмущенные“ дни. Дополнительно можно наблюдать фазы развития магнитных бурь (см. рис. 3).

Кроме того, результаты, полученные после обработки с использованием предлагаемого подхода, могут служить входными данными для решения фундаментальных и прикладных задач. Например, изучение УНЧ-волн в магнитосфере, является активно развивающейся областью физики магнитосферы. Основные нерешенные проблемы связаны с развитием кинетической и магнитогидродинамической теории этих волн в трехмерно-неоднородных моделях магнитосферы.

Представленные результаты показывают, что, применяя систему MATLAB, можно достаточно эффективно работать с технологиями BigData, которые позволяют успешно решать геофизические задачи.

В заключение можно отметить, что использование графических процессоров (GPU) также позволит повысить эффективность работы с технологиями BigData, которые реализованы в MATLAB.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонович А. С., Мазур В. А. Линейная теория МГД-колебаний магнитосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 480 с.
2. Коробейников А. Г. Применение методов Big Data для сравнения данных геомагнитных обсерваторий сети INTERMAGNET // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 12. С. 993–1001. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-993-1001.
3. Коробейников А. Г. Обработка и анализ данных с российского сегмента мировой сети магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ // Междунар. журн. гуманитарных и естественных наук. 2018. № 8. С. 91–98.
4. Макишанов А. В., Журавлев А. Е., Тындыкарь Л. Н. Большие данные. Big Data. СПб: Лань, 2022. 188 с. ISBN 978-5-8114-9834-5.
5. Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г., Величко Е. Н., Непомнящая Э. К., Розов С. В. Синтез бинарных матриц для формирования сигналов широкополосной связи // Радиотехника. 2015. № 9. С. 51–58.
6. Дьяконов В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. М.: ДМК-Пресс, 2016. 976 с.
7. Матюшкин И. В. Моделирование и визуализация средствами MATLAB физики наноструктур. М.: Техносфера, 2011. 168 с.
8. Коробейников А. Г. Применение искусственных нейронных сетей в системах автоматического управления магнитной левитацией // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35, № 3. С. 452–457. DOI: 10.15827/0236-235X.139.452-457.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Анатолий Григорьевич Коробейников — докт. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук; зам. директора по науке; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2024; одобрена после рецензирования 08.02.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Leonovich A. S., Mazur V. A. *Lineynaya teoriya magnitogidrodinamicheskikh kolebaniy magnitosfery* (Linear Theory of Magnetohydrodynamic Oscillations of the Magnetosphere), Moscow, 2016, 480 p. (in Russ.)
2. Korobeynikov A. G. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 12(66), pp. 993–1001, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-993-1001. (in Russ.)
3. Korobeynikov A. G. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2018, no. 8, pp. 91–98. (in Russ.)
4. Makshanov A. V., Zhuravlev A. E., Tyndykar L. N. *Bol'shiye dannyye. Big data* (Big Data. Big Data), St. Petersburg, 2022, 188 p., ISBN 978-5-8114-9834-5. (in Russ.)
5. Grishentsev A. Y., Korobeynikov A. G., Velichko E. N., Nepomnyashchaya E. K., Rozov S. V. *Radioengineering*, 2015, no. 9, pp. 51–58. (in Russ.)
6. Dyakonov V. P. *MATLAB i SIMULINK dlya radioinzhenerov* (MATLAB and SIMULINK for Radio Engineers), Moscow, 2016, 976 p. (in Russ.)
7. Matyushkin I. V. *Modelirovaniye i vizualizatsiya sredstvami MATLAB fiziki nanostruktur* (Modeling and Visualization by Means of MATLAB of the Physics of Nanostructures), Moscow, 2011, 168p. (in Russ.)
8. Korobeynikov A. G. *Software & Systems*, 2022, no. 3(35), pp. 452–457, DOI: 10.15827/0236-235X.139.452-457. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

Anatoly G. Korobeynikov — Dr. Sci., Professor; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS, Directorate; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru

Received 29.01.2024; approved after reviewing 08.02.2024; accepted for publication 16.04.2024

COMFORT NAVIGATION IMPROVEMENT OF PATH PLANNING TASK IN HUMAN–ROBOT INTERACTION

Liao Duzhesheng, S. A. Chepinskiy*, Wang Jian

ITMO University, St. Petersburg, Russia

* chepinsky_s@hotmail.com

Abstract. Navigation is the core of mobile robot applications, but traditional configurations have great difficulties in dealing with dynamic human factors. This means that new service robots must not only undertake the task of autonomous navigation, but also be good at social interaction and consider harmonious coexistence with others. This paper designs a social navigation based on improving the comfort of human–robot interaction. The social space costs and constraints are modeled using asymmetric Cauchy functions, and predictions are made using human–human or human–robot interaction, and pedestrian encounters are considered. The difference in the degree of attention paid to oneself, front, rear, left, and right when encountering obstacles or pedestrians establishes the benchmark for the corresponding model. On this basis, a map cost function is constructed, which can use different constraints on the path and specify that the robot does not enter certain spaces, or enter specific spaces under certain circumstances. The A* and jump algorithms were modified based on the map cost function, and experiments were conducted in MATLAB. The experimental results show that the designed social comfort navigation can effectively realize the function, pedestrians' personal space is guaranteed, and goal-oriented intentionality is understood by the robot. Understanding, coexistence and adaptability of mobile service robots are significantly improved.

Keywords: mobile robot control, A* algorithm, comfort navigation, obstacle avoidance, path planning

For citation: Duzhesheng Liao, Chepinskiy S. A., Jian Wang. Comfort navigation improvement of path planning task in human–robot interaction. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 481–491 (in English). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-481-491.

ПОВЫШЕНИЕ КОМФОРТА НАВИГАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЧЕЛОВЕКА И РОБОТА В ЗАДАЧЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ

Ляо Дучжэшэн, С. А. Чепинский*, Ван Цзянь

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* chepinsky_s@hotmail.com

Аннотация. Автономное движение мобильных роботов в динамически меняющейся внешней среде сопряжено с существенными трудностями. Это означает, что мобильные роботы должны не только выполнять задачу автономной навигации, но и хорошо взаимодействовать не только с неподвижными препятствиями, но и с людьми, движущимися в рабочем пространстве робота. Разработан алгоритм планирования и управления траекторным движением с учетом социальной навигации, обеспечивающей комфортное взаимодействие человека и робота. Затраты и ограничения социального пространства моделируются с использованием асимметричных функций Коши, составляются прогнозы взаимодействия „человек–человек“ или „человек–робот“. На этой основе строится функция стоимости карты, которая может использовать различные ограничения. Алгоритмы A* и jump были модифицированы на основе функции стоимости карты. Результаты экспериментов, выполненных в среде MATLAB, показывают, что предложенные алгоритмы могут эффективно реализовать задачу планирования пути с учетом социальной навигации. Благодаря разработанным алгоритмам выстраивается оптимальный маршрут робота, и личное пространство пешеходов гарантировано. Комфорт с учетом социальной навигации при взаимодействии человека и робота значительно улучшился.

Ключевые слова: управление мобильным роботом, A* алгоритм, комфортная навигация, объезд препятствия, планирование пути

Ссылка для цитирования: Дучжэшэн Ляо, Чепинский С. А., Цзянь Ван. Повышение комфорта навигации при взаимодействии человека и робота в задаче планирования пути // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 481–491. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-481-491.

Introduction. Since mobile robots can be widely used in industrial manufacturing, agricultural production, medical services, daily life and other fields, research interest in the field of robotics has become increasingly intense in the past few decades. From industrial robotic arms and drones to today's Autonomous Ground Vehicles (AGVs) and various home robots, the types and functions of robots are becoming more and more diverse. People are paying more and more attention to the use of robots, and have put forward higher requirements for robots to be autonomous, intelligent, and "humane". From the initial problem of autonomous navigation of mobile robots to the large-scale emergence of mobile service robots, people are more inclined to study the interaction between humans and robots, so that the comfort between humans and robots can be greatly improved.

Based on the current development trend of robot technology, two predictions can be made: first, the focus of robot application will shift from the industrial structured environment to the unstructured environment where humans live; second, the emerging industry of robots will become, like computers, a must-have for every home. For example, researchers across Europe are innovating mobile robot designs and solving fundamental indoor problems, efforts that could eventually lead to home robots becoming a world standard. Some countries, such as South Korea and the United States, have formulated strategic plans involving companies, universities, and research institutions with the aim of occupying the indoor service robot market.

The International Federation of Robotics (IFR) defines a service robot as a semi-autonomous or fully autonomous robot that can complete service tasks that are beneficial to human health [1]. In the past ten years, the market demand for service robots has been growing day by day, showing huge development space [2].

In the battle against the COVID-19 epidemic that broke out in early 2020, mobile service robots also played an important role, helping medical staff reduce their work, reduce contact frequency, and achieve contactless distribution and delivery. In addition, smart spaces such as smart homes and unmanned offices have also expanded the application scope of service robots and enriched the ways they serve and help humans [3].

The entry of service robots into our homes and workplaces provides broader opportunities for engineering research into mobile robots. However, in order to naturally integrate into the environment where humans live, mobile robots must not only be technologically advanced, but also have good interaction design and consider human preferences, needs or other influences.

Therefore, in order to work in a more social way, the robot must understand the corresponding spatial conventions and behave accordingly. In short, when service robots share activity spaces with people, they need to maintain a social space related to social conventions to take into account human comfort.

Social space refers to the spatial distance maintained by individuals in various social and interpersonal relationships. It is a direct reflection of social accessibility and will directly affect the human-robot interaction experience, that is, comfort. Different environments or cultures will lead to differences in spatial language. The term was originally proposed by Hall to describe human management of space [4]. People's spatial interaction relationships include intimate, personal, social and public, and different spaces are reserved for specific relationships [5]. When humans are too close, they often cannot remain comfortable and they feel personal space has been violated. Therefore, intrusion into the personal space of others must be avoided as much as possible. For example, when a robot crosses a crowd, it is likely to affect the people around it, especially when the robot's behavior is considered extremely unsociable [5].

Now, the problem of human-robot interaction can be seen as finding an optimal or suboptimal trajectory without collision based on some pedestrians and obstacles between the starting position

and the destination in a working environment with obstacles. Robot path planning methods can be divided into two categories [6–12], namely classic algorithms and heuristic methods. The main classic algorithms include cell decomposition, visibility map, artificial potential field and sampling-based methods [13]. The robot's free workspace can be divided into cells and an adjacency graph planner is used to find collision-free paths. Between the starting point and the target point on the plane, if their connecting line segments can directly reach each other, a feasible path is drawn to find the optimal shortest path of the robot in the graph.

In order to better integrate robots into human life and improve comfort, this paper has done the following research: on the problem of path planning, a comfort level based on the improved A* algorithm [2] and the jump point algorithm is proposed navigation.

The core application context for this algorithm lies within the realm of service robots operating in public spaces. These environments are inherently dynamic and populated with individuals who may have varying degrees of comfort with robots. Our algorithm specifically addresses the challenge of maintaining comfortable social distances while ensuring efficient navigation and task execution by robots.

First discusses the interaction between pedestrians and robots, combines the comfort issue of human–robot interaction, uses the asymmetric Cauchy function to establish a model, and then implements robots, pedestrians and obstacles on the A* algorithm and jump point algorithm obstacle avoidance to improve user comfort during human–robot interaction.

Social space costs and constraints. In this section, we start from the comfortable distance between people and between people and obstacles, supplemented by Hall's concentric circle theory to define the basic criteria of social constraints, and then design a method to enable people to interact with robots with comfortable distance. Finally, the cost modeling and simulation of the social space is performed, in which the non-standard Cauchy function surface value is used to define the passing cost size. And in practical applications, pedestrian comfort can be fully guaranteed.

People's spatial interaction relationships can be divided into intimate, personal, social and public, and different spaces are reserved for specific relationships [8]. When the robot crosses the crowd, it may affect the people around it, especially when the robot's behavior is considered extremely unsociable.

Personal space [14] refers to the surrounding area actively maintained by an individual, which usually includes the scope of his or her physical activities and a certain social distance. This concept is also known as spatial comfort because it is closely related to the level of comfort an individual feels. Others should not intrude into a personal space without the individual's permission, as doing so may cause discomfort or uneasiness.

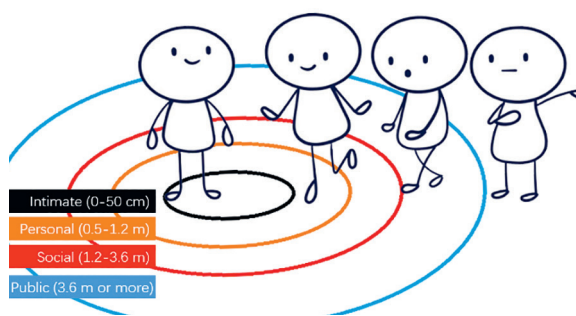
According to the concentric circle theory proposed by Hall [4], the space around an individual can be divided into four specific areas based on social interaction distance. The first level is intimate distance. This is the minimum or no gap in interpersonal communication, which is what we call "intimacy". Its range is between 6 to 18 inches (~15–44 cm).

The second level is personal distance. This is a slightly measured distance between people, with less direct physical contact. The short range of personal distance is between 1.5–2.5 feet (46–76 cm), which is just right for shaking hands and friendly conversation, and is suitable for socializing with acquaintances.

The third level is social distancing. This has gone beyond an intimate or acquaintance relationship, but reflects a more formal relationship of social or etiquette. Its close range is 4 to 7 feet (1.2 to 2.1 meters), suitable for work environments and social gatherings.

The fourth level is the public distance, which is the distance maintained between the speaker and the audience during public speaking. Its close range is 12 to 25 feet (about 3.6 to 7.6 meters). The definitions of these areas and distances in this article are shown in Fig. 1. Pedestrian comfort guarantee based on social space.

Our selection of distance parameters was meticulously guided by Edward T. Hall's theory of proxemics and relevant psychological research findings. The purpose behind these chosen distances is to simulate an ideal range for robot–human interactions, thereby fostering natural and comfortable communication between both parties. By maintaining suitable social distances, we aim to minimize



Schematic diagram of concentric circles

Space	Distance
Public space	>3.6 m
Social space	1.2 m
Personal space	0.45 m
Intimate space	≤0.45 m

Fig. 1



Fig. 2

human discomfort or perceived threats from robots, enhancing the comfort and naturalness of human–robot interactions.

According to daily life experience, space comfort is affected by both subjective and objective factors. Subjective factors refer to individual feelings, which often play a decisive role in interactions; objective factors are more complex, such as gender differences, length of sight distance, walking speed, and density of pedestrians and obstacles in the environment. A lot of related research work has emerged to study changes in personal space. Some studies have shown that when bypassing obstacles, personal space will be adjusted according to the speed of movement, or that the spatio-temporal model of individual comfort can be determined based on changes in speed parameters. In addition, there are also theories related to dynamic scenarios [15].

It is generally accepted that personal space is asymmetric, and this article focuses specifically on asymmetries resulting from direction sensitivity. Pedestrians generally have different sensitivity to interactions from different directions, or the sensitivity is related to the orientation of the posture. For example, when pedestrians move, they mainly pay attention to the dynamics of pedestrians and obstacles in front, and are less sensitive to the movements behind them and to the left and right sides; for example, during peak hours, people walk on the right, so they pay attention to the right side, as shown in Fig. 2.

Based on the above understanding, this article proposes the following social space establishment rules, which serve as the benchmark for the following establishment costs [16]:

1) generally, when stationary pedestrians or obstacles are detected, the personal space distance proposed by Hall is used as the reference distance for social interaction;

2) at the same time, using distance to represent the directional sensitivity of pedestrians determines that the distance to the front of the personal space is slightly larger than the rear, and the distance to the right is slightly larger than the left;

3) the private space closest to the human body should be strictly off-limits;

4) when there are crowds of people, you should try to avoid them.

Cost modeling and simulation based on social space. In social interactions, pedestrian status information and underlying social conventions are very important. Therefore, in order to better reflect the information status, living habits and potential social customs of pedestrians in the social interaction space, in this subsection we establish a social interaction space model that uses the two-dimensional asymmetric Cauchy formula to calculate the space the value of each point within is used as the passing cost of the mobile robot. When the value of a certain point is larger, it means that the point is closer to the human body, and the robot should not pass here; and when the value of a certain point is smaller, it means that the point is further away from the human body, and the robot can consider passing it. These values

are added to the A-star algorithm cost function to reflect the cost of passing a certain point. In this way, when planning the robot's path, we can prioritize lower-cost paths and avoid areas that are too costly.

In general, the mathematical form of the two-dimensional Cauchy function is as follows:

$$f_c^i(x, y) = A \frac{1}{(1 + f_{cx}^i + f_{cy}^i)}. \quad (1)$$

Formula (1) represents the personal space cost function based on the Cauchy function, where each variable and symbol is defined as follows: f_{cx}^i — the cost value at position (x, y) for the i -th pedestrian; A — amplitude, representing the magnitude of the Cauchy function (this parameter determines the projection range of personal comfort space, which can be adjusted through social attributes to change the personal comfort space); $1 + f_{cx}^i + f_{cy}^i$ — the denominator of the Cauchy function, incorporating the cost components in both the x and y directions.

Components in the x and y Directions described with the help of formulas:

$$f_{cx}^i = \frac{(d \cos(\theta_p + \theta_i))^2}{\sigma_x}, \quad (2)$$

$$f_{cy}^i = \frac{(d \sin(\theta_p + \theta_i))^2}{\sigma_y}. \quad (3)$$

These formulas represent the components in the x and y directions, respectively: $d \cos(\theta_p - \theta_i)$ — the distance component in the x direction; σ_x — the variance in the x direction, used to adjust the range of personal comfort space; $d \sin(\theta_p - \theta_i)$ — the distance component in the y direction; σ_y — the variance in the y direction, used to adjust the range of personal comfort space.

We also need to consider calculation of distance and angle:

$$d = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2}, \quad (4)$$

$$\theta_i = \text{atan2}(y_i - y_p, x_i - x_p). \quad (5)$$

Formulas (4) and (5) are used to calculate the distance and angle between the pedestrian and the reference point: d — the Euclidean distance between pedestrian i and reference point p ; $(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2$ — the formula for calculating the distance between two points; θ_i — the azimuth angle between pedestrian i and reference point p ; $\text{atan2}(y_i - y_p, x_i - x_p)$ — the function for calculating the angle from the reference point to the pedestrian, correctly handling angles in all four quadrants.

The asymmetric two-dimensional Cauchy surface simulated with MATLAB is shown in Fig. 3.

In order to establish a social interaction space model, the corresponding parameter values need to be determined:

1) when pedestrians are in a stationary state, referring to Hall's theory, the maximum distance H_q of the social space in the front direction can reach 1.2 m, while the maximum distance H_h of the invisible area directly behind is selected to be 1.0 m;

2) in general intersection situations, pedestrians will pass on the right side of the road according to social custom. Therefore, the farthest distance H_y of the social space on the pedestrian's right side should be larger than the left side H_z . Value: $H_y = 1.2$ m, $H_z = 1$ m.

Hierarchical social dynamic cost map construction. Layered Costmaps technology based on occupancy grids was first proposed by

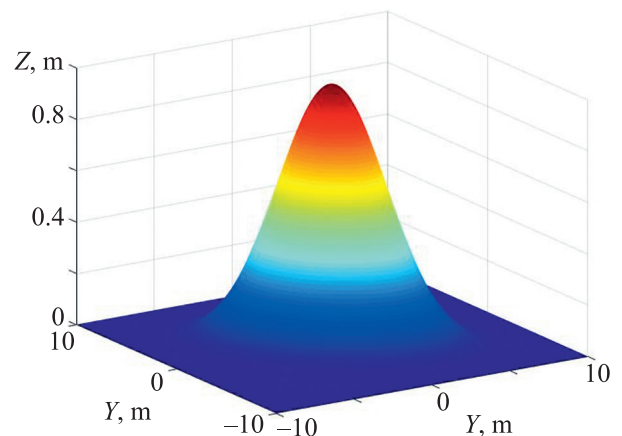


Fig. 3

David V. Lu. These layers include static layers, barrier layers, expansion layers, etc. [3], with the purpose of providing richer semantic information for planning, thereby achieving more ideal results. This section builds a hierarchical social dynamic map based on the established social cost model, aiming to improve people's comfort during human-robot interaction.

Traditional cost maps only deal with costmap as hard constraints. If hard constraints are used to increase social space, many valid paths (non-collision paths) will be excluded. However, in a dynamic cost map, the space points around obstacles are assigned a value $0 \sim \text{Inf}$ calculated by the two-dimensional Cauchy function, with free space marked as the lowest cost 0 and obstacles as the highest cost Inf . Because of some special behaviors of humans, this method can be used to account for the areas affected by human factors and reduce the space occupied, thereby affecting costs.

Map cost function is written:

Algorithm: Compilation of Map Cost Function

```

1: Input: s, g, n, obs
2: Output: field, startposind, goalposind, costchart, fieldpointers
3: function[field...] = initializeField(...)
4: field = zeros(n, n);
5: q = sub2ind([n, n], obs(:, 1), obs(:, 2));
6: k = length(q);
7: for i = 1:k
8:   field(q(i)) = inf;
9: end
10: h = 1.2;
11: segema = power(1/2 * sqrt(power(h, 2) / log(10)), 2);
12: for t = 1:
13:   field(obs(t, 1) + 0, obs(t, 2) + 1) = field(obs(t, 1) + 0,
14:   obs(t, 2) + 1) + ceil(100 * exp((power(0, 2) + power(1, 2)) / (2 * segema1)));
15: end
16: startposind = sub2ind([n, n], s(1), s(2));
17: goalposind = sub2ind([n, n], g(1), g(2));
18: field(startposind) = 0;
19: field(goalposind) = 0;
20: costchart = NaN * ones(n, n);
21: costchart(startposind) = 0;
22: fieldpointers = cell(n, n);
23: fieldpointers{startposind} = 'S';
24: fieldpointers{goalposind} = 'G';
25: fieldpointers(field == inf) = {0};

```

Fig. 4 takes the A-star algorithm as an example. In this algorithm, the cost of pedestrians and obstacles in the map is set to infinite, and their surroundings are assigned values based on the cost calculated by the asymmetric Cauchy function above.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
3	0	0	5	Inf	Inf	5	0	1	0	0	
4	0	0	0	10	Inf	6	5	Inf	5	0	
5	0	0	1	5	Inf	Inf	0	Inf	5	0	
6	0	5	Inf	5	5	5	0	5	0	0	
7	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	
8	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	
9	0	0	5	Inf	5	5	Inf	5	0	0	
10	0	0	0	5	0	0	5	0	0	0	
11											

Fig. 4

It can be seen from Fig. 4 that obstacles and pedestrians will be given Inf, which becomes the highest cost and is not allowed to pass. However, a calculated cost will be given near obstacles and pedestrians, so that if the robot passes, it will avoid obstacles and pedestrians, ensuring robot and pedestrian comfort. This can be optimized through the map cost function [17], and using softer constraints on the path, you can specify that the robot does not enter certain spaces, but can enter a certain space under certain circumstances, or enter certain distances.

This section establishes a cost map based on the Cauchy function mentioned above and applies it to the algorithm to improve people's comfort during human–robot interaction.

Algorithm improvement based on social cost. The A* algorithm (A-Star) is an efficient direct search method for solving the shortest path in a static road network. It is also an effective algorithm for solving many search problems [18]. In this algorithm, the closer the distance estimate is to the actual value, the faster the final search speed is. The A* algorithm is the most commonly used heuristic algorithm, and its core formula is:

$$F(n) = G(n) + H(n).$$

This article adds the map cost function $I(n)$, and its core formula becomes:

$$F(n) = G(n) + H(n) + I(n).$$

Among them, $G(n)$ represents the accumulation of costs from the starting node to the current node; $H(n)$ represents the heuristic function, used to estimate the movement cost from the current node to the end node, usually calculated using Euclidean distance or Manhattan distance; $I(n)$ represents the map cost [19]; $F(n)$ is the sum of the three costs. According to this formula, when searching for a path with the A* algorithm, the node with a smaller $F(n)$ value is always selected.

To implement path search based on the A* algorithm and Cauchy, two sets are needed: open list and close list. In the open list, the grids that the path may or may not pass are stored; while the closed list contains grids that no longer need to be paid attention to. The block diagram of the algorithm is shown below in Fig. 5.

Experiment and comparison. This experiment runs on a Windows 10 64-bit system and uses the MATLAB platform for simulation experiments. The CPU uses Intel i5-4200U, 4 cores and 4GB. The environment model of the simulation experiment uses a grid map. The map consists of $n \times n$ grids, where black grids represent obstacles and white grids represent free movement areas. In the experiment, the red one is the starting point and the blue one is the end point.

Aiming at the path planning problem of mobile robots, this experiment designed three sets of comparative experiments to verify the performance of the algorithm. The first experiment compared the effects of the traditional A* algorithm and the improved A* algorithm after adding the Cauchy function; the second experiment compared the effects of the jump point algorithm and

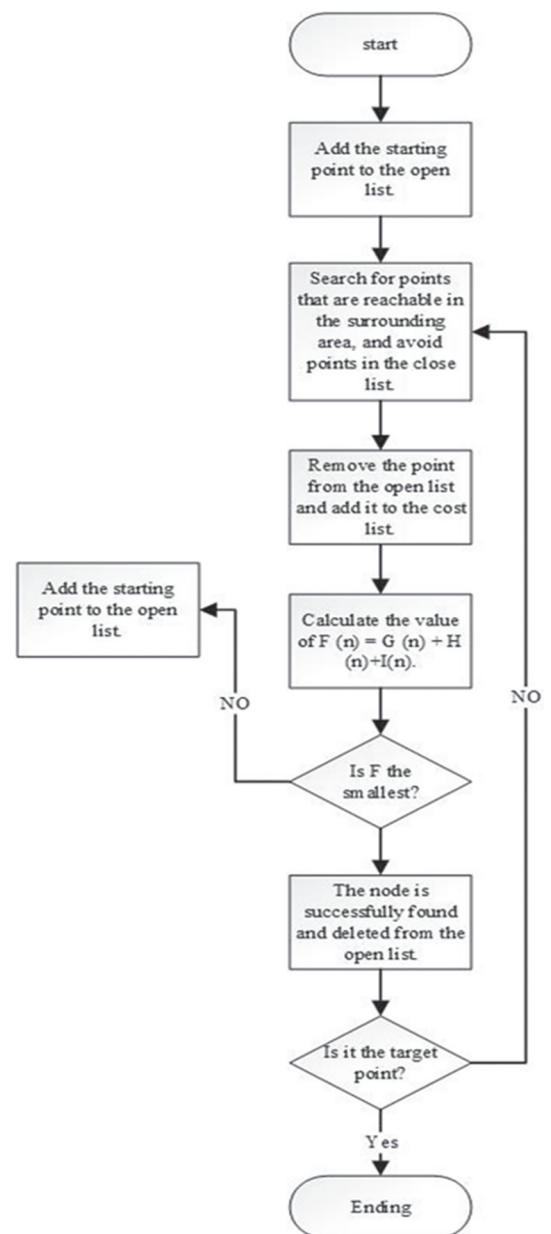


Fig. 5

the improved A* algorithm; the third experiment compared The effect of the improved jump point algorithm and improved A* algorithm is improved.

Experiment 1 uses a 10×10 map, using the A* algorithm and the A* algorithm that adds map cost. The map in this experiment is relatively simple and easy to visually demonstrate the difference between the traditional A* algorithm and the improved A* algorithm.

From Fig. 6, it can be clearly seen that compared with the traditional A* algorithm when encountering pedestrians or obstacles, the improved A* algorithm can effectively avoid pedestrians or obstacles.

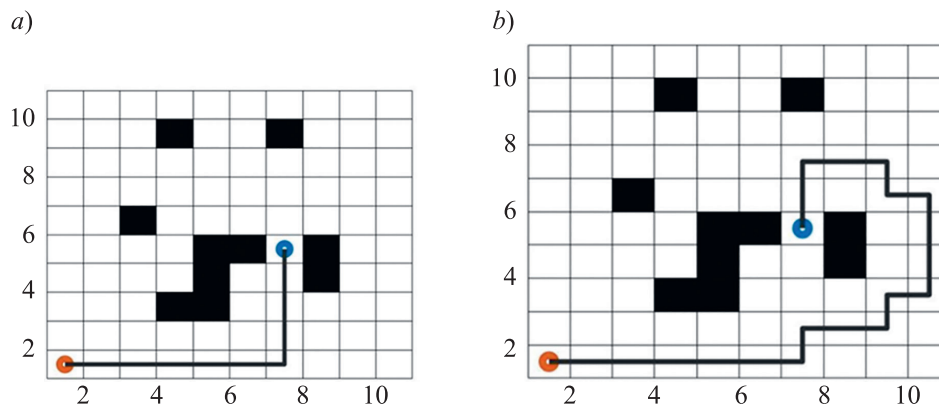


Fig. 6

Experiment 2 uses a 20×20 map, and conducts two comparative experiments using the traditional jump point algorithm and the improved A*. The black movement trajectory in the picture is the jump point algorithm, and the red movement trajectory is the improved A* algorithm.

Jump point algorithm and improved A* algorithm experimental diagram is shown in Fig. 7. It can be seen that the improved A* algorithm is much better than the jump algorithm in avoiding pedestrians and obstacles.

Experiment 3 uses a 10×10 map to test the improved jump point algorithm and improved A* algorithms for comparison.

Jump point algorithm and improved A* algorithm experimental diagram is shown in Fig. 7, f. It can be clearly found that the improved jump point algorithm still avoids obstacles as much as possible while ensuring the optimal solution.

Experiment 4 uses a 10×10 map to test the improved jump point algorithm and improved A* algorithms for comparison.

Experimental diagram of improved jump point algorithm and improved A* algorithm is shown in Fig. 8. It can be clearly found that the improved jump point algorithm and the traditional A* can still avoid obstacles as much as possible while ensuring the optimal solution.

Many obstacles can be overcome when using the asymmetric Cauchy function algorithm. This algorithm is very useful in public environments. It can help robots avoid most people. It can also help when searching for missing people or items. For example, in natural disasters such as fires and earthquakes, it can avoid some obstacles to ensure safety. To ensure the safety of rescuers and prevent them from being put into dangerous situations again while rescuing people.

