



3(137)'2024

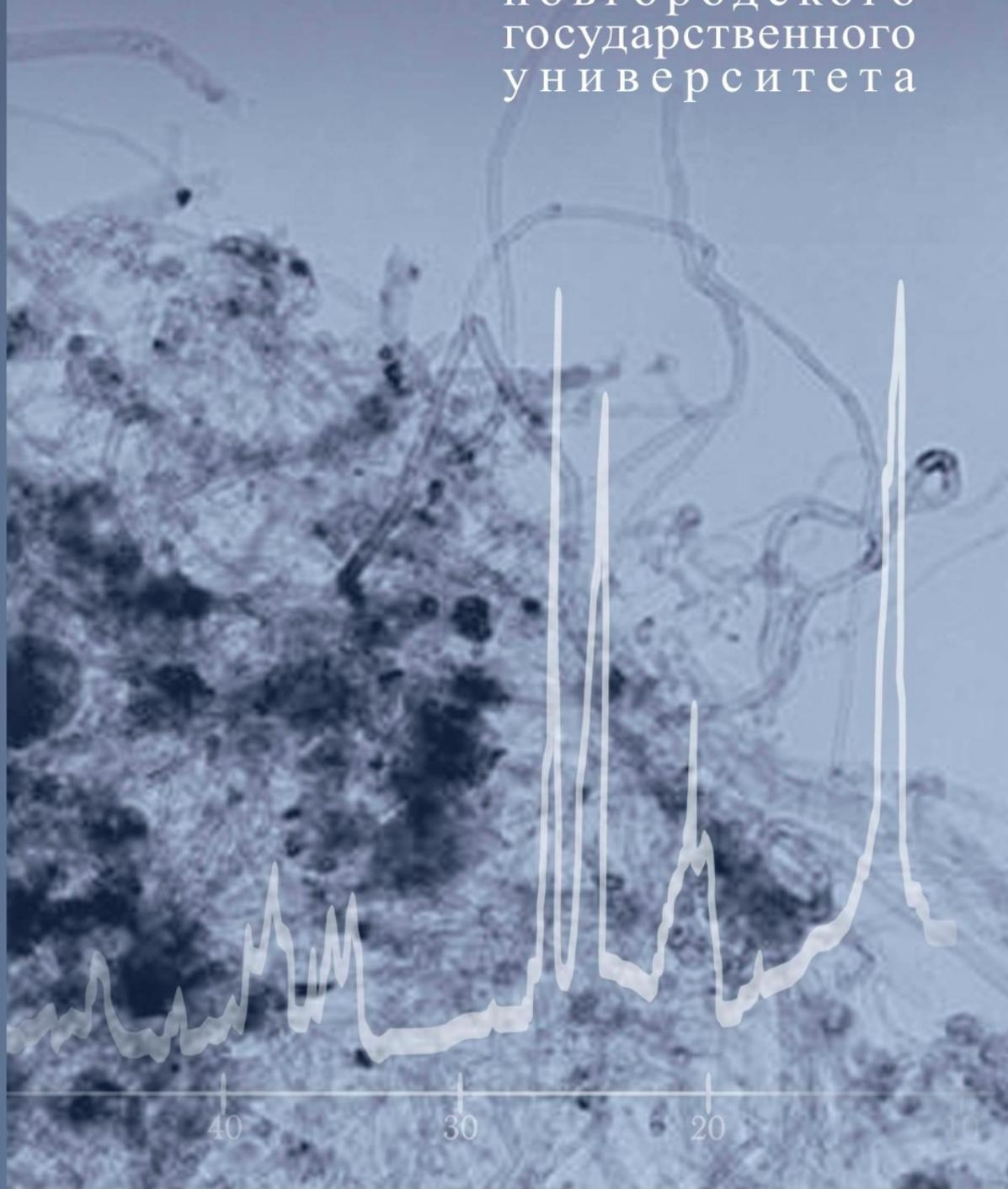
ВЕСТНИК

ВЕСТНИК

СЕРИЯ
ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИ

новгородского
государственного
университета

ВЕЛИКИЙ
НОВГОРОД



40

30

20

ВЕСТНИК

НОВГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА



НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2076-8052

Серия «Технические науки»

3 (137) ' 2024

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

ЕФРЕМЕНКОВ А. Б., д.т.н., доцент

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

БИЧУРИН М. И., д.ф.-м.н., проф.,
научный редактор (Великий Новгород, Россия)

ЗАХАРОВ А. Ю., д.ф.-м.н., проф.,
научный редактор (Великий Новгород, Россия)

ПЕТРОВ В. М., д.т.н., проф.,
ответственный секретарь (Великий Новгород,
Россия)

АВЕРКИЕВ Н. С., д.ф.-м.н., проф.
(Санкт-Петербург, Россия)

БУГАЁВ А. С., д.ф.-м.н., проф., академик РАН
(Москва, Россия)

БЫСТРОВ Н. Е., д.т.н., доцент,
(Великий Новгород, Россия)

ГАВРУШКО В. В., д.т.н., проф.
(Великий Новгород, Россия)

ЕДЕМСКИЙ В. А., д.ф.-м.н., доцент
(Великий Новгород, Россия)

ЗАВОРОТНЕВ Ю. Д., д.ф.-м.н., с.н.с.
(Донецк, Россия)

ЗАХАРОВ М. А., д.ф.-м.н., доцент
(Великий Новгород, Россия)

КАРТАШИНСКАЯ Е. С., д.хим.н. (Донецк, Россия)

МАЛАШЕНКО В. В., д.ф.-м.н., проф.
(Донецк, Россия)

НЕМОВ С. А., д.ф.-м.н., проф.
(Санкт-Петербург, Россия)

ПЕТРОВ Р. В., д.ф.-м.н., доцент
(Великий Новгород, Россия)

RASSOLOV V. A., PhD., prof.
(Columbia, South Carolina, USA)

САМСОНОВ В. М., д.ф.-м.н., проф. (Тверь, Россия)

УЧАЙКИН В. В., д.ф.-м.н., проф.
(Ульяновск, Россия)

ЭМИНОВ С. И., д.ф.-м.н., проф.
(Великий Новгород, Россия)

WANG YAOJIN, PhD, prof. (Nankin, China)

Учредитель и издатель –

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого»

Адрес издателя и редакции:

173003, Россия, Великий Новгород,
ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, ауд. 1308
Факс: +7(8162)974526; Тел.: +7(8162)338830
E-mail: vestnik@novsu.ru

<https://vestnovsu.elpub.ru/>

**ВЕСТНИК НОВГОРОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**
3 (137) ' 2024

Оригинал-макет подготовлен редакцией
журнала «Вестник НовГУ»
Верстка Т. С. Григорьева
Художественное оформление В. В. Попович
Дизайн обложки И. А. Чижикова

Свидетельство ПИ № 77-17766 от 10.03.2004
Министерства Российской Федерации
по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций

Выходит не менее четырех раз в год

Подписано в печать 08.11.2024

Дата выхода 09.11.2024

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Тираж 500 экз. Усл. печ. л. 21,51. Уч.-изд. л. 9,40.

Отпечатано: ИП Копыльцов П. И.,
394052, Россия, Воронеж,
ул. Маршала Неделина, 27, кв. 56



(16+)

© Вестник НовГУ, 2024



Chief Editor

EFREMENKOV A. B., Dr of Engineering, Assoc. Prof.

EDITORIAL BOARD:

BICHURIN M. I., Dr of Physics and Mathematics, Prof.,
Science Editor (Veliky Novgorod, Russia)

ZAKHAROV A. Yu., Dr of Physics and Mathematics,
Prof., Science Editor (Veliky Novgorod, Russia)

PETROV V. M., Dr of Engineering, Prof., Executive
Editor (Veliky Novgorod, Russia)

AVERKIEV N. S., Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Saint Petersburg, Russia)

BUGAYOV A. S., Dr of Physics and Mathematics,
Prof., Member of Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russia)

BYSTROV N. E., Dr of Engineering, Assoc. Prof.
(Veliky Novgorod, Russia)

GAVRUSHKO V. V., Dr of Engineering, Prof.
(Veliky Novgorod, Russia)

EDEMSKIY V. A., Dr of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof. (Veliky Novgorod, Russia)

ZAVOROTNEV Yu. D., Dr of Physics and Mathematics,
senior researcher (Donetsk, Russia)

ZAKHAROV M. A., Dr of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof. (Veliky Novgorod, Russia)

KARTASHYNSKAYA E. S., Dr of Chemistry
(Donetsk, Russia)

MALASHENKO V. V., Dr of Physics and Mathematics,
Prof. (Donetsk, Russia)

NEMOV S. A., Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Saint Petersburg, Russia)

PETROV R. V., Dr of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof. (Veliky Novgorod, Russia)

RASSOLOV V. A., PhD., Prof. (Columbia,
South Carolina, USA)

SAMSONOV V. M., Dr of Physics and Mathematics,
Prof. (Tver', Russia)

UCHAIKIN V. V., Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Ulyanovsk, Russia)

EMINOV S. I., Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Veliky Novgorod, Russia)

WANG YAOJIN, PhD, Prof. (Nankin, China)

Founder and Publisher – Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education
"Yaroslav-the-Wise Novgorod State University"

Postal address of Publisher and Editorial Staff:

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,
Russia, 173003, Veliky Novgorod,
ul. Bolshaya Sankt-Peterburgskaya, 41, room 1308
Fax: +7(8162)974526; Tel.: +7(8162)338830
E-mail: vestnik@novsu.ru

<https://vestnovsu.elpub.ru/>

VESTNIK OF NOVGOROD STATE UNIVERSITY
3 (137) ' 2024

Camera-ready copy is prepared by the Journal
Vestnik NovSU Editorial Staff
Layout T. S. Grigoreva
Art work V. V. Popovich
Cover design I. A. Chizhikova

Printed publication license no. 77-17766
of 10 March, 2004, issued by Ministry
of the Russian Federation for Affairs of the Press,
Television and Radio Broadcasting and Mass
Communication Media

The journal is published quarterly.

Signed to print on 08.11.2024
Publication date 09.11.2024
Sheet size 60×84 1/8. Offset printing.
Number of printed copies: 500.
Conventionally printed sheet 21.51.

Printed by IE Kopyltsov P. I.
Russia, 394052, Voronezh,
ul. Marshala Nedelina, 27-56



СОДЕРЖАНИЕ

Обращение к читателям 329

РАДИОФИЗИКА

Андреев И. А., Иванов А. Ю., Петров Р. В. Исследование влияния различных параметров на вычислительную мощность процессора 333

Ивашева Е. Е., Леонтьев В. С., Бичурин М. И., Осипова И. С. Влияние числа магнитострикционных волокон на магнитоэлектрический эффект в структуре ЦТС-19 / АМАГ-225 341

Малашенко В. В. Нарушение соотношения Тейлора в облучённых металлах 351

Павлов Д. В., Телина И. С., Самуйлова К. Д. Алгоритмическая модель системы ориентации и навигации со структурной избыточностью 363

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Корнышев Н. П. Учет времени экспозиции при двухточечной коррекции геометрического шума матричного фотоприемника 379

Румянцев Д. В., Петров М. Н. Оптимизация функциональной схемы передатчика/приемника по интерфейсу RS-232 391

Яковлев Н. С., Иванов А. Ю., Михайлов А. А., Килиба Ю. В. Использование современных микроконтроллеров при проектировании электронных устройств 403

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Беспалов Д. В., Голованова О. А. Сравнение методов MP2 и DFT для расчета структуры и ИК-спектров на примере соединений магния с аминокислотами 416

Захаров А. Ю., Захаров М. А., Зубков В. В. Принципы релятивистской молекулярной динамики 425

Михайлов Д. Л., Ермишкин В. А., Минина Н. А. Сравнительный анализ кинетики деформации структур никелевых сплавов X30H60M9 и X23H65M13 по результатам испытаний на растяжение 436

Саплев А. Ф., Петров В. М. Влияние пьезоэлектрической фазы на магнитный резонанс в слоистых структурах: обзор 453

Шляхова Г. В., Орлова Д. В., Немлиенко Т. С., Сороков Н. Н. Структура и свойства биметаллического соединения углеродистая сталь-аустенитная нержавеющая сталь, полученного электродуговой наплавкой 466

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

<i>Гарбарь С. В., Ласков И. А.</i> Компенсация эффекта Нарцисса для оптической системы с переменным фокусным расстоянием при различных дистанциях фокусировки	478
<i>Едемский В. А., Дроганова Д. С.</i> О симметричной 2-адической сложности чередующихся последовательностей на основе последовательностей Лежандра	489
<i>Эминов С. И., Сочилин А. В.</i> Обратные задачи теории цилиндрических вибраторных антенн в пространствах Соболева	498
<i>Требования к публикации статей в научном журнале «Вестник НовГУ»</i>	507

CONTENTS

<i>Address to readers</i>	329
---------------------------	-----

RADIOPHYSICS

<i>Andreev I. A., Ivanov A., Petrov R. V.</i> Investigation of the influence of various parameters on the processor processing power	333
<i>Ivasheva E. E., Leontiev V. S., Osipova I. S., Bichurin M. I.</i> Influence of the number of magnetostrictive fibers on the magnetoelectric effect in the structure of PZT-19 / AMAG-225	341
<i>Malashenko V. V.</i> Violation of the Taylor ratio in irradiated metals	351
<i>Pavlov D. V., Telina I. S., Samuilova K. D.</i> Evaluation of the improvement of the accuracy of the orientation and navigation system with structural redundancy	363

MICROELECTRONICS

<i>Kornyshev N. P.</i> Accounting for exposure time with two-point correction of fixed pattern noise of a matrix photodetector	379
<i>Rumiantsev D. V., Petrov M. N.</i> Optimization of the functional diagram of the transmitter/receiver via RS-232 interface	391
<i>Yakovlev N. S., Mikhailov A. A., Kiliba Yu. V., Petrov R. V.</i> Using modern microcontrollers when designing electronic devices	403

CONDENSED MATTER PHYSICS

<i>Bespalov D. V., Golovanova O. A.</i> Comparison of MP2 and DFT methods for calculating structure and IR spectra using the example of magnesium compounds with amino acids	416
<i>Zakharov A. Yu., Zakharov M. A., Zubkov V. V.</i> Principles of relativistic molecular dynamics	425
<i>Mikhailov D. L., Ermishkin V. A., Minina N. A.</i> Comparative analysis of deformation kinetics of structures of nickel alloys X30H60M9 and X23H65M13 according to the results of tensile tests	436
<i>Saplev A. F., Petrov V. M.</i> Piezoelectric phase effect on magnetic resonance in layered structures: a review	453
<i>Shlyakhova G. V., Orlova D. V., Nemlienko T. S., Sorokov N. N.</i> Structure and properties of a bimetallic compound of carbon and austenitic stainless steel produced by electric arc surfacing	466

RADIOTECHNICS AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Garbar S. V., Laskov I. A.</i> Compensation of Narcissus effect for an optical system with variable focal length for different focusing distances	478
<i>Edemskiy V. A., Droганova D. S.</i> About symmetric 2-adic complexity of interleaving sequences based on Legendre sequences	489
<i>Eminov S. I., Sochilin A. V.</i> Inverse problems of the theory of cylindrical dipole antennas in Sobolev spaces	498
<i>Requirements for publishing articles in the scientific journal "Vestnik NovSU"</i>	507

ОБРАЩЕНИЕ К ЧИТАТЕЛЯМ

Уважаемые авторы и читатели журнала «Вестник НовГУ»!

Представляем Вашему вниманию третий выпуск 2024 года научного журнала «Вестник Новгородского государственного университета», серия «Технические науки».

Задача любого научного журнала – распространение научного знания. Именно эта стратегия и лежит в основе создания каждого выпуска научного журнала «Вестник НовГУ». Представлению и продвижению новых знаний в мировое научное сообщество способствует эффективный институт рецензирования, созданный редакционной коллегией, включение в Реферативный журнал и наукометрические и библиометрические базы данных, открытый доступ ко всем материалам выпуска, включая размещение в научной электронной библиотеке (НЭБ «eLIBRARY.ru»), индексирование в Российском индексе научного цитирования. «Вестник НовГУ» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, категория К2. Профессиональная работа, высококвалифицированный коллектив редакции, опытные рецензенты – все эти факторы способствуют росту и качественному развитию журнала «Вестнику НовГУ».

Оставаясь ведущей научно-образовательной организацией в Новгородской области, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого продолжает наращивать свой научный потенциал в различных областях науки. В 2024 году начал активную работу диссертационный совет 24.2.346.03 (приказ Минобрнауки РФ от 17.10.2023 г.), принимающий к рассмотрению и защите диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук по специальностям «Радиофизика» (технические науки) и «Физика конденсированного состояния» (физико-математические науки). Председатель диссертационного совета – научный редактор нашего журнала, доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки РФ, профессор Мирза Имамович Бичурин. Этим обусловлен большой интерес к данным направлениям на страницах третьего выпуска журнала.

Для публикации в данном выпуске в редакцию поступило около 20 статей, отражающих результаты перспективных исследований в области современной физики, полупроводниковой и функциональной электроники и радиотехники.

Расширение географии авторов научных статей (Москва, Томск, Донецк, Омск) свидетельствует о повышении интереса к журналу не только для местного научного сообщества, но и далеко за пределами Новгородского региона. Представляется, что работы данного выпуска будут интересны широкому кругу специалистов.

Напоминаем нашим авторам и читателям, что ждем предложения и материалы для публикации в научном журнале «Вестник Новгородского государственного университета» по адресу электронной почты vestnik@novsu.ru.

Главный редактор научного журнала «Вестник НовГУ»,
проректор по научной работе НовГУ, д.т.н.

А. Б. Ефременков

ADDRESS TO READERS

Dear colleagues and readers of Vestnik NovSU!

We are pleased to present the third issue of the journal “Vestnik NovSU” in 2024, the series “Engineering Sciences”.

The purpose of every scientific journal is to spread scientific knowledge. This very strategy underlies the creation of each issue of the scientific journal Vestnik NovSU. The presentation and promotion of new knowledge to the world scientific community is facilitated by an effective peer review institute created by the editorial board, inclusion in the Abstract Journal and scientometric and bibliometric databases, open access to all materials of the issue, including uploading in the scientific electronic library (National Electronic Library “eLIBRARY.ru”), and indexing in the Russian Science Citation Index. “Vestnik NovSU” is included in the List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences and for category K2 should be published. Professional work, highly qualified editorial staff, experienced reviewers – all these factors contribute to the growth and qualitative development of the journal “Vestnik NovSU”.

While remaining the leading scientific and educational organization in the Novgorod Region, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University continues to increase its scientific potential in various fields of science. In 2024, the dissertation council 24.2.346.03 began its active work (order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated 17.10.2023), accepting for consideration and defense dissertations for the degree of Candidate and Doctor of Sciences in the specialties “Radiophysics” (technical sciences) and “Condensed matter Physics” (physical and mathematical sciences). The chairman of the dissertation Council is the scientific editor of our journal, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor Mirza Bichurin. Due to this there’s great interest in these areas in the third issue of the journal.

For publication in this issue, the editorial office received about 20 articles reflecting the results of promising research in the field of modern physics, semiconductor and functional electronics and radio engineering. The expansion of the geography of the authors of scientific articles (Moscow, Tomsk, Donetsk, Omsk) indicates an increase in interest in this journal not only to the local scientific community, but also far beyond the Novgorod region. It appears that the articles of this issue will be of interest to a wide range of specialists.

We remind our authors and readers that we are waiting for your suggestions and materials for publication in the scientific journal "Vestnik NovSU" by email vestnik@novsu.ru.

*Chief Editor of the scientific journal "Vestnik NovSU",
Vice-Rector for Research of NovSU, Dr.*

Andrey Efremkov

РАДИОФИЗИКА

УДК 537.86:004.451.5

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).333-340

Поступила в редакцию / Received 10.07.2024

ГРНТИ 29.35.19+50.41.17

Специальность ВАК 1.3.4; 1.2.2

Принята к публикации / Accepted 07.08.2024

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНУЮ МОЩНОСТЬ ПРОЦЕССОРА

Андреев И. А., Иванов А. Ю., Петров Р. В.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация Развитие систем радиофизических исследований, например, в области радиоастрономии, требует значительных технических ресурсов, в том числе и вычислительной мощности процессоров, применяемых в аппаратуре обработки спектров изучаемых сигналов. Применение для решения этой задачи ЭВМ в свою очередь заставляет рассматривать их энергетические и вычислительные мощности. Применяемые для локального питания радиофизических систем устройства сбора энергии имеют ограничения по ёмкости, что накладывает ограничения на вычислительные мощности. Соответственно, исследование параметров центрального процессора, в том числе быстродействия, является актуальной задачей. В данной работе проводится анализ скорости работы процессора на основе различных характеристик, таких как тактовая частота, количество ядер, объем кэш-памяти и другие. Показаны возможности определения оптимальных параметров для достижения максимального быстродействия процессора при выполнении различных задач. Предложена методика сравнительного анализа процессоров различных производителей и моделей с помощью специализированных программных средств. Полученные в работе результаты в дальнейшем позволят определить наиболее эффективные подходы для повышения производительности компьютерных систем.

Ключевые слова: *системы радиофизических исследований, магнитоэлектрические устройства сбора энергии, вычислительная мощность процессора*

Для цитирования: Андреев И. А., Иванов А. Ю., Петров Р. В. Исследование влияния различных параметров на вычислительную мощность процессора // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 333-340. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).333-340

Research Article

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF VARIOUS PARAMETERS ON THE PROCESSOR PROCESSING POWER

Andreev I. A., Ivanov A., Petrov R. V.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The development of radiophysical research systems, for example, in the field of radio astronomy, requires significant technical resources, including the computing power of processors used in equipment for processing the spectra of the studied signals. The use of electronic computing machines to solve this problem, in turn, forces us to consider their energy and computing capacities. Energy harvesting devices used for local power supply of radiophysical systems have capacity limitations, which imposes limitations on computing power. Accordingly, studying the parameters of the central processor, including performance, is a relevant task. This article analyzes the processor speed based on various characteristics, such as clock speed, number of cores, cache memory and others. The possibilities for determining the optimal parameters to achieve maximum processor performance when performing various tasks are shown. A method of comparative analysis of processors from different manufacturers and models using specialized software is proposed. The results obtained in the work will further allow us to determine the most effective approaches to improve the performance of computer systems.

Keywords: *radiophysical research systems, magnetoelectric energy harvesting devices, processor processing power*

For citation: Andreev I. A., Ivanov A., Petrov R. V. Investigation of the influence of various parameters on the processor processing power // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 333-340. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).333-340

Введение

Развитие систем радиофизических исследований, например, в области радиоастрономии, требует значительных технических ресурсов, в том числе и вычислительной мощности процессоров, применяемых в аппаратуре обработки спектров изучаемых сигналов. В свою очередь, такие возможности по оптимизации быстродействия вычислительных средств, их мощности, габаритам и массе существенным образом влияют на прогресс в изготовлении новейшей измерительной аппаратуры. Кроме стационарных комплексов измерения и контроля в радиоастрономии применяются спутниковые и прочие подвижные системы с независимым энергопитанием. Энергетические параметры, таким образом, существенно влияют на работу используемых при измерениях устройств и в том числе на вычислительные мощности. Применение для таких комплексов магнитоэлектрических устройств сбора энергии ограничивается пока использованием небольших по мощности вычислительных средств, но в то же время исследование того, какие параметры влияют на энергопотребление, на вычислительную мощность процессора, оказывают серьезнейшее влияние на разработку и эксплуатацию систем радиофизических исследований в целом. Проведение углублённых исследований по выявлению влияния различных параметров на вычислительную мощность процессора представляется, таким образом, важной и актуальной задачей.

Значительное количество исследований посвящено изучению всевозможных аспектов влияния параметров, например, в работе [1] проводится статистический анализ различных факторов, влияющих на энергопотребление, изучение их взаимосвязи для количественной оценки их влияния на энергопотребление многопоточных и многоядерных процессоров. Авторами рассматриваются методы моделирования энергопотребления на кристалле для существующих процессоров и сравнивается соотношение производительности и энергопотребления между многоядерными и многопоточными процессорами. Показано, что статистические данные о потреблении энергии являются обнадеживающими и полезными для маломощных приложений и разработчиков процессоров, ориентированных на энергопотребление. В работе [2] проводится теоретический анализ модели микроархитектуры для определения соотношения мощности и производительности. Представлена аналитическая модель для количественного измерения мощности и производительности процессора, проведен анализ влияния разделения ресурсов на энергопотребление и производительность при выполнении тестирования и дан прогноз оптимального количества ядер для запуска тестов. В работе [3] описывается

методика скоординированного подхода к измерениям, которая сочетает в себе реальное измерение общей мощности с оценкой производительности на основе счетчика мощности на единицу продукции.

Политики замены играют важную роль в функционировании кэш-памяти процессорных ядер, а успешная реализация политики позволяет повысить производительность процессорного ядра и компьютерной системы в целом [4]. Политики замены чаще всего оцениваются по проценту обращений к кэшу во время циклов работы шины процессора при обращении к кэш-памяти. Аппаратной реализацией любого алгоритма политики замены является схема. Эта аппаратная часть процессорного ядра обладает определенными характеристиками: задержкой процесса поиска элемента-кандидата для замены, сложностью управления и надежностью. В этой работе обобщены и исследованы характеристики политик замены PLRUt и PLRUm. Показана зависимость увеличения задержки и сложности логических элементов в случае увеличения ассоциативности кэш-памяти, а также преимущество аппаратной реализации алгоритма PLRUt по сравнению с алгоритмом PLRUm в более высоких значениях ассоциативности.

В статье [5] представлена конструкция множителя процессора, использующего алгоритм Booth и древовидную структуру Wallace для оптимизации, а также включение регистров для вторичной конвейерной обработки для дальнейшего повышения эффективности. С помощью имитационного анализа авторы подтверждают успешность разработки и предоставляет информацию и результаты в современной области оптимизации множителей, направленные на то, чтобы в конечном итоге повысить производительность процессора. В работе [6] проведена разработка методологии проектирования специализированных вычислительных систем, основанной на совместной оптимизации аппаратного и программного обеспечения применительно к выбранному подклассу задач. Рассмотренные подходы к разработке подходят для ускорения процесса проектирования специализированных вычислительных систем с массово-параллельной архитектурой, основанной на конвейерных или процессорных вычислительных узлах.

В целом, авторы рассмотренных статей не дают общего теоретического подхода к анализу эффективности тестирования, а рассматривают лишь отдельные аспекты улучшения работы вычислительных средств. Актуальным является использование Benchmark тестов, которые позволяют программой определить вычислительную мощность центрального процессора (ЦП) и видеокарт. Появление подобных тестов позволило определить какой процессор мощнее, а какой слабее. Benchmark тесты однако не дают понимания, какие параметры важны для быстродействия ЦП, и не дают теоретических подходов и аналитики пользователям и разработчикам, которая позволит работать с процессором, что в свою очередь тормозит прогресс. В статье исследуются параметры, которые задействуются в большинстве тестов и на которые необходимо делать упор в первую очередь.

Факторы, влияющие на быстродействия ЦП

Процессор – это устройство, предназначенные для обработки информации представленной в виде сигналов электрического тока. В процессоре есть ряд особенностей, по которым обычно определяют его быстро действенность: тактовая частота, разрядность, множитель и системная шина, наличие графического ядра, а также количество ядер и потоков.

Тактовая частота. Работа процессора заключается в обработке сигналов. Цифровые сигналы характеризуются активным (высоким) и неактивным (низким либо отсутствием) уровнями напряжения. Переходные процессы на высоких частотах характерных для современных процессоров протекают очень быстро, но тем не менее мгновенно изменить уровни сигнала не получится. Время переключения с одного уровня на другой будет конечно и измеримо. Важно также учитывать при расчёте такие характеристики как фронт сигнала – процесс изменения уровня сигнала с неактивного до активного и спад сигнала – соответственно изменение уровня с активного до неактивного состояния. Заметим, что длительность фронта и спада могут отличаться даже в одной процессорной схеме.

Интервал времени между началами двух соседних фронтов импульсов называется тактом. Чем короче импульс, тем выше тактовая частота, поскольку такт становится короче и за единицу времени процессор обработает большее количество тактов. На сегодняшний день тактовая частота измеряется в ГГц (в гигагерцах), частота в 1 ГГц, была впервые достигнута 6 марта 2000 г., а 16 октября 2023 г. была достигнута самая высокая отметка тактовой частоты 9.043 ГГц на процессоре Intel Core i9-14900KF.

Системная шина и множитель. Понятие системная шина как единая компьютерная шина или основная интерфейсная шина связывает основные части вычислительной системы. Применяется для обеспечения модульности конструкции, соответственно достигая определённых преимуществ. Её параметрами являются количество обслуживаемых системной шиной устройств и максимальная скорость передачи информации между элементами компьютера. Скорость передачи информации в шине сильно зависит от разрядности шины (существуют 8-, 16-, 32- и 64-разрядные) и тактовой частоты. Стандарты системных шин: шина PCI для подключения устройств, находящихся внутри корпуса к материнской плате компьютера, шина USB для подключения периферии вне корпуса вычислительной машины по стандарту plug-n-play, шина SCSI для соединения устройств различных классов.

Множитель процессора – это коэффициент, на который умножается частота системной шины. Результатом умножения множителя на частоту шины является реальная тактовая частота процессора. У многих современных процессоров множитель заблокирован на уровне ядра и не поддается изменению. В процессорах

INTEL параметр является разблокированным в том случае, если в названии процессора присутствует приставка “К”. Повысить тактовую частоту процессора (разогнать процессор) с заблокированным множителем нельзя, потому за основу берут частоту системной шины материнской платы и получают более высокую тактовую частоту процессора без изменения множителя.