Conclusion. This article is based on the hot topic of promoting human–robot interaction, starting from the design of the navigation system that takes human factors into consideration, and takes into account the comfort of pedestrians walking on the road when planning pedestrians' paths. It has broad prospects in promoting the application of robot technology in medical and service industries. The theoretical content will provide certain reference for meeting the comfort navigation needs of mobile robots and improving the level of human–robot interaction. The conclusions drawn are as follows:

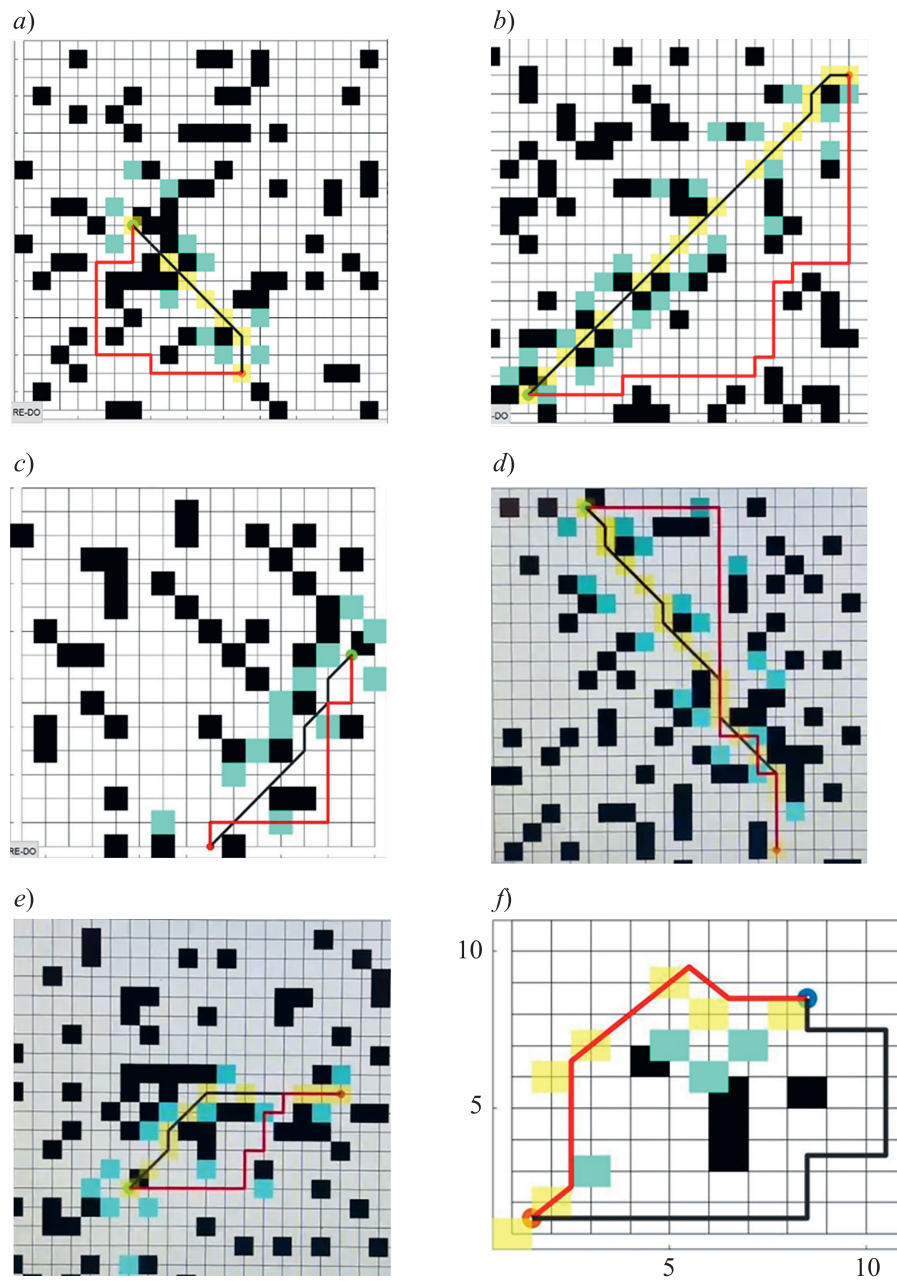


Fig. 7

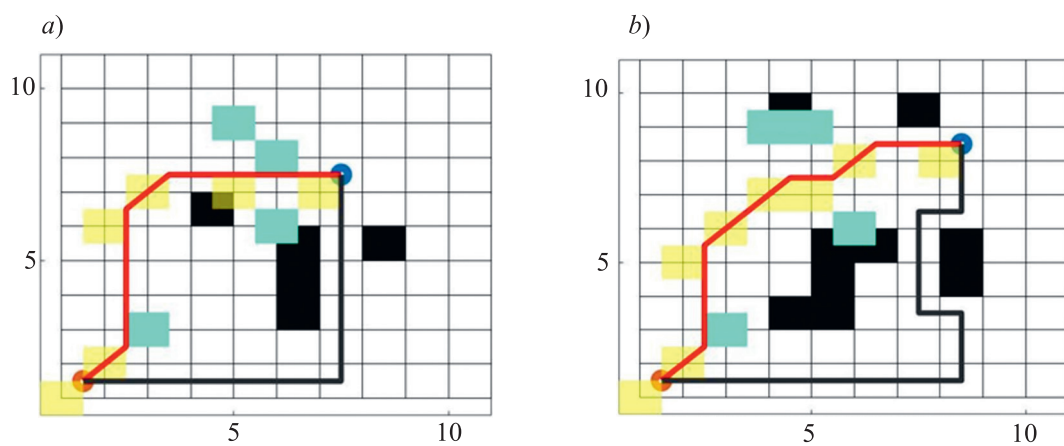


Fig. 8

1) a model based on human walking comfort is proposed, taking into account pedestrians' perception of pedestrians and obstacles around them. In addition, pedestrian-to-pedestrian interaction and attention mechanisms are also considered;

2) an asymmetric Cauchy function model based on social space cost was established, taking into account the impact of pedestrians (pedestrians, vehicles) and traffic facilities (crosswalk boundaries);

3) based on the established social space cost model, a hierarchical social dynamic map is constructed, aiming to improve people's comfort during human-robot interaction. You can specify that the robot will not enter certain spaces, but it can enter a specific space under specific circumstances;

4) based on the A* and jump algorithms, the proposed model is verified. The results show that the performance of the model can help pedestrians improve their comfort and happiness when walking.

REFERENCE

1. Li Lei, Ye Tao, Tan Min, Chen Xi-Jun, *Robot*, 2002, no. 5(24), pp. 475–480.
2. Zhu Daqi, Yan Mingzhong, *Control and Decision*, 2010, no. 07(25), pp. 961–967.
3. Lu D. V., Hershberger D., Smart W. D. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, IEEE, 2014, pp. 709–715, DOI: 10.1109/iros.2014.6942636.
4. Hall E. T. *The hidden dimension: man's use of space in public and private*, London, Bodley Head, 1969.
5. Vasquez D., Stein P., Rios-Martinez J. et al. *The 13th International Symposium on Experimental Robotics*, Heidelberg, Springer, 2013, pp. 449–462.
6. Hidalgo-Paniagua A., Vega-Rodríguez M. A., and Ferruz J. *Expert Syst. Appl.*, 2016, vol. 58, pp. 20–35.
7. Contreras-Cruz M. A., Ayala-Ramirez V., and Hernandez-Belmonte U. H. *Appl. Soft Comput.*, 2015, vol. 30, pp. 319–328.
8. LaValle S. M. *Planning Algorithms*, NY, Cambridge Univ. Press, 2006.
9. Klančar G., Zdešar A., Blažič S., and Škrjanc I. *Wheeled Mobile Robotics*, London, UK, Butterworth, 2017, ch. 4, pp. 161–206.
10. Kapitanyuk Y. A., Chepinskiy S. A. *Gyroscopy and Navigation*, 2013, no. 4(4), pp. 198–203.
11. Wang J., Krasnov A. Yu., Kapitanyuk Yu. A., Chepinskiy S. A., Chen Y., and Liu H. *Gyroscopy and Navigation*, 2016, no. 4(7), pp. 353–359.
12. Wang Jian, Krasnov A. Yu., Kapitanyuk Yu. A., Chepinsky S. A., Kholunin S. A., Chen Yifan, Liu Huimin, Khvostov D. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 11(60), pp. 1003–1011. (in Russ.)
13. Bennewitz M. *Mobile robot navigation in dynamic environments*, Freiburg, Albert Ludwigs Universität Freiburg, 2004.
14. Hayduk L. A. *Psychological Bulletin*, 1978, no. 1(85), pp. 117–134, DOI:10.1037/0033-2909.85.1.117.
15. Nawa N. E., Hashiyama T., Furuhashi T., and Uchikawa Y. *Proc. IEEE Int. Conf. Evol. Comput.*, Apr. 1997, pp. 589–593.
16. Chen Weihua. *Research on positioning and navigation methods of wheeled mobile robots in social environment*, Guangzhou, South China University of Technology, 2018.
17. Masehian E., Sedighzadeh D. *Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology*, 2007, vol. 23, pp. 101–106.
18. Kramer O. *Genetic Algorithms Essentials*, Cham, Switzerland, Springer, 2017, pp. 11–19.
19. Trautman P. *IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control*, Melbourne, IEEE, 2017, pp. 327–334.

DATA ON AUTHORS

- | | |
|-----------------------------|---|
| Liao Duzhesheng | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: ldzs2015@gmail.com |
| Sergey A. Chepinskiy | — Ph.D.; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: chepinsky_s@hotmail.com |
| Wan Jian | — Ph.D.; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Professor; E-mail: wangjian@itmo.ru |

Поступила в редакцию 01.03.2024; одобрена после рецензирования 07.04.2024; принята к публикации 16.04.2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Lei, Ye Tao, Tan Min, Chen Xi-Jun. Present state and future development of mobile robot technology research // Robot. 2002. Vol. 24, N 5. P. 475–480.
2. Zhu Daqi, Yan Mingzhong. Overview of mobile robot path planning technology // Control and Decision. 2010. Vol. 25, N 7. P. 961–967.
3. Lu D. V., Hershberger D., Smart W. D. Layered costmaps for context-sensitive navigation // IEEE Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Chicago, IEEE, 2014. P. 709–715. DOI: 10.1109/iros.2014.6942636.
4. Hall E. T. The hidden dimension: man's use of space in public and private. London: Bodley Head, 1969. 217 p.
5. Vasquez D., Stein P., Rios-Martinez J. et al. Human aware navigation for assistive robotics // The 13th Intern. Symp. on Experimental Robotics. Heidelberg: Springer, 2013. P. 449–462.
6. Hidalgo-Paniagua A., Vega-Rodríguez M. A., and Ferruz J. Applying the MOVNS (multi-objective variable neighborhood search) algorithm to solve the path planning problem in mobile robotics // Expert Syst. Appl. 2016. Vol. 58. P. 20–35.
7. Contreras-Cruz M. A., Ayala-Ramirez V., and Hernandez-Belmonte U. H. Mobile robot path planning using artificial bee colony and evolutionary programming // Appl. Soft Comput. 2015. Vol. 30. P. 319–328.
8. LaValle S. M. Planning Algorithms. NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2006.
9. Klančar G., Zdešar A., Blažič S., and Škrjanc I. Path planning // Wheeled Mobile Robotics. London, UK: Butterworth, 2017. Ch. 4. P. 161–206.
10. Kapitanjuk Y. A., Chepinskiy S. A. Control of mobile robot following a piecewise-smooth path // Gyroscopy and Navigation. 2013. Vol. 4, is. 4. P. 198–203.
11. Wang J., Krasnov A. Yu., Kapitanjuk Yu. A., Chepinskiy S. A., Chen Y., and Liu H. Path Following Control Algorithms Implemented in a Mobile Robot with Omni Wheels // Gyroscopy and Navigation. 2016. Vol. 7, N 4. P. 353–359.
12. Ван Цзянь, Краснов А. Ю., Капитанюк Ю. А., Чепинский С. А., Холунин С. А., Чэнь Ифань, Лю Хуэйминь, Хвостов Д. А. Траекторное управление движением твёрдого тела относительно подвижного объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 11. С. 1003–1011.
13. Bennewitz M. Mobile robot navigation in dynamic environments. Freiburg: Albert Ludwigs Universität Freiburg, 2004.
14. Hayduk L. A. Personal space: An evaluative and orienting overview // Psychological Bulletin. 1978. Vol. 85, N 1. P. 117–134. DOI:10.1037/0033-2909.85.1.117.
15. Nawa N. E., Hashiyama T., Furuhashi T., and Uchikawa Y. A study on fuzzy rules discovery using pseudo-bacterial genetic algorithm with adaptive operator // Proc. IEEE Int. Conf. Evol. Comput. 1997. P. 589–593.
16. Chen Weihua. Research on positioning and navigation methods of wheeled mobile robots in social environment. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
17. Masehian E., Sedighizadeh D. Classic and heuristic approaches in robot motion planning – a chronological review // Proc. of World Academy of Science Engineering and Technology. 2007. Vol. 23. P. 101–106.
18. Kramer O. Genetic Algorithms Essentials. Cham, Switzerland: Springer, 2017. P. 11–19.
19. Trautman P. Sparse interacting gaussian processes: efficiency and optimality theorems of autonomous crowd navigation // IEEE 56th Annual Conf. on Decision and Control. Melbourne. IEEE. 2017. P. 327–334.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ляо Дучжэшэн

— аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: ldzs2015@gmail.com

Сергей Алексеевич Чепинский

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: chepinsky_s@hotmail.com

Ван Цзянь

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; профессор; E-mail: wangjian@itmo.ru

Received 01.03.2024; approved after reviewing 07.04.2024; accepted for publication 16.04.2024

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ БОРТОВОЙ РЛС

В. Л. Румянцев^{1*}, И. А. Ростовцев², А. Н. Карпов², Д. В. Титов³¹ Центральное конструкторское бюро приборостроения, Тула, Россия² Филиал Военной академии материально-технического обеспечения, Пенза, Россия³ Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

* vlroom@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты синтеза алгоритма оптимального обнаружения сигналов, заключающегося в знакопеременном преобразовании принимаемых сигналов во времени и компенсации помехового сигнала при накоплении в фильтре. Физической основой синтеза алгоритма являются различия между частотно-временными характеристиками сигналов, отраженных от движущейся цели и земной поверхности, проявляющиеся во временном сдвиге максимумов полезного и помехового сигналов с равными доплеровскими сдвигами частоты. В алгоритме обработки выполняется сравнение модуля весового интеграла с порогом. Разработана структурная схема оптимального обнаружителя. Рассмотрена зависимость нормированного по амплитуде весового вектора оптимальной обработки от времени. Проведена оценка потенциальных характеристик обнаружения движущихся целей. Показано, что при обнаружении малоскоростных целей существуют оптимальные скорости сканирования, при которых вероятность правильного обнаружения максимальна.

Ключевые слова: алгоритм обнаружения, помеховый сигнал, весовая обработка, доплеровская частота, вероятность обнаружения

Ссылка для цитирования: Румянцев В. Л., Ростовцев И. А., Карпов А. Н., Титов Д. В. Алгоритм оптимального обнаружения движущейся цели бортовой РЛС // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 492–499. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-492-499.

AN ALGORITHM FOR OPTIMAL DETECTION OF A MOVING TARGET BY AN ON-BOARD RADAR

V. L. Rumyantsev^{1*}, I. A. Rostovtsev², A. N. Karpov², D. V. Titov³¹ Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula, Russia² Military Academy of Logistics, Penza Branch, Penza, Penza, Russia³ Southwest State University, Kursk, Russia

* vlroom@yandex.ru

Abstract. Results of the synthesis of an algorithm for optimal signal detection, which consists in alternating sign conversion of received signals in time and compensation of the interference signal during accumulation in the filter, are presented. The physical basis of the algorithm synthesis is the differences between the time-frequency characteristics of the signals reflected from a moving target and the earth's surface, manifested in the time shift of the maximums of the useful and interference signals with equal Doppler frequency shifts. The processing algorithm compares the modulus of the weight integral with the threshold. A block diagram of an optimal detector is developed. The dependence of the weight vector of optimal processing normalized by amplitude on time is considered. The potential performance of moving target detection is assessed. It is shown that when detecting low-speed targets, there are optimal scanning speeds at which the probability of correct detection is maximum.

Keywords: detection algorithm, interference signal, weight processing, Doppler frequency, detection probability

For citation: Rumyantsev V. L., Rostovtsev I. A., Karpov A. N., Titov D. V. An algorithm for optimal detection of a moving target by an on-board radar. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 492–499 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-492-499.

Для решения задач углового сопровождения цели антенны современных РЛС имеют суммарно-разностную диаграмму направленности (ДН) которая может быть использована также для пространственной обработки сигналов, что позволит повысить эффективность обнаружения воздушных и наземных целей на фоне местности [1–6]. Поэтому целесообразно синтезировать

алгоритм оптимальной обработки сигналов, принятых суммарной и разностной ДН антенны в режимах обзора и сопровождения, т.е. синтез при частично заданной структуре РЛС.

Сигнал, отраженный от земной поверхности, на выходе однолучевой антенны, сканирующей по азимуту, в когерентно-импульсной РЛС представляет собой сумму случайных амплитудно-модулированных сигналов, сдвинутых друг относительно друга по времени и доплеровской частоте. Сигнал, отраженный от движущейся цели (ДЦ), образуется отражениями от элементарного точечного отражателя земной поверхности в зависимости от движения летательного аппарата и эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) цели.

Анализ сигналов, отраженных от ДЦ и земной поверхности, показывает наличие частотно-временных различий между ними, проявляющихся во временном сдвиге максимумов полезного и помехового сигналов с равными доплеровскими сдвигами частоты. При увеличении радиальной скорости цели этот временной сдвиг увеличивается.

Задача синтеза алгоритма оптимального обнаружителя ставится следующим образом. Пусть на вход некоторого обнаружителя поступает аддитивная смесь $Y(t)$ полезного сигнала $U_{\text{ц}}(t)$, помехового сигнала $U_{\text{п}}(t)$, отраженного от земной поверхности, и внутреннего шума приемника $n(t)$.

Для радиолокационных устройств шум $n(t)$ можно принять белым гауссовым со спектральной плотностью мощности $N_0/2$ [4–6]:

$$Y(t) = U_{\text{ц}}(t) + U_{\text{п}}(t) + n(t). \quad (1)$$

Необходимо синтезировать алгоритм оптимального обнаружения сигналов, максимизирующий вероятность правильного обнаружения цели при заданной вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$.

Согласно теории статистических решений, алгоритм обработки заключается в сравнении логарифма отношения функционалов правдоподобия с порогом и при гауссовой статистике помех он может быть сведен к сравнению модуля весового интеграла $|Z|$ с порогом Z_0 [5, 6]:

$$|Z| = \int_0^{T_{\text{н}}} Y(t)R(t)dt \begin{matrix} \text{да} \\ \geq \\ \text{нет} \end{matrix} Z_0. \quad (2)$$

Порог обнаружения Z_0 выбирается из соотношения [4–6] $Z_0 = \sqrt{2D_{\text{п}} \ln(1/P_{\text{лт}})}$, где $D_{\text{п}}$ — дисперсия флуктуаций величины Z при отсутствии в смеси реализации полезного сигнала.

Весовой вектор оптимальной обработки $R(t)$ должен удовлетворять уравнению Фредгольма 2-го рода [7, 8]:

$$\int_0^{T_{\text{н}}} K(s, t)R(s)ds = U_{\text{ц}}(t), \quad (3)$$

где $K(s, t) = K_{\text{п}}(s, t) + \frac{N_0}{2}\delta(t - s)$; $R(s)$ соответствует $R(t)$ при замене символа t на s .

В общем случае решение интегрального уравнения в конечных пределах затруднительно. Однако для случая разложимых ядер решение (2) известно и имеет вид [9, 10]:

$$R(t) = \frac{2}{N_0} \exp\{j2\pi f_{\text{дц}} t\} \left(\exp\left\{-\frac{\pi}{T^2}(t - t_{\text{ц}})^2\right\} - \sum_{k=1}^{N_{\text{и}}} \sum_{i=1}^{\infty} D_{iK} S_{iK} \exp\left\{-(t - t_{iK})^2\right\} \exp\{j2\pi(f_{\text{ди}} - f_{\text{дц}})t\} \right), \quad (4)$$

где $t_{\text{ц}}$ — время задержки сигнала, отраженного от цели; S_{iK} — весовые множители, определяемые из системы линейных алгебраических уравнений [11–15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^{N_{\text{и}}} \sum_{i=1}^{\infty} S_{iK} \int_0^{T_{\text{и}}} A_{iK}(t) K_{11}(t) dt + \frac{N_0}{2} S_{11} = \int_0^{T_{\text{и}}} U'_{\text{ц}}(t) K_{11}(t) dt; \\ \sum_{k=1}^{N_{\text{и}}} \sum_{i=1}^{\infty} S_{iK} \int_0^{T_{\text{и}}} A_{iK}(t) K_{21}(t) dt + \frac{N_0}{2} S_{21} = \int_0^{T_{\text{и}}} U'_{\text{ц}}(t) K_{21}(t) dt; \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{N_{\text{и}}} \sum_{i=1}^{\infty} S_{iK} \int_0^{T_{\text{и}}} A_{iK}(t) K_{\infty N_{\text{и}}}(t) dt + \frac{N_0}{2} S_{\infty N_{\text{и}}} = \int_0^{T_{\text{и}}} U'_{\text{ц}}(t) K_{\infty N_{\text{и}}}(t) dt, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$K_{iK} = \int_0^{T_{\text{и}}} \exp \left\{ -\frac{\pi}{T^2} (t - t_{iK})^2 \exp \{ -j2\pi f_{\text{ди}} t \} \right\} dt; \quad (6)$$

$$A_{iK} = P_{iK} \int_0^{T_{\text{и}}} \exp \left\{ -\frac{\pi}{T^2} (t - t_{iK})^2 \exp \{ -j2\pi f_{\text{ди}} t \} \right\} dt;$$

где $N_{\text{и}}$ — число импульсов; A — амплитуда; $f_{\text{дц}}$ — приращение доплеровской частоты сигнала цели, обусловленное взаимным перемещением цели и носителя РЛС; где D_{iK} — дисперсия флуктуаций амплитуды сигнала, отраженного от i -го отражателя земной поверхности, на K -й составляющей помехового сигнала, кратной частоте повторения импульсов; t_{iK} — временное положение максимума сигнала, отраженного от i -й точки земной поверхности; $T = \theta_0/\Omega_{\text{ск}}$ — эффективная длительность отраженного сигнала, $\Omega_{\text{ск}}$ — частота сканирования диаграммы направленности антенны.

Подставив (3) в (1), получим [9, 13]:

$$|Z| = \frac{2}{N_0} \left| \int_0^{T_{\text{и}}} Y(t) \exp \{ -j2\pi f_{\text{дц}} t \} \left(\exp \left\{ -\frac{\pi}{T^2} (t - t_{\text{ц}})^2 \right\} - \sum_{k=1}^{N_{\text{и}}} \sum_{i=1}^{\infty} Y(t) D_{iK} S_{iK} \exp \left\{ -\frac{\pi}{T^2} (t - t_{iK})^2 \right\} \exp \{ j2\pi (f_{\text{дц}} - f_{\text{ди}}) t \} \right) dt \right| \begin{array}{l} \geq \\ < \end{array} \begin{array}{l} \text{да} \\ \text{нет} \end{array} Z_0. \quad (7)$$

Структурная схема оптимального обнаружителя представлена на рис. 1.

Весовой вектор $R_0(t)$ определяется из условия расположения максимума сигнала цели в центре интервала, равного времени наблюдения, для каждого доплеровского фильтра с центральной частотой настройки $f_{\text{ф}} = f_{\text{дц}}$. Этим обеспечивается максимальное использование энергии сигнала цели. Вследствие того, что в режиме обзора азимут цели неизвестен, положение полезного сигнала во времени имеет случайный характер.

Для пояснения принципа работы устройства весовой обработки (УВО) рассмотрим зависимости нормированного по амплитуде весового вектора оптимальной обработки $R_0(t)$ во времени t , приведенные на рис. 2 (U_3 — сигнал, отраженный от земной поверхности; N — число элементарных отражателей).

Графики построены для различных радиальных составляющих скорости цели и разного числа элементарных отражателей земной поверхности N , размещаемых равномерно по три отражателя на полосу пропускания каждого фильтра в пределах не менее пяти эффективных размеров ДН антенны по азимуту.

При радиальной скорости цели $V_{\text{ц}} = 0$ максимумы сигналов цели и помехи совпадают (см. рис. 2). Поэтому возможность обнаружения цели определяется разностью амплитудного контраста полезного сигнала и помеховых отражений. При увеличении $V_{\text{ц}}$ максимум сигнала цели смещается во времени относительно t_3 , поэтому после домножения на весовые коэффи-

коэффициенты увеличивается асимметрия положительных и отрицательных областей преобразованного сигнала цели, что приводит к возрастанию сигнала цели на выходе фильтра. Следовательно, при возрастании $V_{ц}$ отношение „сигнал/помеха“ на выходе системы обработки увеличивается.

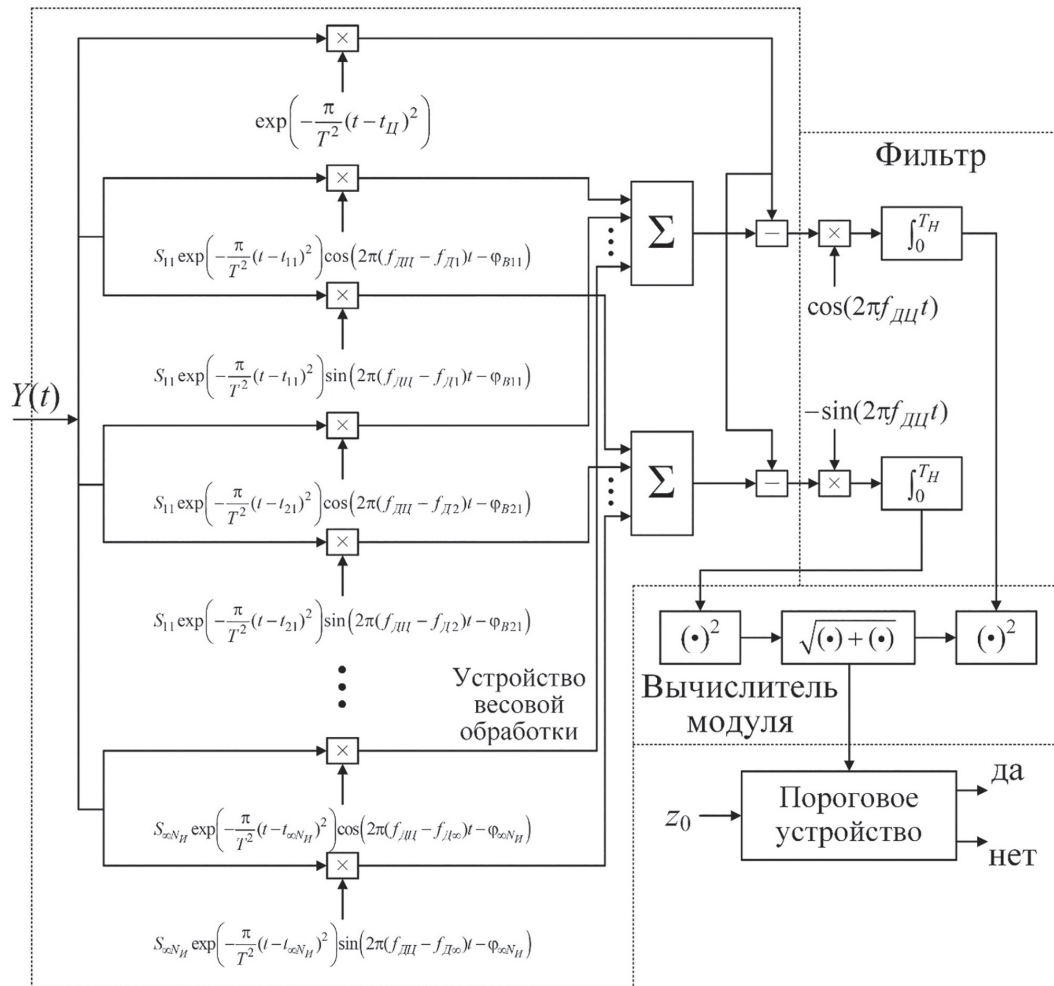


Рис. 1

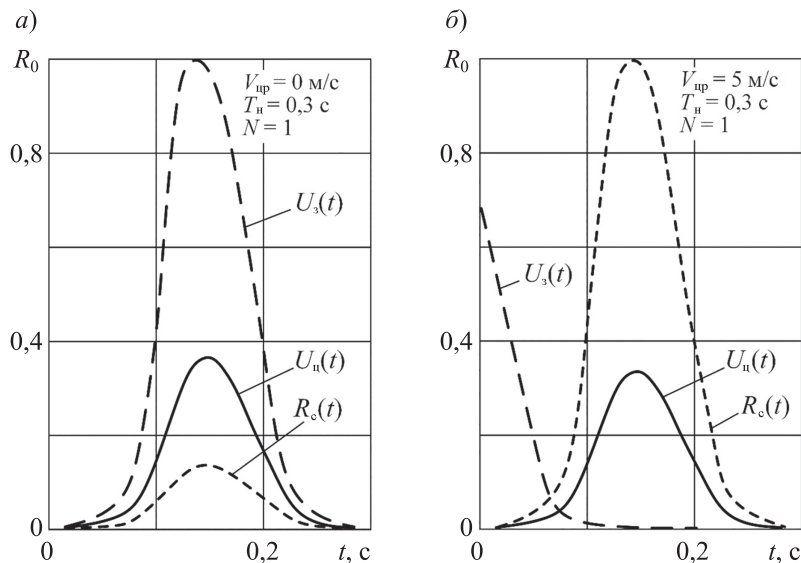


Рис. 2

При $V_{ц} \geq 8-10$ м/с максимумы полезного и помехового сигналов будут разнесены на величину, большую эффективной длительности отраженного сигнала T , и окажут незначительное влияние друг на друга. Обработка становится согласованной со структурой сигнала, отраженного от цели.

Для расчета весового вектора $R_0(t)$ согласно (3) необходимо решить систему бесконечного числа уравнений и найти S_i , что требует огромных вычислительных затрат и определяет невозможность практической реализации. Физически это означает учет в $R_0(t)$ влияния всех отражателей земной поверхности, разнесенных по азимуту. Однако известно [5, 6], что наибольшее влияние на характеристики обнаружения оказывает составляющая помехового сигнала, отраженная от точки земной поверхности, имеющая тот же доплеровский сдвиг частоты, что и у сигнала цели. Это объясняется наибольшей корреляцией сигнала ДЦ с данной составляющей помехового сигнала.

Следовательно, если настроить $R_0(t)$ на подавление лишь составляющей помехового сигнала, отраженного от отражателя земной поверхности, с той же частотой, что и у сигнала цели, то выражение (3) существенно упростится и не будет представлять больших вычислительных сложностей. Квазиоптимальный обнаружитель с весовым вектором, обеспечивающим подавление лишь одной составляющей помехового сигнала, будет являться одноточечным компенсатором помех.

Для расчета потенциальных характеристик обнаружения воспользуемся методикой, изложенной в [2, 4]. В соответствии с ней параметр обнаружения Q оптимального алгоритма (7) имеет вид:

$$Q = D_{ц} \int_0^{T_{ц}} U_{ц}(t) R^*(t) dt = \frac{2D_{ц}}{N_0} \left(\int_0^{T_{ц}} \exp \left\{ -2 \frac{\pi}{T^2} (t - t_{ц})^2 \right\} dt - \sum_{k=1}^{N_{и}} \sum_{i=1}^{\infty} Y(t) D_{iK} S_{iK} \int_0^{T_{и}} \exp \left\{ -\frac{\pi}{T^2} ((t - t_{ц})^2) \right\} \exp \{ j 2 \pi (f_{дц} - f_{ди}) t \} dt \right). \quad (8)$$

Вероятность правильного обнаружения $P_{по}$ связана с Q зависимостью:

$$P_{по} = \frac{1}{P_{лт}^{1+Q/2}}, \quad (9)$$

где $P_{лт}$ — условная вероятность ложной тревоги.

Будем считать цель обнаруженной, если при $P_{лт} = 10^{-6}$ вероятность правильного обнаружения составит $P_{по} = 0,5$ [2, 5].

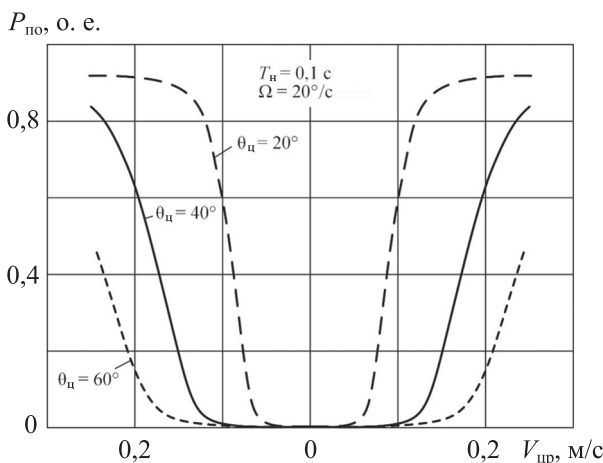


Рис. 3

Потенциальные характеристики обнаружения рассчитывались по соотношениям (8) и (9). В качестве исходных данных использовались характеристики РЛС, обеспечивающие отношение „сигнал/шум“ 25 дБ и „помеха/шум“ в элементе разрешения — 35 дБ, действующее на входе системы обработки. Принималось: $\theta_0 = 2^\circ$, $P_{лт} = 10^{-6}$. Интервал $[0, T_{и}]$ располагался симметрично относительно максимума сигнала цели.

На рис. 3 представлены зависимости вероятности правильного обнаружения $P_{по}$ от радиальной составляющей скорости цели $V_{ц}$ при различных $\theta_{ц}$. При $V_{ц} = 0$ практически нулевое значение $P_{по}$ объясняется подавлением слабого сигнала цели мощным помеховым сигналом на той же частоте ($f_{ди} = f_{дц}$).

При увеличении сигнал цели сдвигается относительно помехового сигнала по времени. Дальнейшее увеличение $V_{ц}$ приводит к незначительному изменению $P_{по}$, поскольку сигналы помехи и цели уже разнесены по времени и частоте, и обнаружение сигнала цели происходит практически на фоне внутренних шумов приемника.

Увеличение интервала наблюдения сопровождается ростом энергии сигнала цели и сужением полосы пропускания фильтра, а следовательно, улучшением характеристик обнаружения. Так, увеличение времени накопления с 0,1 до 0,5 с приводит к снижению $V_{цmin}$ ($P_{по} = 0,5$; $P_{лт} = 10^{-6}$) с 1,9 до 1,8 м/с.

Анализ зависимостей $P_{по}$ от угловой скорости сканирования ДНА по азимуту (рис. 3) показывает, что при обнаружении малоскоростных движущихся целей существуют оптимальные значения скорости сканирования, при которых $P_{по}$ максимальна. Это связано с тем, что при уменьшении $\Omega_{ск}$ возрастает эффективная длительность пачки отраженных импульсов T , поэтому при фиксированном значении T_n частотно-временные различия практически пропадают. При увеличении $\Omega_{ск}$ длительность пачки импульсов, а следовательно, и энергия полезного сигнала уменьшаются.

Максимум $P_{по}$ с ошибкой не более 10 % при заданном T_n наблюдается при согласованности T и T_n ($T \approx T_n$). Следовательно, оптимальной для заданного T_n является скорость сканирования ДН антенны $\Omega_{опт}$, при которой длительность пачки сигналов, отраженных от цели, согласована со временем наблюдения.

С использованием выражений (7) и (8) построены зависимости минимальной радиальной составляющей скорости обнаруживаемой цели $V_{цmin}$ от азимута цели $\theta_{ц}$ при различных T_n (рис. 4). Из графиков следует, что при увеличении азимута цели с $\theta_{ц} = 20$ до 60° значение $V_{цmin}$ возрастает на 3–5,5 м/с.

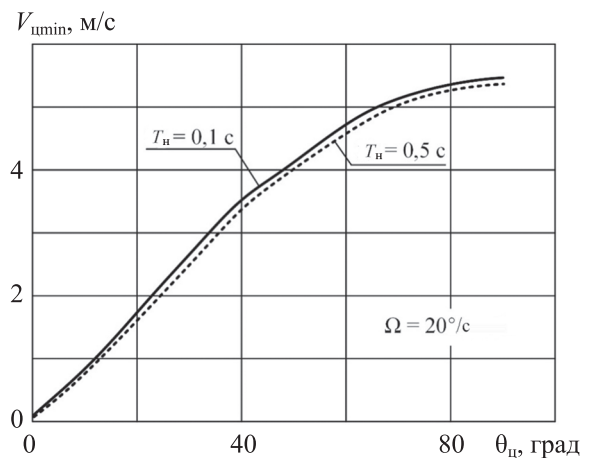


Рис. 4

На дальностях $D_{ц} = 75\text{--}90$ км обеспечивается обнаружение целей при $V_{рц} = 1,5$ м/с на фоне подстилающей поверхности типа „луг, лето“ с $P_{по} = 0,5\text{--}0,7$ при $\theta_{ц} = 30^\circ$ и $T_n = 0,1$ с.

Проведенные исследования показали, что оптимальный обнаружитель ДЦ с частотно-временным разделением полезных и помеховых сигналов обеспечивает обнаружение ДЦ, движущихся с радиальными составляющими скоростей сближения 1,5 м/с и более.

Выводы

1. Синтезирован оптимальный алгоритм обнаружения ДЦ с частотно-временным разделением полезных и помеховых сигналов, который заключается в знакопеременном преобразовании принимаемых сигналов во времени и компенсации помехового сигнала при накоплении в фильтре.
2. Оценено влияние радиальной скорости на возможность обнаружения цели. Показано, что возможность обнаружения неподвижной цели определяется разностью полезного сигнала и отражений от подстилающей поверхности. С увеличением скорости обработка становится согласованной с сигналом, отраженным от цели.
3. Проведена оценка зависимостей $P_{по}$ от угловой скорости сканирования ДН антенны. Установлено, что при обнаружении малоскоростных движущихся целей существуют оптимальные скорости сканирования, при которых значение $P_{по}$ максимально.
4. Показано, что оптимальный обнаружитель ДЦ с частотно-временным разделением полезных и помеховых сигналов обеспечивает обнаружение ДЦ, движущихся с радиальными составляющими скоростей сближения 1,5 м/с и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. Дулевич В. Е. Теоретические основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1978.
3. Школьный Л. А. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрование радиолокационных изображений. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008. 531 с.
4. Бакулев П. А., Степин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
5. Справочник по радиолокации / Пер. с англ.; под общей ред. К. Н. Трофимова. М.: Сов. радио, 1978.
6. Обработка сигналов в многоканальных РЛС / Под ред. А. П. Лукошкина. М.: Радио и связь, 1983. 328 с.
7. Крамер Г. Математические методы статистики / Пер. с англ.; под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Мир, 1975. 648 с.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 560 с.
9. Акиншин Н. С., Петешов А. В., Румянцев В. Л., Хомяков К. А. Адаптивные алгоритмы оптимальной фильтрации сигнала // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 69–79.
10. Кошелев В. И., Белокуров В. А. Адаптивное обнаружение маневрирующих целей // Цифровая обработка сигналов. 2005. № 1. С. 41–46.
11. Страхова Л. А. Обнаружение сигнала движущейся цели на фоне пассивных помех с применением спектрального анализа // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1988. № 4. С. 8–15.
12. Быстров Р. П., Дмитриев В. Г., Потапов А. А., Соколов А. В. Проблемы радиолокационного обнаружения малоконтрастных объектов. Вопросы перспективной радиолокации. М.: Радиотехника, 2003. С. 20–48.
13. Зиятдинов С. И. Синтез дискретных фильтров методами инвариантных дифференциальных и интегральных уравнений // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, №5. С. 424–432.
14. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: ЗАО МАКВИС, 1998. 826 с.
15. Алешкин А. П., Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Леконцев Д. А. Обработка сигналов спутниковых навигационных систем с квадратурным уплотнением и частотным разделением // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 53, № 4. С. 261–267.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Львович Румянцев	— д.т.н., профессор; АО ЦКБА; начальник отдела; E-mail: vlroom@yandex.ru
Иван Александрович Ростовцев	— адъютант; Филиал Военной академии материально-технического обеспечения; E-mail: paii@mil.ru
Александр Николаевич Карпов	— аспирант; Филиал Военной академии материально-технического обеспечения
Дмитрий Витальевич Титов	— д.т.н., доцент; Юго-Западный государственный университет; профессор кафедры

Поступила в редакцию 09.11.2023; одобрена после рецензирования 17.01.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-Based Land Survey Radar Systems), Moscow, 2010, 680 p. (in Russ.)
2. Dulevich V. E. *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii* (Theoretical Foundations of Radar), Moscow, 1978. (in Russ.)
3. Shkolny L. A. *Radiolokatsionnyye sistemy vozduшной razvedki, deshifrovaniye radiolokatsionnykh izobrazheniy* (Aerial Reconnaissance Radar Systems, Decoding of Radar Images), Moscow, 2008, 531 p. (in Russ.)
4. Bakulev P. A., Stepin V. M. *Metody i ustroystva seleksii dvizhushchikhsya tseley* (Methods and Devices for Selecting Moving Targets), Moscow, 1986, 288 p. (in Russ.)
5. Skolnik M., ed., *Radar handbook*, McGraw-Hill, 1990.
6. Lukoshkin A. P., ed., *Obrabotka signalov v mnogokanal'nykh RLS* (Signal Processing in Multi-Channel Radars), Moscow, 1983, 328 p. (in Russ.)
7. Cramer H. *Mathematical Methods of Statistics*, Princeton University Press Princeton, 1946.
8. Ventzel E. S. *Teoriya veroyatnostey i yeye inzhenernyye prilozheniya* (Probability Theory and its Engineering Applications), Moscow, 1988, 560 p. (in Russ.)
9. Akinshin N. S., Peteshov A. V., Rumyantsev V. L., Khomyakov K. A. *News of Tula State University. Technical Sciences*, 2018, no. 9, pp. 69–79. (in Russ.)

10. Koshelev V. I., Belokurov V. A. *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2005, no. 1, pp. 41–46. (in Russ.)
11. Strakhova L. A. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, 1988, no. 4, pp. 8–15. (in Russ.)
12. Bystrov R. P., Dmitriyev V. G., Potapov A. A., Sokolov A. V. *Problemy radiolokatsionnogo obnaruzheniya malokontrastnykh ob"yektov. Voprosy perspektivnoy radiolokatsii* (Problems of Radar Detection of Low-Contrast Objects. Issues of Advanced Radar), Moscow, 2003, pp. 20–48. (in Russ.)
13. Ziatdinov S. I. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 5(62), pp. 424–432. (in Russ.)
14. Shirman Ya. D., ed., *Radioelektronnyye sistemy. Osnovy postroyeniya i teoriya* (Radioelectronic Systems. Fundamentals of Construction and Theory), Moscow, 1998, 826 p. (in Russ.)
15. Aleshkin A. P., Bakholdin V. S., Gavrilov D. A., Lekontsev D. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 4(53), pp. 261–267. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

Vladimir L. Rumiantsev	—	Dr. Sci., Professor; Central Design Bureau of Apparatus Engineering; E-mail: vlroom@yandex.ru
Ivan A. Rostovtsev	—	Military Academy of Logistics, Penza Branch; Adjunct; E-mail: paii@mil.ru
Alexander N. Karpov	—	Military Academy of Logistics, Penza Branch; Post-Graduate Student
Dmitriy V. Titov	—	Dr. Sci., Associate Professor; Southwest State University; Professor

Received 09.11.2023; approved after reviewing 17.01.2024; accepted for publication 16.04.2024

**MODELING PATTERNS OF SENSORY-MOTOR SKILLS FOR PROGRAMMING ROBOTS
IN CONTACT MANIPULATION TASKS****Waddah Ali, S. A. Kolyubin****ITMO University, St. Petersburg, Russia***s.kolyubin@itmo.ru*

Abstract. Learning from demonstration approach is gaining interest for programming robot sensory-motor skills. At the same time, most of the works are addressing manipulation scenarios with position-based control, while various application domains and work in dynamic environment require safe and stable physical interaction where assessing proper force/torque profile along motion is crucial. This study is aimed at developing experiment planning and data collection and processing procedure for training robot behavior priors for dynamic interaction tasks. We fuse motion capture and force-torque sensory data within robot-out-of-loop setting to train Gaussian Mixture Model/Gaussian Mixture Regression (GMM/GMR) model as a reference motion generator that takes time and material label as inputs and outputs predicted end-effector's pose, twist, and interaction wrench vectors. For the case-study we considered experiment setting of cutting three different materials like penoplex, cork, and PVC resulting in 120 demonstrations in total (40 for each material). Algorithms for data processing, GMM/GMR model training and verification have been introduced. We achieved RMSEs of 7.12 and 10.69 % for twist and pose predictions respectively and RMSE of 14.33 % for power estimates as a metric to illustrate how accurate twist-wrench correspondences have been captured by our model, which is important for interaction tasks.

Keywords: *learning from demonstration, robot skill transfer, contact manipulation, interaction dynamics, motion capture*

For citation: Waddah Ali, Kolyubin S. A. Modeling patterns of sensory-motor skills for programming robots in contact manipulation tasks. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 500–510 (in English). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-500-510.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАБЛОНОВ СЕНСОРНО-МОТОРНЫХ НАВЫКОВ ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ
РОБОТОВ В ЗАДАЧАХ КОНТАКТНОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ****Али Ваддах, С. А. Колюбин****Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия***s.kolyubin@itmo.ru*

Аннотация. Подход к обучению на основе демонстрации привлекает все больше внимания при программировании сенсорно-моторных навыков роботов. В то же время большинство работ сосредоточено на сценариях с управлением по положению, тогда как различные прикладные области и работа в динамической среде требуют безопасного и устойчивого физического взаимодействия, где критически важно оценивать соответствующий профиль силы/момента контакта вдоль траектории. Разработана методика планирования экспериментов и сбора и обработки данных для обучения моделей, кодирующих сенсорно-моторные навыки динамического взаимодействия манипулятора с окружением. Для этих целей комплексированы данные, поступающие от системы оптического захвата движения и силомоментного датчика, измеряемые при выполнении человеком последовательности действий. Рассмотрен пример резки скальпелем различных материалов по заданным траекториям. В качестве генератора эталонного движения используется регрессионная модель на основе смеси гауссиан (GMM/GMR), на вход которой поступают метки времени и материала, а на выходе выводятся предсказанные значения векторов пространственного положения, скоростей и сил и моментов контакта инструмента. Проведено 120 экспериментов с тремя различными материалами (пеноплекс, пробка и ПВХ) — по 40 на каждый материал. Представлены алгоритмы для обработки данных, результаты обучения модели и ее верификации. Для предсказаний скорости

и положения инструмента получены значения среднеквадратического отклонения соответственно 7,12 и 10,69 %, а также 14,33 % — для мощности как метрики точности соответствия профиля сил и моментов контакта вдоль движения.

Ключевые слова: обучение на основе демонстрации, передача сенсорно-моторных навыков, контактная манипуляция, захват движения, GMM/GMR модели

Ссылка для цитирования: Ваддах Али, Колюбин С. А. Моделирование шаблонов сенсорно-моторных навыков для программирования роботов в задачах контактного манипулирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 500–510. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-500-510.

Introduction. Learning from demonstration (LfD) is a promising approach to transfer safe and dexterous manipulation skills from human to robots, which is of even higher importance for contact-rich tasks, where coordination between the applied interaction forces/torques and manipulation trajectories is essential. This work is aimed at developing experiment planning and data collection and processing procedure for training robot behavior priors for such tasks.

A recent comprehensive review on transfer learning in robotics, which includes approaches taxonomy, trends and challenges description as well as analysis of more than 150 papers is presented in [1].

Recording and processing data from demonstrations experiments is the first step to encode prior knowledge on human sensory-motor skills that will be used later as behavior priors for accelerating the LfD process [2, 3]. There are many recent works on that subject focusing mostly on pick-and-place tasks, where kinesthetic data limited to position recordings and robot-in-the-loop (teleoperated or hand-guided in admittance control mode) demos are good enough.

In [4], a novel approach to robot learning from human physical feedback is introduced. This method characterizes human skills and tasks by breaking them down into object-centric sub-tasks and interpreting physical interventions from human in relation to specific objects. The task is to adjust nominal behavior priors from corrective movements (perturbations) initiated by human, therefore unlike our approach there were no complete movement skill demonstrations recorded and the task was limited to imitation of trajectories, while the interaction wrench was not considered.

In [5], a hybrid learning and optimization framework for mobile manipulators for complex and physically interactive tasks was proposed. The framework exploits an admittance-type physical interface to obtain intuitive and simplified human demonstrations and Gaussian Mixture Model (GMM)/Gaussian Mixture Regression (GMR) to encode and generate the learned task requirements in terms of position, twist, and wrench profiles. Unlike our proposed approach, this work adopted robot-in-the-loop scenario and uses the resulted behavior priors as constraints for optimization of Cartesian impedance controlled for a specified robotic platform which limits the applicability of the study to address a very specific task with special conditions.

Since we target interaction control scenarios over larger workspaces like material cutting, a novel robot-out-of-loop (ROOL) sensory setup enabling simultaneous motion capture (MoCap) and interaction force-torque (FT) data recording have been designed.

Proposed approach provides a number of advantages:

- 1) high-accuracy richer sensory data to capture end-effector's 6D pose as well as twist and wrench correspondences to encode by behavior priors' models;
- 2) better safety and more natural human movements during demonstrations, because there are no constraints due to kinematic singularities and robot inertia for physically operated arms or limited field-of-view and latency during teleoperation;
- 3) wider workspace not limited by robot reachability constraints.

To collect training datasets, we planned and conducted a series of cutting experiments with three different materials like penoplex, cork, and PVC resulting in 120 demonstrations in total (40 for each material).

GMM/GMR model have been employed as a manipulation skill encoder and behavior prior generator. It accepts time and material labels as inputs and outputs predicted end-effector's trajectory

(end-effector's pose and twist) with interaction wrench aligned along the movement. Models have been trained using expectations maximization algorithm with log-likelihood as a loss function.

The rest of the paper is organized in the following way. At first, we formulate the problem of behavior model training from ROOL demonstration data as a general optimization task adapted for our case study. Next, we describe the experimental setup design including custom tooling and optimal sensory infrastructure configuration. After we describe the MoCap and FT data processing approaches followed by model structure and training algorithm explanation. Finally, we analyze obtained results to justify training data quality, convergence of the training process, and consistency of the learned manipulation skills with human demonstrations and conclude our work with discussion on future steps of how obtained results can be incorporated to robot interaction control systems.

Problem Statement. Fig. 1 illustrates the suggested approach for training behavior priors' generator from ROOL demonstrations and further use of this data within interaction control scenarios. So, the core problem here is generator's parameters training.

We introduced the GMM/GMR model [6–8] of components as a generator due to its adaptability in capturing intricate structures, handling nonlinear relationships between inputs and outputs, effectively estimating continuous variables from complex input-output mappings and the simplicity in hyperparameter adjustment as we only need to fine-tune the number of Gaussian components.

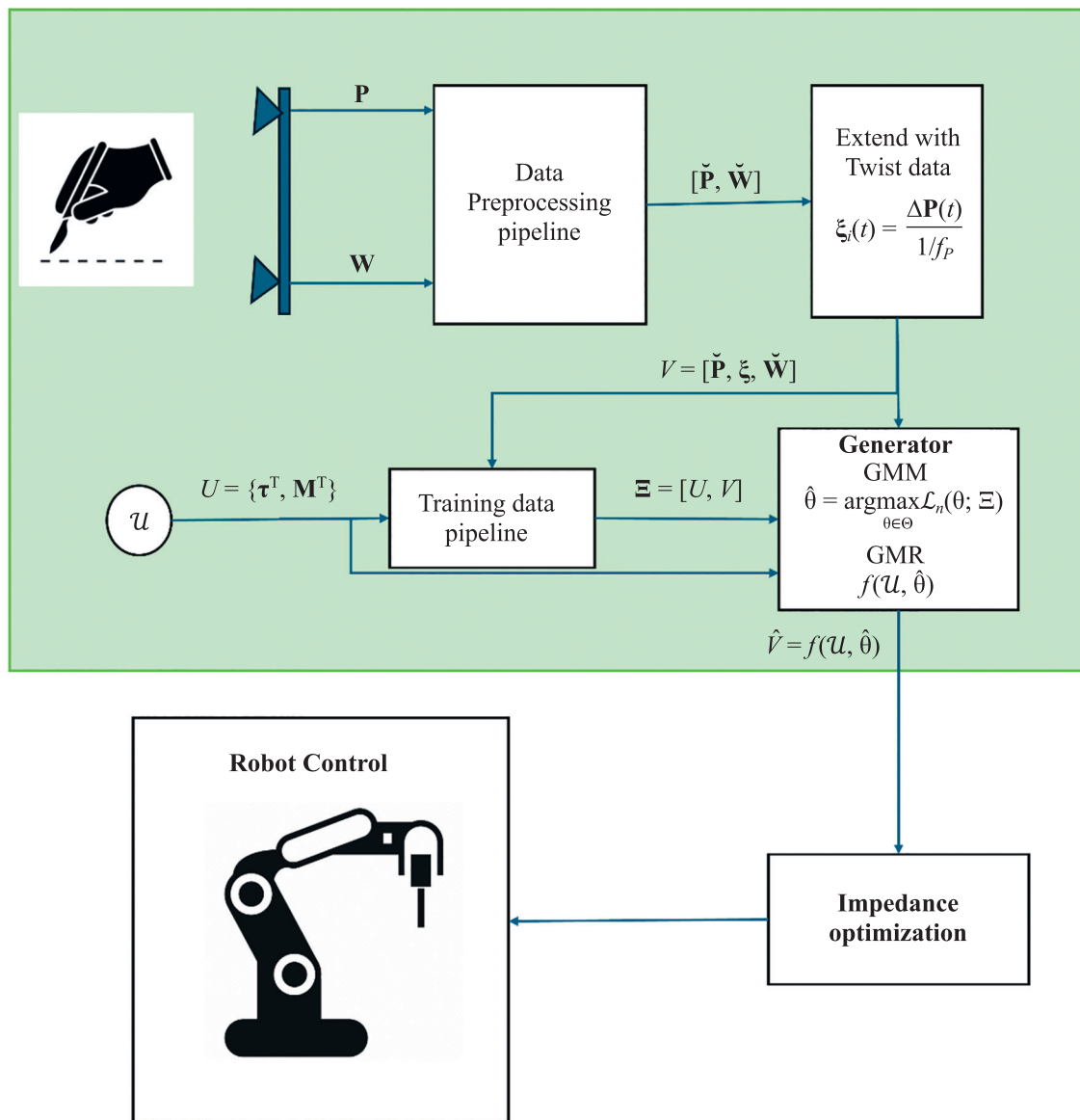


Fig. 1

We will refer to the GMM/GMR model parameters as $\theta = [\mu, \Sigma, \pi]$, where $\mu \in R^{K \times D}$ is the means of Gaussians vector, $\Sigma \in R^{K \times D \times D}$ is the covariance matrix, and $\pi \in R^K$ is the mixing weights that indicate how much each Gaussian component contributes to the model.

Then, generator training from a given pair of input-output data $\Xi = [U, V]$ can be formalized as optimization problem:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}^* &= \underset{\hat{\theta}}{\operatorname{argmin}} \|V - \hat{V}\|, \text{ s. t.} \\ 0 &\leq \pi_k \leq 1; \Sigma_k \pi_k = 1, V_i^T \Sigma_k V_i > 0, \\ &V_i^T \Sigma_k V_i > 0, \end{aligned}$$

where V and $\hat{V}$ are recorded and predicted by the model $f(U, \hat{\theta})$ output values respectively given inputs U , V_i is i -th column of V , Σ_k is k -th covariance matrix from Σ , $\hat{\theta}^*$ is the vector of desired values of model parameters' estimates that minimize the error between the desired output values.

Experimental setup. The experimental setup is depicted at Fig. 2. Here we introduce the following frames: stationary base frame $\{B\}$ and two moving tool-attached frames $\{P\}$ for scalpel and $\{W\}$ for FT sensor with both origins located at the tool central point (TCP, we select it at the scalpel's blade tooltip), but different orientations.

The OptiTrack system with 8 cameras, positioned around the working space in a way that tool-attached markers are visible along its entire movement range by most of the cameras, was calibrated to capture the central area among all cameras. The base frame $\{B\}$ was set on a fixed table in the center to guarantee precise capturing measurements for the frames $\{P\}$ and $\{W\}$.

The FT sensor was attached to the scalpel through a custom-designed adapter consisting of two parts: a grip attached to the back of the FT sensor, held by a human hand, and a scalpel handler fastening the scalpel to the frontal side of the FT sensor. Eight markers were attached to the adapter in a way to ensure distribution along the entire body for better tracking accuracy.

Within this experimental setup, we introduced three different materials (cork — CRK, penoplex — PNX, and PVC). To ensure better generalization capabilities of the GMM/GMR, while still capturing shape preservation capabilities we performed a series of straight line parallel cuts of different length, 40 trials for each material resulting in a total of 120 demonstrations.

Out of demonstrations we can record the following set of data: trajectory of coordinate frame $\{P\}$ with respect to the base frame $\{B\}$ registered by MoCap system and denoted as $\mathbf{P} = [\mathbf{X}^T, \mathbf{Y}^T, \mathbf{Z}^T, \mathbf{R}_x^T, \mathbf{R}_y^T, \mathbf{R}_z^T]$, and the wrench measurements expressed in coordinate frame $\{W\}$ and denoted as $\mathbf{W} = [\mathbf{F}_x^T, \mathbf{F}_y^T, \mathbf{F}_z^T, \mathbf{T}_x^T, \mathbf{T}_y^T, \mathbf{T}_z^T]$.

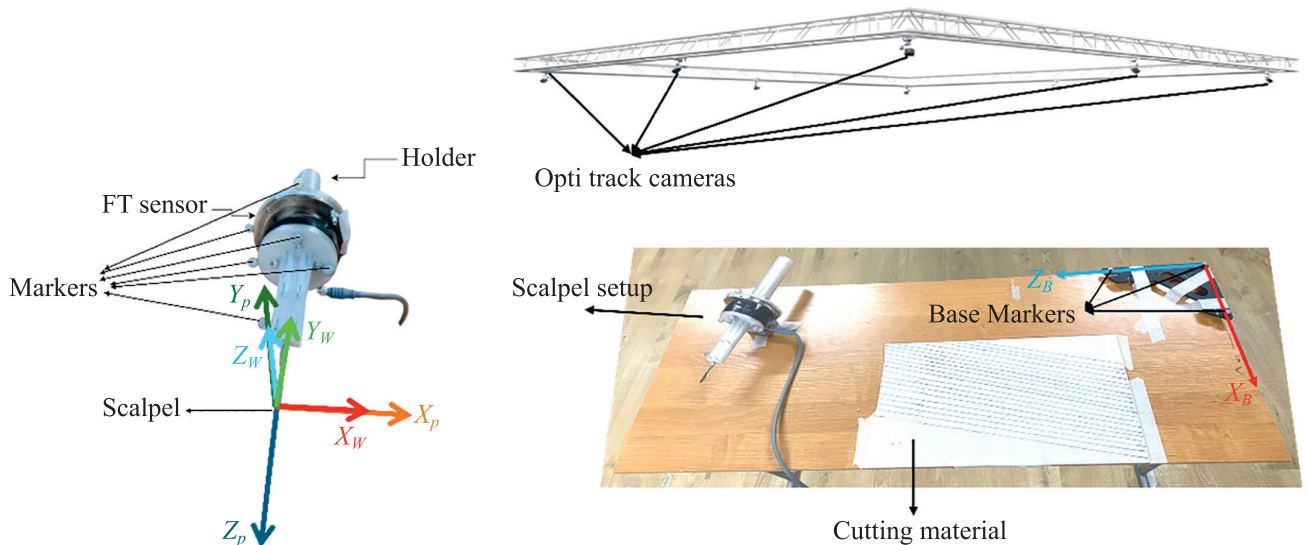


Fig. 2

Data processing. We introduced data processing procedure consisting from three steps.

1. Cutting phase slicing. Recorded data contains three phases: reaching, cutting and releasing. Since we are interested in training cutting skill in particular, we sliced entire sequence and extracted only data corresponding to that stage by detecting, when absolute value of contact forces $\mathbf{F}_x^T, \mathbf{F}_z^T$ change above a specified threshold (see Fig. 3: red is trajectory on X, Y, Z and green is F_x, F_y, F_z respectively).

2. Data imputation. We applied forward and backward fill techniques to guarantee the absence of missing values in recorded data.

3. Data filtering. As obtained position data are for cutting straight lines, we filtered outliers by fitting recorded sequences by a linear regression (see Fig. 4):

$$\check{\mathbf{Y}} = \alpha_y + \beta_y \mathbf{X},$$

where $\check{\mathbf{Y}}$ is the fitted value for $\mathbf{Y}$ measurements, $\alpha_y = \bar{\mathbf{Y}} - \beta_y \bar{\mathbf{X}}$, $\beta_y = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{\mathbf{X}})(Y_j - \bar{\mathbf{Y}})}{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{\mathbf{X}})^2}$, $\bar{\mathbf{X}}$ and $\bar{\mathbf{Y}}$ are

mean values, N is the number of samples in the measurement's sequence. We fit Z measurements the same way.

We extended our training data by calculating from recorded MoCap trajectory data $\mathbf{P}$ the associated twist $\xi = [\mathbf{V}_x^T, \mathbf{V}_y^T, \mathbf{V}_z^T, \boldsymbol{\omega}_x^T, \boldsymbol{\omega}_y^T, \boldsymbol{\omega}_z^T]$. It was done by numeric differentiation:

$$\xi_i(t) = \frac{\Delta \mathbf{P}(t)}{1/f_p},$$

where ξ_i is the i -th column of ξ , $\xi_i(0) = 0$, $\Delta \mathbf{P}(t)$ is the change in position between two consecutive measurements, f_p is the measurements frequency.

To filter wrench measurements $\mathbf{W}$ we applied Exponential Moving Average (EMA) filter, which is a type of infinite impulse response filter that applies weighting factors which decrease exponentially (see Fig. 5):

$$W_i^t = \alpha_{\text{EMA}} W_i^t + (1 - \alpha_{\text{EMA}}) W_i^{t-1},$$

where W_i is the i -th column of $\mathbf{W}$, W_i^t is the exponential moving average value of W_i at time t , $\alpha_{\text{EMA}} = \frac{2}{n_s + 1}$ is the filter's smoothing factor with n_s being the desired number of periods or the span of

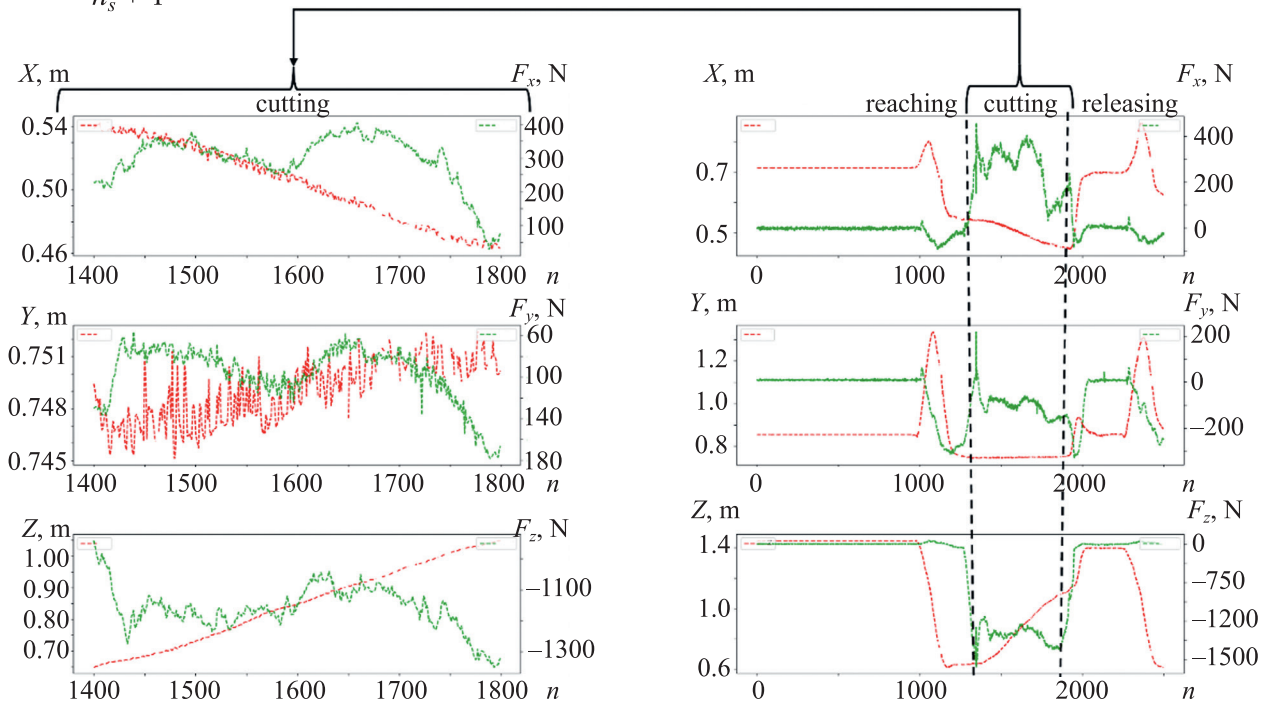


Fig. 3

the EMA. The choice of n_s affects the sensitivity of the EMA to changes in the data: a smaller n_s makes the EMA more responsive to new data, while a larger n_s makes smoothing stronger.

Model training. We define generator input as a concatenation of time and material label sequences $\mathbf{U} = [\boldsymbol{\tau}^T, \mathbf{M}^T] \in \mathcal{R}^{2 \times N}$ and the output is defined as $\mathbf{V} = [\tilde{\mathbf{P}}, \boldsymbol{\xi}, \tilde{\mathbf{W}}] \in \mathcal{R}^{18 \times N}$.