Разрядность. Объединение ранее отдельных компонентов компьютерного процессора в единый кристалл повлекло за собой как большие преимущества, так и определённые недостатки. Системная шина, предназначенная для обмена данными между процессором и другими устройствами по скорости уступает внутрипроцессорной скорости обмена, что влияет на общую производительность. Передача информации связана с тактовой частотой процессора и объёмом обработанной информации за такт. Процессор будет работать быстрее при увеличении количества переданных битов за один такт, соответственно увеличивается и скорость операций. Разрядность адресной шины также влияет на работу системы. Нумерация адресного пространства компьютера реализована побайтно. Запрос процессором адреса данных, при обращении к памяти, компьютером происходит через адресную шину. Разрядность шины адреса существенно влияет на характеристики компьютера, основной её характеристикой является разрядность в битах, что даёт общий объём адресного пространства. Например, при восьми разрядной шине адреса максимальная адресация это 256 байт, при шестнадцати разрядной уже 64000 байт, а при тридцати двух разрядной достигает 4 Гбайт.

Наличие графического ядра. Наличие графического ядра на процессоре может оказывать различное влияние на его производительность в зависимости от конкретной ситуации и задач, которые выполняются. Наличие графического ядра на процессоре может значительно увеличить производительность в графических приложениях, таких как видеоигры или 3D-моделирование. Графическое ядро обрабатывает графические данные и генерирует изображение, освобождая основной процессор от этой нагрузки.

Видеокодирование и обработка графики требуют большого объема вычислений. Наличие графического ядра на процессоре может значительно ускорить эти процессы, улучшая производительность при кодировании, декодировании или редактировании видео, а также при обработке графических изображений. Некоторые задачи, такие как научные расчеты или обработка больших объемов данных, могут быть распараллелены и выполняться с использованием графического ядра и его мощности для выполнения множества вычислений одновременно. В таких случаях графическое ядро может значительно увеличить производительность процессора. Однако, влияние графического ядра может быть незаметным или даже отрицательным в некоторых других задачах, где его использование не требуется или неэффективно. При выполнении задач, не связанных с обработкой графики или

видео, графическое ядро может закрыть доступ к системной шине для центрального процессора и таким образом снизить его производительность.

Наличие DMA. Отличие этого режима в том, что процессор не участвует в обмене данными между устройствами компьютера и основной памятью, и как следствие с него снимается определённая нагрузка. Таким образом удаётся увеличить скорость передачи данных благодаря тому, что независимо от ЦП контроллер DMA может получать доступ к системной шине.

Benchmark тестирование и работа ЦП

Принцип работы Benchmark тестов, заключается в создании нагрузки на ЦП и подсчете его быстродействия. Большинство тестов выдают результаты подсчетов в Flops – единице измерения вычислительной мощности, которая показывает сколько операций с плавающей точностью может обработать процессор за один такт.

Исходя из определения можно вывести формулу:

$$\text{Количество ядер} * \text{частота процессора} * \text{кол-во операций с плавающей точкой} = \text{вычислительная мощность}$$

Однако результаты разных Benchmark тестов говорят о высокой зависимости от количества операций с плавающей точкой, подсчет которых вручную не является рациональным для широкого круга пользователей, но крайне важен для производителей, пишущих инструкции и драйвера для процессоров. Также стоит учитывать то, что процессор постоянно обменивается информацией с оперативной памятью. ОЗУ обрабатывает команды и обменивается ими с процессором через системную шину. Оперативная память хранит информацию, без которого процессор не сможет выполнять инструкции и преобразовывать входящую информацию. Таким образом можно определить, что мощность процессора может быть сильно ограничена разностью частот ОЗУ, процессора и системной шины.

Заключение

Применение для радиофизических исследований, например, в области радиоастрономии, вычислительных средств, таких как современные ЭВМ является актуальной задачей. Оптимизация выбора таких ЭВМ тесно связана как с подбором вычислительных мощностей, так и с энергетическими параметрами. Минимизация затрат на энергетические параметры возможна с использованием магнитоэлектрических устройств сбора энергии, а вычислительные мощности возможно оптимизировать используя Benchmark тесты. Наиболее важными факторами, влияющими на мощность работы процессора, являются: частота процессора, количество ядер, частота ОЗУ, частота системной шины, наличие

графического ядра и наличие DMA. Дополнительными факторами, влияющими на вычислительную мощность ЦП, являются: разрядность и системный множитель.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20045, <https://rscf.ru/project/24-19-20045/>.

Список литературы

1. Saravanan V., Chandran S. K., Punnekkat S., Kothari D. P. A study on factors influencing power consumption in multithreaded and multicore CPUs // WSEAS Transactions on Computers. 2011. 10 (3). 93-103.
2. Anpalagan A., Kothari D. P., Woungang I., Obaidat M. S. An analytical study of resource division and its impact on power and performance of multi-core processors // The Journal of Supercomputing. 2014. 68. 3. 1265-1279. DOI: 10.1007/s11227-014-1086-0
3. Isci C., Martonosi M. Runtime power monitoring in high-end processors: Methodology and empirical data // Proceedings. 36th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, 2003. MICRO-36. 2003, P. 93-104. DOI: 10.1109/MICRO.2003.1253186
4. Titarenko L., Kharchenko V., Puidenko V., Perepelitsyn A., Barkalov A. Hardware-Based Implementation of Algorithms for Data Replacement in Cache Memory of Processor Cores // Computers. 2024. 13, 7. 166. DOI: 10.3390/computers13070166
5. Wu B., Zhang Z. Optimizing multiplier design for enhanced processor performance // Applied and Computational Engineering. 2024. 38. 280-287. DOI: 10.54254/2755-2721/38/20230564
6. Тарасов И. Е., Советов П. Н., Люлява Д. В., Мирзоян Д. И. Методика проектирования специализированных вычислительных систем на основе совместной оптимизации аппаратного и программного обеспечения // Russian Technological Journal / Российский технологический журнал. 2024. 12 (3). 37-45. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45

References

1. Saravanan V., Chandran S. K., Punnekkat S., Kothari D. P. A study on factors influencing power consumption in multithreaded and multicore CPUs // WSEAS Transactions on Computers. 2011. 10 (3). 93-103.
2. Anpalagan A., Kothari D. P., Woungang I., Obaidat M. S. An analytical study of resource division and its impact on power and performance of multi-core processors // The Journal of Supercomputing. 2014. 68. 1265-1279. DOI: 10.1007/s11227-014-1086-0
3. Isci C., Martonosi M. Runtime power monitoring in high-end processors: Methodology and empirical data // Proceedings. 36th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, 2003. MICRO-36, 2003. P. 93-104.
4. Titarenko L., Kharchenko V., Puidenko V., Perepelitsyn A., Barkalov A. Hardware-Based Implementation of Algorithms for Data Replacement in Cache Memory of Processor Cores // Computers. 2024. 13. 166. DOI: 10.3390/computers13070166
5. Bilun Wu, Zeyu Zhang. Optimizing multiplier design for enhanced processor performance // Applied and Computational Engineering. 2024. 38. 280-287. DOI: 10.54254/2755-2721/38/20230564
6. Tarasov I. E., Sovetov P. N., Lulyava D. V., Mirzoyan D. I. Metodika proyektirovaniya spetsializirovannykh vychislitel'nykh sistem na osnove sovmestnoy

optimizatsii apparatnogo i programmnoho obespecheniya [Method for designing specialized computing systems based on hardware and software co-optimization] // Russian Technological Journal. 2024. 12 (3). 37-45. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45

Информация об авторах

Андреев Игорь Алексеевич – студент, лаборант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0001-3373-2502, rogiaandreev@gmail.com

Иванов Андрис Юрьевич – аспирант, преподаватель, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-6623-1762, andrewivanov1998@gmail.com

Петров Роман Валерьевич – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9751-116X, Roman.Petrov@novsu.ru

РАДИОФИЗИКА

УДК 53.098:537.8

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).341-350

Поступила в редакцию / Received 12.08.2024

ГРНТИ 29.10.01+29.19.37

Специальность ВАК 1.3.4

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

Научная статья

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ВОЛОКОН НА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СТРУКТУРЕ ЦТС-19 / АМАГ-225

Ивашева Е. Е., Леонтьев В. С., Осипова И. С., Бичурин М. И.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В статье представлено экспериментальное исследование магнитоэлектрического эффекта в трех композитных структурах, где в качестве пьезоэлектрической фазы использовалась пластина ЦТС-19, а в качестве магнитострикционной фазы – пластина из аморфного магнитомягкого сплава АМАГ-225, 4 волокна АМАГ-225 и 5 волокон АМАГ-225. Приведены графики зависимости выходного напряжения от частоты и магнитоэлектрического коэффициента от частоты для изготовленных композитов. В структуре с использованием магнитострикционной пластины магнитоэлектрический коэффициент составил 12,99 В/(см·Э), с использованием 4 магнитострикционных волокон – 5,41 В/(см·Э), с использованием 5 магнитострикционных волокон – 20,36 В/(см·Э). Было получено, что с использованием большего числа волокон АМАГ-225 наблюдается увеличение магнитоэлектрического эффекта по сравнению со структурами, где используется 4 волокна или пластина АМАГ-225.

Ключевые слова: *магнитофибер, магнитоэлектрическая структура, магнитоэлектрический эффект, магнитострикционные волокна, пьезоэлектрическая пластина*

Для цитирования: Ивашева Е. Е., Леонтьев В. С., Осипова И. С., Бичурин М. И. Влияние числа магнитострикционных волокон на магнитоэлектрический эффект в структуре ЦТС-19 / АМАГ-225 // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 341-350. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).341-350

Research Article

INFLUENCE OF THE NUMBER OF MAGNETOSTRICTIVE FIBERS ON THE MAGNETOELECTRIC EFFECT IN THE STRUCTURE OF PZT-19 / AMAG-225

Ivasheva E. E., Leontiev V. S., Osipova I. S., Bichurin M. I.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The article presents an experimental study of the magnetoelectric effect in three composite structures, where a PZT-19 plate was used as the piezoelectric phase, and a plate of amorphous soft magnetic alloy AMAG-225, 4 AMAG-225 fibers and 5 AMAG-225 fibers were used as the magnetostrictive phase. The graphs of the dependence of the output voltage on the frequency and the magnetoelectric coefficient on the frequency for the manufactured composites are given. In the structure using a magnetostrictive plate, the magnetoelectric coefficient was 12,99 V/(cm·Oe), with the use of 4 magnetostrictive fibers – 5,41 V/(cm·Oe), with the use of 5 magnetostrictive fibers – 20,36 V/(cm·Oe). It was found that with the use of a larger number of AMAG-225 fibers, an increase in the magnetoelectric effect is observed compared to the structures where 4 fibers or an AMAG-225 plate are used.

Keywords: *magnetofiber, magnetoelectric structure, magnetoelectric effect, magnetostrictive fibers, piezoelectric plate*

For citation: Ivasheva E. E., Leontiev V. S., Osipova I. S., Bichurin M. I. Influence of the number of magnetostrictive fibers on the magnetoelectric effect in the structure of PZT-19 / AMAG-225 // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 341-350. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).341-350

Введение

В композитных структурах, в которых механически связаны между собой магнитострикционные и пьезоэлектрические компоненты, возникает магнитоэлектрический (МЭ) эффект. Прямой МЭ эффект заключается в изменении электрических свойств структуры под действием внешнего магнитного поля, обратный МЭ эффект проявляется, наоборот, в изменении магнитных свойств композита под действием внешнего электрического поля.

Одним из развивающихся направлений в области магнитоэлектроники на данный момент является разработка и исследование МЭ структур на основе магнитострикционных и пьезоэлектрических волокон [1, 2]. В настоящее время проведено большое количество исследований, посвященных слоистым МЭ композитам на основе гибкой пьезоэлектрической волокнистой структуры – пьезофибера, – в которых наблюдается значительный МЭ эффект [3]. Изучение магнитострикционных волокнистых структур [4, 5] находится на начальной стадии, что открывает большие перспективы для проведения различных теоретических и экспериментальных исследований, в том числе, связанных с МЭ эффектом.

Исследование МЭ эффекта является перспективным направлением и МЭ структуры находят применение в различного рода устройствах, например, в датчиках магнитного поля [6, 7], датчиках электрического тока [8, 9], исполнительных механизмах (актюаторах) [10, 11], системах сбора энергии (харвестерах) [12, 13] благодаря их способности преобразовывать магнитные и электрические сигналы. За счет повышенной восприимчивости к магнитным полям МЭ структуры применяются в устройствах, где требуются высокоточные измерения.

Технология изготовления

Для экспериментального исследования МЭ структуры на основе пьезоэлектрической пластины и магнитострикционных волокон был изготовлен несимметричный МЭ композит на основе пластины пьезоэлектрика ЦТС-19 с размерами 30×10×0,5 мм и магнитострикционных волокон из аморфного сплава марки АМАГ-225, каждое волокно которого имело размеры 28×2×0,021 мм. Были изготовлены образцы с использованием 4 и 5 волокон АМАГ-225. Также для сравнения полученных результатов была изготовлена структура с пьезоэлектрической пластиной ЦТС-19 того же размера и магнитострикционной пластиной из сплава АМАГ-225 с размерами 28×10×0,021 мм. Для обеспечения жесткой механической связи в каждом случае магнитострикционная фаза соединялась при помощи клея БФ-2 с пластиной пьезоэлектрика. Далее, образцы сушились при комнатной температуре в течение 24 часов под давлением 300 Па. После высыхания клея производилась пайка выводов непосредственно к пьезоэлектрической пластине ЦТС-19.

На рисунке 1 приведены изготовленные несимметричные МЭ структуры на основе пластины ЦТС-19 и магнитомягкого аморфного сплава марки АМАГ-225, где под 1 и 2 обозначены структуры с использованием 4 и 5 волокон АМАГ-225, имеющих размеры $28 \times 2 \times 0,021$ мм, соответственно, и под 3 показана структура с использованием пластины из аморфного сплава, которая имела размеры $28 \times 10 \times 0,021$ мм. При этом расстояние между магнитоотрицательными волокнами в первом композите составляло от 0,41 мм до 0,76 мм, а во втором – от 0,04 мм до 0,35 мм.

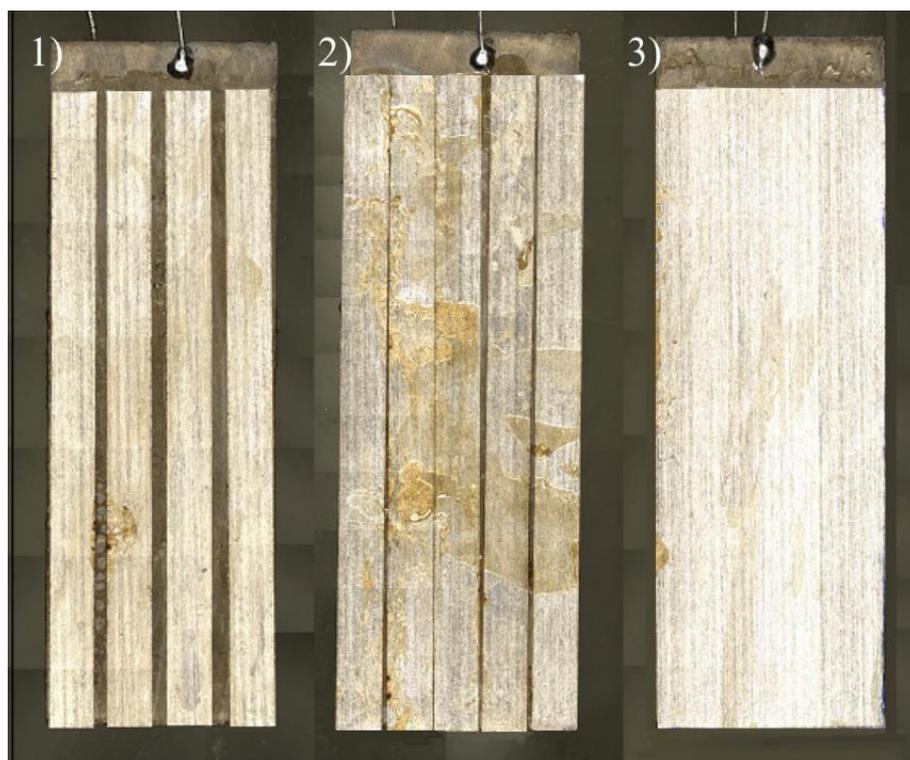


Рисунок 1. МЭ структуры ЦТС-19 / АМАГ-225 с использованием: 1) 4 магнитоотрицательных волокон, 2) 5 магнитоотрицательных волокон, 3) магнитоотрицательной пластины

Экспериментальная установка

Для измерения характеристик изготовленных МЭ структур использовалась экспериментальная установка, включающая в себя следующее оборудование: AC&DC катушки Гельмгольца DXHC5-300; генератор сигналов RIGOL DG2052; усилитель мощности DXFVC-60; источник постоянного тока Tonghui TH6323; магнитометр DEXINGMAG DX-180 и осциллограф RIGOL DHO1072.

На рисунке 2 представлена установка, с помощью которой проводились экспериментальные исследования МЭ образцов.

Экспериментальная установка работает следующим образом: внутри катушек Гельмгольца создается область с однородным постоянным и переменным магнитными полями, при этом напряженность переменного магнитного поля устанавливается равной 1 Э. Для создания такой области используются генератор переменного сигнала и источник постоянного тока. Усилитель сигналов необходим

для передачи сигнала с генератора на катушку Гельмгольца. МЭ образец помещается внутрь катушки Гельмгольца. Выводы МЭ образца подключаются к осциллографу, с помощью которого детектируется выходное напряжение U . С помощью магнитометра проводилось измерение напряженности постоянного и переменного магнитных полей в катушке.

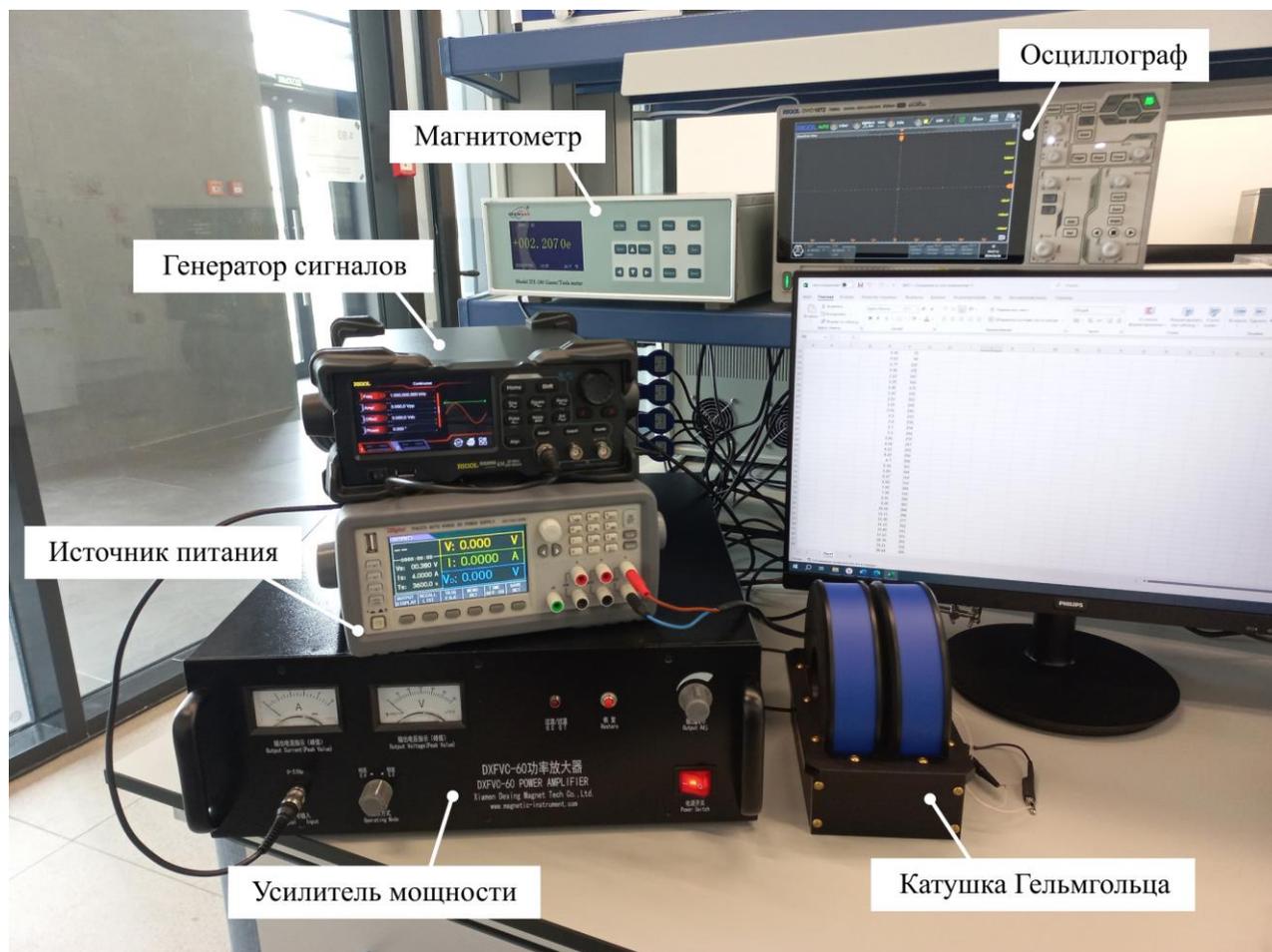


Рисунок 2. Экспериментальная установка

Результаты эксперимента

В ходе проведения экспериментальных исследований изготовленных магнестрикционно-пьезоэлектрических структур, изображенных на рисунке 1, с помощью оборудования, представленного на рисунке 2, были получены зависимости выходного напряжения МЭ образцов U от частоты f .

На рисунке 3 представлена зависимость выходного напряжения от частоты для исследуемых МЭ структур на основе пьезокерамики ЦТС-19 и аморфного сплава АМАГ-225 с 4 и 5 магнестрикционными волокнами, а также с использованием пластины из АМАГ-225.

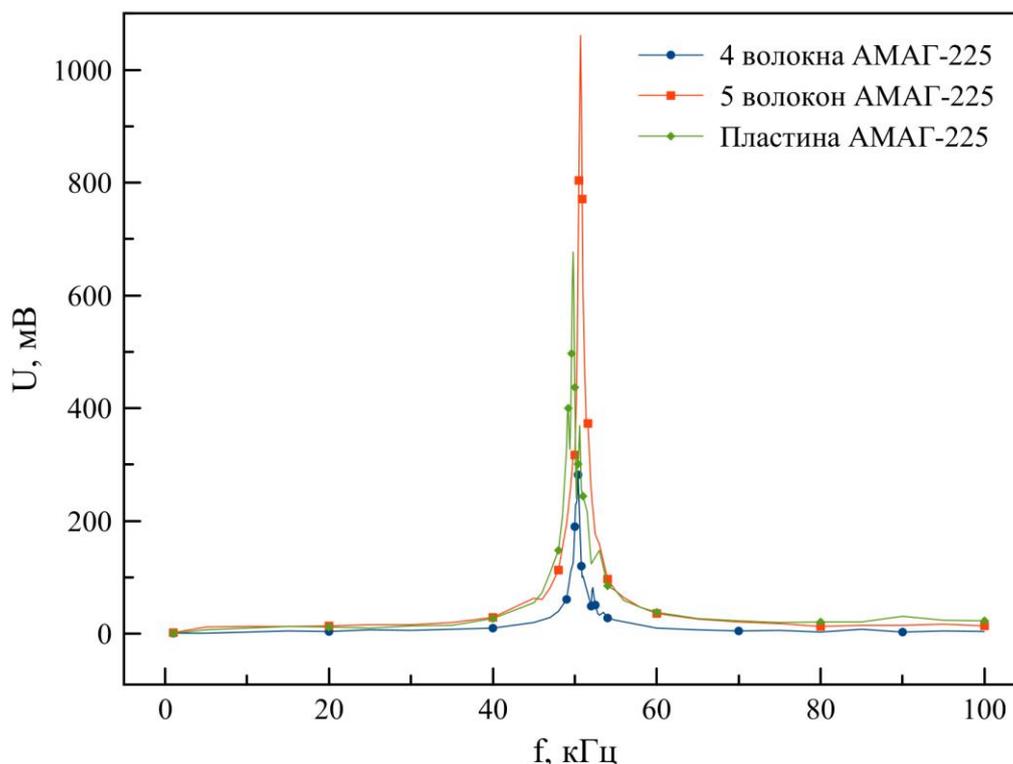


Рисунок 3. График зависимости выходного напряжения от частоты для МЭ образцов ЦТС-19 / АМАГ-225: синяя линия – с использованием 4 волокон АМАГ-225, оранжевая линия – с использованием 5 волокон АМАГ-225, зеленая линия – с использованием пластины АМАГ-225

Зависимость МЭ коэффициента от частоты можно получить, используя следующую формулу:

$$\alpha = -\frac{{}^m\nu^p {}^mY^B q_{11} d_{31} {}^p s_{11} \tan(\eta)}{\varepsilon_{33} \varepsilon_0 {}^p s_{11}^2 c_{11} \eta + d_{31}^2 [{}^p\nu \tan(\eta) - c_{11} {}^p s_{11} \eta]} \quad (1)$$

где ${}^m\nu$ – объемная доля магнестрикционной фазы; ${}^p\nu$ – объемная доля пьезоэлектрической фазы; ${}^mY^B = \frac{{}^mY}{1 - {}^mK_{11}^2}$; mY – модуль Юнга; ${}^mK_{11}^2 = \frac{{}^mY q_{11}^2}{\mu \mu_0}$ – квадрат коэффициента магнитомеханической связи; q_{11} – псевдопьезомагнитный коэффициент магнестрикционной фазы; μ – относительная магнитная проницаемость магнестрикционной фазы; μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А²; d_{31} – пьезоэлектрический коэффициент; ${}^p s_{11}$ – коэффициент податливости пьезоэлектрической фазы; ε_{33} – относительная диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрической фазы; ε_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл/(Н·м²); c_{11} – эффективный коэффициент жесткости МЭ композита; $\eta = \frac{kl}{2}$; k – волновое число; l – длина МЭ композита.

На рисунке 4 приведена зависимость МЭ коэффициента α от частоты для исследуемых МЭ структур ЦТС-19 / АМАГ-225 с 4 и 5 магнитоотрицательными волокнами, а также с использованием магнитоотрицательной пластины.

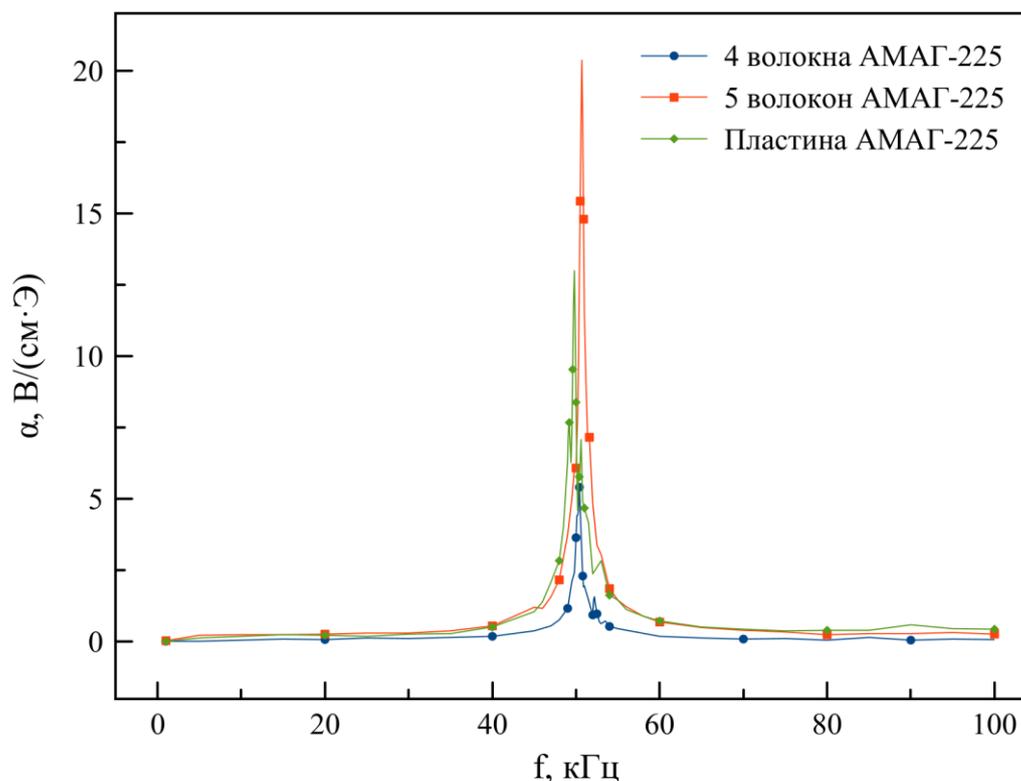


Рисунок 4. График зависимости МЭ коэффициента от частоты для образцов ЦТС-19 / АМАГ-225: синяя линия – с использованием 4 волокон АМАГ-225, оранжевая линия – с использованием 5 волокон АМАГ-225, зеленая линия – с использованием пластины АМАГ-225

В таблице 1 приведены полученные в ходе экспериментальных исследований МЭ структур на основе пьезокерамической пластины ЦТС-19 и магнитоотрицательных волокон из магнитомягкого сплава АМАГ-225 максимальные значения выходного напряжения $U_{\text{макс}}$, МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{\text{макс}}$ и резонансная частота $f_{\text{рез}}$.

Таблица 1. Полученные результаты экспериментальных исследований МЭ структур

№п/п	МЭ структура	$U_{\text{макс}}$, мВ	$\alpha_{\text{макс}}$, В/(см·Э)	$f_{\text{рез}}$, кГц
1	Пластина ЦТС-19 / 4 волокна АМАГ-225	282	5,41	50,4
2	Пластина ЦТС-19 / 5 волокон АМАГ-225	1061	20,36	50,7
3	Пластина ЦТС-19 / пластина АМАГ-225	677	12,99	49,8

Обсуждение результатов

На основании проведенных экспериментальных исследований МЭ структур с использованием пластины из пьезокерамики ЦТС-19 и магнитострикционного аморфного сплава АМАГ-225 (таблица 1), было получено, что МЭ коэффициент по напряжению в структуре с 5 волокнами сплава АМАГ-225, расстояние между которыми составляет от 0,04 мм до 0,35 мм, увеличивается на 73% по сравнению со структурой с 4 волокнами и расстоянием между ними от 0,41 мм до 0,76 мм и на 36% увеличивается по сравнению со структурой с магнитострикционной пластиной. МЭ коэффициент в структуре на основе магнитострикционной и пьезоэлектрической пластин возрастает на 58% по сравнению со структурой, где используется 4 волокна АМАГ-225.

Полученные результаты демонстрируют, что увеличение количества магнитострикционных волокон вместе с уменьшением расстояния между ними приводит к заметному усилению МЭ эффекта, в сравнении со структурами, где используется магнитострикционная пластина или при меньшем числе тех же магнитострикционных волокон с большим расстоянием между ними. Это может быть связано с тем, что магнитострикционная фаза в виде волокон обладает большими степенями свободы, и, при этом, чем меньше между волокнами расстояние, тем с большей площадью пьезоэлектрической фазы они взаимодействуют, тем самым увеличивая МЭ эффект.

Заключение

Область магнитоэлектроники имеет большие перспективы для разработки инновационных устройств и систем на основе уникальных свойства магнитострикционных и пьезоэлектрических материалов. МЭ структуры нашли применение в широком спектре устройств, включая датчики, исполнительные механизмы, сборщики энергии и многие другие устройства и системы мониторинга, измерения и детектирования магнитных и электрических полей.

Продолжающиеся исследования и разработки в области МЭ структур, особенно на основе магнитострикционных и пьезоэлектрических волокон, открывают большие возможности для развития гибкой электроники. Исследования волокнистых МЭ композитов показывают значительный потенциал в плане высокой чувствительности и гибкости, тем самым открывая путь к компактным и легким устройствам.

Проведенное исследование МЭ структур с использованием пьезоэлектрической пластины и магнитострикционных волокон, выявили положительные результаты в повышении МЭ коэффициента. Исследование подчеркивает потенциал разработки высокочувствительных инновационных устройств и систем в области магнитоэлектроники.

В дальнейшем планируется проведение экспериментов по исследованию влияния большего числа магнитострикционных волокон на МЭ эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-15-20044, <https://rscf.ru/project/24-15-20044/>.

Список литературы

1. Иванов С. Н., Семенов Г. А. Технология магнитопьезофибера // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, 2020. 1-1. 314.
2. Патент 184785 Российская Федерация, МПК H01L 41/083 (2006.01). Магнитопьезофибер: № 2018128132: заявлен 2018.07.31; опубликован 2018.11.08 / Бичурин М. И., Семенов Г. А., Иванов С. Н., Леонтьев В. С.; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого». 5 с.
3. Wang Y., Gray D., Berry D., Viehland D., Gao J., Li J., Li M. An Extremely Low Equivalent Magnetic Noise Magnetolectric Sensor // *Advanced Materials*. 2011. 23 (35). 4111-4114. DOI: 10.1002/adma.201100773
4. Джапаридзе М. В., Мусатов В. И., Савельев Д. В., Фетисов Л. Ю. Влияние геометрических характеристик магнитострикционного композита на его магнитострикцию // *Оптические технологии, материалы и системы: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием (Оптотех – 2020)*, Москва, 10-11 декабря 2020 г. Москва, 2020. С. 280-284.
5. Джапаридзе М. В., Мусатов В. И., Савельев Д. В., Фетисов Л. Ю. Влияние материала матрицы на магнитострикцию волоконных композитов // *Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием*, Москва, 5-12 апреля 2021 г. Москва, 2021. Том 1. С. 54-59.
6. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. Magnetolectric Magnetic Field Sensors: A Review // *Sensors*. 2021. 21(18). 6232. DOI: 10.3390/s21186232
7. Turutin A. V., Kubasov I. V., Kislyuk A. M., Kuts V. V., Malinkovich M. D., Parkhomenko Yu. N., Sobolev N. A. Ultra-Sensitive Magnetolectric Sensors of Magnetic Fields for Biomedical Applications // *Nanobiotechnology Reports*. 2022. 17. 261-289. DOI: 10.1134/S2635167622030223
8. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Semenov G., Sokolov O. Magnetolectric Current Sensors // *Sensors*. 2017. 17 (6). 1271. DOI: 10.3390/s17061271
9. Lu C., Zhou H., Li L., Yang A., Xu C., Ou Z., Wang J., Wang X., Tian F. Split-core magnetolectric current sensor and wireless current measurement application // *Measurement*. 2022. 188 (4). 110527. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110527
10. Dong S. Review on piezoelectric, ultrasonic, and magnetolectric actuators // *Journal of Advanced Dielectrics*. 2012. 2(01). 1230001. DOI: 10.1142/S2010135X12300010
11. Sadeghi M., Hojjat Y., Khodaei M. Design, analysis, and optimization of a magnetolectric actuator using regression modeling, numerical simulation and metaheuristics algorithm // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. 30. 16527-16538. DOI: 10.1007/s10854-019-02029-x

12. Fang K. Y., Jing W. Q., He Y. F., Zhao Y. C., Fang F. A low-frequency vibration energy harvester employing self-biased magnetoelectric composite // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. 332 (1). 113066. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113066

13. Narita F., Fox M. A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting Applications // *Advanced Engineering Materials*. 2018. 20 (5). 1700743. DOI: 10.1002/adem.201700743

References

1. Ivanov S. N., Semenov G. A. Tekhnologiya magnitop'yezofibera [Magnetopiezofiber technology] // *Microwave and Telecommunication Technology*. Sevastopol, 2020. 1-1. 314.

2. Bichurin M. I., Semenov G. A., Ivanov S. N., Leontyev V. S. Patent RU No. 184785 U1 Russian Federation, MPK H01L (2006.01). Magnetopiezofiber: No. 2018128132: decl. 2018.07.31; publ. 2018.11.08 / applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 5 p.

3. Wang Y., Gray D., Berry D., Viehland D., Gao J., Li J., Li M. An Extremely Low Equivalent Magnetic Noise Magnetoelectric Sensor // *Advanced Materials*. 2011. 23 (35). 4111-4114.

4. Dzhaparidze M. V., Musatov V. I., Savelyev D. V., Fetisov L. Yu. Vliyaniye geometricheskikh kharakteristik magnitostriksionnogo kompozita na yego magnitostriksiyu [Influence of geometric characteristics of magnetostrictive composite on its magnetostriction] // *Optical technologies, materials and systems: collection of reports of the Russian scientific and technical conference with international participation (Optotekh – 2020)*. Moscow, 2020. P. 280-284.

5. Dzhaparidze M.V., Musatov V.I., Savelyev D. V., Fetisov L. Yu. Vliyanie materiala matricy na magnitostriksiyu volokonnykh kompozitov [Impact of matrix materials on fiber composites magnetostriction] // *Collection of reports of the Russian scientific and technical conference with international participation*. 2021. Vol. 1. P. 54-59.

6. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors: A Review // *Sensors*. 2021. 21 (18). 6232.

7. Turutin A. V., Kubasov I. V., Kislyuk A. M., Kuts V. V., Malinkovich M. D., Parkhomenko Yu. N., Sobolev N. A. Ultra-Sensitive Magnetoelectric Sensors of Magnetic Fields for Biomedical Applications // *Nanobiotechnology Reports*. 2022. 17. 261-289.

8. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Semenov G., Sokolov O. Magnetoelectric Current Sensors // *Sensors*. 2017. 17 (6). 1271.

9. Lu C., Zhou H., Li L., Yang A., Xu C., Ou Z., Wang J., Wang X., Tian F. Split-core magnetoelectric current sensor and wireless current measurement application // *Measurement*. 2022. 188. 110527.

10. Dong S. Review on piezoelectric, ultrasonic, and magnetoelectric actuators // *Journal of Advanced Dielectrics*. 2012. 2 (1). 1230001.

11. Sadeghi M., Hojjat Y., Khodaei M. Design, analysis, and optimization of a magnetoelectric actuator using regression modeling, numerical simulation and metaheuristics algorithm // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. 30. 16527-16538.

12. Fang K. Y., Jing W. Q., He Y. F., Zhao Y. C., Fang F. A low-frequency vibration energy harvester employing self-biased magnetoelectric composite // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. 332 (1). 113066. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113066

13. Narita F., Fox M. A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting

Applications // Advanced Engineering Materials. 2018. 20 (5). 1700743.
DOI: 10.1002/adem.201700743

Информация об авторах

Ивашева Елена Евгеньевна – лаборант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-4492-4137, s246709@std.novsu.ru

Леонтьев Виктор Сергеевич – заведующий лабораторией, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-1313-1715, Viktor.Leontev@novsu.ru

Осипова Ирина Сергеевна – старший преподаватель, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-7850-1694, Irina.Osipova@novsu.ru

Бичурин Мирза Имамович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-0650-4712, Mirza.Bichurin@novsu.ru

РАДИОФИЗИКА

УДК 539.5

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).351-362

Поступила в редакцию / Received 08.06.2024

ГРНТИ 29.19.21

Специальность ВАК 1.3.4

Принята к публикации / Accepted 20.08.2024

Научная статья

НАРУШЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕЙЛОРА В ОБЛУЧЁННЫХ МЕТАЛЛАХ

Малашенко В. В.

Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия)

Аннотация Выполнен теоретический анализ движения ансамбля краевых дислокаций в облучённом металле в условиях высокоскоростной деформации. В рамках теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) получено аналитическое выражение для зависимости динамического предела текучести от плотности дислокаций. Определены условия нарушения соотношения Тейлора при высокоскоростной деформации облучённого металла. Полученная зависимость от плотности дислокаций является немонотонной и имеет минимум. Минимум этой зависимости обусловлен конкуренцией влияния структурных дефектов различного типа на движущийся дислокационный ансамбль. Он имеет место при переходе от доминирования торможения дислокационными петлями к доминированию торможения неподвижными дислокациями.

Ключевые слова: *дислокации, высокоскоростная деформация, облучённые металлы, радиационные дефекты, динамический предел текучести*

Для цитирования: Малашенко В. В. Нарушение соотношения Тейлора в облучённых металлах // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 351-362. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).351-362

Research Article

VIOLATION OF THE TAYLOR RATIO IN IRRADIATED METALS

Malashenko V. V.

Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering (Donetsk, Russia)

Abstract The motion of an edge dislocation ensemble in an irradiated metal under high strain rate deformation is theoretically analyzed. Within the framework of the theory of dynamic interaction of defects (DID) an analytical expression for the dependence of the dynamic yield stress on the dislocation density is obtained. The conditions for violation of the Taylor relation under high strain rate deformation of irradiated metal are determined. The resulting dependence on the dislocation density is nonmonotonic and has a minimum. The minimum of this dependence is due to the competition between the influence of structural defects of various types on the moving dislocation ensemble. It occurs during the transition from the dominance of drag by dislocation loops to the dominance of drag by immobile dislocations.

Keywords: *dislocations, high strain rate deformation, irradiated metals, radiation defects, dynamic yield strength*

For citation: Malashenko V. V. Violation of the Taylor ratio in irradiated metals // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 351-362. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).351-362

Введение

Функциональные металлы и сплавы в процессе эксплуатации могут подвергаться радиационному облучению, порождающему радиационные дефекты, в частности точечные дефекты и дислокационные петли. Эти структурные дефекты,

взаимодействуя с ансамблем дислокаций, перемещающихся по кристаллу, оказывают существенное влияние на формирование механических свойств металлов и зависимость этих свойств от концентрации дефектов и скорости пластической деформации. Одной из главных характеристик, влияющих на механические свойства кристаллов, является плотность дислокаций. Многочисленные экспериментальные данные подтверждают, что зависимость предела текучести от плотности дислокаций при квазистатической деформации может быть описана известным соотношением Тейлора [1]:

$$\tau_T = \alpha \mu b \sqrt{\rho}, \quad (1)$$

где α – безразмерный коэффициент порядка единицы, μ – модуль сдвига, b – модуль вектора Бюргера дислокации, ρ – плотность дислокаций.

При высокоэнергетическом внешнем воздействии, в частности ударно-волновом, металл может быть подвергнут высокоскоростной деформации [2-5]. При этом возможно нарушение соотношения Тейлора. В частности, это соотношение нарушается в чистых кристаллах при высокой скорости пластической деформации, что подтверждают как экспериментальные данные, так и результаты использования метода молекулярной динамики [6]. В работе [7] анализировались условия нарушения соотношения Тейлора в состаренных сплавах и металлах с высокой концентрацией примеси. В настоящей работе проанализирована высокоскоростная деформация облучённых металлов и определены условия нарушения соотношения Тейлора для этого случая.

Основная часть

Поставленная задача решается в рамках теории динамического взаимодействия структурных дефектов (ДВД) [8-10]. В основу этой теории положена известная струнная модель дислокации Гранато-Люкке, прекрасно зарекомендовавшая себя при решении огромного количества задач, особенно при анализе экспериментов по внутреннему трению. Авторы этой модели рассматривали дислокацию как струну, обладающую некоторой эффективной массой, и линейным натяжением. Благодаря этому дислокация способна совершать поперечные колебания в плоскости своего скольжения, которые возникают, в частности, при её взаимодействии с упругими полями структурных дефектов. Линейное натяжение дислокации определяется упругими константами кристалла, а её масса имеет полевое происхождение. Теория Гранато-Люкке позволила удовлетворительно описать многие экспериментальные данные, полученные при квазистатической деформации, а также в экспериментах по внутреннему трению. Однако попытки применить её для анализа надбарьерного движения дислокаций оказались не столь успешными. В области надбарьерного скольжения кинетическая энергия дислокации превосходит энергию её взаимодействия со структурными дефектами, поэтому

дислокации не требуются тепловые флуктуации для преодоления полей этих дефектов. Это так называемая динамическая область скоростей, в которой дислокационные скорости составляют десятки, сотни и даже тысячи метров в секунду. Попытка авторов работы [11] использовать струнную модель для объяснения наблюдаемой зависимости силы торможения от скорости дислокаций и параметров дефектов успехом не увенчалась. Это удалось сделать в рамках теории ДВД. Её главное отличие от теории Гранато-Люкке заключается в учёте важного факта: в реальном кристалле дислокация перемещается по кристаллу, находясь в потенциальной яме, перемещающейся вместе с ней. Эта яма может быть сформирована коллективным взаимодействием точечных дефектов с дислокацией, коллективным взаимодействием движущихся дислокаций с каждой дислокацией ансамбля, магнитоупругим взаимодействием магнитной системы материала с дислокацией либо взаимодействием её со свободной поверхностью, т.е. благодаря действию сил изображения. Колебания дислокации в подвижной потенциальной яме приводят к возникновению щели в спектре дислокационных колебаний, а наличие щели оказывает существенное влияние на эффективность возбуждения дислокационных колебаний, а, следовательно, на величину и характер динамического торможения.

Будем исследовать надбарьерное скольжение ансамбля краевых дислокаций, скользящих вдоль оси ОХ под действием постоянной внешней нагрузки. Плоскости скольжения дислокаций параллельны плоскости ХОZ. Дислокационные линии расположены параллельно оси ОZ. Положение j -ой дислокации описывает функция:

$$S_j(z, t) = vt + s_j(z, t) \quad (2)$$

Здесь v – скорость скольжения дислокаций ансамбля, функция $s_j(z, t)$ описывает колебания дислокации в плоскости скольжения, вызванные её взаимодействием с упругими полями хаотически распределённых структурных дефектов. При этом, поскольку $s_j(z, t)$ является случайной величиной, то

$$\langle s_j(z, t) \rangle = 0 \quad (3)$$

Символ $\langle \dots \rangle$ означает вычисление среднего значения по случайному распределению дефектов и длине дислокации

$$\langle f(r_i) \rangle = \frac{1}{L_{dis}} \int_L dz \int_V \prod_{i=1}^N f(r_i) \frac{dr_i}{V^N} \quad (4)$$

Здесь L_{dis} – длина дислокации, N – число дефектов в кристалле, V – его объем. Согласно стандартной процедуре усреднения мы устремляем к бесконечности и число дефектов N , и объем кристалла V . Отношение этих величин даёт нам среднюю концентрацию структурных дефектов.

Уравнение движения j -й дислокации ансамбля имеет вид:

$$m \left\{ \frac{\partial^2 S_j}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 S_j}{\partial z^2} \right\} = b [\sigma_{xy}^o + \sigma_{xy}^L + \sigma_{xy}^d + \sigma_{xy}^{dis}] - B \frac{\partial S_j}{\partial t} \quad (5)$$

Здесь m – масса единицы длины дислокации, c – скорость звука в металле, b – модуль вектора Бюргера дислокации, B – константа фононного торможения, σ_{xy}^o – компонента тензора напряжений, созданных на линии дислокации постоянной внешней нагрузкой, σ_{xy}^L – компонента тензора напряжений, созданной дислокационными петлями, напряжение σ_{xy}^d создаётся точечными радиационными дефектам, а σ_{xy}^{dis} – другими дислокациями движущегося ансамбля. Масса дислокации имеет полевое происхождение, а её величина определяется известным выражением [1]:

$$m = \frac{\rho_c b^2}{4\pi(1-\gamma)} \ln \frac{L_{dis}}{r_0} \quad (6)$$

Здесь ρ_c – плотность кристалла, γ – коэффициент Пуассона, r_0 – величина порядка атомных расстояний. Типичное значение линейной плотности дислокационной массы составляет $m = 10^{-16}$ кг/м.

Дислокационные петли радиационного происхождения являются призматическими, т.е. вектор Бюргера такой петли перпендикулярен её плоскости. Центры петель хаотически распределены по металлу, их плоскости параллельны плоскостям скольжения дислокаций. Будем считать, что все они одинаковы и имеют радиус равный R .

Надбарьерное скольжение дислокаций коренным образом отличается от движения в области квазистатической деформации, прежде всего изменением механизма диссипации. В динамической области возбуждение дислокационных колебаний в результате взаимодействия с полями упругих напряжений, созданных структурными дефектами, является основным диссипативным механизмом. Авторы работы [12] проанализировали степень эффективности данного механизма, теоретически исследуя надбарьерное дислокационное движение. Ими было доказано, что взаимодействие точечных дефектов с дислокацией приводит к сильному возбуждению собственных дислокационных колебаний. Авторами упомянутой работы была определена корреляционная функция $G(\tau) = \langle w(z,t)w(z,t+\tau) \rangle$. Здесь $w(z,t)$ описывает колебания единичного дислокационного участка при движении по кристаллу. Оценки, выполненные авторами работы [12], показали, что амплитуда дислокационных колебаний, порождённых взаимодействием с точечными дефектами, может превышать амплитуду тепловых колебаний на несколько порядков. Эффективность возбуждения

дислокационных колебаний возрастает при возрастании параметра несоответствия дефекта: чем сильнее отличается радиус дефекта от радиуса атома матрицы, тем больше амплитуда дислокационных колебаний.

В работах [8-10] было показано, что на эффективность этого механизма диссипации большое влияние оказывает вид спектра дислокационных колебаний, в частности, наличие щели в этом спектре, который в рассматриваемом нами случае имеет следующий вид:

$$\omega^2(q_z) = c^2 q_z^2 + \Delta^2 \quad (7)$$

Здесь Δ – спектральная щель, которая по порядку величины равна $\Delta = c/L$, где L – характерный масштаб взаимодействия, вносящего главный вклад в формирование щели.

Появление щели в дислокационном спектре является следствием того, что дислокация совершает колебания в потенциальной параболической яме, перемещающейся по кристаллу вместе с дислокацией. Такая яма, в частности, может быть создана коллективным воздействием точечных дефектов на дислокацию. Как следует из теории ДВД, точечные дефекты могут взаимодействовать с движущейся дислокацией как коллективно, так и независимо друг от друга. Характер взаимодействия определяется концентрацией дефектов и скоростью дислокационного скольжения. Введём следующие характерные времена для данной задачи: время преодоления дефекта диаметром D дислокацией, скользящей со скоростью v , обозначим $T_{def} = D/v$, время продвижения возмущения дислокационной формы на расстояние, примерно равное среднему расстоянию l между точечными дефектами, обозначим $T_{pr} = l/c$. Мы здесь учли, что возмущение дислокационной формы распространяется вдоль дислокации со скоростью звука в твёрдом теле. Если выполняется неравенство $T_{def} > T_{pr}$, это значит, что за время преодоления дислокацией одного дефекта она успевает почувствовать на себе влияние соседних дефектов, т.е. при прохождении каждого атома примеси дислокация «ощущает» влияние коллектива примесных атомов. В противоположном случае ($T_{def} < T_{pr}$) дислокация преодолевает дефект так быстро, что «помощь» соседей дойти до него не успевает. Это область независимых столкновений, здесь щель в спектре дислокационных колебаний не возникает, она появляется только в области коллективного взаимодействия, поскольку именно это взаимодействие и порождает подвижную потенциальную яму, являющуюся причиной возникновения щели. Уравнение для определения этой спектральной щели может быть записано в следующем виде:

$$\Delta_d^2 = \frac{nb^2}{8\pi^3 m^2} \iiint d^3 p \frac{p_x^2 |\sigma_{xy}(p)|^2}{\Delta_d^2 + c^2 p_z^2 - p_x^2 v^2} \quad (8)$$

Здесь n – объемная концентрация точечных дефектов, а интегрирование выполняется по всему импульсному пространству. Приближенное выражение для спектральной щели, создаваемой коллективным взаимодействием точечных дефектов, имеет вид [7]:

$$\Delta = \Delta_d = \frac{c}{b} (n_d \chi^2)^{1/4} \quad (9)$$

Здесь n_d – безразмерная концентрация точечных дефектов, χ – параметр их размерного несоответствия.

Коллективное взаимодействие дислокаций движущегося ансамбля также способно создать подвижную потенциальную яму для каждой дислокации этого ансамбля. Спектральная щель, порождаемая такой потенциальной ямой, будет иметь следующий вид [7]:

$$\Delta = \Delta_{dis} = b \sqrt{\frac{\rho \mu}{2\pi m(1 - \gamma)}} \quad (10)$$

Здесь μ – модуль сдвига.

Если плотность дислокаций высока, то именно их взаимодействие вносит доминирующий вклад в формирование спектральной щели. Это происходит в том случае, когда плотность дислокаций превышает критическое значение, определяемое выражением:

$$\rho_0 = \frac{\sqrt{n_d \chi^2}}{b^2}. \quad (11)$$

Взяв для выполнения численных оценок значения $n_d = 10^{-4}$, $\chi = 10^{-1}$, $b = 3 \cdot 10^{-10}$ м, получим, что коллективное взаимодействие дислокаций ансамбля будет вносить главный вклад в формирование щели в дислокационном спектре при значении плотности дислокаций $\rho = 10^{15} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$. В настоящей статье анализируется именно случай высокой плотности дислокаций.

Как было отмечено выше, подвижная потенциальная яма, в которой совершают колебания скользящие по кристаллу дислокации, может быть также создана благодаря действию сил изображения. Такая ситуация реализуется при движении краевой дислокации в приповерхностном слое параллельно свободной поверхности [8]. Подвижная потенциальная яма может также возникнуть как результат магнитоупругого взаимодействия дислокации с магнитной системой кристалла, однако доминирующим

такое взаимодействие может быть только в материалах с гигантской магнитоупругостью, которая на два-три порядка превышает магнитоупругость обычных магнетиков [8]. Кроме того, высокое гидростатическое давление приводит к перенормировке упругих констант гидростатически сжатого кристалла, тем самым влияя на величину спектральной щели, создаваемой коллективным взаимодействием точечных дефектов или дислокаций движущегося ансамбля, что является важным каналом влияния высокого давления на динамику дислокаций.

Теория ДВД является феноменологической, выражения физических характеристик, полученные на её основе, позволяют оценить только порядок их величины. В этой теории не учитывается ряд особенностей пластической деформации, например процессы зарождения и аннигиляции дислокаций, средняя плотность дислокаций в процессе деформации считается неизменной. Однако в теории ДВД правильно описан механизм диссипации энергии, характерный для надбарьерного движения дислокаций, и учтено влияние коллективных эффектов в дефектной системе на динамику дислокаций. Это позволило объяснить ряд экспериментальных зависимостей, не находивших объяснения в рамках ранее использованных подходов, например, линейную зависимость константы динамического торможения дислокаций точечными дефектами от скорости дислокаций и параметра размерного несоответствия дефектов и корневую зависимость от их концентрации [13]. К тому же теория ДВД позволила предсказать ряд новых динамических эффектов и закономерностей, проверка которых может способствовать постановке новых экспериментов. Она является весьма прозрачной с физической точки зрения и позволяет понять суть анализируемых физических процессов. Это позволило, в частности, сформулировать условия возникновения экстремумов силы динамического торможения, и, как следствие, экстремумов динамического предела текучести на зависимостях от скорости дислокаций и концентрации структурных дефектов. Как следует из теории ДВД, максимум имеет место в тех точках, где происходит изменение спектральной щели, минимум – там, где происходит смена доминирующего дислокационного торможения. Подтверждением этого положения является и результат данной статьи: зависимость динамического предела текучести является немонотонной и имеет минимум, положение которого соответствует сформулированному выше условию.

При вычислении силы динамического торможения дислокации структурными дефектами мы считаем малыми её колебания, возникающие в результате взаимодействия с упругими полями этих дефектов. Это позволяет нам вычислять силу дислокационного торможения во втором порядке теории возмущений:

$$F_d = b \left\langle \frac{\partial \sigma_{xy}^d}{\partial X} w \right\rangle = b \left\langle \frac{\partial \sigma_{xy}^d}{\partial X} G \sigma_{xy}^d \right\rangle \quad (12)$$

Здесь G – функция Грина уравнения дислокационного движения. Для вычислений нам понадобится Фурье-образ этой функции, который имеет следующий вид:

$$G(\omega, q) = \frac{1}{\omega^2 + i\beta\omega - c^2q^2}; \beta = \frac{B}{m} \quad (13)$$

Чтобы вычислить предел текучести кристалла, необходимо суммировать вклады точечных радиационных дефектов τ_d , дислокационных петель τ_L , тейлоровского упрочнения τ_T и фононного торможения τ_f [14]

$$\tau = \tau_T + \tau_f + \tau_L + \tau_d \quad (14)$$

Вклад фононного торможения в предел текучести определяется известным выражением [1]:

$$\tau_f = \frac{B\dot{\varepsilon}}{\rho b^2} \quad (15)$$

Здесь $\dot{\varepsilon}$ – скорость пластической деформации, B – константа фононного торможения.

Для вычисления вклада дислокационных петель в величину динамического предела текучести металла воспользуемся результатами теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) [7-9].

$$\tau_L = \frac{n_L b^2}{4\pi^2 m c v} \int_{-\infty}^{\infty} dp_y \int_{\Delta/v}^{\infty} dp_x \frac{p_x |\sigma_{xy}^L(p_x, p_y, 0)|^2}{\sqrt{p_x^2 - (\Delta/v)^2}} \quad (16)$$

Здесь n_L – объёмная концентрация дислокационных петель, σ_{xy}^L – Фурье-образ компоненты тензора напряжений, создаваемых на линии дислокации этими петлями, m – масса единицы длины дислокации (массы всех дислокаций считаем одинаковыми), c – скорость распространения в кристалле поперечных звуковых волн, v – скорость движения дислокаций ансамбля.

Необходимая нам компонента тензора напряжений круговой дислокационной петли имеет вид:

$$\sigma_{xy}^L(\mathbf{r}) = -\frac{\mu b_0 y \cos \phi}{2(1-\gamma)R^2} J(1,1;2) \quad (17)$$

Здесь μ – модуль сдвига, R – средний радиус дислокационной петли, $\mathbf{r} = (x, y, z)$, $\rho = \sqrt{x^2 + z^2}$, $x = \rho \cos \phi$, $z = \rho \sin \phi$, $J(m, n; p)$ – интегралы Лифшица-Ханкеля, задаваемые соотношением:

$$J(m, n; p) = \int_0^{\infty} J_m(k) J_n(k \frac{\rho}{R}) \exp(-k \frac{|y|}{R}) k^p dk \quad (18)$$

Здесь $J_m(k)$ – функция Бесселя.