GMMs assume that the training data $\Xi = [\mathbf{U}, \mathbf{V}]$ are generated from a mixture of several Gaussian distributions, each characterized by parameters mean μ_k covariance Σ_k , and a mixing coefficient π_k which represents the weight of the k -th Gaussian component in the mixture. Then, the model training problem formulated above can be resolved by applying expectation maximization algorithm with log-likelihood maximization criteria:

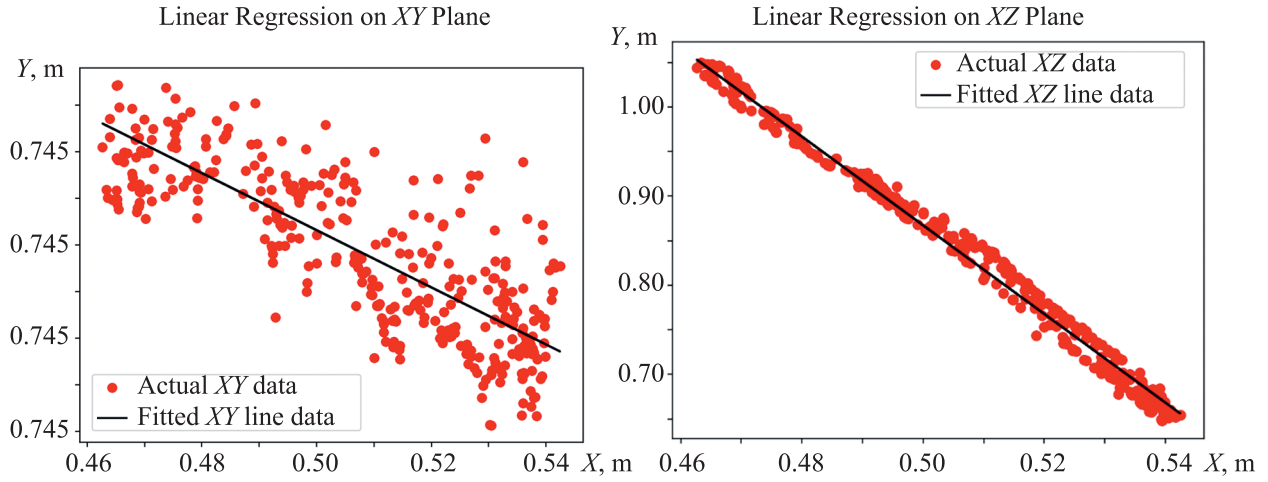


Fig. 4

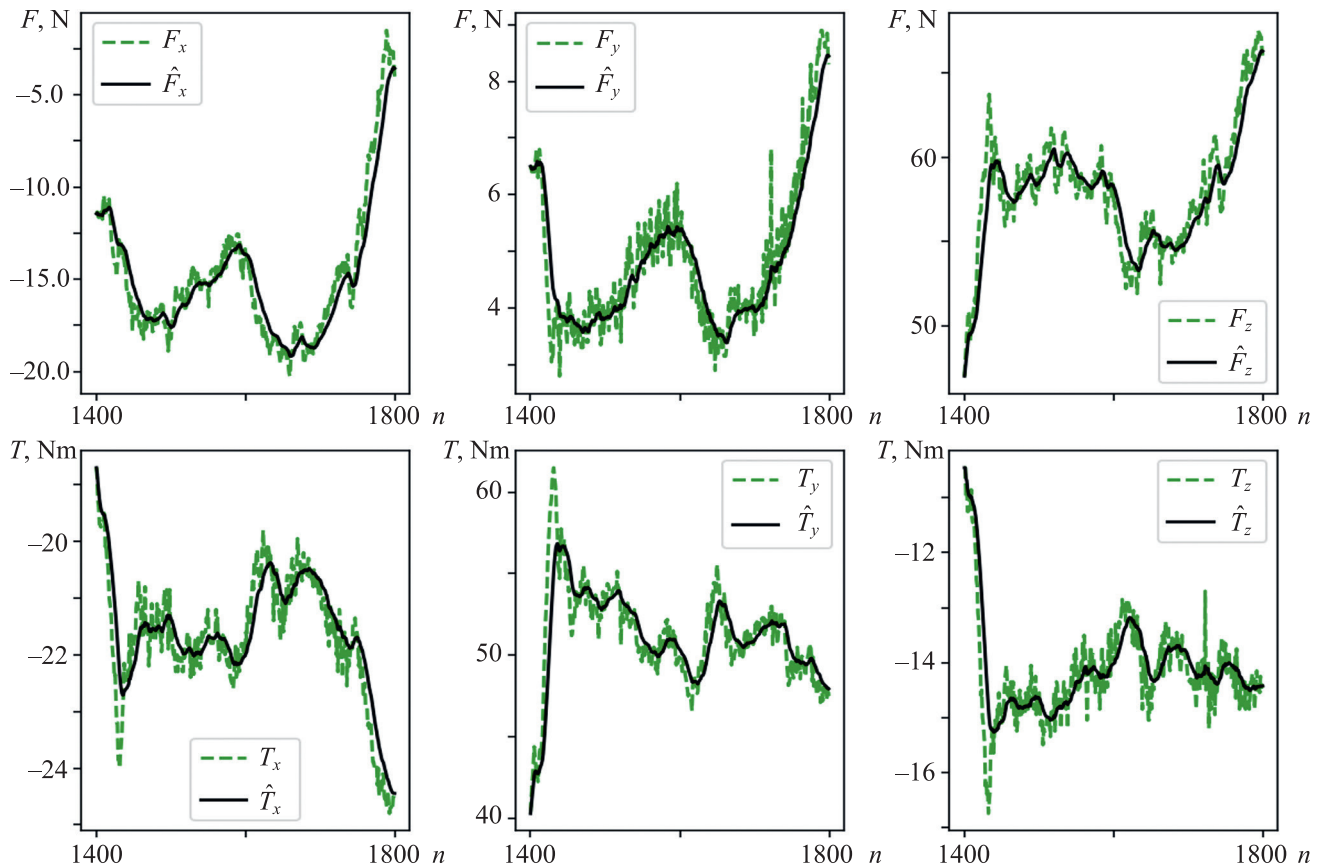


Fig. 5

$$\hat{\theta} = \underset{\theta \in \Theta}{\operatorname{argmax}} \mathcal{L}(\theta; \Xi),$$

where log-likelihood cost function

$$\mathcal{L}(\theta; \Xi) = \log(P(\Xi, \rho|\theta)) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K I(\rho_n = k)(\log(\pi_k) + \log(N(\Xi_n|\mu_k, \Sigma_k))),$$

ρ_n is a latent variable indicating the component that generated the (n_{th}) data point, $(I(\rho_n = k))$ is an indicator function that is 1 if $(\rho_n = k)$ and 0 otherwise, $(N(\Xi_n|\mu_k, \Sigma_k))$ is the probability density of (Ξ_n) under the Gaussian distribution with parameters (μ_k) and (Σ_k) .

The algorithm consists of two steps. At the expectation step we compute the expected value of $\mathcal{L}(\theta; \Xi)$

$$E_{Z|\Xi}[\mathcal{L}(\theta; \Xi)] = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \gamma_{\rho_n}(k)(\log(\pi_k) + \log(N(\Xi_n|\mu_k, \Sigma_k))),$$

where $\gamma_{\rho_n}(k) = E[I(\rho_n = k)] = P(\rho_n = k|\Xi) = \frac{\pi_k N(\Xi_n|\mu_k, \Sigma_k)}{\sum_{k=1}^K \pi_k N(\Xi_n|\mu_k, \Sigma_k)}$ represents the posterior probability that the (n_{th}) data point was generated by the (k_{th}) component, given the current parameter estimates.

At the maximization step we maximize the expected complete log-likelihood obtained at the previous step with respect to parameters θ keeping $(\gamma_{\rho_n}(k))$ fixed.

So, we update parameters' estimates the following way:

$$\begin{aligned} \mu_k^{\text{new}} &= \frac{\sum_{n=1}^N \gamma_{\rho_n}(k) \Xi_n}{\sum_{n=1}^N \gamma_{\rho_n}(k)}, \\ \Sigma_k^{\text{new}} &= \frac{\sum_{n=1}^N \gamma_{\rho_n}(k) (\Xi_n - \mu_k^{\text{new}})(\Xi_n - \mu_k^{\text{new}})^T}{\sum_{n=1}^N \gamma_{\rho_n}(k)}, \\ \pi_k^{\text{new}} &= \frac{\sum_{n=1}^N \gamma_{\rho_n}(k)}{N}. \end{aligned}$$

Estimates convergence is assessed based on the change in log-likelihood between successive iterations. Specifically, the algorithm is considered to have converged when the change in log-likelihood is below a predefined tolerance level, i.e.,

$$\Delta \mathcal{L} = |\mathcal{L}(\theta^{(t+1)}; \Xi) - \mathcal{L}(\theta^{(t)}; \Xi)| < \alpha,$$

where: $\theta^{(t)}$ and $(\theta^{(t+1)})$ are the parameter sets from consecutive iterations (t) and $(t + 1)$ respectively.

Next, at the regression prediction step we calculate parameters of the GMR model out of GMM representation. At first, we decompose GMM parameters for input and output dimensions:

$$\mu_k = \begin{bmatrix} \mu_k^u \\ \mu_k^v \\ \mu_k^w \end{bmatrix}, \Sigma_k = \begin{bmatrix} \Sigma_k^{uu} & \Sigma_k^{uv} \\ \Sigma_k^{vu} & \Sigma_k^{vv} \end{bmatrix},$$

where $\mu_k^u \in \mathcal{R}^{\mathcal{D}_u}$, $\mu_k^v \in \mathcal{R}^{\mathcal{D}_v}$, $\Sigma_k^{uu} \in \mathcal{R}^{\mathcal{D}_u \times \mathcal{D}_u}$, $\Sigma_k^{vv} \in \mathcal{R}^{\mathcal{D}_v \times \mathcal{D}_v}$, $\Sigma_k^{vu} \in \mathcal{R}^{\mathcal{D}_v \times \mathcal{D}_u}$, $\Sigma_k^{uv} \in \mathcal{R}^{\mathcal{D}_u \times \mathcal{D}_v}$, for each component k , $\mu_k^{v|u} = \mu_k^v + \Sigma_k^{vu} (\Sigma_k^{uu})^{-1} (u - \mu_k^u)$, $\Sigma_k^{v|u} = \Sigma_k^{vv} - \Sigma_k^{vu} (\Sigma_k^{uu})^{-1} \Sigma_k^{uv}$.

Then, we calculate the predicted output as

$$\hat{v} = \gamma_p(K) u \mu_k^{v|u},$$

where $\gamma_p(K)u = \frac{\pi_k N(\mathcal{U}; \mu_k^u, \Sigma_k^{uu})}{\sum_{k=1}^K \pi_k N(\mathcal{U}; \mu_k^u, \Sigma_k^{uu})}$ is the responsibility.

Training results. Figures 6–9 illustrate the resulted generated trajectory-wrench data by GMM/GMR compared to expected values. Fig. 6 — expected vs generated cutting trajectories on XZ plane using trained GMM/GMR for 3 different materials: *a* — cork, *b* — PVC, *c* — PNX. Fig. 7 — generated from GMM/GMR vs Expected Wrench data for cork; Fig. 8 — for penoplex; Fig. 9 — for PVC.

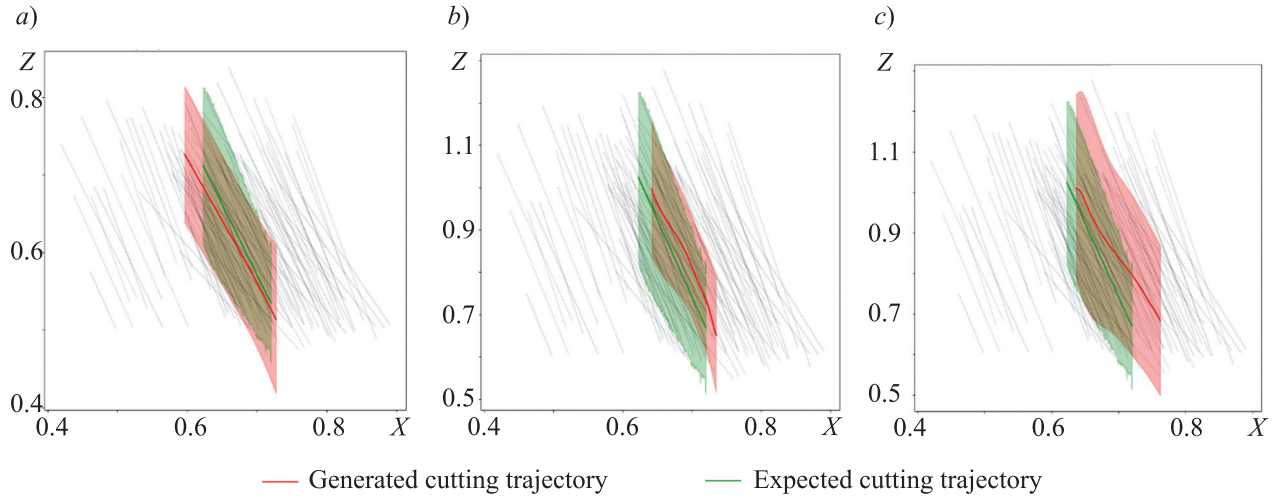


Fig. 6

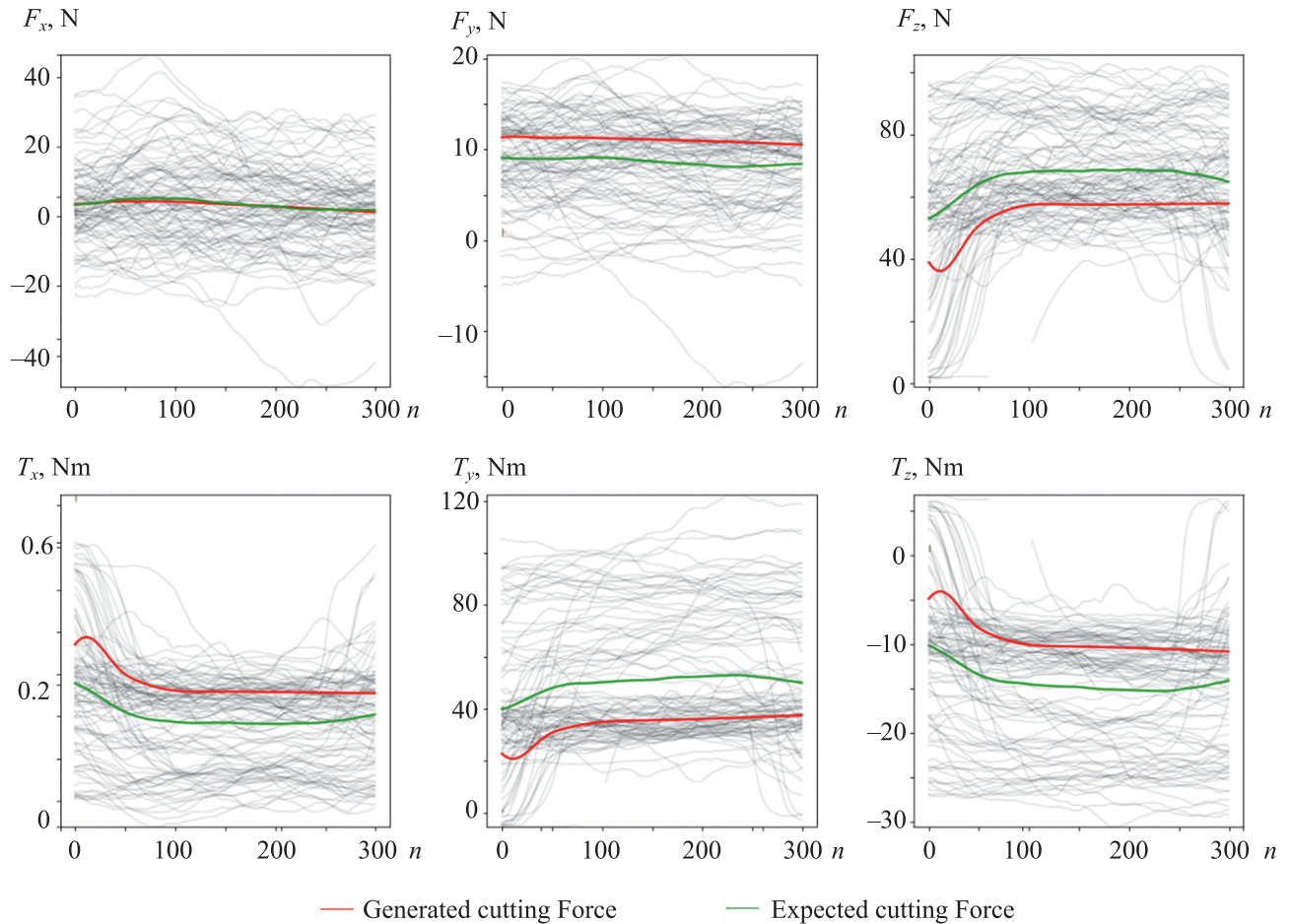


Fig. 7

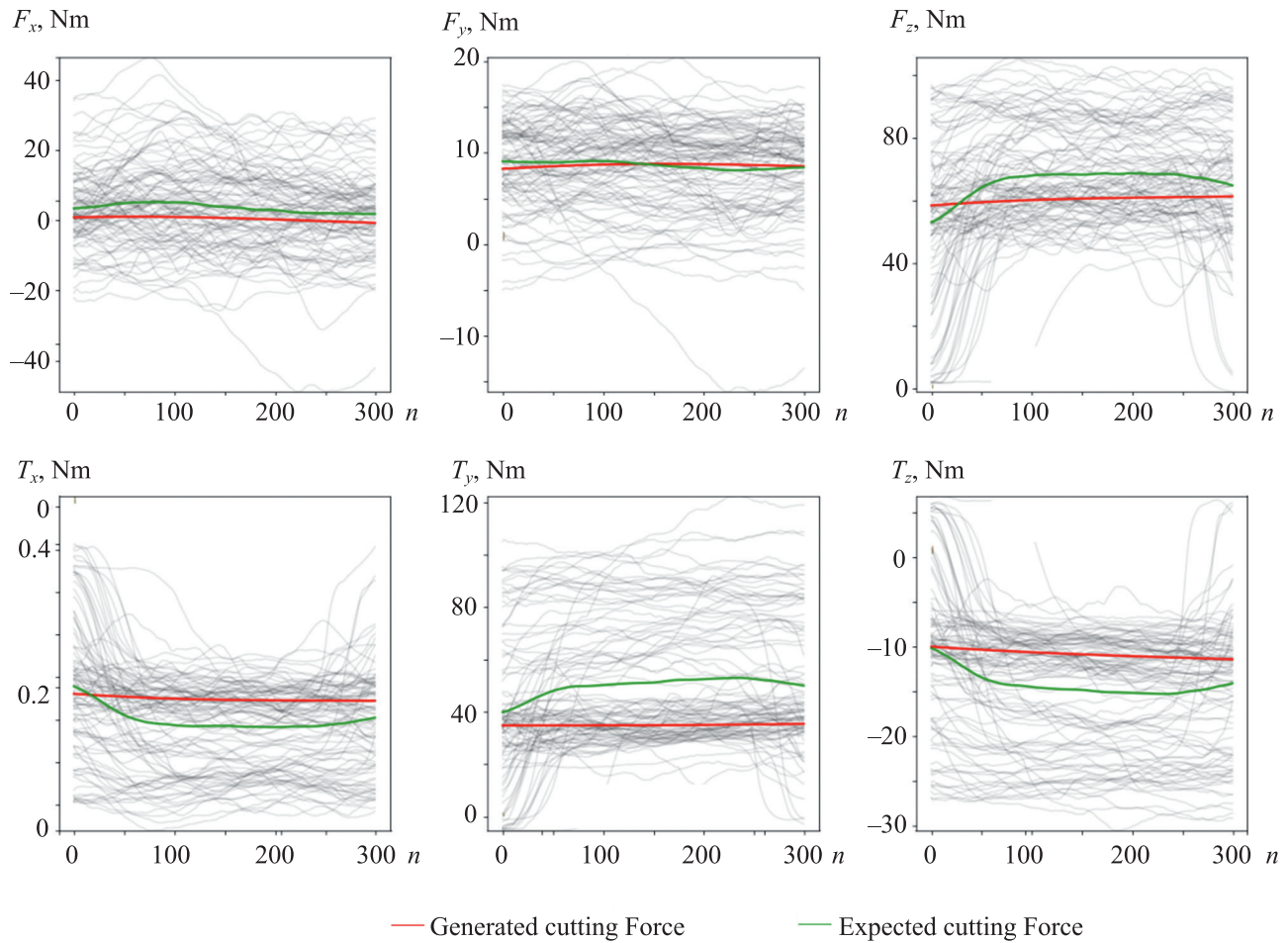


Fig. 8

Fig. 10 illustrates how model parameters (θ) converge to fit the training trajectory-wrench data (Ξ) using change in log-likelihood criteria ($\Delta\mathcal{L}$) which reaches the threshold ($\alpha = 10^{-5}$) within 100 epochs (training iterations).

The results of training the GMM/GMR model on the preprocessed collected data and evaluating the generated trajectory, twist and wrench data compared to expected means of training trajectory, twist and wrench data Ξ . To assess the model's performance, metrics such as root mean squared error (RMSE)) for Twist ξ and Position $\mathbf{P}$, was employed. These evaluation metrics are detailed in Table.

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{\mathcal{V}}_i - \hat{\mathcal{V}}_i)^2},$$

where $\mathcal{V}$ and $\bar{\mathcal{V}}$ denote predicted and averaged recorded values for $\mathcal{V} \subset [\mathbf{P}, \xi]$ at time t_i , ϵ refers to RMSE.

To evaluate the correspondence of the generated wrench to position data, we calculated the root mean squared error for the calculated power values from both predicted and expected Wrench and Position data ($\bar{\Pi}$, $\hat{\Pi}$), respectively. The results under different materials and cutting shapes are illustrated in Table:

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_i &= \bar{\mathbf{W}}_i \bar{\xi}_i, \\ \hat{\Pi}_i &= \hat{\mathbf{W}}_i \hat{\xi}_i, \end{aligned}$$

where i refers to axes (X, Y, Z)

$$\epsilon_{\Pi} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{\Pi}_i - \hat{\Pi}_i)^2}.$$

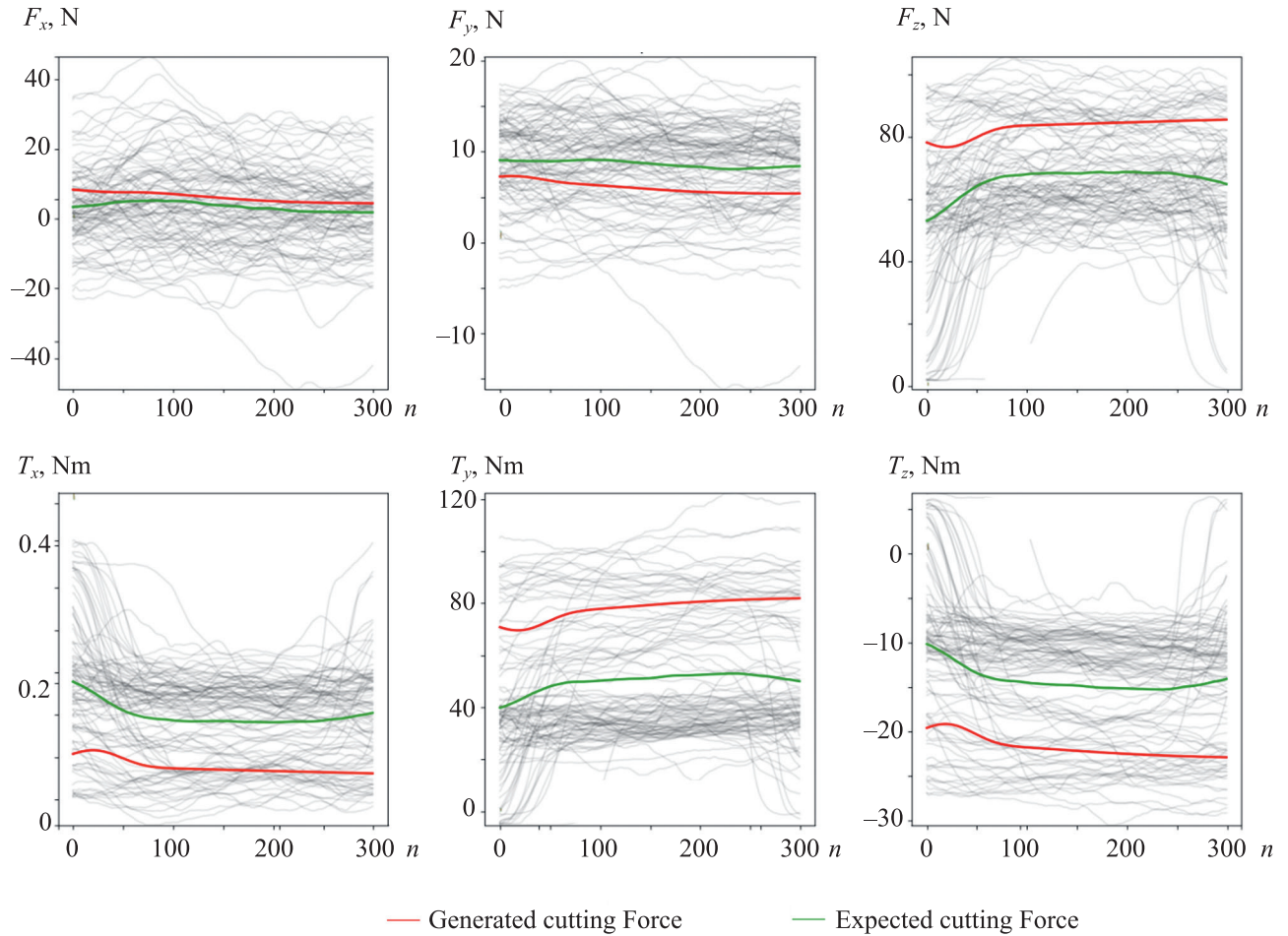


Fig. 9

RMSE Evaluation metric for training the GMM/GMR model for all data where ϵ_P , ϵ_ξ , ϵ_Π , represent the RMSE for Position, twist and Power, respectively

Material	ϵ_P , m	ϵ_ξ , ms	ϵ_Π , W
Cork	0.1165	0.0714	0.1408
Penoplex	0.1031	0.0711	0.1462
PVC	0.1012	0.0710	0.1430

Conclusions and future work. In this study, our primary objective was to train behavior priors models for robotic manipulation in interactive tasks, where both trajectory and force profiles hold significant importance. Initially, we conducted simultaneous collection of trajectory and force/torque data across multiple trials for the material cutting scenario. This involved designing a custom setup with a scalpel attached to an force-torque sensor to capture interaction wrench data and a motion capture system to record associated cutting trajectories. Subsequently, we underwent a data preprocessing phase to ready the dataset for training a GMM/GMR model, as a generator for behavior priors. We validated the convergence of the proposed model training and verified its performance on tests datasets, which demonstrated high accuracy. The novelty of this work is also in using GMM/GMR model with extended input that includes material labels, which opens opportunity for implementing an approach with a mixture of behavior prior generators specific for different materials. Future steps involve utilizing obtained behavior priors for regularization

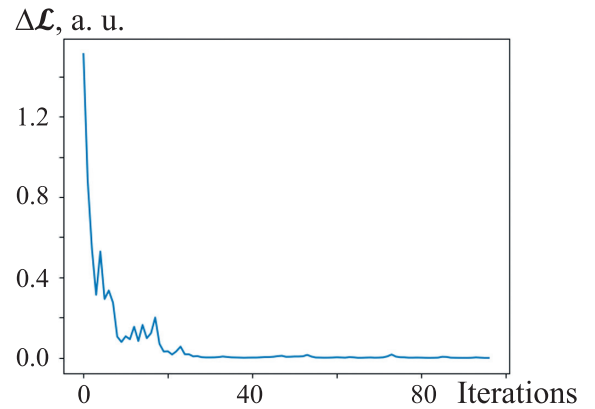


Fig. 10

to improve robot interaction control systems that can be based on Reinforcement Learning (RL) policies training or on optimization-based modern indirect force control algorithms similar to VIC (Variable Impedance Controllers) to train nonlinear functions for stiffness and damping tuning.

REFERENCES

1. Noémie J., Welle M. C., Gams A., Yao K., Fichera B., Billard A., Ude A., Asfour T., and Kragić D. *arXiv preprint arXiv:2311.18044*, 2023.
2. Jauhri S., Peters J., and Chalvatzaki G. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, no. 3(7), pp. 8399–8406.
3. Liu P., Zhang K., Tateo D., Jauhri S., Hu Zh., Peters J., and Chalvatzaki G. *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2023, pp. 9449–9456.
4. Shek A., Su B. Y., Chen R., and Liu Ch. *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2023, pp. 9910–9916.
5. Zhao J., Giammarino A., Lamon E., Gandarias J., De Momi E., and Ajoudani A. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, no. 7, pp. 1–8.
6. Calinon S. *Intelligent service robotics*, 2016, no. 9, pp. 1–29.
7. Fabisch A. *Journal of Open Source Software*, 2021, no. 6 (62), pp. 3054.
8. Sung H. G. *Gaussian mixture regression and classification*, Rice University, 2004.

DATA ON AUTHORS

- Waddah Ali** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Engineer
- Sergey A. Kolyubin** — Dr. Sci., ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Professor; Chief Researcher; E-mail: s.kolyubin@itmo.ru

Поступила в редакцию 15.03.2024; одобрена после рецензирования 28.03.2024; принята к публикации 16.04.2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Noémie J., Welle M. C., Gams A., Yao K., Fichera B., Billard A., Ude A., Asfour T., and Kragić D. Transfer Learning in Robotics: An Upcoming Breakthrough? A Review of Promises and Challenges // *arXiv preprint arXiv:2311.18044*. 2023.
2. Jauhri S., Peters J., and Chalvatzaki G. Robot learning of mobile manipulation with reachability behavior priors // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022 Vol. 3, N 7. P. 8399–8406.
3. Liu P., Zhang K., Tateo D., Jauhri S., Hu Zh., Peters J., and Chalvatzaki G. Safe reinforcement learning of dynamic high-dimensional robotic tasks: navigation, manipulation, interaction // *2023 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2023. P. 9449–9456.
4. Shek A., Su B. Y., Chen R., and Liu Ch. Learning from physical human feedback: An object-centric one-shot adaptation method // *2023 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2023. P. 9910–9916.
5. Zhao J., Giammarino A., Lamon E., Gandarias J., De Momi E., and Ajoudani A. A hybrid learning and optimization framework to achieve physically interactive tasks with mobile manipulators // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022. N 7. P. 1–8.
6. Calinon S. A tutorial on task-parameterized movement learning and retrieval // *Intelligent service robotics*. 2016. N 9. P. 1–29.
7. Fabisch A. gmr: Gaussian mixture regression // *J. of Open Source Software*. 2021. Vol. 62, N 6. P. 3054.
8. Sung H. G. Gaussian mixture regression and classification. Rice University, 2004.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Ваддах Али** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, Международная лаборатория Биомехатроники и энергоэффективной робототехники; инженер; E-mail: waddahkh.ali94@gmail.com
- Сергей Алексеевич Колюбин** — докт. техн. наук; факультет систем управления и робототехники, Международная лаборатория Биомехатроники и энергоэффективной робототехники; профессор, г.н.с; E-mail: s.kolyubin@itmo.ru

Received 15.03.2024; approved after reviewing 28.03.2024; accepted for publication 16.04.2024

**РАСЧЕТ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИЕМНИКА,
СОГЛАСОВАННОЙ С НОРМАЛЬНЫМ ОБЪЕКТИВОМ****А. М. Безуглый*, А. В. Бахолдин, Т. В. Точилина***Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*** ambezuglyi@itmo.ru*

Аннотация. Решаются задачи исследования и расчета параметров криволинейной фоточувствительной поверхности приемника, согласованной с распространенным нормальным объективом. Под нормальными понимаются объективы с заданным полем изображения средних размеров. Проанализирован линзовый объектив с разной формой поверхности изображения. Методом наименьших квадратов получено уравнение аппроксимирующей функции кривой, соответствующей форме поверхности изображения выбранного объектива. При помощи построенных диаграмм прочности деформации объекта оценены прочностные характеристики фоточувствительной поверхности приемника криволинейной формы. Криволинейная фоточувствительная поверхность приемника обеспечивает снижение влияния aberrации кривизны поля в выбранном объективе, уменьшение размеров пятен рассеяния на краю поля в два раза, а следовательно, получение изображения наилучшего качества. Результаты численного моделирования найдут свое применение в проектировании технологии изготовления криволинейной фоточувствительной поверхности, а также при согласовании допустимых значений отклонений, которые проявляются в процессе разработки. Рассмотренная последовательность расчета параметров криволинейной фоточувствительной поверхности приемника может быть применена при проектировании оптических систем и приемных модулей, что позволит упростить создание изображения на фоточувствительной поверхности приемника и снизить влияние кривизны поля без использования линзовых компенсаторов.

Ключевые слова: расчет оптических систем, криволинейная фоточувствительная поверхность приемника, нормальный объектив, ФПЗС, КМОП-приемник, прочностные характеристики фотоприемных устройств

Ссылка для цитирования: Безуглый А. М., Бахолдин А. В., Точилина Т. В. Расчет криволинейной фоточувствительной поверхности приемника, согласованной с нормальным объективом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 511–518. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-511-518.

**CALCULATION OF A CURVILINEAR PHOTOSENSITIVE SURFACE OF THE RECEIVER,
MATCHED WITH A NORMAL LENS****A. M. Bezuglyi*, A. V. Bakholdin, T. V. Tochilina***ITMO university, St. Petersburg, Russia*** ambezuglyi@itmo.ru*

Abstract. The problems of studying and calculating the parameters of a curved photosensitive surface of the receiver, matched with a common normal lens, are solved. Lenses with a given image field of medium size are considered normal. Lenses with different shapes of the image surface are analyzed. Using the least squares method, an equation for the approximating function of the curve corresponding to the shape of the image surface of the selected lens is obtained. Diagrams of the deformation strength of the object are constructed to assess the strength characteristics of the photosensitive surface of the curvilinear receiver. The curved photosensitive surface of the receiver reduces the influence of field curvature aberration in the selected lens, diminishes the size of scattering spots at the edge of the field by half, and therefore ensures the best quality image. Results of numerical modeling may be applied in the design of technology for manufacturing a curved photosensitive surface, as well as in agreeing on the permissible values of deviations that appear during the development process. The considered sequence for calculating the receiver curved photosensitive surface parameters can be used in the design of optical systems and receiving modules to simplify the

creation of an image on the photosensitive surface of the receiver and reduce the influence of field curvature without the implementation of lens compensators.