Производя необходимые вычисления, получим выражение для силы торможения дислокации дислокационными петлями, расположенными случайным образом в плоскости XOZ

$$F_L = \beta \frac{c}{v} \Phi_1(y) \quad (19)$$

Здесь введены обозначения

$$\beta = \frac{n_s R (\mu b b_0)^2}{64 m c^2 (1 - \gamma)^2}; \quad k = \frac{R}{\sqrt{y^2 + R^2}}; \quad t = \frac{y}{R} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Phi_1(y) = & \frac{t^2 k}{(1 - k^2)^2} [2k^2(4k^4 t^2 - 2(1 - k^2))E(k) + \\ & + (1 - k^2)(8(1 - k^2) - 4k^2 t^2(2 - k^2))K(k)] \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь $E(k)$ и $K(k)$ – полные эллиптические интегралы, n_s – концентрация дислокационных петель в плоскости XOZ , b_0 – модуль вектора Бюргера дислокационной петли, γ – коэффициент Пуассона. Если же дислокационные петли хаотически разбросаны по металлу в плоскостях параллельных плоскости скольжения дислокаций, то после усреднения вклад силы динамического торможения краевой дислокации этими петлями в величину динамического предела текучести может быть описан следующим приближённым выражением:

$$\tau_L = \mu \frac{n_L b R}{2(1 - \gamma)\sqrt{\rho}} \quad (22)$$

Здесь n_L – объёмная концентрация дислокационных петель. Отметим, что полученное выражение справедливо для области скоростей деформации, в которой сила динамического торможения дислокаций дислокационными петлями имеет характер сухого трения. Эта область скоростей определяется неравенством:

$$\dot{\epsilon} < \epsilon_{cr} = \rho b R \Delta \quad (23)$$

Мы анализируем случай высокой плотности дислокаций $\rho = 10^{15} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$. Тогда именно коллективное взаимодействие дислокаций определяет формирование спектральной щели, которая в этом случае определяется выражением (10). Концентрация дислокационных петель также является очень высокой и составляет

$n_L = 10^{23} - 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Для вычисления силы динамического торможения дислокации точечными радиационными дефектами воспользуемся результатами теории ДВД. После выполнения необходимых вычислений получим выражение для динамического предела текучести облучённого кристалла в следующем виде:

$$\tau = \frac{B\dot{\epsilon}}{\rho b^2} + \mu \frac{n_L b R}{\sqrt{\rho}} + \alpha \mu b \sqrt{\rho} + \mu \frac{n_d \chi^2}{(\rho b^2)^2} \left(\frac{\dot{\epsilon} b}{c} \right) \quad (24)$$

Выполним численные оценки. Для значений $\mu = 4 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $n_d = 10^{-4}$, $\chi = 10^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 10^4 \text{ с}^{-1}$, $b = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $R = 10^{-9} \text{ м}$, $n_L = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $\rho = 10^{15} \text{ м}^{-2}$, $B = 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ получим, что порядок величин τ_d и τ_f составляет 10^4 Па , а порядок величин τ_L и τ_T примерно 10^8 Па . Таким образом, при указанных выше значениях главный вклад в величину предела текучести облучённого металла вносит торможение дислокаций ансамбля дислокационными петлями (τ_L) и другими дислокациями (τ_T). Анализ полученного выражения показывает, что в этом случае зависимость предела текучести от плотности дислокаций является немонотонной и имеет минимум, положение которого определяется выражением:

$$\rho_{\min} = \frac{n_L R}{2(1-\gamma)\alpha} \quad (25)$$

Полученный результат согласуется с выводами теории ДВД, о которых было сказано выше: положение минимума определяется значением плотности дислокаций, при котором доминирование торможения подвижных дислокаций дислокационными петлями сменяется доминированием их торможения неподвижными дислокациями.

Заключение

Механизм диссипации энергии в условиях высокоскоростной деформации кардинально отличается от механизма диссипации при деформации квазистатической и заключается в необратимом переходе энергии внешних воздействий в энергию поперечных колебаний дислокации. При этом на высокоскоростную деформацию огромное влияние оказывают динамические коллективные эффекты. Эти два обстоятельства и являются причиной отклонения полученной зависимости от соотношения Тейлора в условиях высокоскоростной деформации облучённого металла.

Полученные результаты могут быть полезными при анализе механических свойств облучённых металлов в условиях высокоэнергетических внешних воздействий.

Список литературы

1. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций: перевод с английского. Москва: Атомиздат, 1972. 599 с.

2. Smith R. F., Eggert J. H., Rudd R. E., Swift D. C., Bolme C. A., Collins G. W. High strain-rate plastic flow in Al and Fe Collins // *Journal of Applied Physics*. 2011. 110 (12). 123515. DOI: 10.1063/1.3670001
3. Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers // *EPL: A Letters Journal Exploring the Frontiers of Physics*. 2016. 114 (5/6). 65001. DOI: 10.1209/0295-5075/114/65001
4. Tramontina D., Bringa E., Erhart P., Hawreliak J., Germann T., Ravelo R., Higginbotham A., Suggit M., Wark J., Park N., Stukowski A., Tang Y. Molecular dynamics simulations of shock-induced plasticity in tantalum // *High Energy Density Physics*. 2014. 10. 9-15. DOI: 10.1016/J.HEDP.2013.10.007
5. Tapasa K., Bacon D. J., Osetsky Yu. N. Computer simulation of dislocation-solute interaction in dilute Fe-Cu alloys // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2006. 14 (7). 1153-1166. DOI: 10.1088/0965-0393/14/7/004
6. Fan H., Wang Q., El-Awady J. A., Raabe D., Zaiser M. Strain rate dependency of dislocation plasticity // *Nature Communications*. 2021. 12 (1). 1845. DOI: 10.1038/s41467-021-21939-1
7. Малашенко В. В. Нарушение соотношения Тейлора в условиях высокоэнергетических внешних воздействий // *Физика твёрдого тела*. 2022. 64 (8). 1012-1017. DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52699.340
8. Варюхин В. Н., Малашенко В. В. Динамические эффекты в дефектной системе кристалла // *Известия РАН. Серия физическая*. 2018. 82 (9). 1213-1218. DOI: 10.1134/S0367676518090259
9. Malashenko V. V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // *Physica B Condensed Matter*. 2009. 404 (21). 3890-3893. DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.122
10. Малашенко В. В. Особенности высокоскоростной деформации состаренных сплавов // *Физика твёрдого тела*. 2023. 65 (8). 1375-1378. DOI: 10.21883/FTT.2023.08.56156.70
11. Natsik V. D., Chishko K. A. Effect of impurities on dynamic dragging: of dislocations // *Crystal Research and Technology*. 1984. 19 (6). 763-768. DOI: 10.1002/crat.2170190606
12. Левачева Г. А., Манькин Э. А., Полуэктов П. П. Стохастическое возбуждение собственных колебаний дислокации при ее движении // *Физика твёрдого тела*. 1985. 27 (12). 3709-3711.
13. Kaneda T. Frictional force on a fast moving dislocation in copper dilute alloys // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1970. 28 (5). 1205-1211. DOI: 10.1143/JPSJ.28.1205
14. Aagesen L. K., Miao J., Allison J. E., Aubry S., Arsenlis A. Prediction of Precipitation Strengthening in the Commercial Mg Alloy AZ91 Using Dislocation Dynamics // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018. 49A. 1908-1915. DOI: 10.1007/s11661-018-4530-6

References

1. Hirth John., Lothe J. Теория дислокаций [Theory of Dislocations]. Moscow: Atomizdat, 1972. 599 p.
2. Smith R. F., Eggert J. H., Rudd R. E., Swift D. C., Bolme C. A., Collins G. W. High strain-rate plastic flow in Al and Fe Collins // *Journal of Applied Physics*. 2011. 110 (12). 123515. DOI: 10.1063/1.3670001

3. Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers // EPL: A Letters Journal Exploring the Frontiers of Physics. 2016. 114 (5/6). 65001. DOI: 10.1209/0295-5075/114/65001
4. Tramontina D., Bringa E., Erhart P., Hawreliak J., Germann T., Ravelo R., Higginbotham A., Suggit M., Wark J., Park N., Stukowski A., Tang Y. Molecular dynamics simulations of shock-induced plasticity in tantalum // High Energy Density Physics. 2014. 10. 9-15. DOI: 10.1016/J.HEDP.2013.10.007
5. Tapasa K., Bacon D. J., Osetsky Yu. N. Computer simulation of dislocation-solute interaction in dilute Fe-Cu alloys // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2006. 14 (7). 1153-1166. DOI: 10.1088/0965-0393/14/7/004
6. Fan H., Wang Q., El-Awady J. A., Raabe D., Zaiser M. Strain rate dependency of dislocation plasticity // Nature Communications. 2021. 12 (1). 1845. DOI: 10.1038/s41467-021-21939-1
7. Malashenko V. V. Violation of the Taylor relation under high-energy external influences // Physics of the Solid State. 2022. 64(8). 1012-1017. DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52699.340
8. Varyukhin V. N., Malashenko V. V. Dinamicheskiye effekty v defektnoy sisteme kristala [Dynamic Effects in a Defective System of Crystal] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2018. 82(9). 37-42. DOI: 10.1134/S0367676518090259
9. Malashenko V. V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // Physica B Condensed Matter. 2009. 404 (21). 3890-3893. DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.122
10. Malashenko V. V. Osobennosti vysokoskorostnoy deformatsii sostarennykh splavov [Features of high strain rate deformation of aged alloys] // Physics of the Solid State. 2023. 65(8). 1375-1378. DOI: 10.21883/FTT.2023.08.56156.70
11. Natsik V. D., Chishko K. A. Effect of impurities on dynamic dragging: of dislocations // Crystal Research and Technology. 1984. 19 (6). 763-768. DOI: 10.1002/crat.2170190606
12. Levacheva G. A., Manykin E. A., Poluektov P. P. Stochastic excitation of natural oscillations of a dislocation during its motion // Physics of the Solid State. 1985. 27 (12). 3709-3711.
13. Kaneda T. Frictional force on a fast moving dislocation in copper dilute alloys // Journal of the Physical Society of Japan. 1970. 28 (5). 1205-1211. DOI: 10.1143/JPSJ.28.1205
14. Aagesen L. K., Miao J., Allison J. E., Aubry S., Arsenlis A. Prediction of Precipitation Strengthening in the Commercial Mg Alloy AZ91 Using Dislocation Dynamics // Metallurgical and Materials Transactions A. 2018. 49A. 1908-1915. DOI: 10.1007/s11661-018-4530-6

Информация об авторе

Малашенко Вадим Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия), ORCID: 0000-0001-7073-8762, malashenko@donfti.ru

РАДИОФИЗИКА

УДК 53.084.6:681.783.322.3

ГРНТИ 47.49.31

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).363-378

Специальность ВАК 1.3.4

Поступила в редакцию / Received 25.06.2024

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

Научная статья

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ СО СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Павлов Д. В.¹, Телина И. С.², Самуйлова К. Д.¹

¹АО ИЦ «ИКАР» (Великий Новгород, Россия)

²Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В данной статье рассмотрен подход к построению инерциальных систем ориентации и навигации с использованием структурной избыточности. Структурная избыточность инерциального модуля достигается за счёт установки избыточного числа датчиков первичной информации, оси чувствительности которых неортогональны друг к другу. Такой подход к построению системы ориентации и навигации повышает её надёжность, точность и отказоустойчивость. Приведён пример технического решения малогабаритной инерциальной системы ориентации и навигации со структурной избыточностью на основе MEMS-акселерометра, MEMS-гироскопа и магнетометра для авиационного применения. Приведена математическая модель и алгоритм обработки выходных сигналов системы ориентации и навигации со структурной избыточностью. Выполнена оценка сравнения точности систем ориентации и навигации со структурной избыточностью и без неё.

Ключевые слова: *структурная избыточность, чувствительные оси, инерциальная система, навигация*

Для цитирования: Павлов Д. В., Телина И. С., Самуйлова К. Д. Алгоритмическая модель системы ориентации и навигации со структурной избыточностью // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 363-378. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).363-378

Research Article

EVALUATION OF THE IMPROVEMENT OF THE ACCURACY OF THE ORIENTATION AND NAVIGATION SYSTEM WITH STRUCTURAL REDUNDANCY

Pavlov D. V.¹, Telina I. S.², Samuilova K. D.¹

¹JSC «ECICARUS» (Veliky Novgorod, Russia)

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract. This article discusses an approach to the construction of inertial orientation and navigation systems using structural redundancy. The structural redundancy of the inertial module is achieved by installing an excessive number of primary information sensors the sensitivity axes of which are non-orthogonal to each other. This approach to building an orientation and navigation system increases its reliability, accuracy and fault tolerance. An example of a technical solution for a small-sized inertial orientation and navigation system with structural redundancy based on a MEMS accelerometer, a MEMS gyroscope and a magnetometer for aviation applications is given. A mathematical model and algorithm for processing the output signals of an orientation and navigation system with structural redundancy are presented. The evaluation of the comparison of the accuracy of orientation and navigation systems with and without structural redundancy was performed.

Keyword: *structural redundancy, sensitive axes, inertial system, navigation*

For citation: Pavlov D. V., Telina I. S., Samuilova K. D. Evaluation of the improvement of the accuracy of the orientation and navigation system with structural redundancy // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 363-378. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).363-378

Введение

Задача разработки и совершенствования интегрированных систем навигации в основном направлена на повышение точности и надёжности инерциальной системы ориентации и навигации. Ведь, как известно, любые автономные инерциальные системы ориентации и навигации (ИСОИ) имеют недостаток – дрейф нуля и зашумлённость каналов модуля [1]. Из-за дрейфа нуля выходного сигнала возникает аккумулируемая ошибка, из-за которой возникает необходимость её коррекции. Проблемой уменьшения и коррекцией систематических и случайных составляющих ошибок сегодня занимаются многие институты и организации, деятельность которых направлена на создание высокоточных систем ориентации и навигации. Зачастую, для коррекции дрейфа нуля прибегают к современным алгоритмам [2, 3] с целью усовершенствования малогабаритных ИСОИ.

Сегодня существует несколько различных подходов к созданию усовершенствованных ИСОИ. Наряду с развитием научно-технического прогресса на мировом рынке появляются датчики с новыми технологиями, которые успешно внедряются разработчиками в навигационные системы. Инерциальные датчики, выполненные по новейшим технологиям, обладают высокой точностью первичных выходных сигналов и расширенными эксплуатационными характеристиками. Но, современный анализ рынка показывает, что использование таких датчиков приводят к существенному удорожанию (ИСОИ). К тому же большинство современных высокоточных инерциальных датчиков приведут к увеличению массо-габаритных характеристик ИСОИ. Увеличение габаритов и массы модуля и стоимости изделия, например, уже невыгодно использовать в современных малоразмерных БПЛА ближней авиации. Для создания более высокоточных малогабаритных ИСОИ необходимо прорабатывать математический аппарат, алгоритмы предварительной обработки навигационной информации и алгоритмы коррекции дрейфа нуля.

Одним из современных подходов для повышения точности и надёжности ИСОИ является использование функционально избыточных блоков гироскопов и акселерометров с неортогональной ориентацией их осей чувствительности. Такая конструкция ИСОИ будет давать результат эффективной коррекции дрейфа нуля. Повышение точности достигается из-за противоположных знаков проекций случайного дрейфа датчиков на оси системы координат. При операции суммирования дрейфов разного знака результирующий дрейф оказывается минимальным и стремится к нулю.

Этот принцип построения инерциальных систем навигации активно развивается в работах у отечественных авторов: Бельский Л. Н., Туркин В. А., Водичева Л. В., Алёшкин М. В., Алёшкин В. В. Матвеев А. С. и др. [4-8]. В этом

направлении вклад внесли и зарубежные и авторы [9-12]: Zotov S. A., Rivers M. C., Potter J. E., Harrison I. V., Daly K. C., Mark J. G. и другие. Однако ожидаемая эффективность этого способа построения ИСОН напрямую зависит от алгоритмов предварительной обработки навигационной информации и алгоритмов коррекции дрейфа нуля. Согласно анализу основных источников [5-18] по данному направлению было выяснено, что сегодня не так много работ ведётся в этом направлении по сравнению с работами, которые направлены на создание классических ортогональных ИСОН.

В данной работе приведён пример разработанной математической и алгоритмической модели ИСОН с неортогональными осями чувствительности и со структурной избыточностью. Даны сравнительные оценки точности моделей ИСОН неортогонального и ортогонального исполнения, в которых использовались одни и те же датчики.

Анализ целесообразности структурной избыточности инерциальных систем навигации

Согласно анализу источников [4-17] можно сделать вывод, что подход к структурной избыточности инерциальных модулей в основном позволяет повысить надёжность, точность и отказоустойчивость системы. Такой подход к построению ИСОН не является новым и рассматривался ещё в 1960-1970 годах. Но, такие инерциальные системы в основном разрабатывались для ракетно-космической техники, где необходимо было повышение надёжности и отказоустойчивости систем. Создание избыточных отказоустойчивых инерциальных модулей требовало решения такой одной из основных задач [15-17], как определение оптимальной ориентаций осей чувствительности измерителей и построение эффективных алгоритмов неортогональных избыточных блоков. В области создания ракетно-космической техники ведущими специалистами эти задачи успешно решались и решаются на сегодняшний день.

Кроме ракетно-космической сферы, ИСОН со структурной избыточностью ещё применяются в пешеходных и транспортных системах персональной навигации. Исходя из аналитического обзора, разработка пешеходно-транспортных систем навигации основана на применении MEMS-датчиков. И как правило, такие навигационные системы в основном малогабаритные.

Главная идея создания неортогональных малогабаритных ИСОН с избыточными осями чувствительности состоит в дублировании измерительных осей. Этот подход приводит к повышению надёжности и точности ИСОН. Для этих целей используют в основном MEMS-датчики. Если использовать датчики других технологий, например, волоконно-оптические гироскопы или лазерные гироскопы, то это может привести к неоправданному усложнению и повышению стоимости систем пешеходной навигации.

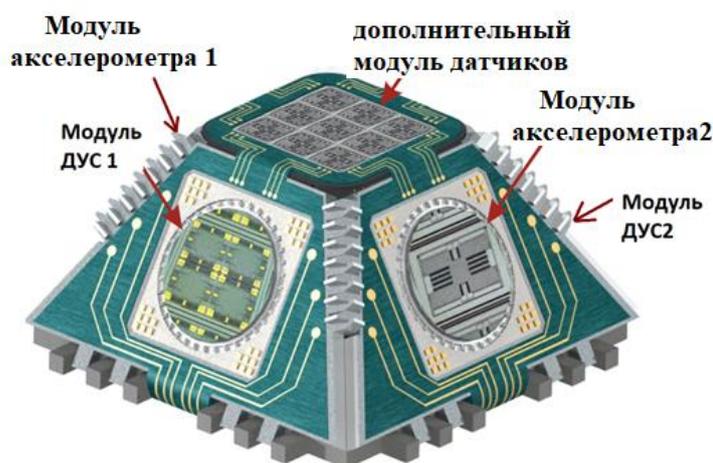
Аналитический обзор [5-21] показывает, что ИСОН со структурной избыточностью применяются в ракетно-космических системах, где в основном требуется высокая надёжность и отказоустойчивость.

Таким образом, можно резюмировать, что подход к построению ИСОН со структурной избыточностью с неортогональными осями чувствительности инерциальных датчиков является одним из эффективных способов повышения точности и надёжности системы. Однако, структурная избыточность при использовании более дорогостоящих и габаритных датчиков (лазерные и волоконно-оптические гироскопы, электромеханические акселерометры и т. д.) приведёт к удорожанию изделия и увеличению массо-габаритных характеристик. К структурной избыточности с неортогональными осями чувствительности прибегают обычно при наличии миниатюрных инерциальных датчиков. Каналы таких датчиков более зашумлены, чем у датчиков других технологий. Эффективная коррекция дрейфа за счёт избыточной структуры ИСОН в совокупности с малыми размерами даёт более высокую точность, чем ИСОН без структурной избыточности.

Техническое предложение ортогональных и неортогональных ИСОН

Для сравнительной оценки точности проведено моделирование двух вариантов ИСОН: ортогональной и неортогональной со структурной избыточностью.

Идея модульного исполнения неортогональной ИСОН со структурной избыточностью основывалась на использовании малогабаритных MEMS-датчиков: датчик угловой скорости (ДУС) и MEMS-акселерометрах. Конструктивно ДУС и MEMS-акселерометры предполагается расположить на 4 гранях усечённой 4-угольной пирамиды (рисунок 1).



БЧЭ

Рисунок 1. Предполагаемое конструктивное исполнение неортогональной ИСОН со структурной избыточностью

Здесь БЧЭ – блок чувствительных элементов представляет корпусное исполнения из сплава Д16Т. Модули ДУС 1 и ДУС 2 предлагается располагать на противоположных гранях усечённой пирамиды. Модули акселерометров могут быть расположены на других противоположных гранях. Каждый модуль представляют собой одноосные устройства акселерометра или ДУС с фильтром и 12-разрядным аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). Внутри аналоговых датчиках ДУС и акселерометре используются встроенные датчики температуры.

Дополнительный модуль датчиков предполагается установить на 5-ю грань усечённой пирамиды. В него входят барометрический датчик и датчик температуры.

Внутри корпуса помещен модуль навигационного спецвычислителя. Навигационный спецвычислитель собирает данные с датчиков, выполняет алгоритм предварительной обработки (приём данных пакетов, прореживание, усреднение), производит комплексирование датчиков, фильтрацию и вычисление углов ориентации объекта и координат местоположения.

В данном конструктивном исполнении ИСОН предполагается использовать MEMS-акселерометр МА-20» и датчик угловой скорости ДУС ТГ-100 фирмы «Лаборатория микроприборов».

На рисунке 2 показана ориентация осей чувствительности ДУС и акселерометров и приборная система координат, которая связана с корпусом усечённой пирамиды.

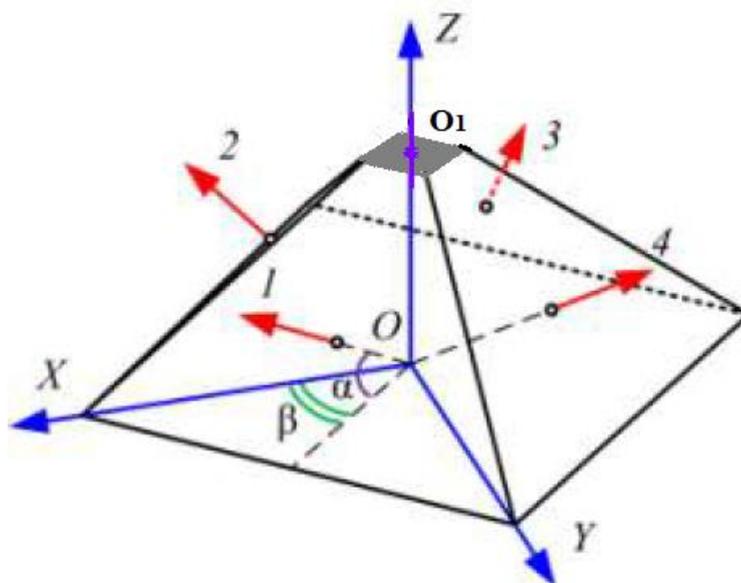


Рисунок 2. Ориентация осей чувствительностей ДУС и акселерометров и положение приборной системы координат: 1, 2, 3 и 4 – оси чувствительности комбинации ДУС и акселерометров; $OXYZ$ – приборная система координат, связанная с центром основания правильной усечённой пирамиды

Оси чувствительности 4-х комбинированных датчиков направлены под углом α к плоскости основания перпендикулярно боковым граням пирамиды и развернуты

друг относительно друга на углы, кратные 2β . Углы α и β определяют взаимную ориентацию осей чувствительности комбинированных датчиков. Данные углы являются основными параметрами при выборе конфигурации ИСОН. Именно от этих углов зависят погрешности определения составляющих измеряемых векторов кажущегося ускорения и угловой скорости.

У ортогональной ИСОН оси чувствительности датчиков располагаются под углом 90° относительно друг друга. Идея конструктивного исполнения ортогональной ИСОН заключается в обеспечении совмещения осей чувствительности датчиков с приборной системой координат. Оси приборной системы координат ортогональны граням куба, а начало её находится в центре куба.

Алгоритмическая и математическая модель неортогональной ИСОН

На рисунке 3 показана структурная схема алгоритма избыточной ИСОН.

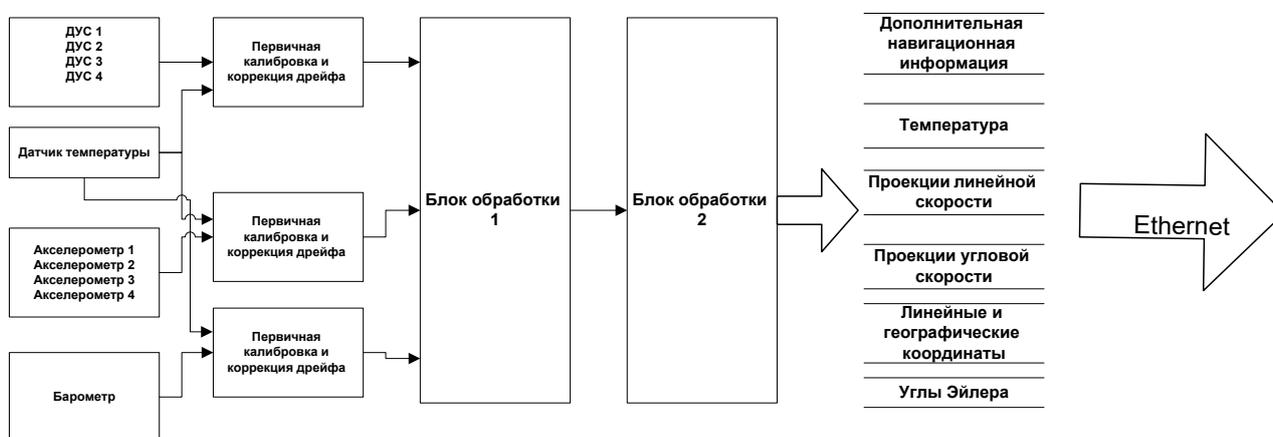


Рисунок 3. Структурная схема алгоритма работы избыточной ИСОН

Выходные навигационные данные ИСОН предполагается передавать с помощью интерфейса Ethernet. Выбор Ethernet обусловлен требованием высокой скорости передачи данных на бортовые компьютерные системы.

В блоке обработки 1 выполняются следующие алгоритмы:

- 1) формирование векторов измерения угловой скорости и кажущего ускорения;
- 2) оптимизация осей чувствительности датчиков;
- 3) комплексирования данных с 4 ДУС и 4 акселерометров;
- 4) пересчёт угловой скорости и кажущего ускорения в приборную систему координат ИСОН.

Комплексирования датчиков происходит с использованием фильтра Калмана. В блоке обработки 2 выполняется навигационный алгоритм вычисления географических координат и углов ориентации имитируемого объекта.

С учётом предполагаемой конструктивной модели расположения датчиков (рисунок 2) и схемы алгоритма работы неортогональной ИСОН (рисунок 3),

рассмотрим математическую модель на примере акселерометрического и гироскопического измерительного канала.

Орт ориентации оси акселерометра A_i :

$$\vec{A}_i = \vec{i} \cdot \cos(\alpha_A) \cdot \cos(\beta_A) + \vec{j} \cdot \cos(\alpha_A) \cdot \sin(\beta_A) + \vec{k} \cdot \sin(\alpha_A) \quad (1)$$

Орт ориентации оси ДУС Ω_i :

$$\vec{\Omega}_i = \vec{i} \cdot \cos(\alpha_\Omega) \cdot \cos(\beta_\Omega) + \vec{j} \cdot \cos(\alpha_\Omega) \cdot \sin(\beta_\Omega) + \vec{k} \cdot \sin(\alpha_\Omega) \quad (2)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - орты осей связанной приборной системы координат с правильной усечённой пирамидой. α_A и β_A – углы, определяющие ориентацию осей чувствительности акселерометра; α_Ω и β_Ω – углы, определяющие ориентацию осей чувствительности ДУС.

Предполагается, что при начальной выставке датчиков, оси чувствительности акселерометра и ДУС совпадают, т.е.: $\alpha_A \approx \alpha_\Omega \approx \alpha$ и $\beta_A \approx \beta_\Omega \approx \beta$.

Тогда матрица измерений для гироскопического и акселерометрического канала будет одинакова:

$$H = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) & \sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & -\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \sin(\alpha) \\ \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & -\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \sin(\alpha) \end{pmatrix} \quad (3)$$

На основании равномерного распределения комбинированных датчиков избыточной ИСОН предполагается, что угол $\beta = 45^\circ$. В данном расположении оценка угла составила $\alpha \approx 28,7^\circ$.

Для избыточной системы ориентации с 4-мя акселерометрами вектор состояния \mathbf{x} с вектором измерений \mathbf{z} можно выразить по следующей формуле:

$$\mathbf{z}_A = H \cdot \mathbf{x}_A + \boldsymbol{\varepsilon}_A \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{z}_A = (a_{x1} \ a_{x2} \ a_{x3} \ a_{x4})^T$ – вектор выходных сигналов акселерометров; $\mathbf{x}_A = (a_x \ a_y \ a_z)^T$ – вектор кажущегося ускорения на оси приборной системы координат ИСОН; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор случайных помех акселерометрического канала, имеющий нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием.

Модель измерения для ДУС:

$$\mathbf{z}_\Omega = H \cdot \mathbf{x}_\Omega + \boldsymbol{\xi} \quad (5)$$

где $\mathbf{z}_\Omega = (\omega_{x1} \ \omega_{x2} \ \omega_{x3} \ \omega_{x4})^T$ – вектор выходных сигналов угловой скорости; \mathbf{x}_Ω – вектор угловой скорости на оси приборной системы координат ИСОН; $\boldsymbol{\xi}$ – вектор случайных помех гироскопического канала, имеющий нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием.

Из матричных уравнений (4) и (5) можно выразить \mathbf{x}_A и \mathbf{x}_Ω :

$$x_A = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot z_A \quad (6)$$

$$x_\Omega = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot z_\Omega \quad (7)$$

Далее, полученные значения x_A и x_Ω используются для расчёта углов ориентации и географических координат местоположения.

В блоке обработке 2 (рисунок 3) реализуется алгоритм вычисления географического местоположения и углов Эйлера летательного аппарата (ЛА). Данный алгоритм основан на базе решений кинематических уравнений кватернионов ориентации.

В указанной модели неортогонального ИСОН (рисунок 4):

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости на оси связанной системы координат;

a_x, a_y, a_z – усреднённые проекции ускорения на оси связанной системы координат;

$\psi(t_0), \theta(t_0), \gamma(t_0)$ – углы курса, крена и тангажа в начальный момент времени;

$\psi = \psi(t), \theta = \theta(t), \gamma = \gamma(t)$ – углы курса, крена и тангажа в произвольные моменты времени;

$\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg}$ – пересчитанные угловые скорости в географической системе координат;

R – радиус Земли;

$\lambda(t_0), \varphi(t_0), h(t_0)$ – долгота, широта и барометрическая высота в начальный момент времени;

$\lambda = \lambda(t), \varphi = \varphi(t), h = h(t)$ – долгота, широта и высота в произвольные моменты времени;

$V_{xg}(t_0), V_{yg}(t_0), V_{zg}(t_0)$ – проекции скоростей ЛА в географической системе координат в начальный момент времени;

$\dot{\lambda}, \dot{\varphi}$ – производные от долготы и широты по времени;

$\Lambda, \bar{\Lambda}$ – простой и сопряжённый кватернион ориентации, соответственно;

$\dot{\Lambda}$ – скорость изменения кватерниона по времени;

$N_g = \Lambda \circ N \circ \bar{\Lambda}$ – пересчёт вектора ускорения в географическую систему координат;

a_{xg}, a_{yg}, a_{zg} – линейные ускорения, пересчитанные в географическую систему координат;

$\Omega = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)^T$ – вектор угловой скорости в связанной системе координат;

$\Omega_g = (\omega_{xg} \ \omega_{yg} \ \omega_{zg})^T$ – вектор угловой скорости, пересчитанный в географическую систему координат;

$N = (a_x \ a_y \ a_z)^T$ – вектор линейного ускорения в связанной системе координат;

$h = h(t)$ – барометрическая высота, получаемая в произвольные моменты времени;

$t = n \cdot \Delta\tau$ – время усреднения датчиков;
 $\Delta\tau$ – отчёт времени АЦП;
 n – число отчётов времени АЦП.

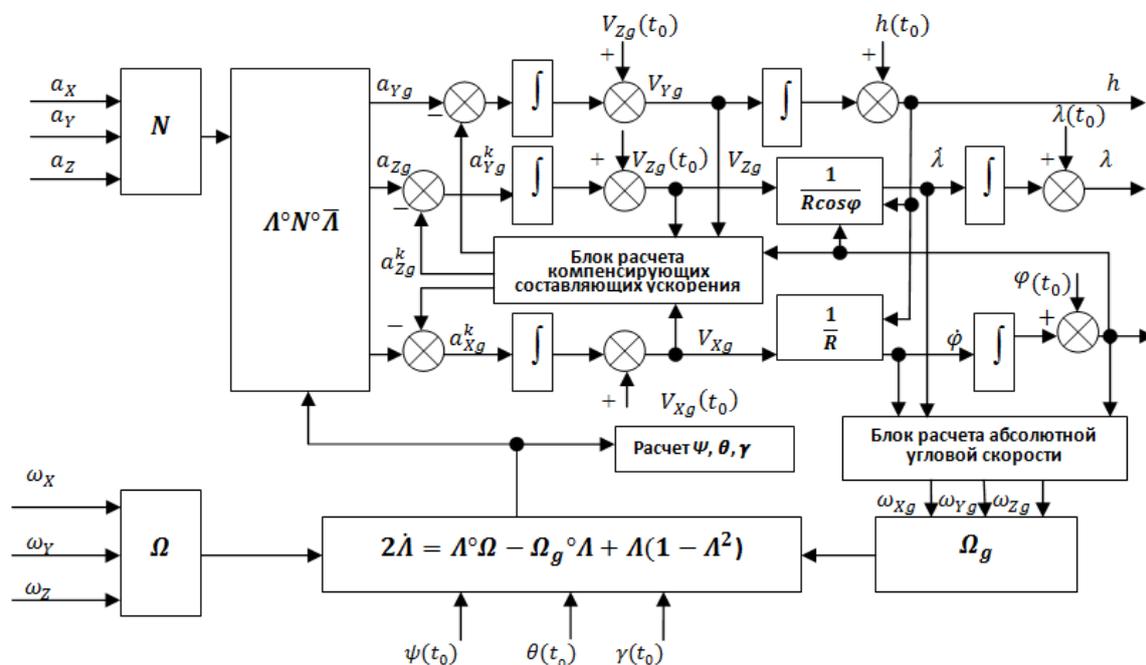


Рисунок 4. Математическая модель неортогональной ИСОН с использованием кватернионов ориентации

Алгоритмическая и математическая модель ортогональной ИСОН

На рисунке 5 показана структурная схема алгоритма ортогональной ИСОН.

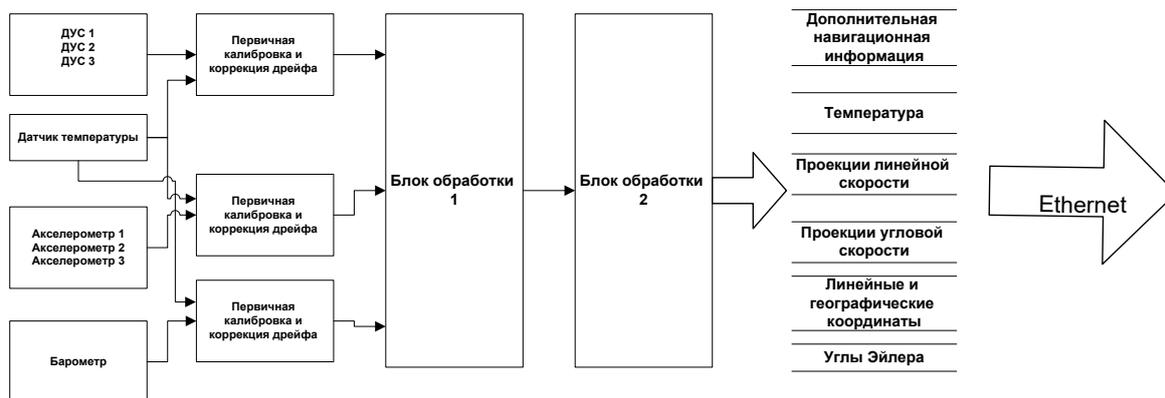


Рисунок 5. Структурная схема алгоритма работы ортогональной ИСОН

Интерфейс передачи данных предполагается использовать такой же, как и у модели неортогональной ИСОН.

В блоке обработке 1 выполняются следующие алгоритмы:

1) формирование векторов измерения угловой скорости и кажущего ускорения;

2) комплексирование данных с 3 ДУС и 3 акселерометров;

В блоке обработки 2 также, как и в неортогональной ИСОН выполняется навигационный алгоритм вычисления географических координат и углов ориентации имитируемого объекта (рисунок 5).

Состав выходной навигационной информации предполагается использовать одинаковый для двух ИСОН.

Сравнительная оценка точности неортогональной и ортогональной ИСОН

Для сравнительной оценки двух моделей инерциальных систем создана имитационная модель объекта. В качестве модели использовали БПЛА самолётного типа. Имитационные характеристики представляют собой кинематические характеристики, характер глиссады, координаты полёта. На рисунке 6 показана имитируемая траектория полёта БПЛА.

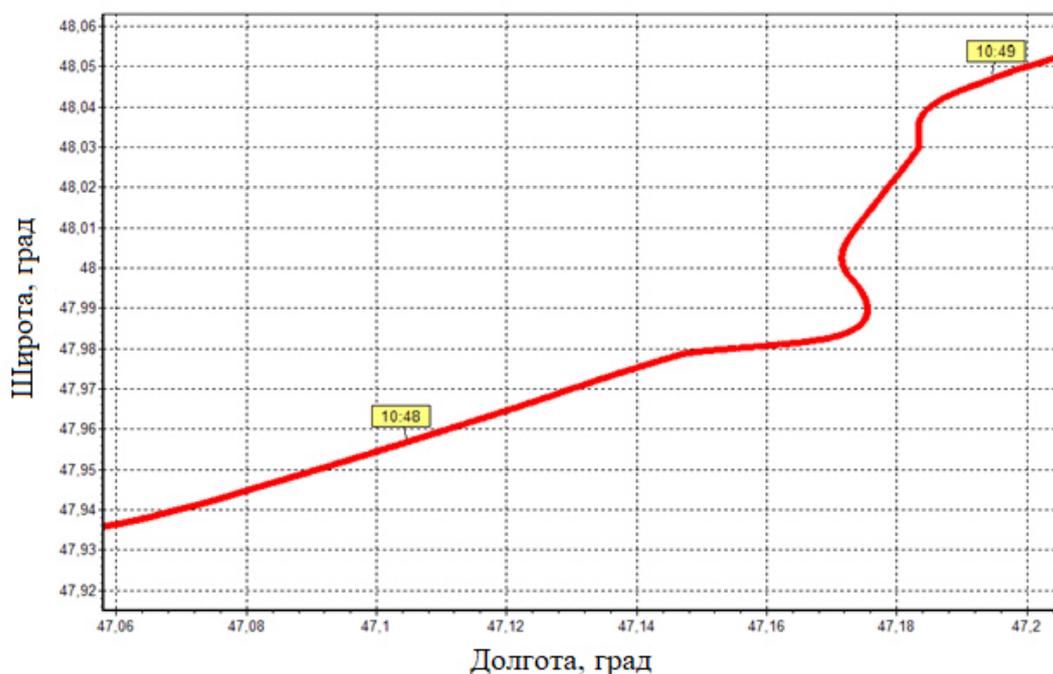


Рисунок 6. Имитируемая траектория полёта БПЛА

На рисунке 7 показаны результаты моделируемых погрешностей географических координат модели неортогональной ИСОН со структурной избыточностью.

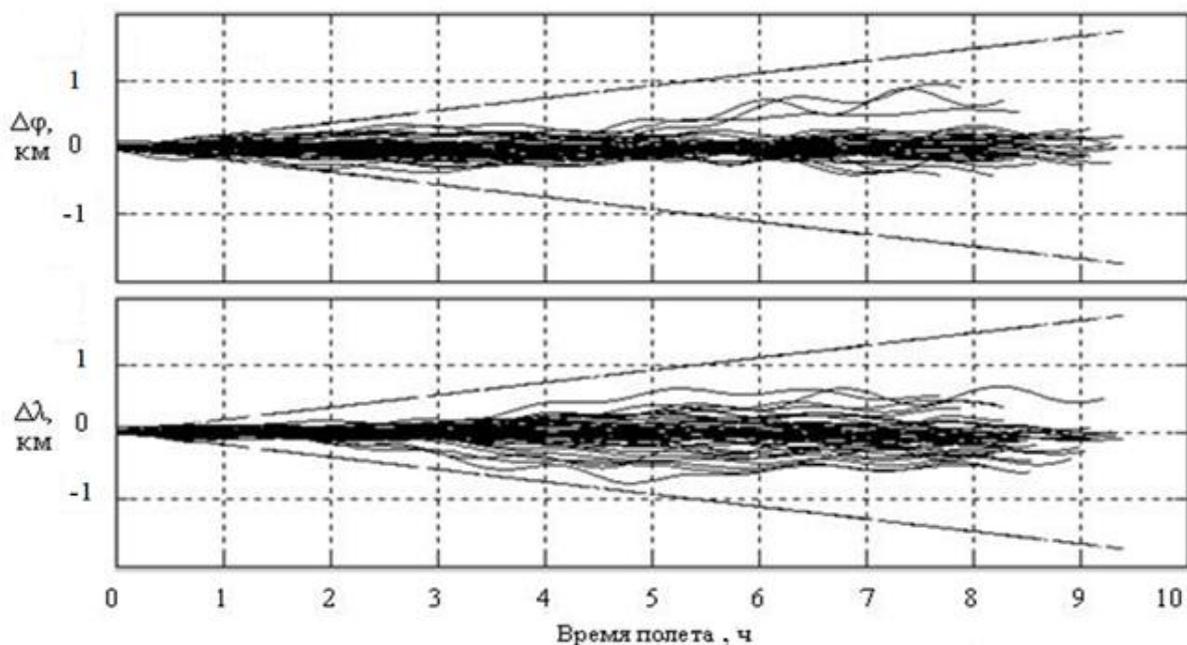


Рисунок 7. Результаты моделируемых погрешностей координат широты $\Delta\varphi$ и долготы $\Delta\lambda$

На рисунке 8 приведены графики моделируемых погрешностей угла курса БПЛА. Семейство графиков получено при многократных экспериментах.

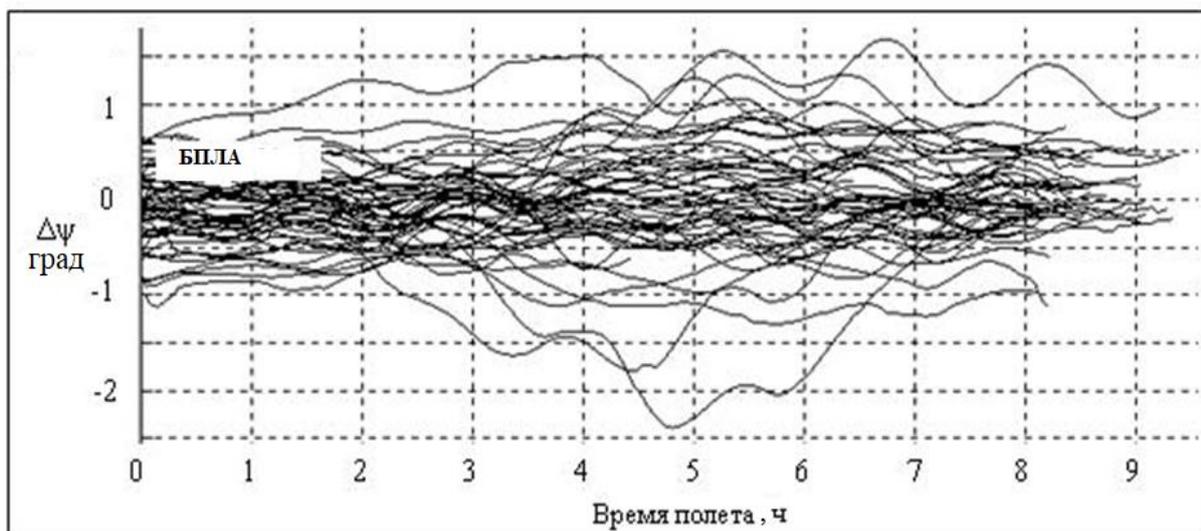


Рисунок 8. Графики погрешностей курса БПЛА по данным модели неортогональной ИСОН

В таблицу 1 сведены сравнительные точностные характеристики двух ИСОН.

На основе проведённого моделирования получили, что модель неортогональной ИСОН со структурной избыточностью обладает потенциально большей точностью, чем ортогональная.

Таблица 1. Точностные характеристики ортогональной и неортогональной ИСОН

Параметр	Неортогональная избыточная ИСОН	Ортогональная ИСОН
Точность определения географических координат местоположения (2σ) (за 5 часов полёта)	± 600 м	$\pm 1,4$ км
Точность определения горизонтальных координат местоположения (2σ) (за 5 часов полёта)	± 450 м	± 800 км
Точность определения углов ориентации (2σ) (крен, тангаж) (за 5 часов полёта)	$\pm 0,22^\circ$	$\pm 0,38^\circ$
Точность определения курса (2σ) (за 5 часов полёта)	$\pm 0,3^\circ / \cos(\varphi)$	$\pm 0,45^\circ / \cos(\varphi)$
Точность определения высоты (2σ) (за 5 часов полёта)	5% от высоты полёта БПЛА	5% от высоты полёта БПЛА
Точность определения путевой скорости (2σ) (за 5 часов полёта)	± 8 м/с	± 12 м/с
Погрешность измерения барометрической высоты (2σ)	$\pm 1,3$ м	$\pm 2,1$ м

Выводы

В данной работе разработана математическая модель и предложены алгоритмы обработки навигационных данных ортогональной и неортогональной ИСОН. Приведены сравнительные точностные характеристики результатов работы двух моделей ИСОН. Результаты моделирования показывают, что более высокие точностные характеристики даёт модель неортогональной ИСОН со структурной избыточностью.

Таким образом, подход к построению неортогональных ИСОН со структурной избыточностью является эффективным с целью повышения точностей автономных систем навигации. Также, согласно исследованиям [2-20] структурная избыточность даёт повышенную надёжность и отказоустойчивость работы ИСОН.

Список литературы

1. Павлов Д. В., Петров М. Н., Лукин К. Г. Метод температурной калибровки блока микромеханических акселерометров бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Метрология. 2015. 2. 25-35.
2. Narasimhappa M., Mahindrakar A. D., Guizilini V. C., Terra M. H., Sabat S. L. MEMS-Based IMU Drift Minimization: Sage Husa Adaptive Robust Kalman Filtering // IEEE Sensors Journal. 2020. 20 (1). 250-260. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2941273
3. Степанов О. А., Литвиненко Ю. А., Васильев В. А., Торопов А. Б., Басин М. В. Алгоритм полиномиальной информации при квадратичных нелинейностях в уравнениях динамики и измерений. Часть 1: Описание и сопоставление с алгоритмами калмановского типа // Гироскопия и навигация. 2021. 29, 3 (114). 3-33. DOI: 10.17285/0869-7035.0068

4. Водичева Л. В., Бельский Л. Н., Парышева Ю. В., Лысцов А. А. Инерциальные измерительные блоки перспективных изделий ракетно-космической техники: обеспечение отказоустойчивости // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроения. 2018. 17 (1). 28-44. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-28-44
5. Алешкин В. В., Алешкин М. В., Сокольский А. С., Матвеев А. С. Исследование алгоритмов обработки информации избыточного блока микромеханических акселерометров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. 1 (21). 96-105.
6. Алешкин В. В., Матвеев А. С., Алешкин М. В. Математические модели, методы и алгоритмы обработки избыточной информации измерительного блока // Интернет и инновации: практические вопросы информационного обеспечения инновационной деятельности: сборник трудов Международной конференции, 19-20 ноября 2008 г. Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. С. 377-380.
7. Туркин В. А. Применение математического моделирования при разработке методики проектирования блоков чувствительных элементов для БИНС с неортогональной ориентацией измерительных осей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. 4. 326-334. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-326-335
8. Туркин В. А. Результаты разработки методики контроля блоков чувствительных элементов для БИНС с неортогональной ориентацией измерительных осей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. 2. 257-264. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-257-264
9. Zotov S. A., Rivers M. C., Trusov A. A., Shkel A. M. Folded MEMS pyramid inertial measurement unit // IEEE Sensors Journal. 2011. 11 (11). 2780-2789. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2160719
10. Potter J. E., Deckert J. C. Minimax Failure Detection and Identification in Redundant Gyro and Accelerometer Systems // Journal of Spacecraft and Rockets. 1973. 10 (4). 236-243. DOI: 10.2514/3.27753
11. Ebner R. E., Mark J. G. Redundant Integrated Flight-Control/Navigation Inertial Sensor Complex // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1978. 1 (2). 143-149. DOI: 10.2514/3.55757
12. Daly K. C., Gai E., Harrison J. V. Generalized Likelihood Test for FDI in Redundant Sensor Configurations // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1979. 2 (1). 9-17. DOI: 10.2514/3.55825
13. Маринушкин П. С., Нестеренко Т. Г. Малогабаритная система персональной навигации на базе неортогонального инерциального измерительного блока с избыточной структурой // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электронный журнал: сетевое научное издание. 2016. 8. 121-134. URL: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/45802/1/reprint-nw-20198.pdf> (Дата обращения: 28.02.2024). DOI: 10.7463/0816.0843239
14. Неортогональная БИНС для малых БПЛА // Хабр: официальный сайт. 2011. URL: <http://special.habrahabr.ru/kyocera/p/114513/> (Дата обращения: 28.02.2024).
15. Маринушкин П. С., Нестеренко Т. Г. Избыточный измерительный модуль на микромеханических датчиках для малогабаритных систем персональной навигации // Инженерный вестник Дона: сетевое издание. 2016. 42 (3). 38-46. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_43_Marinushkin_Nesterenko_N.pdf_189_517c8b2.pdf (Дата обращения: 28.02.2024).

16. Калихман Д. М., Туркин В. А. Методика контроля блоков чувствительных элементов с неортогональной ориентацией измерительных осей // Гироскопия и навигация. 2023. 31, 4 (123). 44-63.
17. Калихман Д. М., Туркин В. А., Депутатова Е. А., Акмаев А. А. Математическая модель измерительного канала шестиосного измерителя линейного ускорения с неортогональной ориентацией осей чувствительности – прибора БИЛУ // Навигация и управление летательными аппаратами. 2023. 4 (43). 2-37.
18. Алехова Е. Ю., Жбанов Ю. К., Климов Д. М. Использование избытка осей чувствительности для повышения точности измерений // Известия РАН. Механика твердого тела. 2013. 5. 24-27.
19. Водичева Л. В. Повышение надежности и точности бесплатформенного инерциального измерительного блока при избыточном количестве измерений // Гироскопия и навигация. 1997. 1 (16). 55-67.
20. Хамидуллин В. К. Технические средства навигации и управления движением: учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова, 2019. 142 с.

References

1. Pavlov D. V, Petrov M. N., Lukin K. G. Metod temperaturnoy kalibrovki bloka mikromekhanicheskikh akselerometrov besplatformennoy inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy [Method of temperature calibration of the micromechanical accelerometer block of the strapdown inertial navigation system] // Metrologiya. 2015. 2. 25-35.
2. Narasimhappa M., Mahindrakar A. D., Guizilini V. C., Terra M. H., Sabat S. L. MEMS-Based IMU Drift Minimization: Sage Husa Adaptive Robust Kalman Filtering // IEEE Sensors Journal. 2020. 20 (1). 250-260. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2941273
3. Stepanov O. A., Litvinenko Yu. A., Vasiliev V. A., Toropov A. B., Basin M. V. Polynomial Filtering Algorithm Applied to Navigation Data Processing under Quadratic Nonlinearities in System and Measurement Equations. Part 1. Description and Comparison with Kalman Type Algorithms // Giroskopiya i Navigatsiya. 2021. 29, 3 (114). 3-33. DOI: 10.17285/0869-7035.0068
4. Vodicheva L. V., Bel'skiy L. N., Parysheva Yu. V., Lystsov A. A. Inertial measuring units for future-generation aerospace products: fault-tolerance // Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering. 2018. 17 (1). 28-44. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-28-44
5. Aleshkin V. V., Aleshkin M. V., Sokolsky A. S., Matveev A. S. Issledovaniye algoritmov obrabotki informatsii izbytochnogo bloka mikromekhanicheskikh akselerometrov [Information processing algorithms research of the micromechanical accelerometers superfluous block] // Vestnik of Saratov State Technical University. 2007. 1. 96-105.
6. Aleshkin V. V., Matveev A. S., Aleshkin M. V. Matematicheskiye modeli, metody i algoritmy obrabotki izbytochnoy informatsii izmeritel'nogo bloka [Mathematical models, methods and algorithms for processing redundant information of the measuring block]. Internet and Innovation: Proceedings of the International Conference. Saratov: Izd-vo SSTU, 2008. P. 377-380.
7. Turkin V.A. Primeneniye matematicheskogo modelirovaniya pri razrabotke metodiki proyektirovaniya blokov chuvstvitel'nykh elementov dlya BINS s neortogonal'noy oriyentatsiyey izmeritel'nykh osey [Application of mathematical modeling in design methodology of inertial measurement units for strapdown inertial systems with non-orthogonal orientation of measurement axes] // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2023. 4. 326-334. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-326-335

8. Turkin V. A. Rezul'taty razrabotki metodiki kontrolya blokov chuvstvitel'nykh elementov dlya BINS s neortogonal'noy oriyentatsiyey izmeritel'nykh osey [Results of the development of a methodology for the control of inertial measurement units for sins with non-orthogonal orientation of measuring axes] // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2023. 2. 257-264. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-257-264
9. Zotov S. A., Rivers M. C., Trusov A. A., Shkel A. M. Folded MEMS pyramid inertial measurement unit // IEEE Sensors Journal. 2011. 11 (11). 2780-2789.
10. Potter J. E., Deckert J. C. Minimax Failure Detection and Identification in Redundant Gyro and Accelerometer Systems // Journal of Spacecraft and Rockets. 1973. 10 (4). 236-243. DOI: 10.2514/3.27753.
11. Ebner R. E., Mark J. G. Redundant Integrated Flight-Control/Navigation Inertial Sensor Complex // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1978. 1 (2). 143-149. DOI: 10.2514/3.55757.
12. Daly K. C., Gai E., Harrison J. V. Generalized Likelihood Test for FDI in Redundant Sensor Configurations // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1979. 2 (1). 9-17. DOI: 10.2514/3.55825.
13. Marinushkin P. S., Nesterenko T. G. Malogabaritnaya sistema personal'noy navigatsii na baze neortogonal'nogo inertsiyal'nogo izmeritel'nogo bloka s izbytochnoy strukturoy [Miniature personal navigation system based on non-orthogonal redundant inertial measurement unit] // Science and Education of Bauman MSTU. 2016. 8. 121-134. URL: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/45802/1/reprint-nw-20198.pdf> (Accessed: 28.02.2024). DOI: 10.7463/0816.0843239
14. Neortogonal'naya BINS dlya malykh BPLA [Non-orthogonal BINS for small UAVs] // Habr, 2011. URL: <http://special.habrahabr.ru/kyocera/p/114513/> (Accessed: 28.02.2024).
15. Marinushkin P. S., Nesterenko T. G. Redundant measurement unit based on micromechanical sensors for miniature personal navigation systems // Engineering journal of Don. 2016. 3 (42). 38-46. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_43_Marinushkin_Nesterenko_N.pdf_189517c8b2.pdf (Accessed: 28.02.2024).
16. Kalikhman D. M., Turkin V. A. Metodika kontrolya blokov chuvstvitel'nykh elementov s neortogonal'noy oriyentatsiyey izmeritel'nykh osey [Methodology for monitoring blocks of sensitive elements with non-orthogonal orientation of measuring axes] // Gyroscopy and Navigation. 2023. 31, 4 (123). 44-63.
17. Kalikhman D. M., Turkin V. A., Deputatova Ye. A., Akmayev A. A. Matematicheskaya model' izmeritel'nogo kanala shestiosnogo izmeritelya lineynogo uskoreniya s neortogonal'noy oriyentatsiyey osey chuvstvitel'nosti – pribora BILU [Mathematical model of the measurement channel for the six-axis linear acceleration sensor with non-orthogonal orientation of sensitivity axes – BILU device] // Navigation and control of aircraft. 2023. 4 (43). 2-37.
18. Alekhova E.Y., Zhanov Y.K., Klimov D.M. Ispol'zovaniye izbytko osey chuvstvitel'nosti dlya povysheniya tochnosti izmereniy [Using redundancy of sensitivity axes to improve measurement accuracy] // Mechanics of Solids. 2013. 5. 24-27.
19. Vodicheva L. V. Povysheniye nadezhnosti i tochnosti besplatformennogo inertsiyal'nogo izmeritel'nogo bloka pri izbytochnom kolichestve izmereniy [Increasing reliability and accuracy of strapdown inertial measuring unit with redundant measurement quantity] // Gyroscopy and Navigation. 1997. 1. 55-67.

20. Khamidullin V. K. Tekhnicheskiye sredstva navigatsii i upravleniya dvizheniyem: uchebnoye posobiye [Technical means of navigation and traffic control: tutorial]. Kaliningrad: Izd-vo BGTU, 2019. 142 p.

Информация об авторах

Павлов Денис Викторович – ведущий инженер-математик, АО «ИЦ ИКАР» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0003-0461-6945, energidriver@mail.ru

Телина Ирина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0003-4429-272X, Irina.Telina@novsu.ru

Самуйлова Ксения Дмитриевна – инженер, АО «ИЦ ИКАР» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0001-3818-2503, s244581@std.novsu.ru

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.383

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).379-390

Поступила в редакцию / Received 01.07.2024

ГРНТИ 47.33.37

Специальность ВАК 2.2.13; 1.3.4

Принята к публикации / Accepted 02.09.2024

Научная статья

УЧЕТ ВРЕМЕНИ ЭКСПОЗИЦИИ ПРИ ДВУХТОЧЕЧНОЙ КОРРЕКЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ШУМА МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНИКА

Корнышев Н. П.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В статье рассматриваются вопросы устранения геометрического шума фотоприемников инфракрасного диапазона, что до сих пор является актуальной задачей, связанной с необходимостью обнаружения малоконтрастных объектов, находящихся в поле видеонаблюдения, на фоне флуктуационного шума и детерминированных помех. Детально рассматривается компенсационный метод борьбы с геометрическим шумом, в частности, так называемая, двухточечная коррекция, основанная на предварительной заводской калибровке матричного фотоприемника при фиксированном времени экспозиции. Изменение времени экспозиции фотоприемника в процессе информативной засветки по отношению к времени экспозиции, использованному на этапе калибровки, приводит к ошибке компенсации, проявляющейся в виде мелкоструктурного шума на изображении. В этой связи методы компенсации геометрического шума, учитывающие возможные изменения времени экспозиции фотоприемника в процессе информативной засветки, рассматриваемые в статье, представляют практический интерес для разработчиков данного класса аппаратуры. В статье достаточно подробно рассматриваются особенности учета времени экспозиции с точки зрения влияния аддитивной (вызванной неравномерностью термогенерации в элементах фотоприемника) и мультипликативной (вызванной неравномерностью чувствительности элементов фотоприемника) составляющих геометрического шума, и приводятся результаты компьютерного моделирования, а также даются рекомендации по применению.