Keywords: optical systems calculation, curvilinear photosensitive receiver surface, normal lens, CCD, CMOS receiver, strength characteristics of photodetectors

For citation: Bezuglyi A. M., Bakholdin A. V., Tochilina T. V. Calculation of a curvilinear photosensitive surface of the receiver, matched with a normal lens. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 511–518 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-511-518.

Введение. На разработку приемных оптических модулей, которые применяются в различных сферах, уходит большое количество материальных и временных ресурсов. Это связано с трудоемкостью проектирования приемного тракта, в состав которого входят оптическая система (линзовый или зеркальный объектив) и фотоприемное устройство. Создание изображения на плоских фоточувствительных поверхностях в оптических системах — достаточно сложная задача. Конструкционные параметры объективов обусловлены использованием приемников с плоской фоточувствительной поверхностью. Для уменьшения количества требований к оптике предлагается ввести в систему приемник с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы. Преимущества приемного тракта с криволинейной фоточувствительной поверхностью заключаются в том, что, по сравнению с плоской, в ней увеличивается поле изображения и корректируется абберация типа „кривизна поля“. Благодаря этому на криволинейных фоточувствительных поверхностях достигается лучшее качество изображения. Снижение требований к оптической системе позволяет уменьшить габаритные размеры объективов и число оптических элементов в их составе, что, в свою очередь, дает возможность сократить себестоимость прибора и время на его разработку.

Большое количество зарубежной литературы посвящено исследованию возможностей применения приемников с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы [1–8]. Крупными зарубежными организациями были использованы результаты научных трудов в космических аппаратах, таких как телескопы „Kepler“, „TESS“ (США). Разработчикам удалось снизить требования к оптической системе путем установки матриц ПЗС на криволинейную поверхность с индивидуальной оптикой. В зарубежных работах [1–4] описываются технологии, позволяющие уменьшить толщину приемника и, при воздействии направленной силы на утоненный приемник, получить неплоскую форму фоточувствительной поверхности. Отечественный опыт разработки и установки приемников на криволинейную поверхность сильно ограничен.

Целью настоящей работы является исследование параметров криволинейной фоточувствительной поверхности приемника, согласованной с нормальным объективом*, и их расчет. При расчете оптической системы конструктивные параметры объектива не изменяются. На основании полученных результатов моделирования была оценена технологическая возможность изготовления приемника (ФПЗС или КМОП-приемник) с криволинейной фоточувствительной поверхностью.

Анализ линзовых объективов с разными формами фокальной плоскости. Открытие Петцвалем [9] искривленного поля показало перспективы применения криволинейной фокальной плоскости, кривизна которой зависит от показателя преломления и радиусов кривизны оптических поверхностей. Эта абберация называется кривизной поля Петцваля и является четвертой суммой из числа коэффициентов Зейделя [10] аббераций третьего порядка. Сумма Петцваля выражается по следующей формуле:

$$\Sigma_{\text{Pet}} = \sum \frac{n_{i+1} - n_i}{r_i n_{i+1} n_i},$$

где n — показатель преломления среды, в которой находится падающий луч; r — радиус кривизны поверхности. Эта формула накладывает ограничения на конструктивные параметры объек-

* ГОСТ 25205-82. Термины и определения. Фотоаппараты и съемочные фотографические объективы. М., 1982. 15 с.

тивов. Коррекция этой аберрации осуществляется с помощью оптических элементов, например, линзами Смита [11]. Линзы Смита [9] корректируют кривизну изображения путем минимизации суммы Петцваля до уровня, когда форма фокальной плоскости становится плоской [12].

Для исследования был выбран линзовый объектив Петцваля, состоящий из двух тонких ахроматов. В этом объективе исправлены кома, сферическая и хроматическая аберрации. Особенно сильные искажения вносит кривизна поля, эта аберрация вызывает сильное падение разрешения на краях поля изображения и ограничивает угол поля зрения. Для коррекции кривизны поля в объективах проектируют оптическую систему с отрицательными линзами, с уменьшенными радиусами кривизны поверхности оптических элементов и с применением линз большой толщины. Исправление этой аберрации описанными методами неизбежно приводит к трудностям в разработке конструкции и увеличению массы и габаритов объектива. В качестве альтернативного способа корректировки кривизны поля предлагается использовать приемник с криволинейной фоточувствительной поверхностью.

Сравнительный анализ выбранного объектива с плоской и неплоской поверхностью изображения (ПИ) выполнен в программе расчета оптических систем Zemax. Характеристики выбранного объектива Петцваля:

- 1) фокусное расстояние $f' = 100$ мм;
- 2) диафрагменное число $k = 4,5$;
- 3) угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 26^\circ$;
- 4) спектральный диапазон F', d', C' .

Для выявления преимуществ неплоской поверхности в конструктивные параметры объектива вводятся изменения: задается криволинейная ПИ. Путем оптимизации выбирается наилучшее значение радиуса кривизны поверхности ПИ на основании качества изображения. В программе Zemax были получены следующие результаты: ход лучей приведен на рис. 1 (1 — апертурная диафрагма, 2 — фокальная плоскость), график аберраций — на рис. 2 (а — с плоской ПИ; б — с криволинейной ПИ; $\lambda_{\text{син}} = 0,486$, $\lambda_{\text{зел}} = 0,588$, $\lambda_{\text{кр}} = 0,656$ мкм; S — синусоидальная форма, T — тангенциальная форма) и точечная диаграмма — на рис. 3.

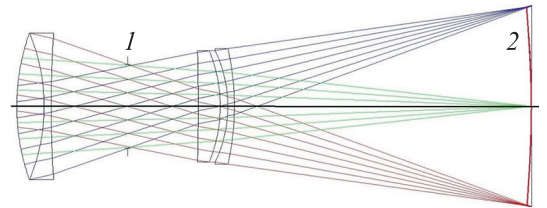


Рис. 1

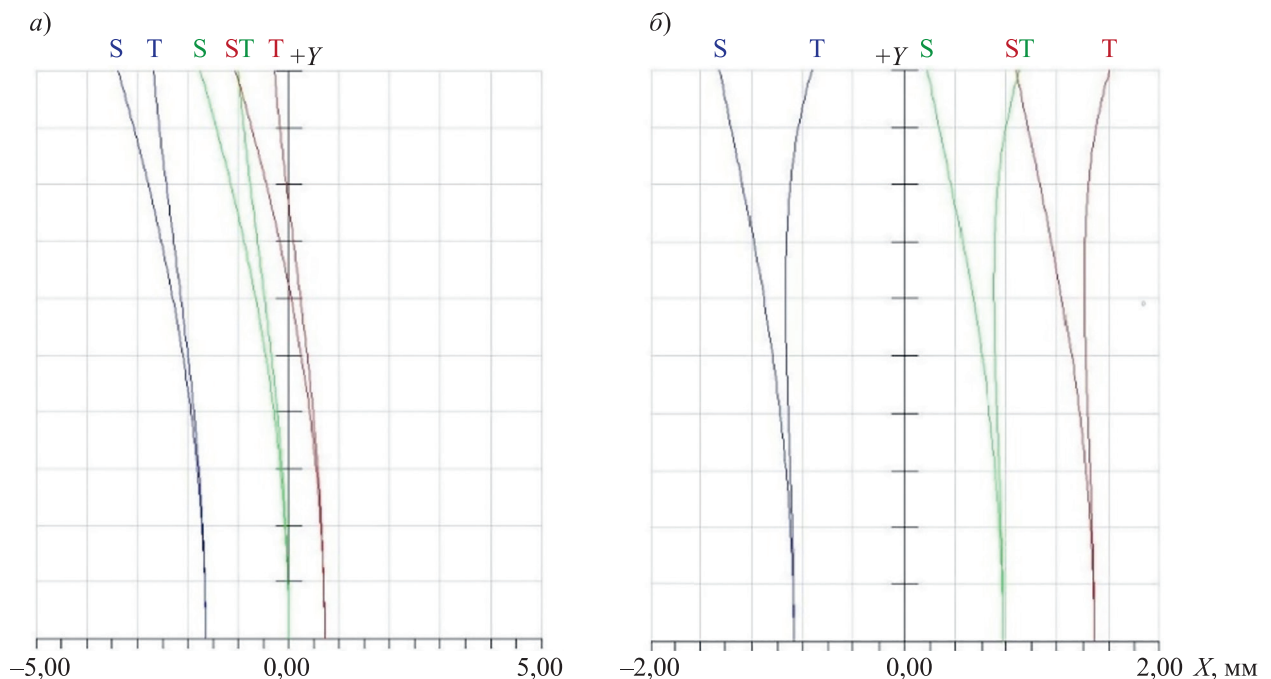


Рис. 2

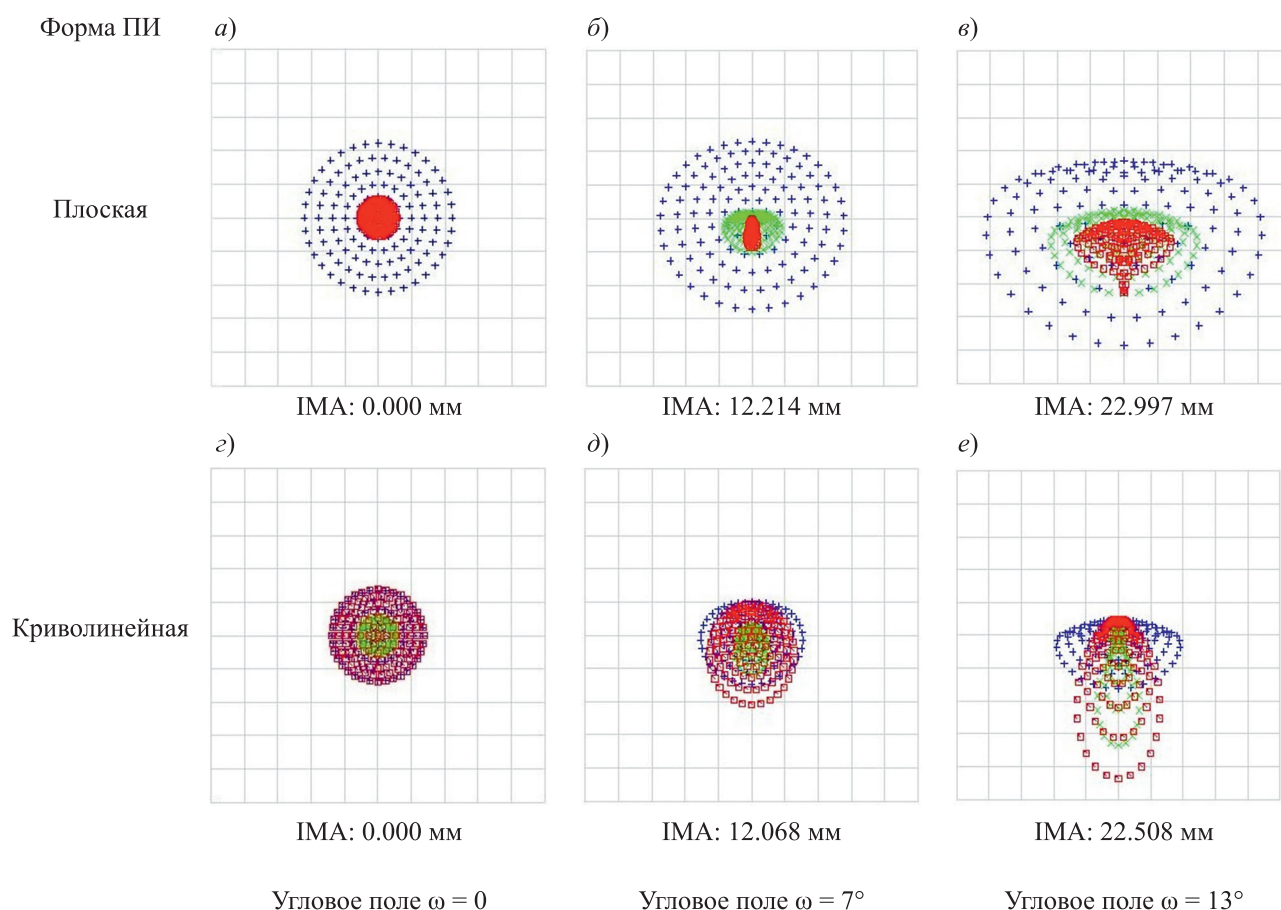


Рис. 3

Как видно из рис. 3, преимуществом использования приемника с криволинейной фоточувствительной поверхностью является лучшее качество регистрируемого изображения — размер пятна рассеяния осевой точки уменьшен до 0,3 мм; максимальный размер пятна рассеяния на краю поля ($\omega = 13^\circ$) уменьшен с 0,8 до 0,4 мм; отклонение от плоскости поверхности составляет $\Delta z = 1,8$ мм. В конструкции объектива с криволинейной фоточувствительной поверхностью приемника отсутствует линзовый компенсатор, это уменьшает его стоимость.

Отдельно отметим, что приведенные здесь результаты получены без использования оптимизации и изменения конструктивных параметров линз объектива.

Численное моделирование. Для подтверждения возможности разработки приемника с криволинейной фоточувствительной поверхностью нами выполнено численное моделирование.

При помощи аппроксимации находится функция $\varphi(x)$, которая приближенно равна исходной $f(x)$. При интерполяции требуется, чтобы приближение имело те же значения, что и у приближаемой функции:

$$\varphi(x_i) = f(x_i), i = 0, 1, 2, \dots, n.$$

Это условие называется условием интерполяции. Функция $\varphi(x)$, удовлетворяющая условиям интерполяции, называется интерполяционной, а точки $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ — узлами интерполяции [13].

При помощи инструмента Ray Trace программы Zemax находятся координаты основных точек криволинейной поверхности. По найденным точкам строится исходная функция $f(x)$, и на основе метода наименьших квадратов выполняется аппроксимация в среде Excel. Полученные результаты представлены на рис. 4 (1 — график исходной функции $f(x)$, 2 — аппроксимирующей $\varphi(x)$).

Полученная аппроксимирующая функция представлена полиномиальной зависимостью второго порядка, и ее уравнение можно записать в следующем виде:

$$\varphi(x_2) = -0,0461x^2 + 0,5536x + 114,59.$$

Точность аппроксимации определяется с учетом фактической глубины резкости объектива [14]:

$$T = a_2 - a_1 = 0,58 \text{ мм},$$

где a_1 — расстояние от входного зрачка до плоскости переднего плана, a_2 — расстояние от входного зрачка до плоскости заднего плана.

Радиус кривизны полученной криволинейной поверхности $R_{\text{Pet}} = 220$ мм.

Результаты численного моделирования найдут свое применение в проектировании технологии изготовления криволинейной фоточувствительной поверхности, а также при согласовании допустимых значений отклонений, которые проявляются в процессе разработки.

Оценка технологических возможностей изготовления приемника с криволинейной фоточувствительной поверхностью. При проектировании приемника с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы в первую очередь необходимо учитывать прочностные характеристики материала объекта. Материал и форма разрабатываемого объекта должны подбираться таким образом, чтобы при испытаниях, в процессе транспортировки и эксплуатации структура изделия сохраняла целостность.

Объектом исследования на прочность является приемник с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы, представляющий собой тонкую пластину монокристаллического кремния (далее — полупроводниковый кристалл). Имитационное моделирование полупроводникового кремниевого кристалла размером 23×23 мм проводилось с помощью программного обеспечения SolidWorks и SolidWorks Simulation. Далее исследовалась прочность кристалла, параметром, по которому проводится оценка прочности, является предел прочности σ . Предел прочности* — механическое напряжение, при превышении которого происходит разрушение материала (монокристаллический кремний имеет высокий предел прочности [15]). На основе экспериментальной оценки прочности кремниевой матрицы при трехточечном изгибе [16] был выбран критерий прочности на разрыв при растяжении $\sigma_{\text{max}} = 385$ МПа (рис. 5).

В процессе исследования конструктивными параметрами являются толщина кристалла (50–110 мкм) и радиус кривизны поверхности (20–600 мм). Результаты исследования, проведенного с помощью программы SolidWorks Simulation, представлены на рис. 6 (δ — толщина кремниевого кристалла).

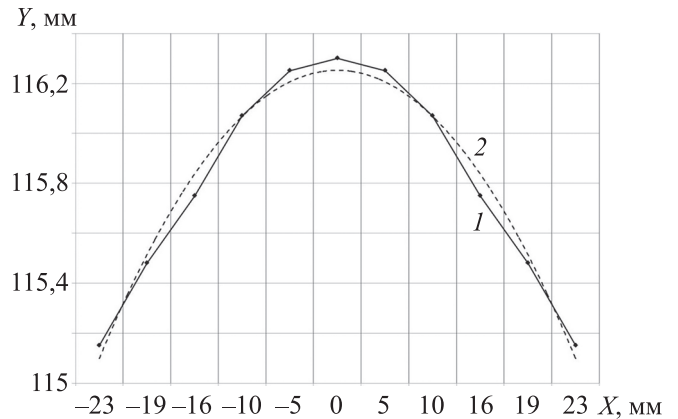


Рис. 4

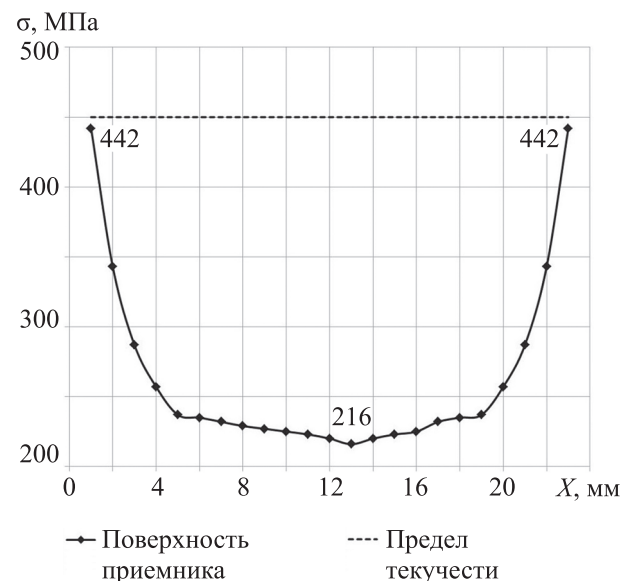


Рис. 5

* ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. М., 1997. 25 с.

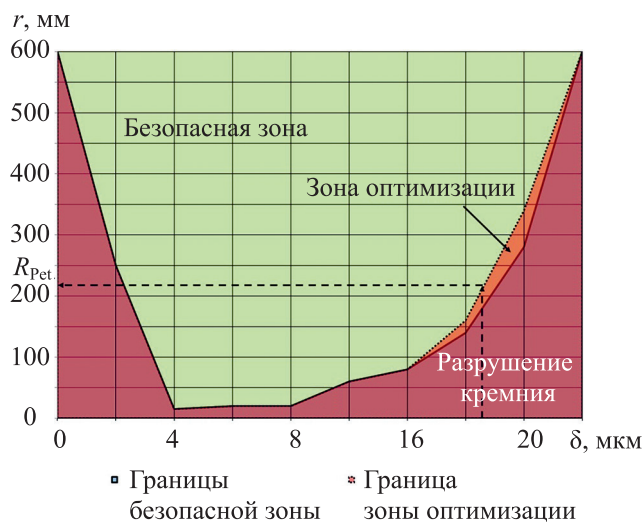


Рис. 6

С помощью проведенного исследования были определены: безопасная зона, в которой риск повреждения структуры кристалла при технологических операциях отсутствует ($\sigma_{Si} > \sigma_{max}$); зона оптимизации, где значения напряжений в кристаллической структуре близки к пределу прочности кремния ($\sigma_{Si} \geq \sigma_{max}$), конструктивные параметры в этой зоне требуют дополнительной оптимизации; зона, в которой происходит разрушение структуры кремния ($\sigma_{Si} < \sigma_{max}$). При рассчитанном в ходе моделирования радиусе кривизны фоточувствительной поверхности ($R_{Pet} = 220$ мм) максимально возможная толщина кристалла, которая удовлетворяет требованиям прочности, составляет около

93 мкм. При проектировании рекомендуется использовать меньшую толщину — в пределах безопасной зоны (50 мкм). В этом случае толщина подложки для кристалла при $\Delta z = 1,8$ мм равна 1,75 мм.

Исследование показало, что для рассматриваемого в статье объектива Петцваля рекомендуются габаритные размеры приемника излучения $23 \times 23 \times 0,05$ мм, радиус кривизны фоточувствительной поверхности — 220 мм.

Заключение. В работе выполнен расчет геометрических параметров приемника с криволинейной фоточувствительной поверхностью, согласованного с нормальным объективом. При постоянных конструктивных параметрах нормального объектива криволинейная поверхность приемника обеспечивает ряд преимуществ, в сравнении с плоской поверхностью. Во вновь разработанных объективах больше не требуется проектировать оптическую систему с компенсацией кривизны поля, роль компенсатора берет на себя фоточувствительная поверхность приемника. Это позволяет уменьшить габаритные характеристики оптической системы и всего приемного тракта.

Важным условием применения криволинейной фоточувствительной поверхности является технологическая возможность изготовления приемника подобной формы. Имитационное моделирование показало, что фоточувствительную поверхность приемника возможно представить в криволинейной форме. На прочностные характеристики приемного устройства влияют такие параметры, как радиус кривизны поверхности и толщина приемника.

Расчет криволинейной фоточувствительной поверхности приемника, согласованного с нормальным объективом, может быть полезен при проектировании оптических систем и приемных трактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chambion B., Gaschet C., Behaghel T., Vandeneynde A., Caplet S., Gétin S., Henry D., Hugot E., Jahn W., Lombardo S., Ferrari M. Curved sensors for compact high-resolution wide-field designs: prototype demonstration and optical characterization // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 2018. Vol. 10539. P. 1053913.
2. Guenter B., Joshi N., Stoakley R., Keefe A., Geary K., Freeman R., Hundley J., Patterson P., Hammon D., Herrera G., Sherman E., Nowak A., Schubert R., Brewer P., Yang L., Mott R., McKnight G. Highly curved image sensors: a practical approach for improved optical performance // Optics Express. 2017. Vol. 25, N 12. P. 13010–13023. DOI: 10.1364/OE.25.013010.
3. Iwert O., Delabre B. The challenge of highly curved monolithic imaging detectors // High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV. 2010. Proc. SPIE. Vol. 7742, N 6. P. 646–654.
4. Swain P. K., Channin D. J., Taylor G. C., Lipp S. A., and Mark D. S. Curved CCDs and their application with astronomical telescopes and stereo panoramic cameras // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5301. P. 109–129.

5. Dumas D., Fendler M., Baier N., Primot J., le Coarer E. Curved focal plane detector array for wide field cameras // *Applied Optics*. 2012. Vol. 51, N 22. P. 5419–5424.
6. Itonaga K., Arimura T., Matsumoto K., Kondo G., Terahata K., Makimoto S., Hirayama T. A Novel Curved CMOS Image Sensor Integrated with Imaging System // *Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology)*. Digest of Technical Papers. 2014. DOI:10.1109/vlsit.2014.6894341.
7. Hugot E., Lombardo S., Behaghel Th., Chambion B., Jahn W., Gaschet Ch., Hugo S., Gach J. L., Ferrari M., Henry D. Curved sensors: experimental performance of CMOS prototypes and wide field related imagers // *Intern. Conf. on Space Optics (ICSO 2018)*. Chania, Greece, 9–12 October 2018. *Proc. of SPIE*. Vol. 11180. P. 111802Y-2.
8. Gaschet Ch., Chambion B., Gétin S., Moulin G. Curved sensors for compact high-resolution wide field designs // *Novel Optical Systems Design and Optimization XX*. 2017. *Proc. of SPIE*. Vol. 10376.
9. Olmedo M., Lloyd J., Mamajek E. E., Chávez M. Deep GALEX UV Survey of the Kepler Field I: Point Source Catalog // *The Astrophysical Journal*. 2015. Vol. 813, N 2.
10. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
11. Русинов М. М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979. 488 с.
12. Sutton T. Panoramic Photography // *J. of the Photographic society*. 1860. N 95. 185 p.
13. Мальшиева Т. А. Численные методы и компьютерное моделирование. Лабораторный практикум по аппроксимации функций. СПб: Университет ИТМО, 2016. 33 с.
14. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1966. 565 с.
15. Адамова А. А., Цивинская Т. А. Прецизионный сенсор давления на базе монокристаллического кремния // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2020. № 9. С. 104–109.
16. Zhao J.-H., Tellkamp J., Gupta V., and Edwards D. R. Experimental Evaluations of the Strength of Silicon Die by 3-Point-Bend Versus Ball-on-Ring Tests // *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*. 2009. Vol. 32, N 4. P. 248–255.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Артём Михайлович Безуглый** — аспирант; Университет ИТМО, Центр прикладной оптики; E-mail: ambezuglyi@itmo.ru
- Алексей Валентинович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент, профессор; Университет ИТМО, Центр прикладной оптики; директор ЦПО; E-mail: bakholdin@itmo.ru
- Татьяна Вячеславовна Точилина** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, Центр прикладной оптики; старший преподаватель; E-mail: tvtochilina@itmo.ru

Поступила в редакцию 31.01.2024; одобрена после рецензирования 01.03.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Chambion B., Gaschet C., Behaghel T., Vandeneynde A., Caplet S., Gétin S., Henry D., Hugot E., Jahn W., Lombardo S., Ferrari M. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, Conference Series, 2018, vol. 10539, pp. 1053913.
2. Guenter B., Joshi N., Stoakley R., Keefe A., Geary K., Freeman R., Hundley J., Patterson P., Hammon D., Herrera G., Sherman E., Nowak A., Schubert R., Brewer P., Yang L., Mott R., McKnight G. *Optics Express*, 2017, no. 12(25), pp. 13010–13023, DOI: 10.1364/OE.25.013010.
3. Iwert O., Delabre B. *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV*, 2010, *Proc. SPIE*. 7742, vol. 6, pp. 646–654.
4. Swain P. K., Channin D. J., Taylor G. C., Lipp S. A., and Mark D. S. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5301, pp. 109–129.
5. Dumas D., Fendler M., Baier N., Primot J., le Coarer E. *Applied Optics*, 2012, no. 22(51), pp. 5419–5424.
6. Itonaga K., Arimura T., Matsumoto K., Kondo G., Terahata K., Makimoto S., Hirayama T. *Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology)*. Digest of Technical Papers, 2014, DOI:10.1109/vlsit.2014.6894341.
7. Hugot E., Lombardo S., Behaghel Th., Chambion B., Jahn W., Gaschet Ch., Hugo S., Gach J. L., Ferrari M., Henry D. International Conference on Space (Optics—ICSO 2018), Chania, Greece, October 9–12, 2018, *Proc. of SPIE*, vol. 11180, pp. 111802Y-2.
8. Gaschet Ch., Chambion B., Gétin S., Moulin G. *Novel Optical Systems Design and Optimization XX*, *Proc. of SPIE*, 2017, vol. 10376.
9. Olmedo M., Lloyd J., Mamajek E. E., Chávez M. *The Astrophysical Journal*, 2015, no. 2(813).
10. Slyusarev G. G. *Raschet opticheskikh sistem* (Calculation of Optical Systems), Leningrad, 1975, 640 p. (in Russ.)
11. Rusinov M. M. *Technical optics* (Tekhnicheskaya optika), Leningrad, 1979, 488 p. (in Russ.)
12. Sutton T. *J. of the Photographic society*, 1860, no. 95, 185 p.

13. Malysheva T. A. *Chislennyye metody i komp'yuternoye modelirovaniye. Laboratornyy praktikum po approksimatsii funktsiy* (Numerical Methods and Computer Modeling. Laboratory Workshop on Approximation of Functions), St. Petersburg, 2016, 33 p. (in Russ.)
14. Churilovsky V. N. *Teoriya opticheskikh priborov* (Theory of Optical Instruments), Leningrad, 1966, 565 p. (in Russ.)
15. Adamova A. A., Tsivinskaya T. A. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2020, no. 9, pp. 104–109. (in Russ.)
16. Zhao J.-H., Tellkamp J., Gupta V., and Edwards D. R. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2009, no. 4(32), pp. 248–255.

DATA ON AUTHOR

Artyom M. Bezuglyi	—	MSc; ITMO University, Applied Optics Center; Post-Graduate Student; E-mail: ambezuglyi@itmo.ru
Aleksey V. Bakholdin	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Applied Optics Center; E-mail: bakholdin@itmo.ru
Tatiana V. Tochilina	—	PhD, Senior Lecturer; ITMO University, Applied Optics Center; E-mail: tvtochilina@itmo.ru

Received 31.01.2024; approved after reviewing 01.03.2024; accepted for publication 16.04.2024.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Е. Е. Майоров^{1*}, В. В. Курлов¹, Ю. М. Бородинский², А. В. Дагаев³, И. С. Таюрская⁴¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия³ Ивановгородский гуманитарно-технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, Ивановгород, Россия⁴ Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, Санкт-Петербург, Россия
* majorov_ee@mail.ru

Аннотация. Методом спектрального анализа исследованы оптические параметры голографических носителей информации, полученных от разных производителей. В научной практике для голографии используют такие регистрирующие среды (фотопластинки и фотопленки), которые обеспечивают высокоточные информативные результаты экспериментов. Приведена оптическая схема автоматизированного спектрометра, представлены его технические характеристики. Получены спектральные зависимости коэффициента поглощения от длины световой волны. Проанализированы экспериментальные результаты и даны рекомендации по использованию данных фотоматериалов.

Ключевые слова: фотоматериал, спектральный анализ, длина световой волны, коэффициент поглощения, источник излучения, спектрометр, кювета, фотозлектронный умножитель

Ссылка для цитирования: Майоров Е. Е., Курлов В. В., Бородинский Ю. М., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Исследование голографических материалов методом спектрального анализа // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 519–524. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-519-524.

STUDYING HOLOGRAPHIC MATERIALS BY SPECTRAL ANALYSIS METHOD

E. E. Maiorov^{1*}, V. V. Kurlov¹, Yu. M. Borodiansky², A. V. Dagaev³, I. S. Taiurskaya⁴¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia² The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia³ Ivangorod Humanitarian and Technical Institute (branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation), Ivangorod, Russia⁴ St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, St. Petersburg, Russia
* majorov_ee@mail.ru

Abstract. The optical parameters of holographic storage media obtained from different manufacturers are studied using the method of spectral analysis. In scientific practice, recording media (photographic plates and films) are used for holography, which provide highly accurate informative results of experiments. An optical diagram of the automated spectrometer is presented, and its technical characteristics are presented. The spectral dependences of the absorption coefficient on the light wavelength are obtained. The experimental results are analyzed and recommendations for the use of these photographic materials are given.

Keywords: photographic material, spectral analysis, light wavelength, absorption coefficient, radiation source, spectrometer, cuvette, photomultiplier tube

For citation: Maiorov E. E., Kurlov V. V., Borodiansky Yu. M., Dagaev A. V., Taiurskaya I. S. Studying holographic materials by spectral analysis method. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 519–524 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-519-524.

Введение. Разработчики оптических приборов при создании голографической техники уделяют большое внимание как источникам излучения, так и регистрирующим средам (фотопластинкам и фотопленкам) [1, 2]. В последние годы на российском рынке приборов неразрушающего контроля появляются новые средства измерений и материалы, также в широком ассортименте представлена элементная база [3, 4]. Инновационные технологии в оптическом приборостроении позволяют перейти на более качественный уровень измерений [5, 6]. В частности, спектральные приборы и комплексы активно используются в машиностроении, электро-

нике, оптике, медицине, текстильной и пищевой промышленности, а также при производстве строительных и оптических материалов [7, 8].

Российские ученые постоянно совершенствуют информационную и научную базы экспериментальных исследований, которые непосредственным образом связаны с оптическими измерениями [9, 10].

Методы спектрального анализа используются для выявления структуры и состава вещества в различных агрегатных состояниях, причем форма объекта и среда не подвергаются механическому воздействию [11, 12]. Работа этих средств основана на получении спектральных характеристик объекта или среды в исследуемой части оптического спектра [13, 14]. В процессе работы регистрируются переходные энергетические процессы и информация выводится в виде спектральных зависимостей $K(\lambda)$, $T(\lambda)$, $R(\lambda)$.

Методы голографической интерферометрии для записи и воспроизведения изображений, обеспечивающие получение результатов высокой точности измерений, требуют использования качественных высокоразрешающих регистрирующих сред [15, 16]. От того, какие фотопластинки или фотопленки используются, зависит достоверность эксперимента.