Ключевые слова: *геометрический шум, обработка изображений, двухточечная коррекция*

Для цитирования: Корнышев Н. П. Учет времени экспозиции при двухточечной коррекции геометрического шума матричного фотоприемника // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 379-390. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).379-390

Research Article

ACCOUNTING FOR EXPOSURE TIME WITH TWO-POINT CORRECTION OF FIXED PATTERN NOISE OF A MATRIX PHOTODETECTOR

Kornyshev N. P.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The article discusses the issues of eliminating the geometric noise of infrared matrix sensors, which is still an urgent task related to the need to detect low-contrast objects in the video surveillance field against the background of fluctuating noise and deterministic interference. The compensatory method of combating geometric noise is considered in detail, in particular, the so-called two-point correction based on the preliminary factory calibration of the matrix sensor at a fixed exposure time. Changing the exposure time of the matrix sensor in the process of informative illumination in relation to the exposure time used at the calibration stage leads to a compensation error, which manifests itself in the form of fine-grained noise in the image. In this regard, the methods of geometric noise compensation, taking into account possible

changes in the exposure time of the matrix sensor during informative illumination, considered in the article, are of practical interest to developers of this class of equipment. The article discusses in sufficient detail the features of accounting for exposure time from the point of view of the influence of additive (caused by uneven thermal emission in the elements of the matrix sensor) and multiplicative (caused by uneven sensitivity of the elements of the matrix sensor) components of geometric noise, and the results of computer modeling are presented, recommendations for use are given.

Keywords: *fixed pattern noise, image processing, two-point correction*

For citation: Kornyshev N. P. Accounting for exposure time with two-point correction of fixed pattern noise of a matrix photodetector // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 379-390. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).379-390

Введение

Геометрический шум (ГШ) или в английской аббревиатуре *FPN*-шум (*fixed pattern noise*) является для конкретного фотоприемника детерминированной помехой, имеющей две составляющих: аддитивную и мультипликативную. Аддитивная составляющая обусловлена неравномерностью термогенерации носителей заряда в элементах матричного фотоприемника. Мультипликативная составляющая обусловлена неоднородностью чувствительности элементов матричного фотоприемника.

Математическая модель, описывающая ГШ, имеет вид линейного уравнения с постоянными коэффициентами:

$$Y=KX+B, \quad (1)$$

где Y – матрица выходных значений яркости элементов матричного фотоприемника с ГШ, B – матрица значений аддитивной составляющей ГШ, KX – матрица значений мультипликативной составляющей ГШ, причем, X – матрица исходных значений яркости элементов матричного фотоприемника без ГШ, а K – матрица коэффициентов, характеризующих неравномерность чувствительности каждого элемента фотоприемника [1, 2].

С ГШ обычно борются компенсационными методами. Так, например, метод одноточечной коррекции заключается в вычитании предварительно запомненных (эталонных) значений аддитивной составляющей. Однако, он эффективен только в небольшом диапазоне изменения сигнала относительно эталонного значения.

Более точен метод двухточечной коррекции, заключающийся в вычитании предварительно запомненных значений аддитивной составляющей B и умножении (или делении) на предварительно рассчитанные коэффициенты K компенсации мультипликативной составляющей.

Данный метод предусматривает предварительную калибровку матричного фотоприемника видимого диапазона спектра, предусматривающую поочередное перекрытие потока излучения и равномерное облучение фотоприемника при фиксированном времени экспозиции. Получаемые при этом значения яркости элементов кадров изображений Y_1 для перекрытого потока излучения и Y_2 для

равномерно облученного фотоприемника запоминают. Затем рассчитывают коэффициенты K , характеризующие относительную чувствительность элементов фотоприемника по формуле $K=Y_2/m_2$, где m_2 средняя яркость изображения Y_2 . При информативном облучении фотоприемника производят компенсацию ГШ в получаемых при этом цифровых значениях Y яркости элементов кадра, формируя выходные значения яркости X элементов кадра по обратному выражению математической модели ГШ:

$$X=(Y-B)/K, \text{ причем, } B=Y_1. \quad (2)$$

Для компенсации ГШ матричного фотоприемника инфракрасного диапазона способ предусматривает нахождение коэффициентов K из системы уравнений с двумя неизвестными:

$$Y_1=KX_1+B, \quad (3)$$

$$Y_2=KX_2+B. \quad (4)$$

При этом $X_1=m_1$ и $X_2=m_2$ – исходные значения яркости элементов матричного фотоприемника без ГШ при, соответственно, равномерном низком и высоком уровне облученности элементов фотоприемной матрицы, где m_1 и m_2 – средние значения яркости изображений Y_1 и Y_2 .

Из рассмотренной выше системы уравнений следуют значения:

$$K=(Y_2-Y_1)/(m_2-m_1), \quad (5)$$

$$B=(Y_1X_2-Y_2X_1)/(X_2-X_1). \quad (6)$$

Если $X_1 \rightarrow 0$, то $K \approx Y_2/X_2$, $B \approx Y_1$. Однако, как показывает компьютерное моделирование, приближенное вычисление коэффициентов B практически не влияет на точность двухточечной коррекции, а приближенное вычисление коэффициентов K существенно ее ухудшает. Необходимо отметить, что компьютерное моделирование показывает на ограничения в применении рассмотренных выше способов при увеличении динамического диапазона изменения сигнала.

Целью настоящей статьи является обзор вариантов двухточечной коррекции геометрического шума матричного фотоприемника, позволяющих учесть влияние изменения времени его экспозиции в процессе информативной засветки по отношению к времени экспозиции, использованном при калибровке.

Двухточечная коррекция ГШ с учетом времени экспозиции

Общим недостатком известных компенсационных методов является снижение точности компенсации ГШ фотоприемника при времени экспозиции (накопления) в процессе информативного облучения, отличном от времени экспозиции, использованном в процессе калибровки. Низкая точность обусловлена тем, что,

например, при увеличении времени t экспозиции фотоприемника в процессе его информативного облучения в пределах рабочего диапазона экспозиций $t_{min} \leq t \leq t_{max}$ относительно минимального времени экспозиции t_{min} , использованного в процессе калибровки, возникает ошибка компенсации ГШ. Ошибка компенсации ГШ в свою очередь объясняется тем, что аддитивная составляющая ГШ прямо пропорциональна времени накопления. На изображении ошибка компенсации проявляется в виде помехи – зернистой структуры. При этом, чем больше задаваемое время накопления t , тем больше ошибка компенсации и заметнее помеха.

На рисунках 1, 2 показаны экспериментально снятые зависимости математического ожидания сигнала от температуры источника излучения при фиксированной экспозиции и зависимости математического ожидания сигнала от величины экспозиции фотоприемника при фиксированной температуре.

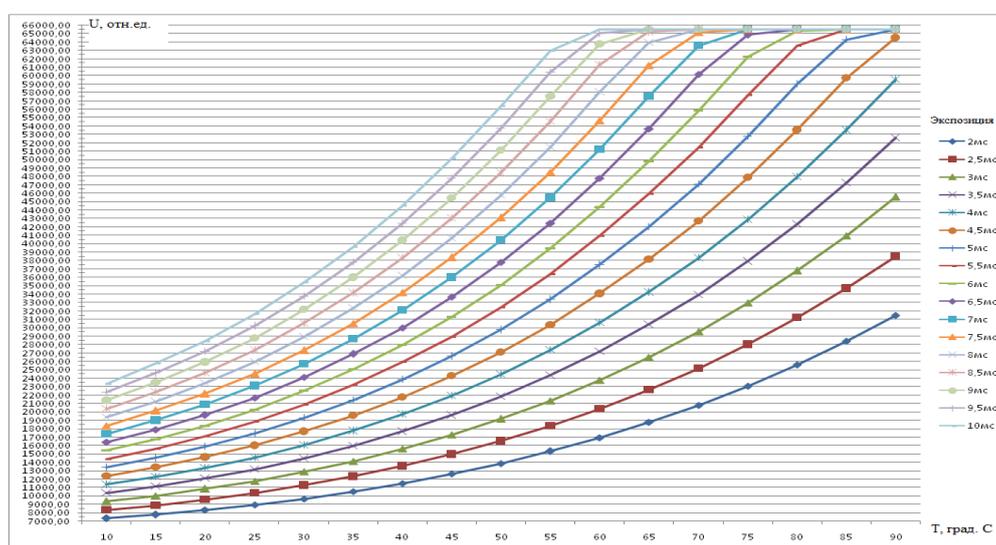


Рисунок 1. Зависимости среднего значения сигнала от температуры источника излучения при фиксированной экспозиции фотоприемника

Наличие линейной зависимости средней яркости изображения m от времени экспозиции t на интервале $t_{min} \leq t \leq t_{max}$ позволяет достаточно просто учесть ошибку компенсации ГШ при смене экспозиции, поскольку величина аддитивной составляющей ГШ имеет аналогичный характер зависимости от времени экспозиции.

Ниже рассматривается способ компенсации ГШ фотоприемника [3], инвариантный для устанавливаемого времени t экспозиции фотоприемника в пределах $t_{min} \leq t \leq t_{max}$.

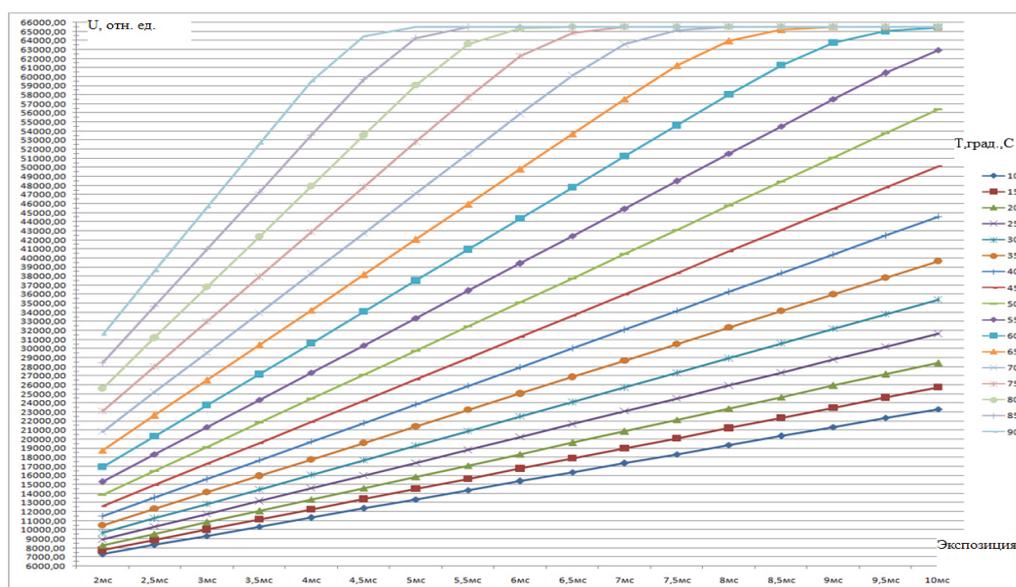


Рисунок 2. Зависимости среднего значения сигнала от величины экспозиции фотоприемника при фиксированной температуре источника излучения

Сущность способа заключается в том, что вычисляются значения яркости дополнительного корректирующего кадра изображения \mathbf{dX} , соответствующего ошибке компенсации для времени экспозиции t . При информативной засветке значения \mathbf{dX} вычитаются из значений яркости соответствующих элементов выходного кадра, формируемого по коэффициентам \mathbf{K} , рассчитанным на этапе калибровки при времени экспозиции t_{min} .

Вычисление матрицы \mathbf{dX} производится, исходя линейной зависимости средней яркости изображения m от времени экспозиции t на интервале $t_{min} \leq t \leq t_{max}$, соответствующем средним значениям яркости m_1 и m_{max} . Иными словами, по известным значениям яркости \mathbf{X}_1 и \mathbf{X}_2 производится интерполяция значений яркости элементов дополнительного корректирующего кадра изображения \mathbf{dX} для времени t экспозиции.

На практике целесообразно использовать следующую последовательность операций, осуществляемых на этапе калибровки фотоприемника. Дополнительно к изображениям \mathbf{Y}_1 и \mathbf{Y}_2 формируют изображение \mathbf{Y}_{1max} , получаемое при низком уровне равномерного облучения фотоприемника с экспозицией t_{max} .

Далее формируются изображения \mathbf{X}_1 и \mathbf{X}_2 , содержащие остаточный ГШ, при экспозициях t_{min} и t_{max} после компенсации изображения \mathbf{Y}_2 . Для этого осуществляются преобразования по формулам:

$$\mathbf{X}_1 = (\mathbf{Y}_2 - \mathbf{Y}_1)\mathbf{K} + m_1 \quad (7)$$

$$\mathbf{X}_2 = (\mathbf{Y}_{1max} - \mathbf{Y}_2)\mathbf{K} + m_{1max}, \quad (8)$$

где m_1 и m_{1max} средние значения яркости элементов в кадрах изображений Y_1 и Y_{1max} .

Затем вычисляются значения коэффициента a по формуле:

$$a=(t-t_{min})/(t_{max}-t_{min}). \quad (9)$$

Значения яркости дополнительного корректирующего кадра изображения dX , соответствующего ошибке компенсации для времени экспозиции t находятся в соответствии с выражением, как взвешенная сумма x_2 и x_1 :

$$dX=aX_2+(1-a)X_1. \quad (10)$$

При информативном облучении с временем экспозиции t выходные цифровые значения яркости элементов изображения X' формируют в соответствии с выражениями:

$$X=(Y-Y_1)K+m_1 \quad (11)$$

$$X'=X-dX+m_0, \text{ если } t \neq t_{min} \quad (12)$$

$$X'=X, \text{ если } t=t_{min}, \quad (13)$$

где m_0 – средняя яркость dX .

Возможен другой вариант способа, учитывающего время экспозиции, который заключается в следующем [4]. Производят предварительную калибровку фотоприемника путем поочередного равномерного облучения элементов фотоприемной матрицы от источника с низким и высоким уровнем излучения при минимальном времени экспозиции фотоприемника t_{min} .

Полученные при этом значения сигнала яркости изображения Y_{1min} для низкого уровня облучения и изображения Y_{2min} для высокого уровня облучения запоминают в цифровой форме и вычисляют среднее значение m_{1min} и m_{2min} сигнала яркости изображений Y_{1min} и Y_{2min} , соответственно.

На этапе калибровки дополнительно задают максимальное время экспозиции t_{max} при низком уровне равномерной облученности фотоприемника. Получаемые при этом значения сигнала яркости изображения Y_{1max} запоминают в цифровой форме и вычисляют их среднее значение m_{1max} .

Непосредственно перед информативной засветкой для заданного в пределах $t_{min} \leq t \leq t_{max}$ времени t экспозиции вычисляют коэффициент $a=(t-t_{min})/(t_{max}-t_{min})$, а также формируют матрицу эталонного изображения по формуле $Y_0=aY_{1max}+(1-a)Y_{1min}$ и определяют его среднюю яркость m_0 , а также матрицу коэффициентов K по формуле $K=(Y_{2min}-Y_{1min})/(m_{2min}-m_{1min})$.

Во время информативной засветки выходные цифровые значения яркости X вычисляют по формуле $X=(Y-Y_0)/K+m_0$.

Таким образом, идея данного способа, как и предыдущего, заключается в учете изменения аддитивной составляющей ГШ при смене времени экспозиции. Максимальное изменение аддитивной составляющей ГШ фиксируется при максимальном времени экспозиции t_{max} в эталонном изображении Y_{1max} .

Промежуточные значения изменений аддитивной составляющей ГШ линейно интерполируются по формуле $Y_0 = aY_{1max} + (1-a)Y_{1min}$ при вычислении матрицы эталонного изображения по формуле Y_0 , используемого при формировании выходного изображения X .

Однако помимо аддитивной составляющей в ГШ имеется мультипликативная составляющая, которая также как и аддитивная составляющая, изменяется при изменении экспозиции, что не учитывается в способах, рассмотренных выше. Отсутствие учета мультипликативной составляющей ведет к недостаточной точности компенсации ГШ при смене экспозиции, что особенно сильно сказывается при увеличении диапазона времени $[t_{min}; t_{max}]$.

Повышение точности компенсации геометрического шума матричного фотоприемника в процессе двухточечной коррекции при смене времени экспозиции возможно с учетом изменения не только аддитивной, но и учетом изменения мультипликативной составляющей ГШ [5].

Это достигается за счет дополнительного запоминания в цифровой форме значений яркости элементов эталонного изображения Y_{2max} , получаемого на этапе калибровки при максимальном времени экспозиции t_{max} и высоком уровне равномерной облученности фотоприемника, и определения коэффициентов компенсации мультипликативной составляющей K_{max} для максимального времени экспозиции t_{max} .

В свою очередь, используя значения коэффициентов компенсации мультипликативной составляющей K_{min} и K_{max} для границ диапазона $[t_{min}; t_{max}]$ за счет дополнительной линейной интерполяции по формуле $K = aK_{max} + (1-a)K_{min}$ вычисляются значения коэффициентов компенсации мультипликативной составляющей K для устанавливаемых времен экспозиции t .

Указанные операции позволяют учесть изменения не только аддитивной, но и мультипликативной составляющей ГШ, происходящие при смене времени t экспозиции фотоприемника в пределах $t_{min} \leq t \leq t_{max}$, что обеспечивает повышение точности компенсации ГШ. Кроме этого, достигается расширение возможного диапазона экспозиции $[t_{min}; t_{max}]$, при котором обеспечивается качественная компенсация ГШ.

Способ осуществляется следующим образом. Поток излучения, проходит через объектив на фотоприемник ИК-камеры. Время экспозиции t в пределах

$t_{min} \leq t \leq t_{max}$ задается в ИК-камере. Значения t , t_{min} и t_{max} вводятся в компьютер в ручном режиме.

Калибровка камеры осуществляется при $t=t_{min}$ и при $t=t_{max}$ с использованием излучателя, формирующего равномерный фон при низкой и высокой температуре по модели абсолютно черного тела (АЧТ).

Получаемые в процессе калибровки изображения Y_{1min} для t_{min} и Y_{1max} для t_{max} при низкой температуре АЧТ, а также Y_{2min} для t_{min} и Y_{2max} для t_{max} при высокой температуре АЧТ последовательно преобразуются ИК-камерой в электрический сигнал, который в свою очередь преобразуется в цифровую форму стандартным устройством видеозаписи и последовательно вводится в компьютер.

Введенные в компьютер исходные цифровые значения яркости элементов изображений Y_{1min} , Y_{1max} , Y_{2min} , Y_{2max} , а также значения t , t_{min} и t_{max} обрабатываются программным путем. При этом вычисляются средние значения m_{1min} , m_{1max} , m_{2min} , m_{2max} яркости элементов в кадрах изображений Y_{1min} , Y_{1max} , Y_{2min} , Y_{2max} , а также рассчитываются матрицы коэффициентов компенсации по формулам $K_{min}=(Y_{2min}-Y_{1min})/(m_{2min}-m_{1min})$ и $K_{max}=(Y_{2max}-Y_{1max})/(m_{2max}-m_{1max})$.

Кроме этого определяют значение коэффициента a в соответствии с выражением $a=(t-t_{min})/(t_{max}-t_{min})$ для устанавливаемого времени экспозиции и вычисляют интерполированные значения аддитивной составляющей ГШ в виде матрицы $Y_0=aY_{1max}+(1-a)Y_{1min}$ и определяют ее среднее значение m_0 , а также вычисляют интерполированные значения коэффициентов компенсации $K=aK_{max}+(1-a)K_{min}$ мультипликативной составляющей.

В процессе информативной засветки фотоприемника получают исходное изображение Y , содержащее аддитивную и мультипликативную составляющие геометрического шума. С использованием полученных интерполированных значений Y_0 и K производят двухточечную коррекцию исходного изображения Y , получая выходное изображение X в соответствии с выражением $X=(Y-Y_0)/K+m_0$.

На рисунке 3 приведены примеры изображений и профилограммы яркости вдоль строки, получаемые при двухточечной коррекции с учетом времени экспозиции фотоприемника.

На рисунке 4 показаны профилограммы яркости выделенной строки изображения и обработанного методом двухточечной коррекции без учета времени экспозиции (профилограммы 1), а также обработанного с учетом времени экспозиции (профилограммы 2).

По горизонтальной оси графиков показаны номера элементов строки изображения, по вертикальной оси графиков показаны значения яркости в относительных единицах при 16-разрядном их кодировании.

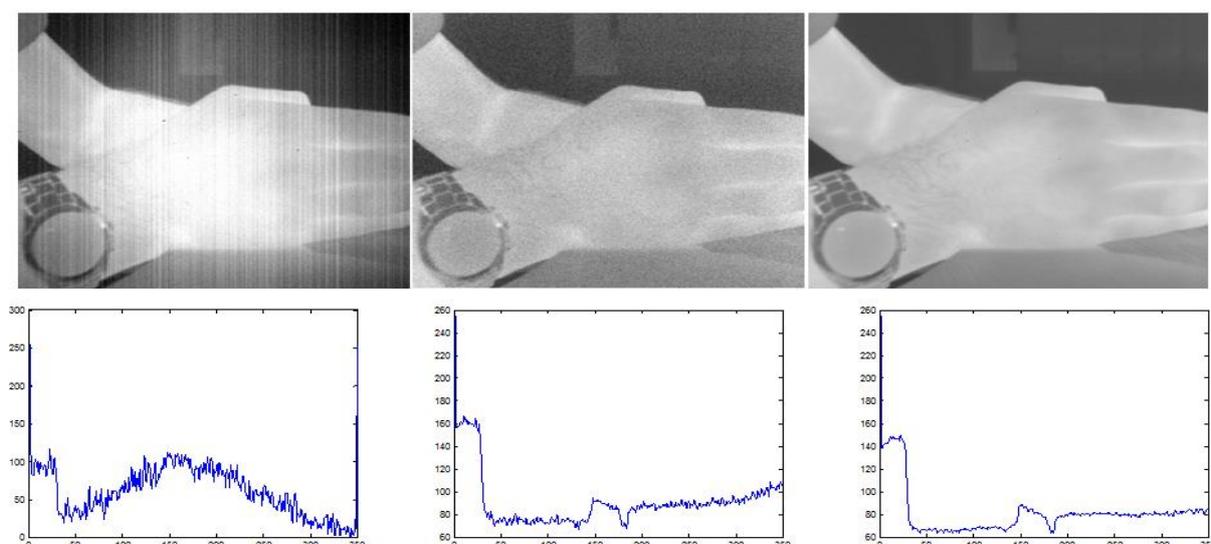


Рисунок 3. Исходное, содержащее ГШ (слева), и результирующие изображения и профилограммы яркости вдоль строки, полученные без учета времени экспозиции (в центре) и с учетом времени экспозиции (справа) при времени экспозиции $t_{min}=3\text{мс}$ в процессе калибровки фотоприемника и времени экспозиции $t=6\text{мс}$ в процессе информативного облучения

При этом калибровка производилась для низкого уровня облученности с температурой 10С и высокого уровня облученности с температурой 50С. Время экспозиции при калибровке $t_{min}=2\text{мс}$ и $t_{max}=10\text{мс}$. Информативная засветка производилась при $t=7\text{мс}$.

Как видно из представленных графиков, учет изменения обеих составляющих ГШ обеспечивает существенное уменьшение уровня геометрического шума по сравнению со способом, учитывающим только аддитивную составляющую ГШ, что позволяет в свою очередь существенно расширить диапазон используемых значений времени экспозиции. Компьютерное моделирование в среде MATLAB показывает, что учет изменения двух составляющих ГШ обеспечивает не менее чем двукратное увеличение диапазона экспозиции.

Заключение

Рассмотренные методы двухточечной коррекции позволяют учесть изменение времени экспозиции при информативной засветке матричного фотоприемника по отношению к времени экспозиции, использованному при его калибровке.

Методы отличаются объемом калибровочных операций, а также объемом памяти, необходимым для хранения эталонных изображений, и объемом вычислений при информативной засветке.

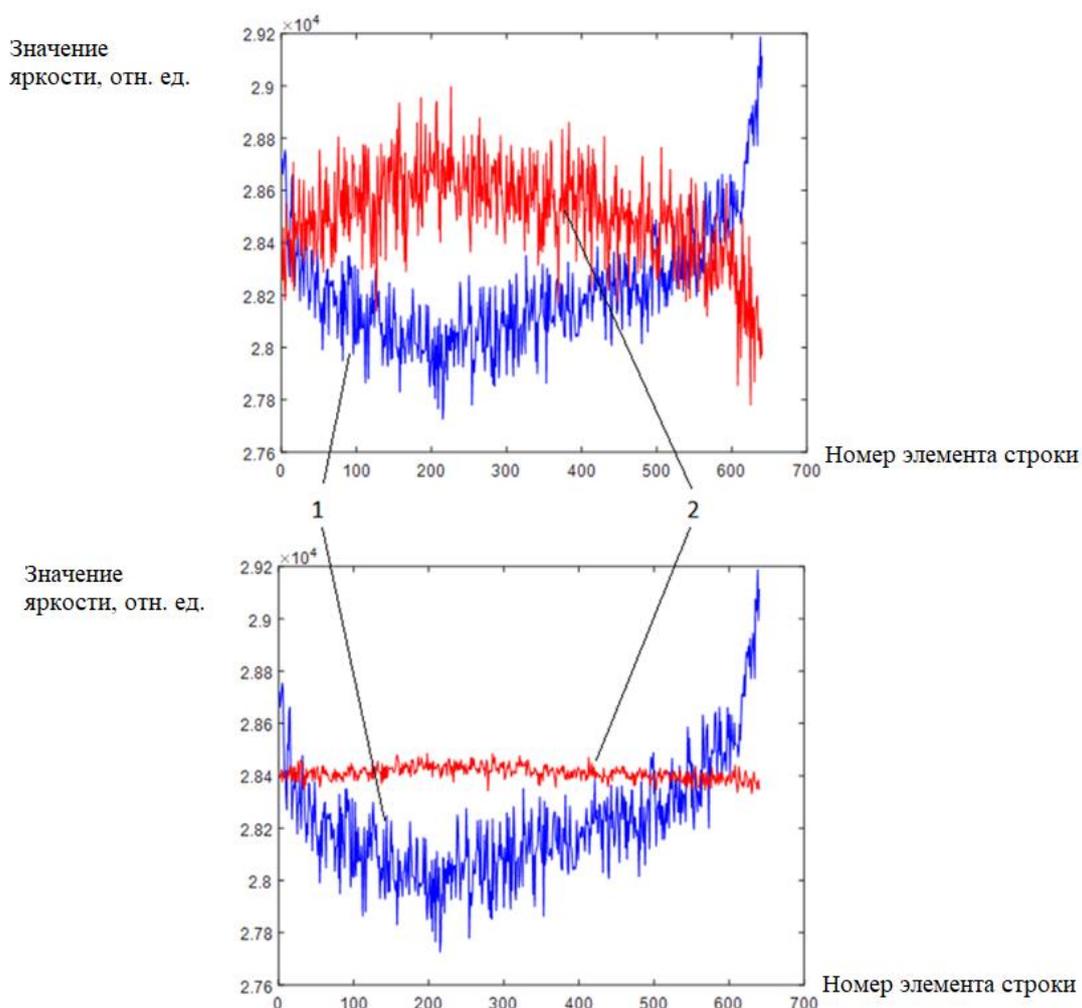


Рисунок 4. Профилограммы яркости выделенной строки изображения, полученного при информативной засветке с $t=7$ мс и обработанного методом двухточечной коррекции без учета времени экспозиции при калибровке с $t_{min}=2$ мс (профилограмма 1), а также обработанного с учетом времени экспозиции при калибровке с $t_{min}=2$ мс и $t_{max}=10$ мс. (профилограммы 2). Профилограмма 2 вверху соответствуют учету изменения только аддитивной составляющей ГШ, а профилограмма 2 внизу соответствуют учету изменения, как аддитивной, так и мультипликативной составляющей ГШ

Однако, учет изменения не только аддитивной, но и мультипликативной составляющей геометрического шума, происходящего при смене времени экспозиции фотоприемника в пределах заданного диапазона, обеспечивает повышение точности его компенсации в более широком диапазоне изменения времени экспозиции в процессе информативной засветки матричного фотоприемника.

Список литературы

1. Хромов Л. И., Лебедев Н. В., Цыцулин А. К., Куликов А. Н. Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах. Москва: Радио и связь, 1986. С. 16-23.
2. Брондз Д. С., Харитонов Е. Н. Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом Т-порядка // Журнал радиоэлектроники. 2008. 11. 2.
3. Корнышев Н. П., Лукин К. Г., Сенин А. С., Степанов Ю. В., Головкин С. Н. Патент № 2679547 Российская Федерация, МПК G06T 5/00 (2006.01), G06T 7/80 (2017.01), H04N 5/33 (2006.01), H04N 5/357 (2011.01). Способ компенсации геометрического шума матричного фотоприемника: № 2018109050: заявл. 03.13.2018: опубл. 02.11.2019 / заявитель Закрытое акционерное общество «ЭЛСИ». 11 с.
4. Корнышев Н. П., Лукин К. Г., Сенин А. С. Патент № 2711723 Российская Федерация, МПК G06T 5/00 (2006.01), G06T 7/80 (2017.01), H04N 5/537 (2011.01). Способ компенсации геометрического шума матричного фотоприемника: № 2019134818: заявл. 29.10.2019: опубл. 21.01.2020 / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого». 11 с.
5. Корнышев Н. П. Патент № 2688616 Российская Федерация, МПК G06T 5/00 (2024.01), G06T 7/80 (2024.01), H04N 25/60 (2024.01). Способ компенсации геометрического шума матричного фотоприемника, инвариантный к времени экспозиции: № 2023125439: заявл. 04.10.2023: опубл. 09.04.2024 / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого». 13 с.

References

1. Khromov L. I., Lebedev N. V., Tsitsulin A. K., Kulikov A. N. Tverdotel'noe televidenie. Televizionnye sistemy s peremennymi parametrami na PZS i mikroprocessorah [Solid-state television. Television systems with variable parameters on CCD and microprocessors]. Moscow: Radio and Communications, 1986. P. 16-23.
2. Bronz D. S., Kharitonova E. N. Korrekciya geometricheskogo shuma MFPU s pomoshch'yu approksimacii metodom naimen'shih kvadratov peredatochnyh karakteristik matricy polinomom T-poryadka [Correction of the geometric noise of the MFPU using the least squares approximation of the transfer characteristics of the matrix by a T-order polynomial] // Journal of radio electronics. 2008. 11. 2.
3. Kornyshev N. P., Lukin K. G., Senin A. S., Stepanov Yu. V., Golovkin S. N. Patent No. 2679547 Russian Federation, IPC G06T5/00 (2006.01), G06T 7/80 (2017.01), H04N 5/33 (2006.01), H04N 5/357 (2011.01). Sposob kompensacii geometricheskogo shuma matrichnogo fotopriemnika [Method for compensating geometric noise of a matrix photodetector]: No. 2018109050: application 03.13.2018: publ. 02.11.2019 / applicant: Closed Joint Stock Company "ELSI". 11 p.
4. Kornyshev N. P., Lukin K. G., Senin A. S. Patent No. 2711723 Russian Federation, IPC G 0 5/00 (2006.01), G 0 G T 7/80 (2017.01), H04N 5/537 (2011.01). Sposob kompensacii geometricheskogo shuma matrichnogo fotopriemnika [Method for compensating geometric noise of a matrix photodetector]: No. 2019134818: application 29.10.2019: publ. 21.01.2020 / applicant: the Federal state budgetary educational institution of higher education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 11 p.

5. Kornyshev N. P. Patent No. 2688616 Russian Federation, IPC G06T5/00 (2024.01), G06T 7/80 (2024.01), H04N 25/60 (2024.01). Sposob kompensacii geometricheskogo shuma matrichnogo fotopriemnika, invariantnyj k vremeni ekspozicii [Method for compensating geometric noise of a matrix photodetector, invariant to exposure time]: No. 2023125439: application 04.10.2023: published 09.04.2024 / applicant: Federal state budgetary educational institution of higher education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 13 p.

Информация об авторах

Корнышев Николай Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-3177-2040, Nikolai.Kornishev@novsu.ru

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.396.621:621.396.61:654.16

ГРНТИ 47.47.29+47.47.31+49.43.29

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).391-402

Специальность ВАК 2.2.15

Поступила в редакцию / Received 13.06.2024

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

Научная статья

ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПЕРЕДАТЧИКА/ПРИЕМНИКА ПО ИНТЕРФЕЙСУ RS-232

Румянцев Д. В., Петров М. Н.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В статье раскрываются методы по улучшению качества связи информационного взаимодействия между устройствами через интерфейс передачи данных RS-232, путем добавления логики HDL, с использованием языка описания оборудования System Verilog. Подробно описан сам последовательный интерфейс, принцип его работы, структура посылки данных, способы подключения с указанием назначения выводов сигнала, пример передачи сообщения с использованием указанного интерфейса в графическом представлении. Приводится результат тестирования доработанной версии приемника, в среде ModelSim, с использованием метода множественной выборки для захвата данных с линии передачи, проверки ложного сигнала, информирующего о начале передачи посылки, поскольку передача в интерфейсе RS-232 осуществляется без синхронизирующего тактирования. Экспериментально было выявлено в каком промежутке времени установления уровня сигнала лучше всего захватывать данные. Приведена доработка модулей приемника и передатчика, путем добавления переменной сброса, которая играет роль счетчика цикла работы приема/отправления сообщения. Также объясняется почему скорость передачи 115200 бит в секунду пользуется популярностью среди выпускаемого промышленного и лабораторного оборудования. Расписан метод получения значения делителя, чтобы установить специализированную скорость передачи информации по последовательному интерфейсу, и настройка микросхемы UART с использованием конфигурационных регистров.

Ключевые слова: HDL, RS-232, приемник и передатчик, улучшение качества связи, информационное взаимодействие

Для цитирования: Румянцев Д. В., Петров М. Н. Оптимизация функциональной схемы передатчика/приемника по интерфейсу RS-232 // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 391-402. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).391-402

Research Article

OPTIMIZATION OF THE FUNCTIONAL DIAGRAM OF THE TRANSMITTER/RECEIVER VIA RS-232 INTERFACE

Rumiantsev D. V., Petrov M. N.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The article discusses methods for improving the quality of communication in information interaction between devices through the RS-232 data transmission interface by adding HDL logic using the System Verilog hardware description language. The serial interface itself is described in detail, including its operating principle, data packet structure, connection methods with pinout assignments, and an example of message transmission using the specified interface in graphical representation. The results of testing the modified receiver version in the ModelSim environment are presented, using a multiple sampling method to capture data from the transmission line and check for false signals indicating the start of packet transmission, since transmission in the RS-232 interface is performed without synchronized clocking. Experimentally, the optimal time interval for capturing data during signal level establishment was identified. The article also details the modifications made to the receiver and transmitter modules by adding a reset variable that acts as a cycle

counter for the receive/send message operation. Additionally, it explains why a transmission speed of 115200 bits per second is popular among industrial and laboratory equipment. The method for obtaining the divider value to set a specialized data transmission speed via the serial interface is described, along with the configuration of the UART chip using configuration registers.

Keywords: HDL, RS-232, receiver and transmitter, communication quality improvement, information interaction

For citation: Rumiantsev D. V., Petrov M. N. Optimization of the functional diagram of the transmitter / receiver via RS-232 interface // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 391-402. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).391-402

Введение

Последовательный интерфейс – один из способов обмена данными, который до сих пор остаётся популярным. Данный интерфейс несложно реализовывать, он обладает высокой надёжностью и доступностью оборудования. Программное обеспечение для последовательного обмена данными можно реализовать с помощью стандартных функций, доступных в операционной системе Windows.

Последовательный интерфейс передачи информации применяется в коммуникационных системах, большинстве систем обмена данными и управления. Последовательные порты компьютерных систем поддерживают стандарт информационного взаимодействия RS-232, относящийся к протоколам последовательного обмена данными. Передача и приём данных по RS-232 интерфейсу происходит последовательно, бит за битом, что и дало название «последовательный порт». Структура асинхронной передачи данных по последовательному интерфейсу RS-232 представлена на рисунке 1 [1].

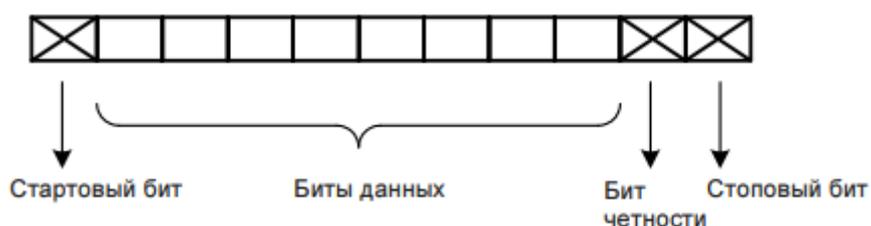


Рисунок 1. Структура посылки данных

Скорость обмена данными по последовательному интерфейсу может достигать 115200 бит в секунду, хотя современные разработки позволяют увеличить скорость до 921 Кбит/с. С увеличением скорости передачи растет и количество помех, которые появляются на линии передачи и являются проблемой при отладке или настройке оборудования, у которого происходит информационное взаимодействие через RS-232 интерфейс. Также можно отметить, что скорость передачи часто выбирается именно 115200 бит/с.

Подробнее про интерфейс RS-232

В интерфейсе RS-232 логические уровни сигналов находятся в диапазонах от минус 3 до минус 25 вольт, что соответствует логической единице, и от плюс 3 до плюс 25 вольт, логический ноль. Диапазон от минус 3 до плюс 3 вольт соответствует зоне нечувствительности.

Интерфейс RS-232 позволяет передавать данные на расстояние до 15 метров. При этом были случаи, когда удавалось развернуть передачу данных через интерфейс RS-232 на расстоянии до 25 м. Это делает его популярным выбором для лабораторных и учебных систем обмена данными, а также для настройки, тестирования и отладки оборудования, в котором предусмотрено информационное взаимодействие с помощью микросхемы UART.

В передаче данных по интерфейсу RS-232, лежит принцип считывания значений заключенных между стартовым и стоповым битами. В упрощенном виде информационное взаимодействие представлено на рисунке 2.

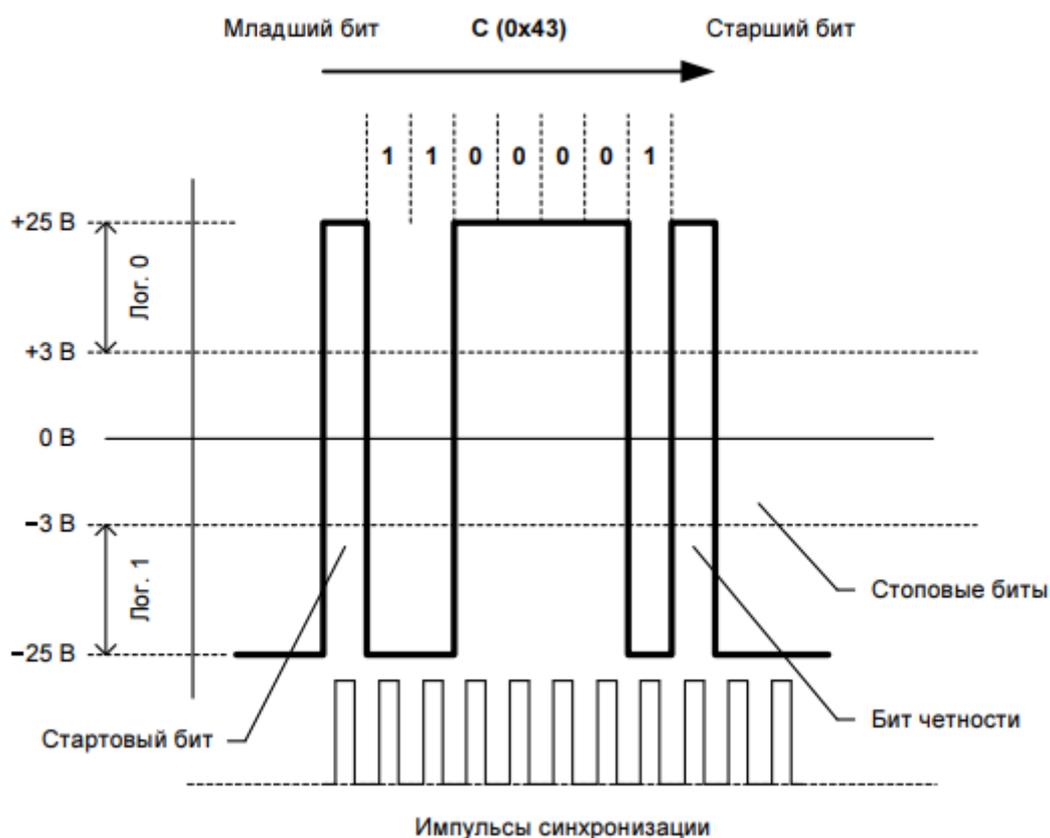


Рисунок 2. Передача байта данных

На рисунке 2 представлена передача значения 7'h43. Весь процесс начинается со стартового бита, затем идут 7 бит данных, бит чётности и в завершении два стоповых бита.

Передача блока сообщения обязательно должна начинаться со стартового бита. Затем выставляются биты передаваемых данных, количество которых зависит

от выбранного протокола информационного взаимодействия. Передача осуществляется младшим битом вперед. После передачи битов данных выставляется бит чётности. И в конечном итоге завершают передачу два стоповых бита, которые указывают о завершении передачи.

Строб начала передачи нового сообщения может быть обнаружен в любой момент времени, строго после завершения передачи предыдущего сообщения. Благодаря этому сигналу в приемнике происходит синхронизация, важное условие для правильной работы системы – это наличие одинаковой тактовой частоты синхронизации.

Когда на линии передачи выставляется стартовый бит от передатчика, приемник, в свою очередь, отсчитывает длительность сигнала, согласно с установленной частоте синхронизации, а также выбранной скорости передаваемого сообщения, и производит запись полученных значений с линии в регистр, где хранится передаваемый байт данных.

Для аппаратной реализации взаимодействия через интерфейс RS-232 обычно используется универсальный асинхронный приемопередатчик, который сокращённо называют UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), а физический уровень для преобразования сигналов обеспечивает другая микросхема, например MAX3232 [2, с. 32].

«На практике интерфейс RS-232 реализован в виде сигнальных линий, имеющих следующее назначение:

- GND (Ground) – сигнальная земля (относительно нее отсчитываются уровни сигналов);
- TxD (Transmit Data) – выход передатчика;
- RxD (Receive Data) – вход приемника;
- RTS (Request-To-Send) – запрос обмена данными, который выставляется контроллером последовательного порта;
- CTS (Clear-To-Send) – указывает на готовность модема или терминального устройства к обмену данными;
- DTR (Data Terminal Ready) – указывает модему или другому устройству, что контроллер последовательного порта готов установить соединение;
- DSR (Data Set Ready) – указывает контроллеру последовательного порта на то, что периферийное устройство готово установить соединение;
- DCD (Data Carrier Detect) – входной сигнал от удаленного модема или устройства. Когда модем или другое устройство обнаруживает появление несущей информации на другом конце линии, то линия становится активной.» [3, с. 73]

Для подключения устройств между собой через последовательный порт информационного взаимодействия применяется «нуль-модемное» соединение. В зависимости от требований в аппаратном и программном обеспечении системы обмена данными, может использоваться как полноценное соединение, представленное на рисунке 3а, так и упрощённый вариант подключений, показанный на рисунке 3б [4, с. 17]. Для диагностики и управления системами автоматизации, таких

как микроконтроллеры или платы управления, а также для отладки систем в лабораторных условиях часто применяется упрощенный вид подключения нуля-модемного соединения.



Рисунок 3. Нуль-модемное соединение: а – полнофункциональное соединение, б – упрощенный вариант

В процессе передачи данных используется определённый формат, который включает в себя несколько ключевых элементов:

- стартовый бит: первый бит в последовательности, который всегда равен нулю. Он служит сигналом начала передачи данных;
- 8 бит данных: основная часть сообщения, которая содержит информацию, подлежащую передаче;
- стоповый бит: последний бит в последовательности, равный единице. Он сигнализирует о завершении передачи данных.

Скорость 115200 бит/с

Асинхронный приёмопередатчик является ключевым элементом последовательного интерфейса и представляет собой сложный аппаратно-программный модуль для обмена данными. В этом разделе статьи мы сосредоточимся на работе аппаратной части этого устройства. Микросхема UART широко используются в одноплатных системах, основанных на микропроцессорах и микроконтроллерах. Модули последовательной передачи данных во всех современных микроконтроллерах работают с помощью UART микросхемы.

Настройка устройства UART осуществляются через внутренние регистры. Через конфигурирование определяют режимы функционирования микросхемы. Настройки записываются в начале цикла работы микросхемы и корректируются управляющей системой по мере необходимости внутри цикла работы устройства. Большая часть этих регистров доступна для использования в пользовательских

приложениях, в то время как некоторые из них являются внутренними служебными регистрами и предназначены для выполнения специализированных операций.

Скорость обмена данными по последовательному интерфейсу задается путем деления тактовой частоты кристалла микросхемы UART. Стандартизированная тактовая частота для микросхемы UART обычно равняется 1,84 МГц. Внутренняя частота синхронизации микросхемы в 16 раз меньше частоты тактирования кристалла, находится по формуле (1). С помощью данной формулы также можно найти значение делителя «Divider», чтобы установить специализированную скорость передачи по последовательному интерфейсу.

$$Baud = \frac{f_{clk}}{Divider} \quad (1)$$

где *Baud* – скорость передачи, бит/с;

f_{clk} – тактовая частота синхронизации, Гц;

Divider – константа.

В ходе расчета внутренней частоты синхронизации получаем значение равное 115200 Гц. Для получения специализированной скорости обмена данными в оба байта конфигурационного регистра делителя частоты нужно записать значение, равное частоте синхронизации в герцах, деленное на скорость обмена данными в бодах. Например, для получения стандартизированной скорости обмена информацией между устройствами, а именно 9600 бод [5, с. 68], в регистр делителя частоты нужно передать значение 8`h0C в шестнадцатеричной системе исчисления. В младшем байте управляющего регистра делителя частоты будет значение 8`h0C, а в старшем – 8`h00. Для получения максимальной скорости обмена 115200 бод, для указанной микросхемы UART с тактовой частотой равной 1,8432 МГц, в конфигурационный регистр делителя частоты нужно передать значение 8`h01.

Захват данных в начале при смене уровня сигнала

При захвате данных в начале, сбор данных в регистр происходит сразу же после смены уровня сигнала без задержек, при данном подходе помехи появляются уже на первом бите посылке. В ходе эксперимента отправлялось сообщение 8`h01 и из 100 посылок три значения пришли с ошибочными данными - 8`h03. При проверке седьмого бита данных наблюдается 21 верное принятое значение сообщения из 100. Восьмой бит данных принимается без помех поскольку стоповый бит имеет состояние высокого уровня.

Захват данных в конце при смене уровня сигнала

При записи данных в конце смены уровня сигнала стоповый бит, равный логической единице, создает помеху для последующего использования принятой информации. Искажения принятого сообщения, в отличии от исходного отправленного, происходят настолько сильно, что из 100 попыток отправить сообщение, ни одно не было получено в исходном представлении. Проверялось нахождение бита в каждом

разряде байта, результат не изменился. Отсюда следует невозможным считывание сообщения в конце смены уровня сигнала, при использовании интерфейса RS-232.

Захват данных по центру установления сигнала

При добавлении счетчика отслеживания длительности сигнала появляется возможность захватывать данные в любом промежутке времени. Прописываем условие для считывания значений в регистр сообщения, таким образом, чтобы оно происходило приблизительно по середине:

```

    «if (tickCount[14:0] == Divider [15:1])
    begin
    rData[bitCount] = rx; // сбор данных в регистр
    end».

```

В данном случае, при достижении счетчиком «tickCount» половины регистра «Divider», условие выполняется и происходит запись значения с линии передачи данных. Интересным образом происходит деление переменной «Divider» путем сдвига регистра константы вправо на 1 бит.

В ходе проверки такого варианта захвата данных выяснилось, что сообщения отправляются без ошибок, все биты находятся на своих местах и точно передают несущую информацию. Было отправлено 900 сообщений, каждое из них было верно обработано и принято.

Множественная выборка для захвата данных

Захват значений по центру установленного сигнала значительно улучшает качество связи, но проверка происходит всего один раз. Что будет когда наступит момент помех, находящихся в центре передаваемого сигнала. В регистр байта запишется то значение, которое было во время захвата. Чтобы избежать этого можно использовать метод множественной выборки. Если три раза снять значение на линии передачи и значение большинства записать в регистр, то мы уберем вероятность одиночного сбоя по центру. Как уже ранее выяснилось, самые достоверные данные находятся примерно в середине установленного уровня сигнала передачи, где и следует применять множественную выборку, поскольку влияние времени установления сигнала отсутствует.

Метод множественной выборки был реализован в RS-232 приемнике на HDL языке System Verilog. Выборка значений производилась три раза по центру формирования сигнала на линии передачи. Небольшая часть логики работы приемника, а именно запись значений в регистр:

```

    «if (tickCount[14:0] == Divider [15:1]-Divider [15:3])
    v1 = rx;

```

```

if (tickCount[14:0] == Divider [15:1])
v2 = rx;
if (tickCount[14:0] == Divider [15:1] + Divider [15:3])
begin
v3 = rx;
if (v1&v2||v1&v3||v3&v2)
rData[bitCount] = 1; // сбор данных в регистр
else if (!(v1&v2||v1&v3||v3&v2))
rData[bitCount] = 0; // сбор данных в регистр
end».

```

Производится запись трех значений с линии передачи в переменные «v1», «v2», «v3» в небольшом промежутке, чтобы не затрагивать время нарастания сигнала на высоких скоростях передачи. А далее уже идет передача значения на основе выбора большинства, в регистр «rData» записывается либо единица, либо ноль. Моделирование передачи с использованием множественной выборкой приведено на рисунке 4, с использованием программного обеспечения ModelSim средства Waveform.

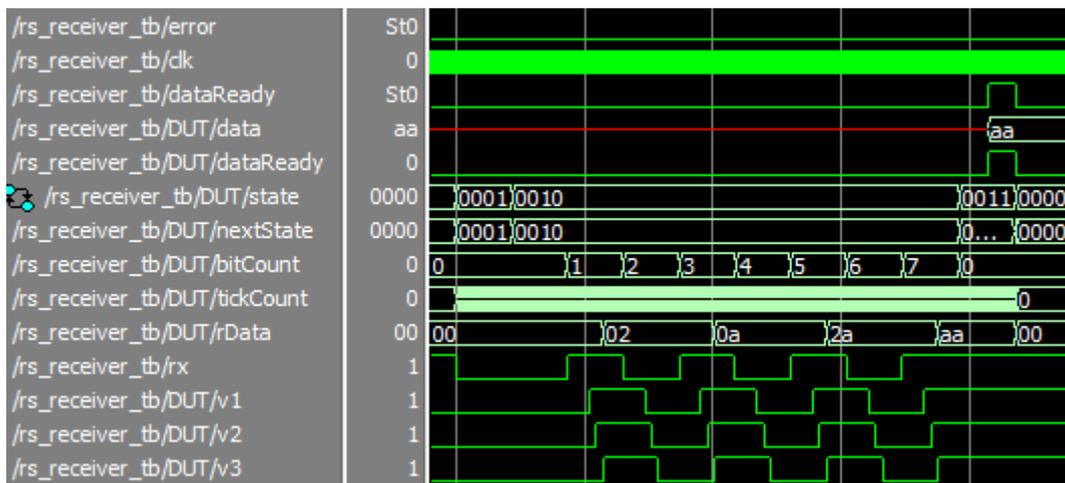


Рисунок 4. Моделирование работы RS-232 приемника

Как видно из рисунка 4, на линии передачи «rx» выставляются данные байта 8'hAA, в шестнадцатеричной системе исчисления младшим битом вперед. Запись данных производится три раза, а затем значение большинства передается в регистр «rData» сразу после третьей проверки. И когда все 8 бит данных будут успешно приняты, тогда приемник выставит выходной сигнал о готовности данных «dataReady» для дальнейшей обработки.

Улучшение передатчика и приемника

Как выяснилось для корректного приёма каждый бит данных должен быть захвачен точно либо же примерно в середине временного интервала, когда он является действительным. При этом одиночного захвата значения не всегда достаточно и этот момент сможет поправить метод множественной выборки значений. По мере увеличения скорости передачи данных синхронизация передатчика и приёмника становится более сложной задачей. Это связано с тем, что паразитные ёмкости электронных компонентов начинают влиять на фронты синхроимпульсов, а также индуктивность физической линии передачи.

Логика работы приёмника, описанная на языке HDL System Verilog с использованием конечных автоматов переключения состояний, представлена в виде схемы на рисунке 5 [6, с. 70].

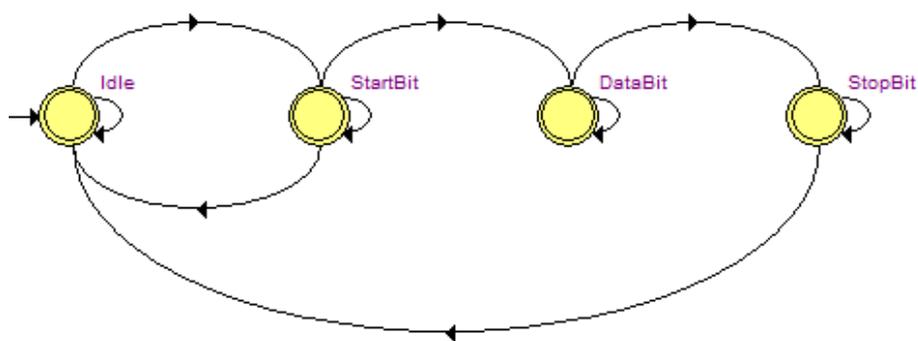


Рисунок 5. Схема работы приемника RS232

Работа передатчика и приёмника происходит в следующих состояниях:

- Idle: режим ожидания, когда передатчик или приёмник не активны;
- StartBit: приём или отправка стартового бита;
- DataBit: формирование восьмибитного сообщения данных;
- StopBit: формирование стопового бита и завершение передачи или приёма сообщения.

Однако при работе с данными могут возникать проблемы, связанные с помехами на линии передачи. В таких случаях возможны ложные срабатывания прерывания от линии передачи, что может привести к обнаружению ложного стартового сигнала. В этом случае можно получить сообщение, заполненное значением: «8`hFF».

Чтобы избежать этой проблемы, была доработана логика в проверке стартового и стопового значений битов в середине формирования сигнала. Это позволяет исключить ложные данные из дальнейшей обработки. Если на месте стартового бита обнаруживается логическая единица, выставляется сигнал ошибки, и передатчик возвращается в режим ожидания. Это можно увидеть на рисунке 5. По такому же принципу происходит обработка стопового бита, если на его месте в середине формирования сигнала будет обнаружен «логический ноль».

Моделирование ложного сигнала начала передачи приведено на рисунке 6, с использованием программного обеспечения ModelSim средства Waveform.

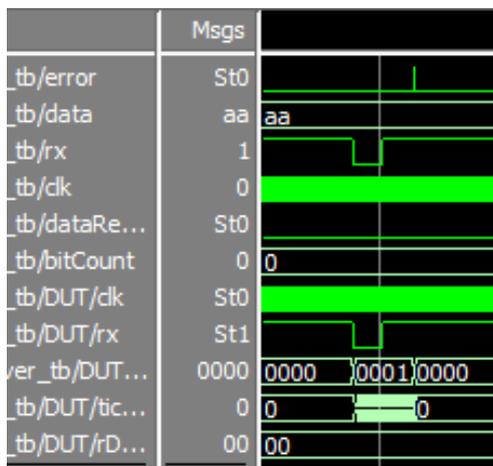


Рисунок 6. Моделирование работы приемника RS232

Можно заметить, что модуль сообщил об ошибке сигналом «error», поскольку произошло ложное начало передачи данных.

Также модуль приемника RS-232 был доработан и исправлен от зависания работы с помощью добавления переменной «reset», которая играет роль счетчика цикла работы приема сообщения. Модуль тестировался на частоте синхронизации 25 МГц, при скорости передачи данных 115200 бит/с. Если переменная достигает значения 2200, то происходил сброс состояний в «IDLE», в том случае, когда зависание происходило на этапе записи данных в регистр, весь процесс принудительно переходил в состояние конечного автомата «Idle» через состояние «StopBit». Общее значение цикла работы вычисляется путем умножения значения «Divider», которое находится из формулы 1, на 10. Следует брать значение, которое отвечает за сброс состояний в статус «Idle», с запасом.

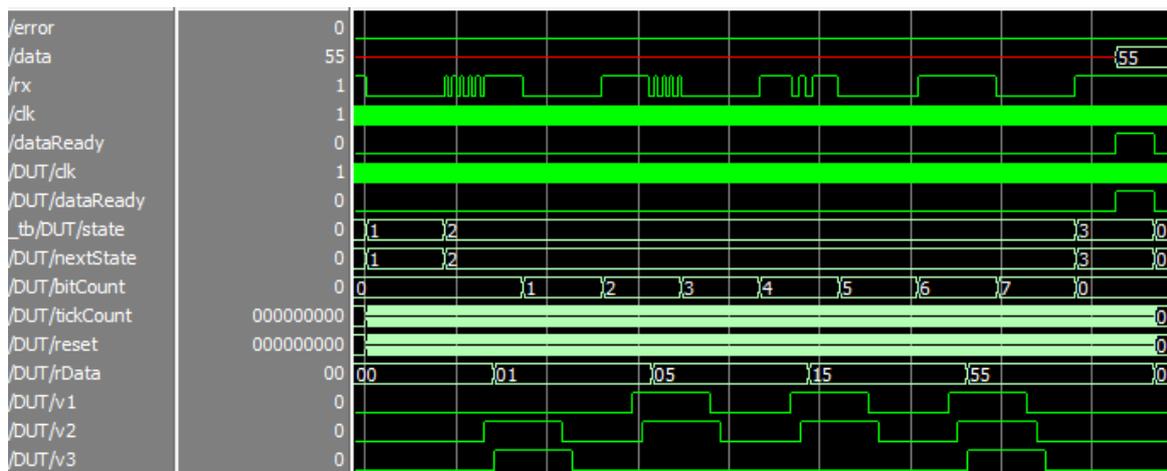


Рисунок 7. Моделирование помех на линии передачи

Моделирование передачи данных 8`h55, в шестнадцатеричной системе исчисления, с симулированием помех в начале смены уровня сигнала и в конце, и по центру установления сигнала, приведено на рисунке 7, с использованием программного обеспечения ModelSim средства Waveform. HDL описание модуля приемника производилось на языке System Verilog.