Существует широкий класс фотопластинок, фотопленок для голографической интерферометрии, которые различаются по химическим, физическим и оптическим свойствам. На практике применяют фотопленки на основе диарилэтенон и фотопластинки — на основе кристаллов галогенида серебра.

Анализ литературных источников показал, что в технике голографии ведущее место заняли фотопластинки марок ПФГ-03М, U08М, а также фотопленки CGH [17, 18]. Эти материалы пригодны для исследования напряженно-деформированного состояния поверхности объекта, позволяют хранить длительное время данные о волновых фронтах, существовавших в различные моменты времени, а также восстанавливать трехмерные изображения объекта или среды.

Поэтому вопросы регистрации изображений на голографических носителях требуют внимательного изучения методами спектрального анализа.

Целью работы явилось изучение оптических параметров голографических носителей информации разных производителей.

Постановка задачи: с помощью автоматизированного спектрометра UV-3600i провести измерения оптических параметров голографических регистрирующих сред разных производителей в диапазоне длин волн от 185 нм до 900 нм; получить спектральные данные для каждого материала; проанализировать оптические параметры материалов и сравнить по полученные графические зависимости.

Метод и объект исследования. Исследованию подлежали фотоматериалы (ПФГ-03М, U08М, CGH).

Фотоматериалы ПФГ-03М и U08М используются в голографии (для регистрации гладких и возмущенных форм поверхности), а также для записи диффузно отражающих поверхностей. ПФГ-03М состоит из сенсibilизирующего красителя, кристаллов галогенида серебра; основа — оптическое стекло толщиной 2,65 мм. U08М состоит из сенсibilизирующего красителя, кристаллов галогенида серебра.

CGH — мономерная каландрированная пленка — обладает уникальными оптическими свойствами, что позволяет использовать ее в дизайне и рекламе для привлечения внимания потребителя или для маркировки различной продукции. Пленка может использоваться для сольвентной, экосольвентной, УФ- и латексной печати.

Для проведения экспериментальных исследований использовался автоматизированный спектрометр UV-3600i с оптической схемой, представленной на рис. 1 (W1 — галогенная лампа; D2 — дейтериевая лампа; M1–M15 — система зеркал; S1–S3 — система щелей; G1–G4 — система решеток; F — оптический отсекающий; С.Н. — затвор; W1–W3 — окошки диаметром 30 мм; W4 и W5 — окошки диаметром 40 мм; PMT — приемник излучения).

Световой пучок от источника света (W1, D2), пройдя систему отражающих зеркал (M5–M9), направляется в опорный и объектный каналы измерений. В этой схеме оба световых

пучка достигают фотоэлектронного умножителя (PMT), где в дальнейшем подвергаются обработке. Уникальность оптической схемы заключается в том, что нет необходимости направлять объектный и опорный световые пучки в один измерительный канал. Это позволяет увеличить пространство в кюветном отделении, а значит, проводить измерения с использованием мутных сред, размещая в непосредственной близости от световыми окошками (W2, W3). Технические параметры спектрометра UV-3600i приведены в таблице.

Этот прибор предназначен для спектрального анализа веществ в различных агрегатных состояниях и мелкодисперсных сред. Спектрометр может автоматически изменять ширину щели, он имеет двойной монохроматор, фотоэлектронный умножитель, который обрабатывает световые сигналы в диапазоне от 185 до 3300 нм. Преимущество этого прибора состоит в том, что у него большой фотометрический диапазон, это позволяет исследовать образцы с высокой цветопередачей. Прибор комплектуется специальными приставками с большими кюветными отделениями, с зеркальными отражателями и поляризаторами, а также интегрирующими сферами. Спектрометр имеет хорошую сопряженность с дополнительным оборудованием ASX-280 b ASX 560, используется программа LabSolutions UV-Vis. Настройки можно корректировать для конкретного объекта или среды.

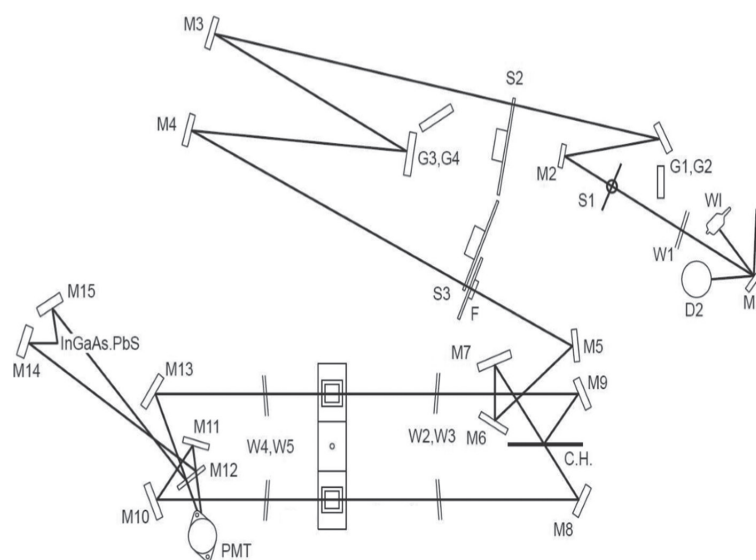


Рис. 1

Оптическая схема	Двулучевая
Монохроматор	Двойной (Черни–Тернера и предмонохроматор с вогнутой дифракционной решеткой)
Спектральный диапазон	185–3300 нм
Детектор	УФ/видимый диапазон: ФЭУ. Ближний/ИК-диапазон: InGaAs/ охлаждаемый PbS
Ширина щели	УФ/видимый диапазон: 8-ступенчатая от 0,1 до 8 нм. Ближний/ИК-диапазон: 10-ступенчатая от 0,2 до 32 нм
Скорость сканирования	4500 нм/мин (УФ/видимый диапазон); 9000 нм/мин (ближний/ИК-диапазон с ФЭУ/InGaAs); 4000 нм/мин (ближний/ИК-диапазон с PbS)
Погрешность установки длины волны	± 0,2 нм (УФ/вид); ± 0,8 нм (ближний/ИК-диапазон)
Погрешность воспроизводимости по шкале длин волн	± 0,08 нм (УФ/вид); ± 0,32 нм (ближний/ИК-диапазон)
Уровень рассеянного излучения	0,00008 % (220 нм, NaI); 0,00005 % (340 нм, NaNO ₂); 0,0005 % (1420 нм, H ₂ O); 0,005 % (2365 нм, CHCl ₃)
Размеры прибора	1020 × 660 × 270 мм
Масса	96 кг

Экспериментальные результаты. Голографические фотоматериалы (ПФГ-03М, U08М, CGH) были предоставлены компанией „Азимут Фотоникс“ (Москва).

Характеристики спектров поглощения фотоматериалов представлены на рис. 2. Наибольшее значение коэффициента поглощения зарегистрировано у ПФГ-03М (рис. 2, б): как видно, коэффициент поглощения достигает наибольшего значения ($K = 81,4\%$) при $\lambda = 633$ нм. Для фотоматериала CGH максимальное значение ($K = 75,2\%$) достигается при $\lambda = 632$ нм (рис. 2, а); для U08М (рис. 2, в) при $\lambda = 633$ нм — $K = 72,9\%$. Такие высокие значения коэффициентов поглощения могут быть обусловлены поглощением галогенидами серебра и диарилэтенном светового излучения в диапазоне длин волн от 620 до 640 нм.

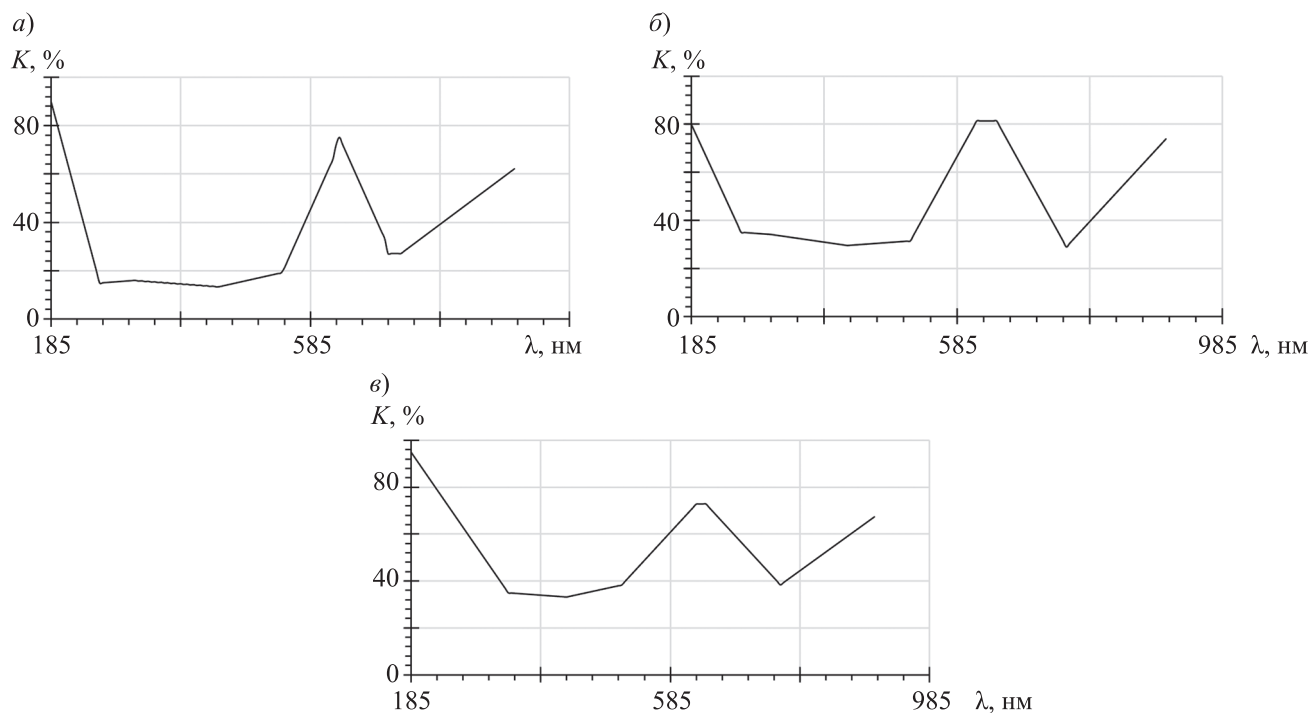


Рис. 2

Представленные зависимости схожи, но поглощение в диапазоне длин волн от 255 до 445 нм разное. Видимо, это связано с разной концентрацией поглотителей у голографических материалов.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о том, что целесообразно записывать и воспроизводить изображения в исследованных материалах на длине волны $\lambda = 633$ нм. Таким образом, анализ полученных данных подтверждает, что голографические материалы разных производителей пригодны для оптической обработки записанных интерферограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
3. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
4. Малакара Д. Оптический производственный контроль / Пер. с англ. под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
5. Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Таюрская И. С. Исследование оптических свойств авиационных гидравлических жидкостей методом оптической спектроскопии // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 80–85. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-80-85.
6. Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Таюрская И. С. Спектрофотометрия углеводородного топлива для летательных аппаратов дозвуковой авиации // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 100–105. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-100-105.

7. Кузьмина Д. А., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Нарушак Н. С. Использование метода спектроскопии отражения для распознавания подлинности стоматологических реставрационных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 63–70. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70.
8. Майоров Е. Е., Афанасьева О. В., Соколовская М. В. Исследование оптических свойств продуктов косметологии спектрофотометром, работающим в дальнем ультрафиолетовом диапазоне длин волн // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 128–133. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-128-133.
9. Майоров Е. Е., Туровская М. С., Литвиненко А. Н., Черняк Т. А., Дагаев А. В., Пономарев С. Е., Курлов В. В., Катунин Б. Д. Исследование разработанного спектрофотометра для ультрафиолетовой области спектра и его технико-экономическое обоснование // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 7. С. 38–43.
10. Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Хохлова М. В., Дагаев А. В., Гулиев Р. Б., Таюрская И. С. Экспериментальное определение элементарного смещения в разработанной оптико-электронной системе контроля голографических объектов // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 12. С. 200–205. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-200-205.
11. Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Арефьев А. В., Бородинский Ю. М., Дагаев А. В., Гулиев Р. Б. Исследование медицинских жидкофазных сред с использованием спектрофотометра с диапазоном длин волн 200...780 нм // Медицинская техника. 2023. № 1. С. 53–55.
12. Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Исследование оптических свойств авиационных технических моющих жидкостей в ультрафиолетовом диапазоне длин волн // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 234–240. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-234-240.
13. Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Исследование оптических клиньев для оптических и оптико-электронных приборов и комплексов спектральным методом // Приборы. 2023. № 4(274). С. 41–44.
14. Шаламай Л. И., Оксас Н. С., Лампусова В. Б., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е. Спектральный анализ новейших стоматологических материалов для эстетики и реставраций на твердых тканях зуба // Dental Forum. 2023. № 2(89). С. 29–33.
15. Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Костин Г. А. Применение высокочувствительных фотоматериалов на основе галогенидов серебра для исследования влияния отклонений подложек спеклограмм на результаты измерений // Приборы. 2023. № 5(275). С. 51–54.
16. Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Применение спектрофотометрии для сравнительного анализа контрольной фиксации композитных вкладок к дентину человека // Медицинская техника. 2023. № 3. С. 10–13.
17. Майоров Е. Е., Афанасьева О. В., Курлов В. В., Таюрская И. С., Соколовская М. В. Применение спектрофотометрического метода для исследования содержания этилового спирта в жидкофазных средах // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 501–508. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-501-508.
18. Шаламай Л. И., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Абсорбционный спектральный анализ светоотверждаемых рентгеноконтрастных материалов „Омнихрома“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 9. С. 781–788. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-781-788.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- | | |
|--------------------------------------|--|
| Евгений Евгеньевич Майоров | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; доцент; E-mail: majorov_ee@mail.ru |
| Виктор Валентинович Курлов | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества; доцент; E-mail: vitek543@rambler.ru |
| Юрий Михайлович Бородинский | — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, кафедра безопасности информационных систем; доцент; E-mail: borodyanskyum@gmail.com |
| Александр Владимирович Дагаев | — канд. техн. наук; Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кафедра математики, информатики и информационных таможенных технологий; E-mail: adagaev@list.ru |
| Ирина Соломоновна Таюрская | — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики; доцент; E-mail: tis_ivesep@mail.ru |

Поступила в редакцию 02.11.2023; одобрена после рецензирования 22.11.2023; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1970.
2. Afanas'yev V. A. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1968, 263 p. (in Russ.)
3. Vest Ch. M. *Holographic Interferometry*, NY, Wiley, 1979.
4. Malacara D., ed., *Optical Shop Testing*, Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., 2007.
5. Kostin G. A., Chernyak T. A., Maierov E. E., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 80–85, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-80-85. (in Russ.)
6. Kostin G. A., Chernyak T. A., Maierov E. E., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 100–105, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-100-105. (in Russ.)
7. Kuzmina D. A., Maierov E. E., Shalamay L. I., Mendoza E. Yu., Narushak N. S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 1(64), pp. 63–70, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70. (in Russ.)
8. Maierov E. E., Afanasyeva O. V., Sokolovskaya M. V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 128–133, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-128-133. (in Russ.)
9. Maierov E. E., Turovskaya M. S., Litvinenko A. N., Chernyak T. A., Dagaev A. V., Ponomarev S. E., Kurlov V. V., Katunin B. D. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 7, pp. 38–43. (in Russ.)
10. Maierov E. E., Arefiev A. V., Khokhlova M. V., Dagaev A. V., Guliyev R. B., Tayurskaya I. S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 12, pp. 200–205, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-200-205.
11. Mayorov E. E., Pushkina V. P., Arefiev A. V., Borodyansky Yu. M., Dagaev A. V., Guliev R. B. *Biomedical Engineering*, 2023, no. 1, pp. 53–55. (in Russ.)
12. Maierov E. E., Kostin G. A., Chernyak T. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 3(66), pp. 234–240, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-234-240. (in Russ.)
13. Maierov E. E., Kostin G. A., Chernyak T. A. *Devices*, 2023, no. 4(274), pp. 41–44. (in Russ.)
14. Shalamay L. I., Oksas N. S., Lampusova V. B., Mendoza E. Yu., Maierov E. E. *Dental Forum*, 2023, no. 2(89), pp. 29–33. (in Russ.)
15. Maierov E. E., Chernyak T. A., Kostin G. A. *Devices*, 2023, no. 5(275), pp. 51–54 (in Russ.)
16. Maierov E. E., Shalamay L. I., Mendoza E. Yu., Lampusova V. B., Oksas N. S. *Biomedical Engineering*, 2023, no. 3, pp. 10–13. (in Russ.)
17. Maierov E. E., Afanaseva O. V., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S., Sokolovskaya M. V. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 6(66), pp. 501–508, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-501-508. (in Russ.)
18. Shalamay L. I., Maierov E. E., Mendoza E. Yu., Lampusova V. B., Oksas N. S. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 9(66), pp. 781–788, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-781-788. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

Eugeny E. Maierov	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; Associate Professor; E-mail: majorov_ee@mail.ru
Viktor V. Kruglov	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems; Associate Professor; E-mail: vitek543@rambler.ru
Yury M. Borodiansky	—	PhD; The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, Department of Information Systems Security; Associate Professor; E-mail: borodyanskyum@gmail.com
Alexander V. Dagaev	—	PhD; Ivangorod Humanitarian and Technical Institute (branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation), Department of Mathematics, Informatics and Information Customs; E-mail: adagaev@list.ru
Irina S. Taiurskaya	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technologies and Mathematics; Associate Professor; E-mail: tis_ivesep@mail.ru

Received 02.11.2023; approved after reviewing 22.11.2023; accepted for publication 16.04.2024

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

METHODS AND INSTRUMENTS FOR ANALYSIS AND MONITORING OF THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 62-1/-9
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-525-532

КОМПАКТНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПИРОПРИЕМНИКОВ

А. Ф. Аушев, Л. А. Глущенко*

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
Ленинградская область, Сосновый бор, Россия*

** Gla2016@rambler.ru*

Аннотация. Исследованы методы измерения пороговой чувствительности пирозлектрических приемников, позволяющие минимизировать аппаратные погрешности измерений. Экспериментально подтверждена возможность измерения пороговой чувствительности пирозлектрических приемников с помощью компактной схемы измерений, содержащей единственный оптический элемент — ограничивающую диафрагму. Схема измерения основана на использовании проекционной системы типа камеры-обскуры. Предложенная схема измерений позволяет минимизировать ошибки измерений благодаря отсутствию оптических элементов, искажающих энергетические и спектральные характеристики излучения, а также отсутствию искажения сигнала при распространении излучения в воздухе за счет компактности измерительной схемы.

Ключевые слова: *пиродетектор, камера-обкура, оптическое излучение, модель абсолютно черного тела, синхронный детектор, пороговая чувствительность приемника*

Благодарность: авторы благодарят заместителя генерального директора по научной работе АО „НИИ ОЭП“, доктора технических наук Н. И. Павлова за полезные консультации и обсуждения.

Ссылка для цитирования: Аушев А. Ф., Глущенко Л. А. Компактная установка для измерения чувствительности пироприемников // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 525–532. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-525-532.

STADIES OF MODERN PIROELECTRIC RECEIVERS AND A COMPACT DEVICE FOR MEASURING THEIR SENSITIVITY

A. F. Aushev, L. A. Glushchenko*

JSC Research Institute of Optical-Electronic Instrumentation, Sosnovy Bor, Leningrad Region, Russia

** Gla2016@rambler.ru*

Abstract. Studied methods for measuring the threshold sensitivity of pyroelectric receivers are make it possible to minimize hardware measurement errors. The possibility of measuring the threshold sensitivity of pyroelectric receivers using a compact measurement circuit with a single optical element - a limiting diaphragm - is experimentally confirmed. The measurement scheme is based on the use of a "camera obscura" type projection system. The proposed measurement scheme allows to minimize measurement errors due to the absence of optical elements that distort the energy and spectral characteristics of radiation, as well as the absence of signal distortion when radiation propagates in air due to the compactness of the measuring circuit.

Keywords: *pyroelectric receivers, camera obscura, optical radiation, absolutely black body, synchronous detector, receiver threshold sensitivity*

Acknowledgment: The authors thank N. I. Pavlov, Doctor of Technical Sciences, the Deputy General Director for Scientific Work of JSC Research Institute of Environmental Protection, for useful consultations and discussions.

For citation: Aushev A. F., Glushchenko L. A. Compact installation for measuring the sensitivity of pyroelectric receivers. Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 6. P. 525–532 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024- 67-6-525-532.

Введение. Одним из важнейших направлений современной прикладной физики является создание систем контроля тепловизионных (ТПВ) приборов. Натурные испытания таких приборов весьма дороги, а ошибки конструкторских решений выявляются лишь на завершающем этапе. Поэтому тестирование отдельных узлов в лабораторных условиях необходимо для оценки и оптимизации характеристик ТПВ-систем на этапе конструкторской проработки. Одним из важнейших узлов таких приборов являются фотоприемные устройства, в частности, пироприемники.

Пироэлектрические приемники известны давно, но зачастую недооценены в силу невысокой чувствительности. Пироприемники работают в широком диапазоне длин волн — от ультрафиолета до дальнего ИК-диапазона [1]. Кроме того, пироэлектрические приемники являются наиболее быстродействующими из всех известных типов тепловых приемников [2, 3]. Неселективность, высокая чувствительность и быстродействие определяют большой интерес к использованию этих приборов, например, при измерении мощности лазерного излучения. Можно отметить, что среди одноэлементных неохлаждаемых тепловых приемников пироэлектрические характеризуются наилучшими параметрами. Они являются лучшими в классе неохлаждаемых ИК-приемников, превосходя аналогичные устройства с иными принципами действия по эффективности обнаружения источника излучения, быстродействию, надежности, меньшим стоимости и энергопотреблению. В одноэлементных приемниках чувствительная площадка, как правило, имеет площадь порядка 1–3 мм², диапазон длин волн регистрируемого излучения составляет 3–14 мкм, допускается модуляция излучения с частотой 10–50 Гц [4].

Пироэлектрические приемники часто используются в различных измерительных схемах, в том числе в приборах зарубежного производства. Их применение осложняется тем, что в документации указаны близкие к предельным пороговые характеристики, но не даны условия их получения. Так, в паспорте широко известного термпарного измерителя 3A фирмы Ophir указан уровень шума 2 мкВт, но рекомендуется использовать его при потоках выше 60 мкВт, а в документации на приемник UM9B-BL-L-DO фирмы Gentec приводится порог 10 нВт, что на практике получить очень сложно.

Ряд зарубежных компаний, таких как *Electro Optical Industries, Inc. (EOI, США)*, *Standa Barbara Infrared Inc. (SBIR, США)* и др. достаточно полно представляют продукцию для тестирования инфракрасных приемников. В зависимости от типа измеряемых параметров современные стенды для тестирования ИК-приемников, такие как *SBIR RTB 3000*, создаются в одной из трех конфигураций:

- 1) измерения ведутся, когда тест-объект проецируется на тестируемое фотоприемное устройство (ФПУ) с конечного расстояния (в сфокусированном пучке),
- 2) измерения в потоке (без тест-объекта),
- 3) измерения при бесконечной удаленности тестового объекта (в коллимированном пучке) [5].

При измерениях в поточном режиме детектор освещается несфокусированным излучением от высокотемпературного полостного абсолютно черного тела (АЧТ) или АЧТ с протяженной излучательной площадкой. Измерения в поточном режиме применяются при определении энергетических параметров, таких как чувствительность, шумы, однородность, обнаружительная способность и линейность. Для определения чувствительности источник теплового излучения устанавливается перед исследуемым ФПУ. В случае протяженного АЧТ фотоприемник устанавливается непосредственно перед излучательной площадкой, а в случае полостного дистанция между ФПУ и АЧТ выбирается исходя из апертуры, и между ФПУ и АЧТ устанавливаются диафрагмы, модуляторы и оптические фильтры.

Чувствительность приемника является крайне важным параметром, поскольку она используется для вычисления смежных характеристик: удельной обнаружительной способности и разности температур, эквивалентной шуму. Как правило, набор светофильтров между источником и приемником излучения используется во всех известных измерительных схемах определения

пороговой чувствительности фотоприемников [5, 6]. В случае измерения неравномерности чувствительности по площадке фоточувствительного элемента (ФЧЭ) с целью исследования позиционно-чувствительных фотоприемников, при контроле ФПУ в процессе изготовления используются оптические зонды для освещения фотоприемной площадки [7–9].

В настоящей работе предложена схема измерения пороговой чувствительности пироэлектрических приемников на основе использования проекционной системы типа камеры-обскуры с целью определения реально достижимых возможностей ФЧЭ. Источником излучения служит АЧТ. Проекционная система типа камеры-обскуры отличается весьма низкой светосилой, но именно это свойство полезно в рассмотренном случае, поскольку позволяет избежать необходимости использования светофильтров. Предложенная экспериментальная установка пригодна для измерения чувствительности ФПУ различных спектральных диапазонов, поскольку единственный оптический элемент экспериментальной установки — диафрагма, которая служит и проекционным объективом с достаточно резким изображением, и ослабителем с коэффициентом подавления вплоть до шести порядков. В оптической схеме для ослабления излучения довольно часто [10] применяется промежуточная диафрагма, однако в использованной нами схеме диафрагма — единственный оптический элемент, который не характеризуется спектральной зависимостью. Схема установки отличается от известных [5–9, 11–13] отсутствием линзовых и зеркальных оптических элементов, нейтральных и спектральных светофильтров, оптических зондов. Это позволяет избежать внесения погрешностей, связанных с использованием указанных оптических элементов, при проведении измерений (единственное ограничение — дифракционный предел). Если удастся пренебречь дифракцией, то схема становится очень простой как в части энергетических расчетов, так и в интерпретации экспериментальных данных. Камера-обскура привлекательна еще и из-за отсутствия „фокальной плоскости“. Последнее свойство позволяет реализовать конструктивные преимущества при проектировании какого-либо встроенного устройства или устройства в компактном исполнении.

Описание экспериментальной установки. Внешний вид экспериментальной установки с камерой-обскурой для измерения чувствительности неселективных приемников излучения представлен на рис. 1, а, оптическая схема показана на рис. 1, б: 1 — модель АЧТ; 2 — ограничивающая диафрагма; 3 — модулятор; 4 — конический тубус-бленда; 5 — пироприемник.

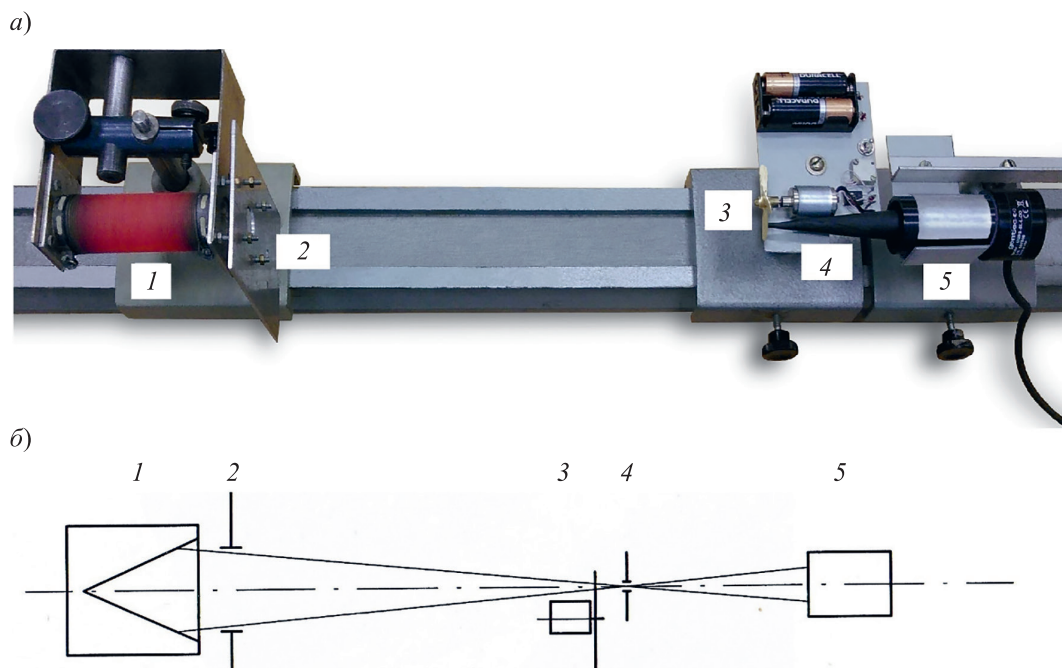


Рис. 1

В соответствии с ГОСТ 59607-2021* в качестве источника излучения при измерении широкого спектрального диапазона выбирается излучатель в виде модели АЧТ с температурой полости $T = (500 \pm 2), (800 \pm 2), (1000 \pm 2), (1273 \pm 2)$ К. В рассматриваемой схеме источником излучения служит модель АЧТ, состоящая из нагревателя и внутреннего конуса. Обмотка из нихромовой проволоки навита на керамический корпус проволочного резистора номинальной мощности 50 Вт. Внутрь керамической трубы вставлен стальной цилиндр диаметром 20 мм с конической полостью. Цилиндр прошел термическую обработку на воздухе до получения прочной окалины. Достаточно миниатюрный вариант модели АЧТ исключает влияние пространственной неоднородности АЧТ и внесение дополнительных погрешностей, что отмечено в некоторых работах [14].

Питание нагревателя производится от автотрансформатора. При напряжении порядка 60 В мощность составляет 400 Вт. При этом температура тела накала составляет около 1000 К. Температура контролируется термопарой. Перед излучающим конусом закреплена ограничивающая диафрагма диаметром 16 мм. Модель АЧТ компактна и закреплена на рейтере и имеет подвижки по пяти координатам, что удобно для юстировки. Коэффициент излучения модели АЧТ не менее 0,99 (как этого требует ГОСТ 59607-2021 для модели в виде излучающего конуса), что подтверждается совпадением приведенных ниже результатов расчета и эксперимента; стабильность АЧТ определяется качеством источника питания и условиями теплообмена.

Блок приемника содержит модулятор, изготовленный на базе микродвигателя с редуктором швейцарского производства. На оси закреплен диск с тремя лепестками. При напряжении на двигателе от 0,1 до 2 В частота модуляции изменяется от 0,2 до 25 Гц. Питание микродвигателя модулятора автономное, от батареи 3 В. Частота 5 Гц, рекомендуемая для данного приемника, соответствует напряжению на двигателе 0,6 В. Тубус-бленда конической формы, наиболее эффективно защищающая как от внешнего света, так и от конвективных воздушных потоков, имеет отверстие диаметром 1 мм в вершине конуса, которое является объективом камеры-обскуры. Тубус окрашен изнутри и снаружи черной матовой эмалью и вставлен в штатную бленду приемника, которая сама по себе не обеспечивает достаточной защиты открытой площадки пироприемника от внешних воздействий.

Показанный на рис. 1, а пироприемник модели *UM9B-BL-L-DO* используется в паре с аналоговым усилителем *APM(D)*, выход которого подключен к цифровому осциллографу *TDS 2002*. Диаметр приемной площадки пироприемника составляет 9 мм.

В настоящем исследовании полоса усиления не ограничивалась, и сигнал считывался непосредственно с экрана осциллографа. Тело излучения модели АЧТ нагревалось до температуры 750 °С (т. е. 1023 К). Эта температура и заложена в энергетический расчет. Гарантированный спектральный диапазон использования пироприемника этой модели составляет 0,2–20 мкм. Это позволяет в расчете использовать формулу Стефана–Больцмана для энергетической светимости черного тела:

$$M = \sigma T^4. \quad (1)$$

Здесь σ — постоянная Стефана–Больцмана, T — температура (К).

Яркость АЧТ в направлении приемной диафрагмы определяется как:

$$L_{\text{АЧТ}} = M/\pi. \quad (2)$$

Энергетическая светимость для рассматриваемого случая $M = 6,2$ Вт/см², соответственно яркость модели АЧТ в направлении приемной диафрагмы $L_{\text{АЧТ}} = 2$ Вт/см²срад.

Оптическая схема измерительной установки показана на рис. 1, б. Коническая полость нагретого стального цилиндра является достаточно близким аналогом АЧТ. Отверстие в ме-

* ГОСТ Р 59607-2021. Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик. Введен 01.03.2022. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 58 с.

таллической пластине диаметром 16 мм является полевой диафрагмой и ограничивает поток излучения в конической полости, которая наиболее равномерно нагрета. Далее через отверстие диаметром 1 мм в вершине конуса изображение полевой диафрагмы проецируется на приемную площадку пироприемника по принципу камеры-обскуры. Расстояние от полевой диафрагмы до отверстия в вершине конуса равно 28 см и от вершины конуса до площадки приемника 14 см, при этом освещенное пятно на приемной площадке равно ее диаметру 9 мм (8 мм — расчетное геометрическое изображение объекта при бесконечно малой диафрагме, 1 мм — уширение камеры-обскуры). Мощность светового потока, падающая на приемник, равна мощности, проходящей через отверстие в конусе. Предложенная схема представляется удачной, поскольку диск модулятора удален от горячего излучающего тела, чтобы избежать его перегрева. Конус наилучшим образом обрезает фон и исключает воздушные потоки, которые вызывают сильные флуктуации сигнала весьма чувствительного прибора, не защищенного окном. Схема не содержит оптических элементов, способных внести погрешности и спектральные искажения (линзы, зеркала и фильтры). Компактность установки позволяет не только расположить ее в любом помещении, но и пренебречь поглощением излучения воздухом.

Энергетический расчет сводится к определению мощности потока, проходящего через диафрагму камеры-обскуры. Искомый поток равен произведению яркости модели АЧТ на его площадь (точнее, площадь полевой диафрагмы) и на телесный угол, под которым видно отверстие в защитном конусе. Мощность излучения на приемнике определяется как:

$$\Phi_{\Pi} = L_{\text{АЧТ}} S_{\text{д}} \Omega_0, \quad (3)$$

где $S_{\text{д}}$ — площадь диафрагмы; Ω_0 — телесный угол камеры-обскуры. При $S_{\text{д}} = 2 \text{ см}^2$; $\Omega_0 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$, мощность излучения на апертуре приемника имеет значение $\Phi_{\Pi} = 36 \text{ мкВт}$.

Экспериментальные исследования. Значение чувствительности прибора модели *UM9B-BL-L-DO* составляет 14,3 мВ/мкВт, соответственно ожидаемое значение сигнала (напряжения), регистрируемого на выходе усилителя приемника $U_c = 515 \text{ мВ}$. Осциллограмма полученного по двум входам осциллографа сигнала (рис. 2) показывает весьма точное совпадение результатов измерений с расчетом (из-за низкой частоты модуляции на переменном входе сигнал искажен).

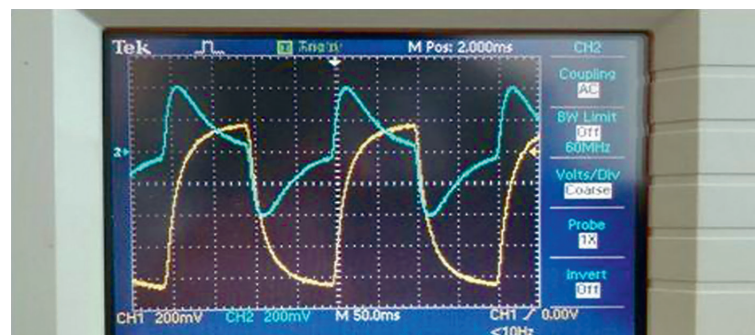


Рис. 2

Возможно, такая точность является результатом наложения погрешностей с разными знаками. Однако сама экспериментальная установка с проекционной системой камеры-обскуры настолько проста и прозрачна, что трудно ошибиться как в расчетах, так и в измерениях. Исследуемый пироприемник чувствителен к вибрации и акустическому шуму. Напряжение сигнала усилителя содержит постоянную составляющую, которая непрерывно дрейфует. При воздействии тепла (примерно 36 °С) на корпус фотоприемного устройства более 5 с постоянная составляющая достигает предела (выходит в насыщение). Возврат в активную зону происходит через 10–20 с, но не всегда достигает нулевого значения.

В работе исследовались шумы пироприемника. В отсутствие оптического сигнала напряжение шума составляет около 8 мВ, что соответствует мощности излучения на апертуре приемника 0,5 мкВт. Шум регистрировался без постоянной составляющей. Расчетная мощность светового потока в этой компоновке, как указывалось выше, составляет 36 мкВт. Измерения показали величину 35 мкВт при отношении сигнал/шум 70, пересчитанная мощность шума соответствует 0,5 мкВт, что гораздо выше заявленного порогового значения мощности. Обнаруженное несоответствие связано с шириной полосы пропускания в схеме регистрации сигнала. В этой же схеме при той же мощности излучения АЧТ проведено сравнение с приемником 3А фирмы *Ophir*. Размеры приемных площадок этих приемников практически одинаковы. Разброс полученных измерительных данных до 50 %. Только путем усреднения по 30 измерениям получено значение сигнала в 30 мкВт. В результате измерений был сделан вывод, что уровень шума пироприемника *UM9B-BL-L-DO* ниже, чем уровень шума приемника 3А фирмы *Ophir* не менее чем в 30 раз.

В работе также исследовалась зависимость сигнала приемника от частоты модуляции. При увеличении частоты с 5 до 20 Гц сигнал уменьшается от 1 до 0,65 о. е. Результат можно считать удовлетворительным, учитывая резкий рост шума в области низких частот, которые могут быть отрезаны активным фильтром нижних частот, что улучшит отношение сигнал/шум.

При обработке сигнала переменного тока возможно сузить полосу пропускания и использовать схему синхронного детектирования, что позволит на порядок улучшить пороговые характеристики прибора, приблизив их к декларируемому значению 10 нВт для пироприемника модели *UM9B-BL-L-DO*. С термоэлектрическим измерителем 3А фирмы *Ophir* таких характеристик достичь невозможно из-за большой инерционности прибора.

С целью получения результата, близкого к заявленной производителем величине, была выполнена доработка установки путем использования схемы синхронного детектора. В качестве источника излучения использовался протяженный источник излучения, обладающий хорошей температурной стабильностью (пластина, нагретая до температуры 32 °С). В эксперименте источник периодически помещался перед модулятором, в непосредственной близости от фотоприемника, что позволяло снизить влияние конвективных потоков воздуха. Сигналы усилителя и синхронного детектора показаны на рис. 3.

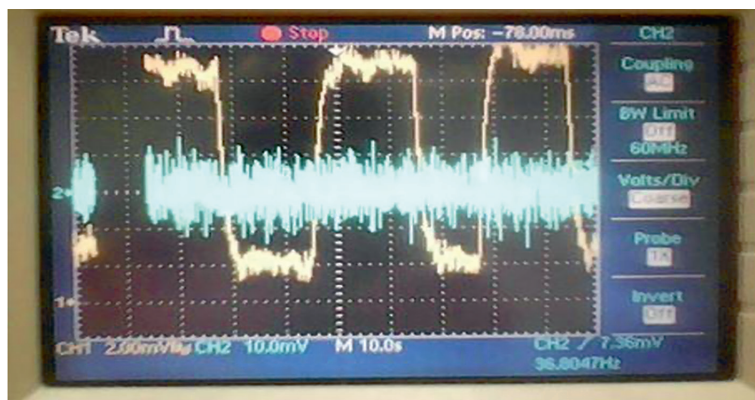


Рис. 3

На оциллограмме представлена запись шумовой дорожки усилителя *APM(D)* и выходного напряжения синхронного детектора. Осциллограф работал в режиме самописца, скорость записи 0,1 дел/с. Сигнал приемника неразличим в шумах. На заведомо большом сигнале была проведена калибровка синхронного детектора. Измеренная разность напряжений составила 10 мВ, что соответствует 220 нВт. Отношение сигнал/шум — в пределах 6–10. Таким образом, шум сигнала составил 22–36 нВт, что является зарегистрированным порогом чувствительности приемника с синхронным детектором, достигнутым в описанном эксперименте.

Синхронный детектор выполнен на двояном операционном усилителе (ОУ) *OP295* по схеме двухполупериодного фазового детектора. На втором ОУ микросхемы собран усилитель

постоянного тока с коэффициентом усиления $K = 10$, поскольку напряжение шума синхронного детектора невозможно измерить непосредственно осциллографом TDS 2002. В качестве ключа использован „идеальный“ ключ на герконе, управляемый магнитами, укрепленными попарно на лепестках диска модулятора. Частота модуляции составила 5 Гц; постоянная времени простого интегратора — 2 с.

Эксперимент подтвердил хорошие эксплуатационные характеристики пироприемника UM9B-BL-L-DO. Однако из-за высокой чувствительности к помехам было трудно добиться стабильных результатов измерений. Анализ результатов эксперимента показал, что описанная схема зарекомендовала себя как простой и надежный инструмент для реализации экспресс-метода измерения чувствительности неселективных приемников излучения. В работе представлены результаты исследований пороговых характеристик пироэлектрических приемников с целью определения реально достижимых возможностей приборов в нормальных климатических условиях. Установлено, в частности, что задекларированные изготовителем характеристики приемника UM9B-BL-L-DO могут быть достигнуты лишь при использовании схемы синхронного детектирования.

Закключение. В работе экспериментально подтверждена возможность измерения пороговой чувствительности пироэлектрических приемников в нормальных климатических условиях с помощью предложенной компактной схемы измерений, содержащей единственный оптический элемент — ограничивающую диафрагму. Схема измерения основана на использовании проекционной системы типа камеры-обскуры. Предложенная схема измерений отличается предельной простотой и позволяет минимизировать ошибки измерений благодаря отсутствию оптических элементов, искажающих энергетические и спектральные характеристики излучения, а также отсутствию искажения сигнала при распространении излучения в воздухе за счет компактности измерительной схемы. К важным свойствам предложенной схемы относятся построение изображения с одновременным подавлением световой мощности на несколько порядков при отсутствии спектральной зависимости и возможность изменения масштаба изображения простым перемещением диафрагмы между источником света и приемником.

Предложенная компактная схема измерительной установки актуальна для реализации экспресс-метода определения пороговой чувствительности пироприемников. Рекомендуется использовать ее в случае отсутствия эксплуатационной документации (паспорта), что часто имеет место для изделий зарубежного производства. Знание пороговой чувствительности приемника излучения крайне важно на предварительной стадии проектировании измерительных приборов и стендов, когда отсутствуют специализированные метрологические измерительные установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисова М. Э. Активные диэлектрики: Учеб. пособие. СПб, 2012. 82 с.
2. Вьюхин В. Н., Иванов С. Д. Регистрация маломощных наносекундных импульсов излучения приемником на основе тонкопленочной пироэлектрической структуры // Автометрия. 2018. Т. 54, № 5. С. 94–98.
3. Иванов С. Д., Косцов Э. Г. Быстродействующий неохлаждаемый тепловой приемник ИК-излучения // Интерэкспо Гео Сибирь. 2017 [Электронный ресурс]: <<https://cyberleninka.ru/article/n/byatrodeystvuyuschiy-neohlazhdaemyy-teplovoy-priemnik-ik-izlucheniya/viewer/>>.
4. Иванов С. Д., Косцов Э. Г. Пироприемник теплового излучения неохлаждаемых мегапиксельных тепловизионных матриц (Обзор) // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5, № 2. С. 136–154.
5. Гибин И. С., Колесников Г. В. Современные устройства измерения параметров и комплексного тестирования инфракрасных ФПУ и приборов (обзор) // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2, № 3. С. 293–302.
6. Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Новиков Е. В., Кочергина О. В., Лагутин А. А. Исследование характеристик матричных лавинных фотоприемников в режиме счета фотонов // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9, № 3. С. 216–223. DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-3-216-223.
7. Андосов А. И., Батшева А. А., Полесский А. В., Тресак В. К., Хамидулин К. А. Методы измерения размера фоточувствительной площадки, неравномерности чувствительности и коэффициента фотоэлектрической связи (обзор) // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6, № 2. С. 149–156.

8. Чуки́та В. И., Сенокосов Э. А., Фе́щенко В. С. Стенд для исследования позиционно-чувствительного фотоприемника // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7, № 3. С. 69–76. DOI: 10/32362/2500-316X-2019-7-3-69-76.
9. Батш́ева А. А., Кузнецов В. Ю., Полесский А. В., Тресак В. К. Универсальная зондовая установка для межоперационного контроля фотоэлектрических характеристик фотоприемников // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6, № 1. С. 68–74.
10. Кува́лдин Э. В., Шульга А. А. Осветитель установки измерения пороговой мощности и энергии оптического излучения // Оптический журнал. 2017. Т. 84, № 2. С. 52–58.
11. Пат. РФ 2689457. Стенд измерения параметров тепловизионных каналов / Р. Р. Агафонова, М. Н. Батавин, Д. В. Куликов, А. В. Мингалев, С. Н. Шушарин. 2019. Б.И. № 16.
12. Пат. РФ 2507495. Способ контроля параметров оптико-электронных систем в рабочем диапазоне температур / В. М. Демидов, А. Л. Логутко, Е. Н. Федонов. 2014. Б.И. № 5.
13. Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергин А. О. Спектральные характеристики кремниевых фотоэлектрических умножителей // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9, № 2. С. 164–171. DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-164-171.
14. Полесский А. В., Соломонова Н. А. Влияние пространственной неоднородности абсолютно черного тела на результаты измерения параметров фотоприемных устройств второго поколения с „холодной“ диафрагмой // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8, № 2. С. 148–154.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Анатолий Федорович Аушев** — НИИ ОЭП; ст. науч. сотр.; E-mail: tom@sbor.net
Лариса Александровна Глущенко — канд. физ.-мат. наук; НИИ ОЭП; вед. науч. сотр.;
 E-mail: Gla2016@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.05.2023; одобрена после рецензирования 15.01.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Borisova M. E. *Aktivnyye dielektriki* (Active Dielectrics), St. Petersburg, 2012, 82 p. (in Russ.)
2. V'yukhin V. N., Ivanov S. D. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2018, no. 5(54), pp. 502–505.
3. <https://cyberleninka.ru/article/n/byatrodeystvuyuschiy-neohlazhdaemyy-teplovoy-priemnik-ik-izlucheniya/viewer/>. (in Russ.)
4. Ivanov S. D., Kostsov E. G. *Advances in Applied Physics*, 2017, no. 2(5), pp. 136–154. (in Russ.)
5. Gibin I. S., Kolesnikov G. V. *Advances in Applied Physics*, 2014, no. 3(2), pp. 293–302. (in Russ.)
6. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Novikov E. V., Kochergina O. V., Lagutik A. A. *Advances in Applied Physics*, 2021, no. 3(9), pp. 216–223, DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-3-216-223. (in Russ.)
7. Andosov A. I., Batsheva A. A., Polesskiy A. V., Tresak V. K., Khamidullin K. A. *Advances in Applied Physics*, 2018, no. 2(6), pp. 149–156. (in Russ.)
8. Chukita V. I., Senokosov E. A., Feshchenko V. S. *Rossiiskii Tekhnologicheskii Zhurnal*, 2019, no. 3(7), pp. 69–76, DOI: 10/32362/2500-316X-2019-7-3-69-76. (in Russ.)
9. Batsheva A. A., Kuznetsov V. Y., Polesskiy A. V., Tresak V. K. *Advances in Applied Physics*, 2018, no. 1(6), pp. 68–74. (in Russ.)
10. Kuvaldin E. V., Shul'ga A. A. *Journal of Optical Technology*, 2017, no. 2(84), pp. 108–112.
11. Patent RU 2689457, *Stend izmereniya parametrov teplovizionnykh kanalov* (Stand for Measuring Parameters of Thermal Imaging Channels), R. R. Agafonova, M. N. Batavin, D. V. Kulikov, A. V. Mingalev, S. N. Shusharin, Published 2019, Bulletin 16. (in Russ.)
12. Patent RU 2507495, *Sposob kontrolya parametrov optiko-elektronnykh sistem v rabochem diapazone temperature* (A Method for Monitoring the Parameters of Optical-Electronic Systems in the Operating Temperature Range), V. M. Demidov, A. L. Logutko, E. N. Fedonov, Published 2014, Bulletin 5. (in Russ.)
13. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. *Advances in Applied Physics*, 2021, no. 2(9), pp. 164–171, DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-164-171. (in Russ.)
14. Polesskiy A. V., Solomonova N. A. *Advances in Applied Physics*, 2020, no. 2(8), pp. 148–154. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Anatoly F. Aushev** — Research Institute of Optical-Electronic Instrumentation; Senior Researcher; E-mail: tom@sbor.net
Larisa A. Glushchenko — PhD; Research Institute of Optical-Electronic Instrumentation; Leading Researcher; E-mail: Gla2016@rambler.ru

Received 18.05.2023; approved after reviewing 15.01.2024; accepted for publication 16.04.2024

РАЗРАБОТКА ШАРИКОВОГО РАСХОДОМЕРА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ ЖИДКОСТИ

Р. Р. Садыков*, Ш. С. Сафинов, В. Х. Ясовеев

Уфимский университет науки и технологий, Республика Башкортостан, Уфа

* srr-91@mail.ru

Аннотация. Представлен вариант шарикового расходомера электропроводной жидкости с четырьмя электродами и балансной схемой, обеспечивающей исходное равновесие схемы преобразователя. Представлены результаты опытно-конструкторских работ по созданию шариковых расходомеров электропроводной жидкости, предназначенных для средств автоматизации производственных процессов и социальной сферы экономики, — особенно перспективно использование таких расходомеров в теплоэнергетике, в пищевой и фармацевтической промышленности. Разработанные шариковые расходомеры электропроводной жидкости обладают общим конструктивным признаком. В них используются шарик с нулевой плавучестью в жидкости и винтообразный струенаправляющий аппарат с соосно расположенным кольцевым каналом. Конфигурация струенаправляющего аппарата спроектирована таким образом, чтобы минимизировать потери энергии движущейся жидкости и предотвращать срывы и завихрение жидкости при входе в кольцевой канал. Электронная схема первичного преобразователя расхода генерирует выходной сигнал в форме частоты следования прямоугольных импульсов, пропорциональной величине расхода жидкости.

Ключевые слова: расходомер, первичный преобразователь расхода, шариковый расходомер жидкости, струенаправляющий аппарат, операционный усилитель, компаратор, балансная схема, мостовая схема

Ссылка для цитирования: Садыков Р. Р., Сафинов Ш. С., Ясовеев В. Х. Разработка шарикового расходомера электропроводной жидкости // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 533–541. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-533-541.

DEVELOPMENT OF A BALL FLOW METER FOR ELECTRICALLY CONDUCTIVE LIQUID

R. R. Sadykov*, S. S. Safinov, V. K. Yasoveev

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Republic of Bashkortostan

* srr-91@mail.ru

Abstract. A variant of a ball flowmeter of an electrically conductive liquid with four electrodes and a balanced circuit is presented, which ensures the initial balance of the converter circuit. Results of development work on the creation of ball flowmeters of electrically conductive liquid intended for automation of production processes and the social sphere of the economy are presented - the use of such flowmeters in heat power engineering, the food and pharmaceutical industries is especially promising. The developed ball flowmeters of electrically conductive liquid have a common design feature. They use a ball with zero buoyancy in a liquid and a helical jet guide apparatus with a coaxially located annular channel. The configuration of the jet guide apparatus is designed in such a way as to minimize energy losses of the moving fluid and prevent breakdowns and turbulence of the fluid at the entrance to the annular channel. The electronic circuit of the primary flow transducer generates an output signal in the form of a rectangular pulse repetition rate proportional to the liquid flow rate.

Keywords: flow meter, primary flow converter, ball flow meter, jet guide vane, operational amplifier, comparator, balanced circuit, bridge circuit

For citation: Sadykov R. R., Safinov S. S., Yasoveev V. K. Development of a ball flowmeter for electrically conductive liquid. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 533–541 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-533-541.

В условиях увеличения численности населения Земли и истощения водных ресурсов при глобальном потеплении и тотальном загрязнении окружающей среды бытовыми и промышленными отходами остро встает задача учета потребления воды как в социальной сфере и жилищно-коммунальном хозяйстве, так и в промышленности и электро- и теплоэнергетике*.

* Федеральный закон № 28-ФЗ от 03 апреля 1996 г. „Об энергосбережении“ (с изменениями от 5 апреля 2003 г., 18 декабря 2006 г.); Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ „Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации“, ст. 5, п. 2.

Для учета потребления воды и водяного носителя тепла в системах теплоснабжения могут использоваться расходомеры различного типа, например, турбинные, электромагнитные, вихревые и ультразвуковые*.

Однако известен еще один тип расходомера жидкости — шариковый [1], который не нашел своего места на рынке ни в социально-бытовой, ни в промышленной сферах экономики, исключая их ограниченное использование в тепло- и электроэнергетике [2]. В Уфимском университете науки и технологий возник вопрос: может ли шариковый расходомер расширить сферу применения [3] в промышленности и, оттеснив расходомеры других типов [4], прежде всего, зарубежного производства, что в полной мере соответствует требованиям импортозамещения в экономике России [5]. Анализ рынка дает положительный ответ, но при условии, что шариковые расходомеры по точности измерения расхода жидкости не уступают другим типам расходомеров, а по динамическому диапазону измерения ($Q_{\max}/Q_{\min}$, где Q — расход жидкости) и себестоимости изделий в условиях серийного производства значительно их превосходят [6].

Анализ информации о продукции отечественных и зарубежных производителей расходомеров и счетчиков количества жидкости (АО „Арзамасский приборостроительный завод“, г. Арзамас; ЗАО „Тепловодомер“, г. Мытищи; ООО НПО „Наука“, Чебоксары; ЗАО „Взлёт“, Санкт-Петербург; АО „Метран“, Челябинск; ООО „Термотроник“, Санкт-Петербург; ЗАО „Электронные и механические измерительные системы“, Челябинск; ООО „Геолинк“, Москва; АО „ИПФ СибНА“, Тюмень; ООО „Энергетика“, Москва; ПАО „Завод Старорусприбор“, г. Старая Русса; KROHNE Messtechnik GmbH, Германия; Siemens AG, Германия; ABB Automation Products GmbH, Германия; Yokogawa Electric CIS Ltd., Япония; Schlumberger NV, Schlumberger Limited, США и др.) позволил вычислить коэффициент привлекательности для промышленности и социальной области экономики известных типов расходомеров жидкости:

$$K_{\Pi} = \frac{D}{C\Pi},$$

где D — динамический диапазон измерения ($D = Q_{\max}/Q_{\min}$), C — отпускная цена изделия (руб.), Π — допустимая приведенная погрешность измерения (%) [6].

На рис. 1 в виде диаграммы представлены обобщенные значения коэффициента привлекательности K_{Π} различных типов расходомеров типоразмера $D_u \leq 40$ мм [6].

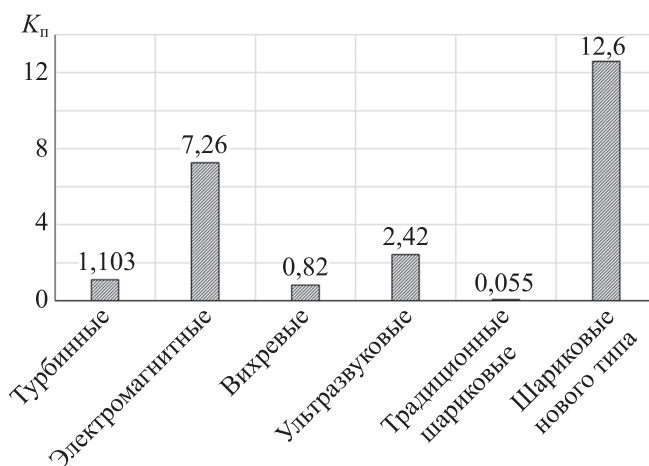


Рис. 1

Результаты анализа параметров и стоимости расходомеров российского и зарубежного производства явились побудительным фактором для разработки шариковых расходомеров. Были

* ГОСТ 15528-86. Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения.

разработаны три типа шариковых расходомеров жидкости: для электропроводной жидкости, для прозрачной жидкости и для любой жидкости (электропроводной и неэлектропроводной, прозрачной и непрозрачной).

В настоящей статье представлен один из вариантов конструкции шарикового расходомера электропроводной жидкости.

Шариковый расходомер электропроводной жидкости состоит из гидромеханической части и электронного преобразователя частоты вращения шарика, выполненного из диэлектрического материала и имеющего плавучесть в измеряемой жидкости, близкую к нулевой [7], в частоту выходного напряжения.

В Университете на начальном этапе исследований были разработаны и изготовлены шариковые расходомеры жидкости с двумя [7] и тремя [8] электродами электронного преобразователя четырех типоразмеров (Ду-12, Ду-25, Ду-30 и Ду-40), которые положительно зарекомендовали себя при натурных испытаниях в Государственном региональном центре стандартизации, метрологии и испытаний им. А.М. Муратшина (Республика Башкортостан). Эти конструкции, с двумя и тремя электродами, имеют общий недостаток, проявляющийся при больших расходах жидкости и снижающий максимально возможный измеряемый расход жидкости — „опрокидывание“ выходных импульсов и последующее их „слипание“ [9].

Затем был разработан и изготовлен шариковый расходомер типоразмером Ду-50 с четырех-электродной электронной частью (рис. 2), изготовленный при помощи аддитивных технологий (3D-печать по технологии FDM).

Гидромеханическая часть шарикового расходомера электропроводной жидкости (рис. 3) включает в себя цилиндрический корпус 1, изготовленный из диэлектрического материала, такого как стекло, пластмасса или композитный материал. Внутри корпуса расположен струенаправляющий аппарат 2 со ступицей 3 [10]. Выполненный из диэлектрика шарик 4 обладает нулевой плавучестью в жидкости и свободно вращается в кольцевом канале корпуса 1 и внешней поверхностью ступицы 3. Кроме того, внутри корпуса 1 симметрично относительно траектории движения шара 4 размещены четыре электрода: $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$ и $\mathcal{E}_4$.

Стационарный относительно корпуса 1 струенаправляющий аппарат 2 состоит из нескольких лопастей, спроектированных таким образом [11], чтобы преобразование входного линейного потока жидкости во вращающийся поток [12] происходило без потери скорости и образования завихрений [13].

Расстояние между электродами $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$ и $\mathcal{E}_4$, $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_4$, $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$ одинаково, они размещены на корпусе 1 таким образом, чтобы траектория движения шара 4 делила расстояния между электродами $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$, $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_4$ на две равные части.

На рис. 3 показано, что шар 4 вращается по часовой стрелке относительно входа расходомера. Сначала он проходит между электродами $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$, а затем — между электродами $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_4$.



Рис. 2

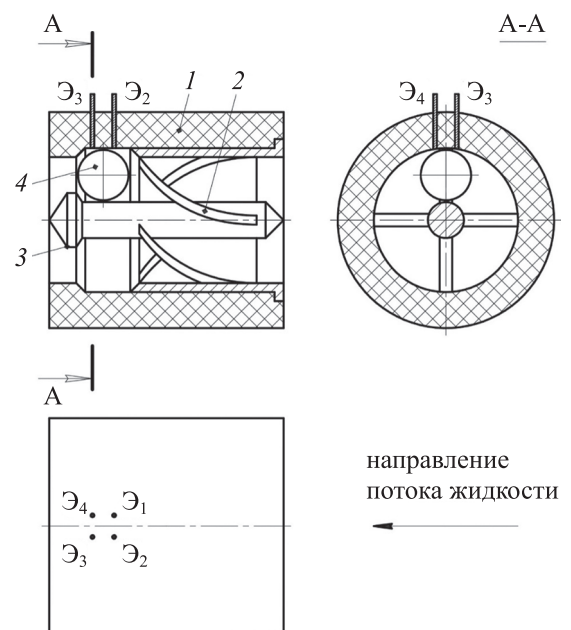


Рис. 3

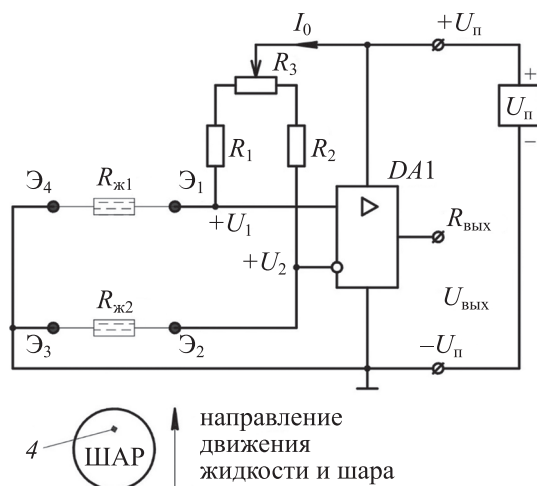


Рис. 4

Электрическая часть шарикового расходомера жидкости, изображенная на рис. 4, состоит из четырех электродов $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$ и $\mathcal{E}_4$, трех резисторов R_1 , R_2 и R_3 , источника стабильного питающего напряжения $U_{\text{п}}$, а также интегрального операционного усилителя (ОУ) $DA1$, работающего в качестве однопорогового компаратора.

В балансной схеме между электродами $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_4$, $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_3$, $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$, $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_4$ с резисторами R_1 , R_2 и R_3 включены сопротивления электропроводной жидкости $R_{\text{ж1}}$ и $R_{\text{ж2}}$. Мостовая схема питается стабилизированным напряжением $U_{\text{п}}$. Выходное дифференциальное напряжение этого резистивного моста подключается к неинвертирующему и инвертирующему входам ОУ $DA1$, который предназначен для нормирования выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ шарикового расходомера [14].

ОУ $DA1$ работает с однополярным источником питания $U_{\text{п}}$. Если входное дифференциальное напряжение $U_{\text{вх.д}} = U_1 - U_2$ больше $U_{\text{п}}/k_y$, где k_y — коэффициент усиления по напряжению для данного типа интегрального операционного усилителя, то выходное напряжение преобразователя расходомера $U_{\text{вых}}$ будет максимальным, т. е. $U_{\text{вых.мах}}$. У интегральных операционных усилителей значение k_y обычно составляет десятки или сотни тысяч. Это означает, что сигнал, измеряемый между электродами $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$, может иметь очень низкий уровень напряжения, на уровне милливольт. Максимально возможное выходное напряжение интегрального операционного усилителя положительной полярности примерно равно $U_{\text{вых.мах}} = U_{\text{п}} - 0,6$ В. Если входное напряжение ОУ $DA1$ $U_{\text{вх.д}} = U_1 - U_2$ меньше нуля (отрицательное), то выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ при однополярном электропитании будет меньше 0,6 В, что является низким уровнем выходного сигнала.

Подстроечный резистор R_3 используется для калибровки схемы в исходное состояние, когда шарик 4 находится неподвижно в области кольцевого канала, противоположной электродам. Это учитывает реальные расхождения в сопротивлениях промышленно производимых резисторов R_1 и R_2 , а также смещение нуля выходного напряжения операционного усилителя (при $U_1 = U_2$ $U_{\text{вых}} \neq 0$).

С помощью подстроечного резистора R_3 можно компенсировать эти расхождения и достичь состояния, при котором выходное напряжение операционного усилителя будет равно нулю при одинаковых значениях напряжений U_1 и U_2 . Это позволяет установить исходное состояние системы, учитывая неравенство сопротивлений R_1 и R_2 и сдвиг нуля выходного напряжения операционного усилителя.

Для определения сопротивления резисторов R_1 и R_2 учитываются желаемый ток I_0 , равные напряжения U_1 и U_2 , а также известные сопротивления $R_{\text{ж1}}$ и $R_{\text{ж2}}$, которые представляют собой сопротивления жидкости между электродами $\mathcal{E}_1$ или $\mathcal{E}_2$ и общей шиной схемы $U_{\text{п}}$, когда система находится в исходном состоянии.

После сборки шарикового расходомера жидкости и перед его предпродажной проверкой и опломбированием требуется настроить электронную схему на нужный режим работы. Для этого используется подстроечный резистор R_3 , который позволяет создать небольшой дисбаланс в мостовой схеме, достаточный для получения требуемого выходного напряжения от ОУ $DA1$. Например, если в соответствии с техническими условиями для данного расходомера требуется получить низкое выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ относительно общей шины (не превышающее 0,6 В для интегрального операционного усилителя с однополярным питанием), то с помощью резистора R_3 настраивается небольшое отличие напряжения U_2 на инвертирующем входе ОУ $DA1$ от напряжения U_1 в несколько милливольт.

В реальных условиях работы шарикового расходомера жидкости, когда поток жидкости отсутствует или его уровень ниже порога чувствительности расходомера, возможно застопоривание шарика 4 между электродами Э₂ и Э₃. Это приведет к увеличению сопротивления жидкости между электродами, и напряжение U_2 на инвертирующем входе ОУ DA1 превысит напряжение U_1 . В результате на входе операционного усилителя образуется положительное дифференциальное напряжение, что приведет к формированию постоянного высокого выходного напряжения схемы $U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} - 0,6 \text{ В}$.

Таким образом, в статическом состоянии шарикового расходомера жидкости выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ может принимать высокое или низкое значение, но не будет иметь импульсного характера.

При вращении шарика в кольцевом канале сопротивления жидкости между различными парами электродов — Э₁ и Э₄, Э₁ и Э₃, Э₂ и Э₃, Э₂ и Э₄ — изменяются. Это вызывает модуляцию дифференциального напряжения $U_1 - U_2$, а следовательно, появление импульсного выходного напряжения с очень короткими фронтами благодаря высокому коэффициенту усиления интегральных операционных усилителей. Процесс генерации такого импульсного выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, зависящего от значений U_1 и U_2 на неинвертирующем и инвертирующем входах ОУ DA1, и углового положения шара φ относительно электродов Э₁, Э₂, Э₃ и Э₄, показан на рис. 5.

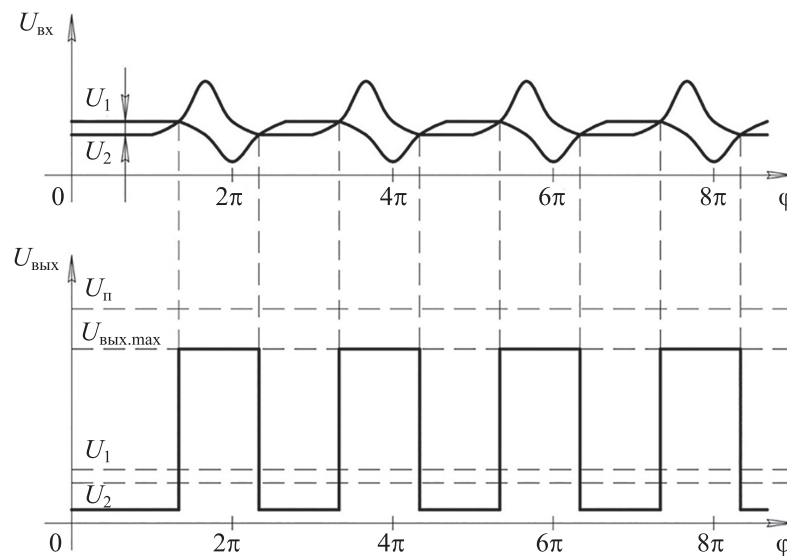


Рис. 5

Рассмотрим, как электронная часть шарикового расходомера в режиме работы, установленном с помощью подстроечного сопротивления R_3 , подавляет влияние уровня электропроводности жидкости в кольцевом канале. На рис. 6 представлены векторы токов положительных и отрицательных ионов жидкости, которые протекают между различными парами электродов: Э₁ и Э₄, Э₁ и Э₃, Э₁ и Э₂, Э₂ и Э₃, Э₂ и Э₄.

На рис. 6 не указано направление движения положительных и отрицательных ионов, протекающих через жидкость между электродами Э₁ и Э₂. Это связано с тем, что при прохождении шара под этими электродами направление движения ионов изменяется в зависимости от полярности дифференциального напряжения $U_1 - U_2$.

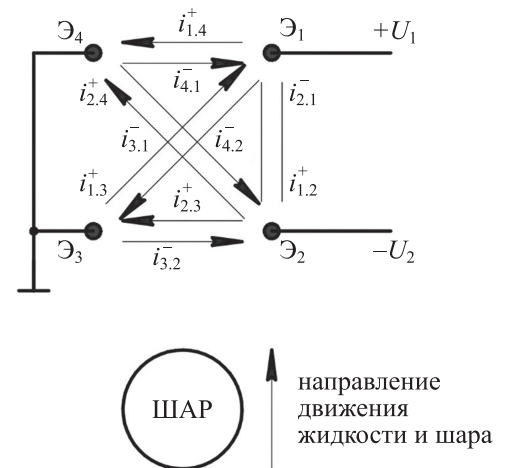


Рис. 6

Если шарик в текущий момент времени располагается между электродами Э₁ и Э₄, то дифференциальное напряжение составит

$$U_1 - U_2 = U_{\Pi} \frac{R_{\text{ж}} + \Delta R_{\text{ж}}}{R_2 + R_{\text{ж}} + \Delta R_{\text{ж}}} - U_{\Pi} \frac{R_{\text{ж}}}{R_1 + R_{\text{ж}}},$$

где $R_{\text{ж}}$ — сопротивление жидкой рабочей среды между электродами, когда шарик находится на удалении от них, т. е. исключается препятствие движению положительных и отрицательных ионов между этими электродами; $\Delta R_{\text{ж}}$ — абсолютное увеличение сопротивления жидкой рабочей среды между электродами, когда шарик противодействует свободному передвижению ионов в среде; R_1, R_2 — сопротивление плеч моста без учета малозначительного смещения подвижного контакта потенциометра R_3 относительно его центра, необходимое для фиксации начального состояния схемы.

Для оценки величины и полярности дифференциального напряжения можно считать, что сопротивления R_1 и R_2 , с учетом сопротивлений соответствующих участков переменного сопротивления R_3 , практически равны и их обозначить как R . Тогда дифференциальное напряжение $U_1 - U_2$ может быть выражено следующим образом:

$$U_1 - U_2 = \frac{U_{\Pi} R \Delta R_{\text{ж}}}{(R + R_{\text{ж}} + \Delta R_{\text{ж}})(R + R_{\text{ж}})} > 0,$$

а на выходе электронной схемы расходомера выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ будет пропорционально дифференциальному напряжению с коэффициентом усиления k_y по напряжению ОУ DA1. Таким образом, выходное напряжение будет почти равно напряжению питания U_{Π} .

Если шарик в текущий момент времени будет располагаться над электродами Э₂ и Э₃, то дифференциальное напряжение составит

$$U_1 - U_2 = U_{\Pi} \frac{R_{\text{ж}}}{R + R_{\text{ж}}} - U_{\Pi} \frac{R_{\text{ж}} + \Delta R_{\text{ж}}}{R + R_{\text{ж}} + \Delta R_{\text{ж}}} < 0,$$

и напряжение на выходе схемы $U_{\text{вых}}$ будет предельно низким.

Важно отметить, что дифференциальное напряжение на входе операционного усилителя имеет очень низкий уровень (в милливольтгах), и ток, протекающий между электродами Э₁ и Э₂ при реальном сопротивлении жидкости, имеет очень малые значения (в микроамперах). При таких низких напряжениях и токах между электродами электрохимические процессы не возникают, и можно пренебречь влиянием движущейся жидкости на подвижность положительных и отрицательных ионов. Жидкость одновременно сдвигает траектории движения положительных и отрицательных ионов в одном и том же направлении, это приводит к одинаковому увеличению длины соответствующих участков электропроводной жидкости и, следовательно, их электрических сопротивлений. В результате синфазные напряжения U_1 и U_2 на электродах Э₁ и Э₂ увеличиваются, но дифференциальное напряжение на входе ОУ DA1 остается неизменным.

Аналогично можно рассуждать о влиянии величины сопротивления жидкости $R_{\text{ж}}$ между электродами, зависящего от ее вида, типа и температуры. Изменение этих факторов приводит к равному изменению синфазных напряжений U_1 и U_2 , но их разность $U_1 - U_2$ остается неизменной, поэтому начальная настройка состояния мостовой схемы не изменится [8].

Динамический диапазон $Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$ измерения расхода жидкости значительно увеличится, если величина дифференциального напряжения $U_1 - U_2$ при низких расходах будет достаточной для переключения ОУ DA1. Дифференциальное напряжение $U_1 - U_2$ примет наибольшую величину при оптимальной величине сопротивлений $R_1 = R_2 = R$.

Вычислив экстремум функции (1) по параметру R , получим оптимальное сопротивление

$$R = \sqrt{R_{\text{ж}}^2 + R_{\text{ж}} \Delta R_{\text{ж}}}.$$

Например, пусть $R_{\text{ж}} = 10 \text{ кОм}$, $\Delta R_{\text{ж}} = 1 \text{ кОм}$ и $U_{\text{п}} = 5 \text{ В}$. Тогда разность напряжений при $R = 10,448 \text{ кОм}$, вычисленном по формуле (2), в соответствии с выражением (1), составит $U_1 - U_2 = 0,116 \text{ В}$ — этого достаточно для переключения ОУ DA1. Если коэффициент усиления по напряжению ОУ составляет $50 \cdot 10^3$, то для его надежного переключения достаточно разности $U_1 - U_2 = 5/50 \cdot 10^3 = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ В}$, при $U_{\text{п}} = 5 \text{ В}$.

Наконец, необходимо отметить, что вольт-амперные характеристики воды и других электропроводных жидкостей нелинейны, поэтому при фиксировании режима работы резистивной мостовой схемы следует согласовать напряжение электропитания с тем участком вольт-амперной характеристики жидкости, где наблюдается наибольшая зависимость напряжения от величины протекающего тока. Более того, чувствительность мостовой схемы к положению шарика в кольцевом канале зависит от расстояния между электродами Э₁, Э₄ и Э₂, Э₃ и диаметра шарика.

Заключение. Таким образом, представленный шариковый расходомер электропроводной жидкости обеспечивает:

— значительное расширение динамического диапазона измерения расхода электропроводной жидкости путем подавления влияния скорости движения жидкости в кольцевом канале на выбранный режим работы электронной схемы. Это позволяет увеличить максимально допустимую величину измеряемого расхода;

— сокращение потребляемой мощности электронной схемой практически в два раза за счет использования одного источника питания (в отличие от схем с двухполярным питанием операционного усилителя);

— возможность применения однопорогового компаратора на операционном усилителе, что способствует упрощению схемы и повышению ее надежности [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кремлёвский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Кн. 1. СПб: Политехника, 2002. С. 331–335.
2. Загребяев А. М., Попов Е. О. Предиктивная диагностика расходомеров реактора РБМК // Глобальная ядерная безопасность. 2023. № 2(47). С. 24–30. DOI 10.26583/gns-2023-02-03. EDN PJXECW.
3. Хайруллин Б. Д. Анализ работы тахометрических расходомеров // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 9-й Междунар. молодежн. науч.-практ. конф. Курск, 18 ноября 2022 года. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 232–235. EDN UICYJY.
4. Абрамов Г. С., Барычев А. В. Практическая расходометрия в нефтяной промышленности. М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 2002.
5. Реут В. И., Федорова Ю. М. Новые решения в конструкции шариковых расходомеров // Приборы. 2016. № 7(193). С. 37–40. EDN WMOZLP.
6. Ясовеев В. Х., Садыков Р. Р., Сафинов Ш. С. Актуальность применения шариковых расходомеров в нефтегазовой отрасли // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании. Молодежный научный форум: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. Ижевск, 25–26 мая 2023. Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2023. С. 282–287.
7. Пат. РФ 2471154 С1, МПК G01F 1/05. Шариковый первичный преобразователь расхода электропроводной жидкости / А. М. Муллагалеев, Ш. С. Сафинов. Заяв. 2011132821/28 от 04.08.2011, опубл. 27.12.2012. EDN ZGOSTJ.
8. Пат. РФ 2566428 С1, МПК G01F 1/06. Универсальный электрошариковый первичный преобразователь расхода электропроводной жидкости / Ш. С. Сафинов, Р. Н. Галлямов. Заяв. 2014131864/28 от 31.07.2014, опубл. 27.10.2015. EDN WBUKIL.
9. Пат. РФ 2762946 С1, МПК G01F 1/05. Шариковый расходомер электропроводной жидкости / Д. Н. Пущенко, Р. Р. Садыков, Ш. С. Сафинов. Заяв. 2020142615 от 22.12.2020, опубл. 24.12.2021. EDN MQLXWP.
10. А.с. СССР 1117448 А1, МПК G01F 1/06. Шариковый расходомер / Ю. Г. Бибик, В. Г. Новиков, М. С. Хабибуллин, Б. Н. Линовский. Заяв. 3640383 от 31.08.1983, опубл. 07.10.1984. EDN IFTQGC.
11. Митрофанова О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М., 2010. 288 с. EDN MUWSRZ.

12. Пат. РФ 2761416 C1, МПК G01F 1/05. Универсальный шариковый расходомер жидкости / Д. Н. Пущенко, Р. Р. Садыков, Ш. С. Сафинов. Заяв. 2021100496 от 12.01.2021, опубли. 08.12.2021. EDN QUUICZ.
13. Пат. РФ 2253843 C1, МПК G01F 1/06. Шариковый преобразователь расхода / С. В. Архангельский, Г. Н. Байкова, Э. Г. Звенигородский и др. Заяв. 2004122571/28 от 26.07.2004, опубли. 10.06.2005. EDN OGXCDQ.
14. Пат. РФ 2779813 C1, МПК G01R 17/16. Мостовой преобразователь сопротивления / Д. Н. Пущенко, Р. Р. Садыков, Ш. С. Сафинов. Заяв. 2021126392 от 08.09.2021, опубли. 13.09.2022. EDN CHJUCX.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- | | |
|---------------------------------|---|
| Руслан Рашитович Садыков | — аспирант; Уфимский университет науки и технологий, кафедра электронной инженерии; E-mail: srr-91@mail.ru |
| Шамиль Саидович Сафинов | — канд. техн. наук; Уфимский университет науки и технологий, кафедра технической кибернетики; доцент; E-mail: safinov@mail.ru |
| Васих Хаматович Ясоев | — докт. техн. наук; Уфимский университет науки и технологий, кафедра электронной инженерии; профессор; E-mail: yasov@mail.ru |

Поступила в редакцию 30.01.2024; одобрена после рецензирования 16.03.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Kremlevsky P. P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv. Kniga 1* (Flow Meters and Substance Quantity Counters. Book 1), St. Petersburg, 2002, pp. 331–335. (in Russ.)
2. Zagrebaev A. M., Popov E. O. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* (Global Nuclear Security), 2023, no. 2(47), pp. 24–30, DOI 10.26583/gns-2023-02-03. (in Russ.)
3. Khairullin B. D. *Kachestvo produktsii: kontrol', upravleniye, povysheniye, planirovaniye* (Product Quality: Control, Management, Improvement, Planning), Collection of scientific papers of the 9th International Youth Scientific and Practical Conference, Kursk, November 18, 2022. Kursk, 2022, pp. 232–235. (in Russ.)
4. Abramov G. S., Barychev A. V. *Prakticheskaya raskhodometriya v neftyanoy promyshlennosti* (Practical Flow Metering in the Oil Industry), Moscow, 2002. (in Russ.)
5. Reut V. I., Fedorova Yu. M. *Devices*, 2016, no. 7(193), pp. 37–40. (in Russ.)
6. Yasoveev V. Kh., Sadykov R. R., Safinov Sh. S. *Informatsionnyye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii. Molodezhnyy nauchnyy forum* (Information technologies in science, industry and education. Youth Scientific Forum), Collection of proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Izhevsk, May 25–26, 2023. Izhevsk, 2023, pp. 282–287. (in Russ.)
7. Patent RU 2471154 C1, G01F 1/05, *Sharikovyy pervichnyy preobrazovatel' raskhoda elektroprovodnoy zhidkosti* (Ball Primary Converter for the Flow of Electrically Conductive Liquid), A. M. Mullagaleev, Sh. S. Safinov, Patent application no. 2011132821/28, Priority 04.08.2011, Published 27.12.2012. (in Russ.)
8. Patent RU 2566428 C1, G01F 1/06, *Universal'nyy elektrosharikovyy pervichnyy preobrazovatel' raskhoda elektroprovodnoy zhidkosti* (Universal Electric Ball Primary Flow Converter for Electrically Conductive Liquid), Sh. S. Safinov, R. N. Gallyamov, Patent application no. 2014131864/28, Priority 31.07.2014, Published 27.10.2015. (in Russ.)
9. Patent RU 2762946 C1, G01F 1/05, *Sharikovyy raskhodomer elektroprovodnoy zhidkosti* (Ball Flow Meter of Electrically Conductive Liquid), D. N. Pushchenko, R. R. Sadykov, Sh. S. Safinov, Patent application no. 2020142615, Priority 22.12.2020, Published 24.12.2021. (in Russ.)
10. Certificate of authorship USSR1117448 A1, G01F 1/06, *Sharikovyy raskhodomer* (Ball Flow Meter), Yu. G. Bibik, V. G. Novikov, M. S. Khabibulin, B. N. Linovsky, Application no. 3640383, Priority 31.08.1983, Published 07.10.1984. (in Russ.)
11. Mitrofanova O. V. *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalakh yaderno-energeticheskikh ustanovok* (Hydrodynamics and Heat Transfer of Swirling Flows in the Channels of Nuclear Power Plants), Moscow, 2010, 288 p. (in Russ.)
12. Patent RU 2761416 C1, G01F 1/05, *Universal'nyy sharikovyy raskhodomer zhidkosti* (Universal Ball Liquid Flow Meter), D. N. Pushchenko, R. R. Sadykov, Sh. S. Safinov, Patent application no. 2021100496, Priority 12.01.2021, Published 08.12.2021. (in Russ.)
13. Patent RU 2253843 C1, G01F 1/06, *Sharikovyy preobrazovatel' raskhoda* (Ball Flow Converter), S. V. Arkhangelsky, G. N. Baykova, E. G. Zvenigorodsky etc., Patent application no. 2004122571/28, Priority 26.07.2004, Published 10.06.2005. (in Russ.)
14. Patent RU 2779813 C1, G01R 17/16, *Mostovoy preobrazovatel' soprotivleniya* (Bridge Resistance Converter), D. N. Pushchenko, R. R. Sadykov, Sh. S. Safinov, Patent application no. 2021126392, Priority 08.09.2021, Published 13.09.2022. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

- Ruslan R. Sadykov** — Post-Graduate Student; Ufa University of Science and Technology, Department of Electronic Engineering; University; E-mail: srr-91@mail.ru
- Shamil S. Safinov** — PhD, Associate Professor; Ufa University of Science and Technology, Department of Technical Cybernetics; E-mail: safinov@mail.ru
- Vasikh K. Yasoveev** — Dr. Sci. Professor; Ufa University of Science and Technology, Department of Electronic Engineering; E-mail: yasov@mail.ru

Received 30.01.2024; approved after reviewing 16.03.2024; accepted for publication 16.04.2024

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БРОНЕВОГО СИТАЛЛА В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

В. М. Медунецкий^{1*}, Ю. Ю. Меркулов², С. В. Солк³, Б. Н. Добряков⁴

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² НПО Спецматериалов, Ленинградская область, Сосновый бор, Россия

³ НИИ ОЭП, Ленинградская область, Сосновый бор, Россия

⁴ НИИ телевидения, Санкт-Петербург, Россия

* vm57med@yandex.ru

Аннотация. Показана возможность изготовления зеркальных оптических элементов и элементов конструкции из нового материала — бронеситалла. Использование бронеситалла обеспечивает защиту оптико-электронных приборов от механических повреждений высокоскоростными объектами. Рассмотрена технология получения бронеситалла и проведены эксперименты. Сделаны выводы о возможности совершенствования технологии с целью получения бронеситалла, прозрачного в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра.

Ключевые слова: оптическая керамика, бронеситалл, оптический элемент, оптическая поверхность, прозрачная броня

Ссылка для цитирования: Медунецкий В. М., Меркулов Ю. Ю., Солк С. В., Добряков Б. Н. Технологическая возможность применения броневое ситалла в приборостроении // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 542–546. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-542-546.

TECHNOLOGICAL POSSIBILITY OF USING ARMORED GLASS CERAMICS IN INSTRUMENT ENGINEERING

V. M. Medunetskii^{1*}, Yu. Yu. Merkulov², S. V. Solk³, B. N. Dobryakov⁴

¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia

² JSC Scientific and Production Association of Special Materials, St. Petersburg, Russia

³ JSC Research Institute of Optical-Electronic Instrumentation, Sosnovy Bor, Leningrad Region, Russia

⁴ JSC Television Scientific Research Institute, St. Petersburg, Russia

* vm57med@yandex.ru

Abstract. The possibility of manufacturing mirror optical elements and structural elements from a new material - armored glass ceramics - is shown. The use of armored glass ceramics ensures protection of optical-electronic devices from mechanical damage by high-speed objects. The technology for producing armored glass ceramics is considered and experiments are carried out. Conclusions are drawn about the possibility of improving technology in order to obtain armored glass ceramics that is transparent in the visible and near-infrared spectral ranges.

Keywords: optical ceramics, glassceramics, optical element, optical surface, transparent armor

For citation: Medunetskii V. M., Merkulov Yu. Yu., Solk S. V., Dobryakov B. N. Technological possibility of using armored glass ceramics in instrument engineering. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 542–546 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-542-546.

В настоящее время все более актуальной становится задача защиты различных систем, в том числе оптико-электронных приборов (ОЭП), от механических повреждений высокоскоростными объектами. По нашему мнению, это вызвано:

1) необходимостью защиты приборов военного назначения от пуль и осколков в боевой обстановке [1];

2) увеличением числа космических аппаратов и количества космического мусора, обуславливающим рост вероятности их столкновения [2]. Также существует вероятность повреждения космических аппаратов метеороидами [3];

3) ростом террористической опасности [4] и, как следствие, необходимостью защиты все большего количества приборов, расположенных в общественных местах, например, камер видеонаблюдения.

Следует отметить, что на сегодняшний день накоплен большой опыт создания материалов и структур легкой бронезащиты, предназначенных для защиты от высокоскоростных пуль и осколков с поверхностной плотностью, не превышающей 50–80 кг/м² [5]. Непрозрачные материалы могут использоваться для изготовления конструкций, которые предназначены для защиты механических и электронных компонентов приборов, прозрачные — для защиты непосредственно оптических элементов [6].

Все многообразие броневых структур можно разделить на следующие группы [5]:

- 1) текстильная броня (из тканей типа кевлар, тварон, дайнема и т.п.);
- 2) металлическая броня (сталь, алюминий, титан и различные сплавы);
- 3) керамическая броня (корунд, карбид бора, карбид кремния и др.);
- 4) органопластиковая броня (композитная броня на основе арамидных тканей или сверхвысокомодульного полиэтилена);
- 5) комбинированная многослойная броня (металлотекстильная, керамико-органопластиковая и др.);
- 6) прозрачная броня.

В настоящее время для защиты от высокотвердых поражающих элементов современных боеприпасов наиболее широко используется комбинированная броня. Но этот вид баллистической защиты технологически сложен и имеет высокую себестоимость. Защитные свойства текстильной брони недостаточны, они значительно ухудшаются в условиях повышенной влажности. Металлическая броня имеет большую массу. Баллистические свойства органопластиковой брони значительно зависят от влажности и температуры окружающей среды.

Наиболее перспективной считается керамическая броня [7]. Однако на сегодняшний день броневая керамика имеет либо невысокую стоимость и высокую плотность (корундовая керамика), либо невысокую плотность и высокую себестоимость (керамика из карбида бора) при сравнимых баллистических характеристиках [8, 9].

В работе [10] описана технология создания нового конструкционного материала на основе броневых ситалла (высокопрочной стеклокерамики). Слово „ситалл“ — производное от „стекло–кристалл“, оно появилось в 1960-х гг. в СССР, во времена так называемого „стеклокерамического бума“.

В отличие от разработанных ранее бронекерамик [11, 12] был выбран вариант стеклокерамики (бронеситалла) алюмосиликатлитиевой системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. Выбор основан на следующих технико-экономических преимуществах:

1) стоимость исходного сырья (в зависимости от масштабов производства) — 25–30 долларов США за 1 кг стекломассы (соизмеримо со стоимостью сырья для производства 1 кг бронекерамики на основе Al_2O_3 . Все остальные широко применяемые (карбид кремния и карбид бора) значительно (в 4–15 раз) дороже;

2) технологический процесс производства бронеситалла разработан для реализации в одну рабочую смену (8 ч);

3) плотность бронеситалла (2,56 г/см³) практически равна плотности карбида бора (2,54 г/см³) и значительно меньше плотности карбида кремния (3,15 г/см³) и корунда (3,95 г/см³);

4) варка исходной стекломассы производится при средних температурах (1200–1300 °С);
5) процесс производства изделий из бронеситалла аналогичен процессу производства обычного стекла (за исключением последней фазы — управляемой кристаллизации) и проще поддается автоматизации (в отличие от керамических технологий, где много ручного труда).

Технология производства бронеситалла включает следующие операции: смешивание шихты, варка стекла, формование, отжиг и кристаллизация изделий. Ситалловая шихта, в отличие от обычной стекольной, дополнительно содержит катализатор кристаллизации.

При апробации процесса варка стекла осуществлялась в воздушной атмосфере муфельной печи в тигле из керсила при температуре 1300 °С. Формование (выработка) стекла производилась при температуре 1000 °С в подогретые до 400 °С стальные формы. Отжиг осуществлялся при температуре 400 °С. Кристаллизация проводилась в два этапа при температуре 500 и 700 °С с выдержкой от 60 до 180 мин (для обеспечения образования максимального числа центров кристаллизации, необходимой степени закристаллизованности и заданного фазового состава).

Плотность полученного бронеситалла составила 2,56 г/см³. Значение плотности определялось гидростатическим взвешиванием. Баллистические испытания показали, что бронеситалл можно использовать в качестве фронтального слоя в защитных структурах класса Бр 4 с поверхностной плотностью около 35 кг/м².



Рис. 1

Был проведен ряд экспериментов по исследованию возможности использования бронеситалла для изготовления зеркал. Формообразование рабочих поверхностей осуществлялось по традиционной в оптическом приборостроении технологии: шлифование связанным инструментом, шлифование свободным абразивом и полирование. На заготовках размером 50 × 50 мм была получена плоская поверхность со следующими характеристиками: $Rq = 20 \text{ Å}$, $N = 0,5\Delta N = 0,2$. На рис. 1 приведена фотография изготовленного экспериментального образца.

Эксперименты показали, что бронеситалл может быть использован также при изготовлении зеркал со сферическими и асферическими поверхностями. Это позволяет изготавливать составные зеркала с „сотовой“ структурой. Такое зеркало при попадании в него высокоскоростного объекта защищает остальные элементы конструкции. При повреждении, вызывающем неприемлемое ухудшение качества изображения, один или несколько сегментов могут быть удалены, для чего необходимо предусмотреть специальные механизмы.

Бронеситалл также может быть использован для создания защитных корпусов ОЭП, которые будут защищать механические и электронные элементы конструкции. На рис. 2 показана экспериментальная конструкция в виде кольца из бронеситалла, полученная литьем в форму. Более сложная конструкция (с выборками, отверстиями и другими элементами конструкции) может быть получена путем дополнительной обработки заготовки инструментом для механической обработки оптических стекол [13].

В работе [14] приводится информация о достижениях иностранных специалистов в изготовлении стеклокерамики, в том числе прозрачной в видимом спектральном диапазоне, для использования ее в качестве брони. Проведенный анализ показал, что возможно совершенствование техно-



Рис. 2

логии изготовления броневиталла, которая позволит получить кристаллическую структуру с размерами кристаллов 0,05–0,1 мкм. Это позволит сделать броневиталл прозрачным в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Таким образом, имеется возможность изготавливать из броневиталла не только зеркальные, но и линзовые оптические элементы.

Таким образом, по работе можно сделать следующие выводы:

1) экспериментально доказана принципиальная возможность изготовления зеркальных оптических элементов и защитных элементов конструкции из броневиталла;

2) имеется возможность получить броневиталл, прозрачный в видимом и ближнем ИК-диапазонах, при наличии соответствующей технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатова А. О., Бородай В. В., Сильников Н. М., Борисов Д. В. Физические свойства и сравнительные характеристики прозрачной брони // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 09–10(123–124). С. 162–167.
2. Merkulov Yu. Yu., Solk S. V., Lebedev O. A. Protection of orbital station optics against high — speed damaging elements // Acta Astronautica. 2017. Vol. 135. P. 21–25.
3. Adushkin V., Kozlov S., Veniaminov S., Doronin A., Silnikov M. Natural and technogeneous contamination of near-Earth space // Acta Astronautica. 2017. Vol. 135. P. 6–9.
4. Ивановский В. С., Макаренко Н. Г., Яковлев Ю. С. Прозрачная броня в изделиях военной техники // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 1(116). С. 133–138.
5. Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 161 с.
6. Солк С. В., Меркулов Ю. Ю., Лебедев О. А. Проблемы защиты оптико-электронных приборов от высокоскоростных поражающих элементов // Сб. тр. Междунар. конф. „Прикладная оптика–2016“. СПб, 2016. Т. 2. С. 144–148.
7. Сильников Н. М., Юрченко Н. М., Михайлин А. И., Гук И. В. Баллистические испытания органокерамических панелей на основе керамики „идеал“ // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 7–8(169–170). С. 156–166.
8. Hazell P. O. Advances in Ceramic Armour // Military Technology. 2009. Vol. 33, N 4. P. 118–126.
9. Беспалов И., Григорян В., Карпов А. Керамическая броня // Новости ВПК. 2012. № 26(443) [Электронный ресурс]: <<http://vpk-news.ru/articles/9011>>.
10. Меркулов Ю. Ю., Михайлин А. И., Сильников Н. М. Баллистическая стойкость броневиталла системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 7–8(177–178). С. 126–138.
11. Пат. РФ № 2176624. Стеклокерамика, способ ее получения и защитная конструкция на ее основе / Ю. Ю. Меркулов. 2001. Бюл. 34.
12. Пат. РФ № 2294517. Композиционный материал и способ изготовления композиционного материала (варианты) / Ю. Ю. Меркулов. 2007. Бюл. 6.
13. Справочник технолога-оптика / Под ред. М. А. Окатова. СПб: Политехника, 2004. 679 с.
14. Gallo L. S. A., Villas Boas M. O. C., Rodrigues A. C. M., Zannotto E. D., Melo F. C. L. Transparent glass-ceramics for ballistic protection: materials and challenges // Journal of Material Research and Technology. 2019. Vol. 8, N 3. P. 3357–3372.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Виктор Михайлович Медунецкий** — докт. техн. наук; Университет ИТМО; профессор;
E-mail: vm57med@yandex.ru
- Юрий Юрьевич Меркулов** — канд. техн. наук; НПО Спецматериалов; науч. сотр.;
E-mail: melas33@yandex.ru
- Сергей Вольдемарович Солк** — докт. техн. наук; НИИ ОЭП; зам. начальника отдела; E-mail: solk@sbor.net
- Борис Николаевич Добряков** — НИИ телевидения; инженер-технолог; E-mail: progsnob92@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.09.2023; одобрена после рецензирования 31.03.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Filatova A. O., Boroday V. V., Silnikov N. M., Borisov D. V. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu* (Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism), 2018, no. 09–10(123–124), pp. 162–167. (in Russ.)
2. Merkulov Yu. Yu., Solk S. V., Lebedev O. A. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 21–25.
3. Adushkin V., Kozlov S., Veniaminov S., Doronin A., Silnikov M. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 6–9.
4. Ivanovsky V. S., Makarenko N. G., Yakovlev Yu. S. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk* (News of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences), 2021, no. 1(116), pp. 133–138. (in Russ.)
5. Kobylkin I. F., Selivanov V. V. *Materialy i struktury legkoy bronezashchity* (Materials and Structures of Light Armor Protection), Moscow, 2014, 161 p. (in Russ.)
6. Salk S. V., Merkulov Yu. Yu., Lebedev O. A. *Prikladnaya optika–2016* (Applied Optics-2016), Proceedings of the International Conference, St. Petersburg, 2016, vol. 2, pp. 144–148. (in Russ.)
7. Silnikov N. M., Yurchenko N. M., Mikhailin A. I., Guk I. V. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu* (Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism), 2022, no. 7–8(169–170), pp. 156–166. (in Russ.)
8. Hazell P. O. *Military Technology*, 2009, no. 4(33), pp. 118–126.
9. <http://vpk-news.ru/articles/9011>. (in Russ.)
10. Merkulov Yu. Yu., Mikhailin A. I., Silnikov N. M. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu* (Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism), 2022, no. 7–8(177–178), pp. 126–138. (in Russ.)
11. Patent RU 2176624, *Steklokeramika, sposob yeye polucheniya i zashchitnaya konstruktsiya na yeye osnove* (Glass Ceramics, Method of Its Production and Protective Structure Based on It), Yu. Yu. Merkulov, Published 2001, Bulletin 34. (in Russ.)
12. Patent RU 2294517, *Kompozitsionnyy material i sposob izgotovleniya kompozitsionnogo materiala (varianty)* (Composite Material and Method of Manufacturing Composite Material (Options)), Yu. Yu. Merkulov, Published 2007, Bulletin 6. (in Russ.)
13. Okatov M. A., ed., *Spravochnik tekhnologa-optika* (Optical Technologist's Handbook), St. Petersburg, 2004, 679 p. (in Russ.)
14. Gallo I. S. A., Villas Boas M. O. C., Rodrigues A. C. M., Zanotto E. D., Melo F. C. L. *Journal of Material Research and Technology*, 2019, no. 3(8), pp. 3357–3372.

DATA ON AUTHORS

Viktor M. Medunetskiy	—	Dr. Sci.; ITMO University; Professor; E-mail: vm57med@yandex.ru
Yurii Yu. Merkulov	—	PhD; Scientific and Production Association of Special Materials; Researcher; E-mail: melas33@yandex.ru
Sergei V. Solk		Dr. Sci.; Research Institute of Optical-Electronic Instrumentation, Deputy Head of Department; E-mail: solk@sbor.net
Boris N. Dobryakov		Television Scientific Research Institute; process engineer; E-mail: progsnob92@yandex.ru

Received 17.09.2023; approved after reviewing 31.03.2024; accepted for publication 16.04.2024