Как видно из рисунка 7, у модуля приемника повысилась помехоустойчивость на линии последовательной передачи данных. Метод множественной выборки, добавленный в логику работы приемника, вполне справляется со своей задачей, при наличии даже грубых помех.

Заключение

Изученные методы по улучшению приемника и передатчика по RS-232 интерфейсу, на уровне описания логической схемы, исключают помехи, один из них – это добавление обработки ложных сигналов срабатывания начала передачи. Это необходимо, поскольку передача осуществляется без синхронизирующего тактирования. Также при наличии времени нарастания сигнала, на аппаратном уровне, существует вероятность того, что если сохранять значения сразу же при первой смене уровня на линии передачи, то возможна ситуация, когда передаваемые данные будут находиться в промежутке времени нарастания сигнала, и в этом случае пакет данных будет не корректным. Решение считывать значения на пике установленного уровня, повышает вероятность достоверности несущей информации, но одной проверки недостаточно. Поэтому приемник был улучшен, с помощью добавления метода множественной выборки, которая в свою очередь исключала одиночные сбои на линии передачи. Добавление логики обработки помехи, во время установления сигнала на линии, и обнаружение ложного сигнала о начале передачи сообщения, повышает качество связи по интерфейсу передачи RS-232.

Скорость передачи RS-232 115200 бит/с универсальна для переноса на более старые версии контроллеров, без изменений логики приемника и передатчика. Эта скорость поддерживается как в старых контроллерах, так и в новых. Изменение значения делителя в прошивке для микроконтроллера, и в программном обеспечении не требуется.

Список литературы

1. Ронжин И. В., Макарова А. В. Реализация универсального асинхронного приемопередатчика на кристалле программируемой логической интегральной схемы // Политехнический молодежный журнал. 2018. 4. 1-7. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-04-295
2. Иванов Ю. И., Югай В. Я. Интерфейсы средств автоматизации: учебное пособие. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. 252 с.
3. Магда Ю. С. Компьютер в домашней лаборатории: практическое руководство. Москва: ДМК Пресс, 2008. 200 с.
4. Магда Ю. С. Программирование последовательных интерфейсов. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2009. 304 с.

5. Барабанов А. В. Проектирование цифровых устройств на языках VHDL и Verilog: учебное пособие. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2015. 167 с.
6. Гребенников А. HDL-реализация асинхронного приёмопередатчика // Современная электроника. 2011. 4. 70-73.

References

1. Ronzhin I. V., Makarova A. V. Realizatsiya universal'nogo asinkhronnogo priyemoperedatchika na kristalle programmiruyemoy logicheskoy integral'noy skhemy [Implementation of a universal asynchronous receiver-transmitter on a programmable logic integrated circuit chip] // Politechnical student journal. 2018. 4. 1-7.
2. Ivanov Yu. I., Yugay V. Ya. Interfeysy sredstv avtomatizatsii: uchebnoye posobiye [Interfaces of automation equipment: tutorial]. Taganrog: Publishing house of TRTU, 2005. 252 p.
3. Magda Yu. S. Komp'yuter v domashney laboratorii: prakticheskoye rukovodstvo [Computer in the home laboratory: practical guide]. Moscow: DMK Press, 2008. 200 p.
4. Magda Yu. S. Programirovaniye posledovatel'nykh interfeysov [Programming of serial interfaces]. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg, 2009. 304 p.
5. Barabanov A. V. Proyektirovaniye tsifrovyykh ustroystv na yazykakh VHDL i Verilog: uchebnoye posobiye [Design of digital devices in VHDL and Verilog languages: tutorial]. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2015. 167 p.
6. Grebennikov A. HDL-realizatsiya asinkhronnogo priyemoperedatchika [HDL implementation of an asynchronous receiver-transmitter] // Sovremennaya elektronika. 2011. 4. 70-73.

Информация об авторах

Румянцев Денис Вячеславович – студент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0004-0470-2146, dan.rumiantsev@yandex.ru

Петров Михаил Николаевич – кандидат технических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-5122-2450, Mikhail.Petrov@novsu.ru

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.8:004.422

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).403-415

Поступила в редакцию / Received 03.07.2024

ГРНТИ 29.35.19+50.41.23

Специальность ВАК 2.2.2; 1.3.4

Принята к публикации / Accepted 05.08.2024

Научная статья

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Яковлев Н. С., Михайлов А. А., Килиба Ю. В., Петров Р. В.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В данной статье рассматривается тема оптимального выбора микроконтроллера для своего проекта. Применение современных материалов в электронных устройствах, предназначенных для радиофизических измерений – это тренд, нацеленный на совершенствование исследований. Примером тому могут быть магнитоэлектрические материалы, которые используются для изучения электромагнитных и магнитных полей, для производства устройств сбора энергии, для создания радиоизмерительных устройств и нейроморфных компьютеров. В свою очередь, разработка таких радиофизических устройств для радиоастрономии, квантовой и статистической радиофизики, спектроскопии, а также микро- и наноэлектроники невозможна без применения современных микроконтроллеров. Представлен обзор и сравнительный анализ различных микроконтроллеров, включая их архитектуру, периферийные устройства, среду разработки и области применения. Рассматриваются различные семейства микроконтроллеров, такие как MCS-51, AVR, PIC, STM, ESP32, и анализируются их характеристики и преимущества. Данная статья будет полезна разработчикам электронных устройств, студентам радиофизических специальностей и всем, кто интересуется современными микроконтроллерами и их применением в различных областях.

Ключевые слова: *магнитоэлектрические устройства сбора энергии, радиофизические измерительные устройства, микроконтроллеры*

Для цитирования: Яковлев Н. С., Михайлов А. А., Килиба Ю. В., Петров Р. В. Использование современных микроконтроллеров при проектировании электронных устройств // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 403-415. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).403-415

Research Article

USING MODERN MICROCONTROLLERS WHEN DESIGNING ELECTRONIC DEVICES

Yakovlev N. S., Mikhailov A. A., Kiliba Yu. V., Petrov R. V.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract This article discusses the topic of the optimal choice of a microcontroller for your project. The use of modern materials in electronic devices designed for radiophysical measurements is a trend aimed at improving research. Magnetolectric materials that are used to study electromagnetic and magnetic fields, to produce energy harvesting devices, to create radio measuring devices and neuromorphic computers can be an example of this. In turn, the development of such radiophysical devices for radio astronomy, quantum and statistical radiophysics, spectroscopy, as well as micro- and nanoelectronics is impossible without using modern microcontrollers. An overview and comparative analysis of various microcontrollers, including their architecture, peripherals, development environment and application areas, is presented. Various families of microcontrollers such as MCS-51, AVR, PIC, STM, ESP32 are considered and their characteristics and advantages are analyzed. This article will be useful for developers of electronic devices, students of radiophysics specialties and anyone interested in modern microcontrollers and their application in various fields.

Keywords: *magnetoelectric energy harvesting devices, radiophysical measuring devices, microcontrollers*

For citation: Yakovlev N. S., Mikhailov A. A., Kiliba Yu. V., Petrov R. V. Using modern microcontrollers when designing electronic devices // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 403-415. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).403-415

Введение

Применение современных материалов в электронных устройствах, предназначенных для радиофизических измерений, это тренд, нацеленный на совершенствование исследований. Примером этому могут быть магнитоэлектрические материалы, которые возможно использовать для изучения электромагнитных и магнитных полей, и для производства устройств сбора энергии, и для создания радиоизмерительных устройств и нейроморфных компьютеров. В свою очередь, разработка таких радиофизических устройств для радиоастрономии, квантовой и статистической радиофизики, спектроскопии, а также микро- и наноэлектроники невозможна без применения современных микроконтроллеров. Выбор оптимального микроконтроллера важная и сложная задача, стоящая перед проектировщиком электронных устройств.

Использование вычислительной техники для математических и научных исследований раздвинуло границы научных исследований, позволило решать задачи, которые ранее невозможно было решить или это требовало огромных усилий и ресурсов. С компьютерами стало возможно проводить сложнейшие расчеты, моделировать длинные физические и химические процессы, производить анализ данных и т.д. А к текущему времени компьютеры плотно вошли в нашу повседневную жизнь и используются почти во всех сфера деятельности человека – в образовании, для работы, развлечений, в коммуникации, для физических исследований. Компьютеры стали главным инструментом для большинства людей и организаций.

Первоначально компьютеры использовались как счетные машины, из-за своих огромных размеров и малой вычислительной мощности. С уменьшением размеров и повышением производительности ЭВМ, появилась возможность устанавливать их в различные приборы и создавать компактные компьютерные устройства, производить компьютеризацию. Далее была создана однокристалльная микро-ЭВМ (микроконтроллер), интегральная микросхема, состоящая из трех основных блоков, которые соединяет системная шина: блока микропроцессора, блока памяти и блока ввода-вывода (I/O), изображенная на рисунке 1.

Однокристалльные ЭВМ появляются с началом эпохи развития и массового применения устройств компьютерной автоматизации в области управления, что позволило интегрировать вычислительные функции в различные устройства и системы, обеспечивающие возможность автоматизации процессов, управления устройствами, обработки данных и т. д.

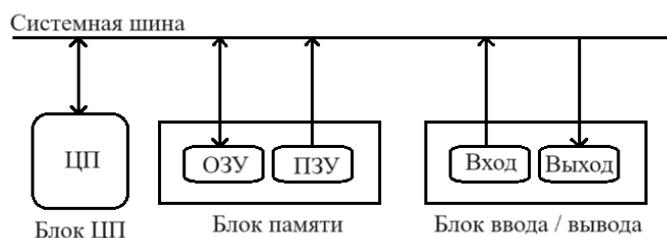


Рисунок 1. Блоки микроконтроллера

Микроконтроллер в полной комплектации может содержать микропроцессор, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), устройства ввода-вывода, устройства аналогово-цифрового преобразования (АЦП) и цифро-аналогово преобразования (ЦАП), устройство широтно-импульсной модуляции (ШИМ), таймеры, различные модули связи и др. [1], что изображено на рисунке 2.

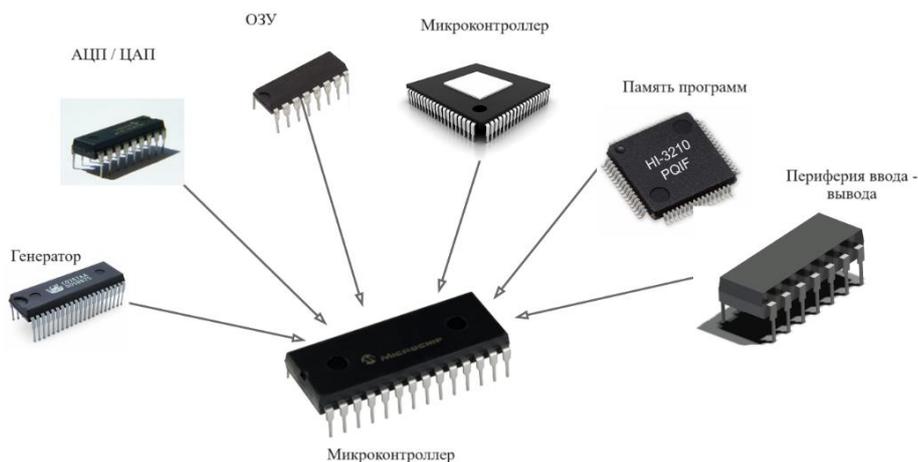


Рисунок 2. Элементы входящие в микроконтроллер

Микропроцессор выполняет команды в виде инструкций, которые хранятся в памяти. Периферийные устройства ввода-вывода обеспечивают возможность взаимодействовать с внешним миром. Таймеры осуществляют синхронизацию выполняемых операций, ограничивая выполнение каждого действия точными временными интервалами. АЦП используется для преобразования аналоговых сигналов в цифровые, а ЦАП наоборот.

Во включенном состоянии микроконтроллер выполняет инструкции, загруженные ранее в его память с помощью программатора или иного способа программирования устройства. Микроконтроллер способен считывать входные данные с датчиков, выполнять вычисления и выводить данные для управления устройствами.

Микроконтроллеры предназначены для работы в режиме реального времени. Работая постоянно и реагируя на изменяющиеся входные данные, они отлично

подходят для задач в робототехнике, автоматизации и управлении. Классификация микроконтроллеров изображена на рисунке 3.



Рисунок 3. Классификация микроконтроллеров

Все микроконтроллеры делят на группы в зависимости от целей и задач их использования, их архитектуры, объема памяти, разрядности, наборов команд и др. Исходя из большого количества параметров, влияющих на выбор микроконтроллера, выбор наиболее подходящего для конкретного проекта может оказаться непростой задачей.

В статье рассматриваются микроконтроллеры разных типов и обсуждаются их преимущества и недостатки применительно к сфере использования, в частности к электронным устройствам и устройствам радиофизики. Представлен обзор и сравнительный анализ различных микроконтроллеров, включая их архитектуру, периферийные устройства, среду разработки и области применения. Рассмотрены различные семейства микроконтроллеров, такие как MCS-51, AVR, PIC, STM, ESP32, и проанализированы их характеристики и преимущества. Данная статья будет полезна разработчикам электронных устройств, студентам радиофизических специальностей и всем, кто интересуется современными микроконтроллерами и их применением в различных областях.

Применение

Благодаря своим крошечным размерам микроконтроллеры нашли свое применение в огромном количестве устройств, где требуется что-то рассчитывать, обрабатывать, проводить вычисления.

Микроконтроллеры используются:

- в вычислительной технике (компьютерная техника, где производятся вычисления);
- в бытовой технике (холодильники, микроволновки, кухонные печи и др.);

- в устройствах промышленной автоматики (датчики, сервоприводы, системы управления);
- в системах умный дом (безопасность, освещение, электропитание, отопление и др.);
- используются в качестве контроллера запоминающего устройства;
- для управления двигателем автомобиля;
- для обработки сигналов;
- в медицинском оборудовании (цифровые термометры, кардиомониторы, рентгеновские аппараты, томографы);
- в игрушках и развлекательных устройствах (игровые приставки, радиоуправляемые машины, звуковоспроизводящие игрушки);
- оборонительные системы (системы связи, системы навигации)
- охранная сигнализация.

В зависимости от сценария применения микроконтроллеры можно разделить на несколько категорий.

1) Промышленные микроконтроллеры

Данные микроконтроллеры разработаны с учетом требований промышленного применения. К ним предъявляют требования повышенной надежности, работы в экстремальных условиях окружающей среды (влажность, механические удары и вибрация), устойчивость к электромагнитным помехам и длительный срок службы.

Silicon Labs C8051F53x Industrial MCUs

Infineon 32-bit XMC7000 Industrial Microcontroller

2) Автомобильные микроконтроллеры

Это специализированные микроконтроллеры, предназначенные для использования в автомобилестроении. Используются в системах управления двигателем, системами безопасности, информационно-развлекательной системой и климат-контролем. Особый акцент здесь делается на функции безопасности и обработки больших объёмов информации в реальном времени. Микроконтроллеры должны правильно и четко работать, даже при наличии неисправностей.

Infineon 32-bit AURIX™ TriCore™ MCU

Renesas RH850 Automotive MCUs

Microchip AT90CAN32 MCU

3) Медицинские микроконтроллеры

Микроконтроллеры используются в медицинском оборудовании занимающиеся диагностической визуализацией, мониторингом состояния пациента, обеспечением работоспособности дефибрилляторов, аппаратов искусственной вентиляции легких и др. Надежность работы, точность и отклик в режиме реального времени являются основными факторами, которые необходимо учитывать при разработке встраиваемых систем медицинского назначения.

Texas Instruments MSP430FR Series

Microchip PIC32MZ Series

STMicroelectronics STM32G4 Series

Renesas RX Series

NXP/Freescale Kinetis KEA Series

4) Микроконтроллеры бытовой электроники

Микроконтроллеры предназначены для обеспечения работоспособности и функциональности бытовой электроники. Микроконтроллеры обладают хорошей производительностью, используются для управления устройством, обработкой звука и мультимедиа, в системах IoT.

ARM Cortex-M Series

ESP8266 and ESP32

PIC32MX Series

Silicon Labs EFR32 Series

Разрядность

Микроконтроллеры разделяют по разрядности. Чем больше разрядность, тем выше производительность микроконтроллера и тем больше данных он может обрабатывать за один такт. Однако, такие микроконтроллеры обычно стоят дороже и потребляют больше энергии.

8-битные микроконтроллеры – простые и дешевые микроконтроллеры, которые используют 8-разрядную шину данных. Данные микроконтроллеры идеально подходят для простых задач, встраиваемых систем, где стоимость и энергопотребление являются ключевыми факторами, т. е. бытовая техника и электроника, игрушки, где не требуются сложные вычисления и мобильные, портативные устройства.

1. ATmega328P: 8-битный микроконтроллер от Atmel (AVR).
2. PIC16F877A: 8-битный микроконтроллер от Microchip.
3. STM8S003F3: 8-битный микроконтроллер от STMicroelectronics, который имеет 8 Кб флэш-памяти, 1 Кб SRAM и 256 байт EEPROM.

16-битные микроконтроллеры используют 16 разрядную шину данных и обладают большей производительностью в сравнении с 8-разрядными и все еще хорошую экономичность. Хорошо подходят для автомобильных систем управления, более продвинутых интеллектуальных датчиков и малогабаритных встраиваемых устройств, требующих умеренной вычислительной мощности и экономичности.

1. AVR25 - семейство 16-битных микроконтроллеров Atmel.
2. PIC24 - семейство 16-битных микроконтроллеров Microchip.
3. MCS-48 - семейство 16-битных микроконтроллеров Intel.

32-битные микроконтроллеры обладают значительно более высокой производительностью и большим объемом памяти. Они могут быть использованы в очень сложных схемах устройств, например, таких как смартфоны, промышленные

компьютеры или комплексы с высокой вычислительной мощностью и сложных обработкой данных.

1. PIC32 - семейство 32-битных микроконтроллеров от Microchip
2. AVR32 - семейство 32-битных микроконтроллеров от Atmel
3. ESP32 - семейство 32-битных микроконтроллеров от Espressif Systems
4. STM32 - семейство 32-битных микроконтроллеров от STMicroelectronics

Набор инструкций (RISC, CISC)

Набор команд (instruction set architecture, ISA) – это часть архитектуры компьютера, которая определяет программируемую часть ядра микропроцессора. Этот набор команд сообщает микропроцессору определенную инструкцию для исполнения. В краткий набор команд входят: прочитать, записать, переместить, сложить, вычислить, умножить, разделить, сравнить и др. В сложный набор команд входят комбинации из нескольких простых команд.

Ядро современных 8-разрядных микроконтроллеров реализуют как на основе CISC (архитектура компьютера со сложным набором команд), так и на основе RISC архитектуры (сокращенный набор команд).

Микроконтроллеры с CISC-архитектурой имеют одно-, двух-, трех- либо четырехбайтовый формат команд. Выборка команды из памяти ведётся побайтно в течение нескольких машинных циклов. Время выполнения каждой команды с учетом времени выборки для большинства случаев составляет от 1 до 10 циклов. Комплексный набор команд CISC требует сложного блока управления, что затрудняет реализацию микропрограммного управления.

RISC представляет ограниченный, но достаточный набор команд, который обеспечивает максимальную скорость за счет сокращения количества тактов, требуемых для каждой команды. Большинство вычислений может быть выполнено с использованием небольшого числа простых операций, что приводит к ускорению разработки в целом. Целью RISC-архитектуры является оптимизация производительности за счет переноса редко используемых функций в аппаратное обеспечение, а часто используемых – в программное, что в итоге приводит к повышению производительности. Микроконтроллеры с RISC-архитектурой имеют фиксированный формат команды – 12, 14 или 16 бит. Выборка из памяти и выполнение основного числа команд осуществляется в них за один машинный цикл [2].

CISC сложнее конвейеризовать, но RISC обеспечивает лучшую эффективность конвейеризации. Преимущество CISC перед RISC заключается в том, что для запуска сложных программ в CISC требуется меньше инструкций при меньшем количестве циклов выборки. В отличие от этого RISC требует большего количества инструкций для выполнения одной и той же задачи с большим количеством циклов выборки. Тем не менее, RISC может значительно повысить производительность за счет более

высокой тактовой частоты, более эффективной конвейерной обработки и оптимизации компилятора.

Архитектура ЭВМ

Архитектура микроконтроллера – это набор правил и соглашений, определяющие его функции, реализацию.

Запоминающее устройство является одним из ключевых частей микроконтроллера. Данный модуль отвечает за хранение данных и инструкций, необходимых для выполнения микроконтроллером его функций. Как правило микроконтроллеры имеют 2 вида памяти:

- память программ (ROM);
- память данных (RAM).

Также микроконтроллеры делят на 2 типа на основе блоков памяти: с встроенной и внешней памятью. Блоки или модули памяти находятся внутри корпуса или снаружи.

Память программ является энергонезависимой и используется для хранения кода встроенного программного обеспечения (инструкций) и управления функциями микроконтроллера. В тоже самое время память данных является энергозависимой, используется для хранения данных, которые используются инструкциями и нужны для их работы.

Разделяют два вида архитектуры ЭВМ такие как Гарвардская и архитектура фон Неймана (Принстонская). Эти архитектуры отличает одну от другой использование единой в одном случае или раздельной памяти для данных и инструкций в другом случае. Гарвардская архитектура характеризуется тем, что в ней память и процессор разделены физически, данные и инструкции передаются по разным каналам и используют разные шины. Схема архитектуры изображена на рисунке 4. Микроконтроллер с Гарвардской архитектурой может выполнять инструкции за один машинный цикл. Это позволяет увеличить скорость работы ЭВМ, так как процессор не тратит время на поиск инструкций в памяти, инструкции загружаются в буфер инструкций, откуда быстро извлекаются процессором. Также это позволяет использовать разные типы памяти для данных и инструкций.

В архитектуре фон Неймана используется общая шина для данных и инструкций, как показано на рисунке 5. Таким образом, обе операции не могут выполняться одновременно, и их необходимо запланировать. Общая шина упрощает конструкцию системы и снижает общую стоимость, но вместе с тем уменьшается производительность из-за необходимости синхронизации между данными и инструкциями.

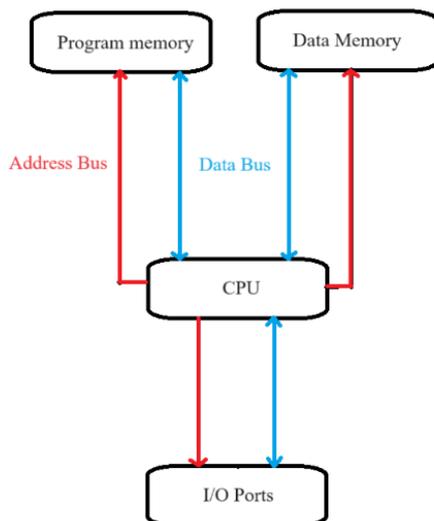


Рисунок 4. Гарвардская архитектура

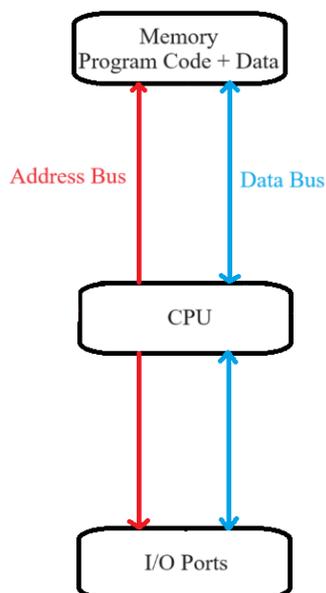


Рисунок 5. Архитектура фон Неймана

8051 (MCS-51)

8051 – это 8 битный микроконтроллер, созданный корпорацией Intel и работающий на архитектуре CISC. Имеет 6 тактов на инструкцию Это один из самых распространенных и дешевых микроконтроллеров в мире. Имеет встроенное программируемое ПЗУ объемом 4 КБ 128 байт встроенной оперативной памяти. Имеющиеся периферийные устройства такие как порты ввода/вывода (I/O ports), таймеры/счетчики, UART (последовательный порт), SPI (последовательный периферийный интерфейс) и I2C (интерфейс последовательной шины) позволяют реализовать широкое разнообразие приложений. На практике используется

в электронике и в учебных целях [3]. Разрабатывались с учетом требований работы в экстремальных условиях, для работы в условиях от -40 до +250 °С.

PIC

PIC (peripheral interface controller) серия микроконтроллеров, производимых американской компанией Microchip Technology Inc, имеющих гарвардскую архитектуру, используют микропроцессоры RISC Микроконтроллер используется в системах встроенной электронике, робототехнике, в транспорте, в медицинском оборудовании. Доступны в 8-разрядном, 16-разрядном и 32-разрядной версии. Ширина набора программных инструкций может составлять 12, 14, 16 и 24 бита. Как правило имеют внутренний генератор с частотой 8 МГц или 16 МГц. Машинный цикл состоит из 4-тактовых импульсов, в отличие от 12-тактовых импульсов в микроконтроллере Intel Представлены в корпусах от SMD до DIP. В качестве языка программирования выступает C и ассемблер.

Микроконтроллеры PIC известны своей надежностью простотой в использовании, энергоэффективностью и небольшими размерами. Микроконтроллеры отлично подходят для большого числа встраиваемых систем начиная от бытовой электроники и автомобильной промышленности до промышленной автоматизации и медицинской техники. Номенклатура моделей насчитывает более 500 различных микроконтроллеров с различными вариантами объема памяти, выводами, тактовой частотой, разным диапазоном питания, рабочими температурами и др. [4].

AVR

Микроконтроллеры AVR (Alf and Vegard's RISC microcontroller) – представляют собой семейство 8-разрядных и 32-разрядных микроконтроллеров, известных своим низким энергопотреблением и высокой производительностью. Они имеют архитектуру RISC и просты в программировании. Микроконтроллеры идеально подойдут для самостоятельных проектов в области электроники, включая любительские и образовательные проекты. Система для микроконтроллеров AVR имеет для различных типов от 90 до 135 различных команд. В основном команды занимают одну ячейку памяти – это 16 бит, а выполняются за один такт. Для применения в устройствах с малым энергопотреблением созданы модели AVR работающие при напряжении питания от 1,8 до 5,5 В.

Микроконтроллеры AVR имеют встроенную Flash-память для хранения программы, оперативную память (SRAM) для временного хранения данных и EEPROM для долговременного хранения данных. Микроконтроллеры AVR имеют периферийные устройства, позволяющие реализовать множество функций – аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, таймеры, интерфейсы UART, SPI, I2C и другие, что даёт им преимущества для реализации приложений [5].

STM32

Семейство микроконтроллеров STM32 это устройства на базе архитектуры ARM Cortex-M с 32-разрядами, высокой производительностью, эффективным использованием памяти и низким энергопотреблением. Эти микроконтроллеры обладают широким спектром функций и возможностей, что позволяет для самых разных задач. Они используются в промышленной автоматизации, медицинском оборудовании, бытовой электронике, в системах управления автомобилем, в устройствах для «умного дома» и др.

STM32 предлагает множество моделей, отличающиеся разным объемом флэш-памяти, ОЗУ, набором периферийных модулей. Микроконтроллеры поддерживают различные стандартные интерфейсы, такие как UART, SPI, I2C, CAN, Ethernet и USB. Для разработки используются Keil, IAR или STM32CubeIDE.

Низкое энергопотребление, высокая скорость обработки и разнообразие периферийных устройств делают его подходящим для широкого спектра применений и одним из самых популярных на рынке.

ESP32

Серия высокопроизводительных микроконтроллеров с низким энергопотреблением и встроенными контроллерами Wi-Fi и Bluetooth. Микроконтроллер ESP 32 основан на 32-разрядной архитектуре Extensa X6, имеет два ядра с максимальной частотой 240 МГц и 7-ступенчатый конвейер. Он также имеет 16/24-разрядный набор команд и различные периферийные интерфейсы, такие как UART, SPI, I2C, АЦП и ЦАП.

ESC 32 поддерживает единицы измерения с плавающей запятой и команды DSP, включая 32-разрядные умножители, 32-разрядные делители и 40-разрядные единицы умножения-накопления (MAC).

Для USP 32 доступно несколько сред разработки, включая Arduino IDE, ASP-IDF и PlatformIO. Благодаря низкому энергопотреблению и поддержке Wi-Fi и Bluetooth ESC32 широко используется в различных приложениях, таких как устройства "умного дома", IoT-устройства и носимые устройства [6].

Renesas RL78

Устройства компании Renesas отличаются высокой производительностью, сверхнизким энергопотреблением и компактной упаковкой.

Благодаря большому объему памяти и количеству контактов эти устройства используются в различных системах управления автомобилями. Два популярных микроконтроллера от Renesas – это RL78 и RX. RL78 известен своим низким энергопотреблением, в то время как RX известен своей высокой производительностью.

Микроконтроллеры основаны на гарвардской архитектуре CISC. Семейство RL78 доступны в виде 8-разрядных и 16-разрядных версий, а RX в 32-разрядном.

Семейство RL78 - это микроконтроллеры с низким энергопотреблением, в то время как RX обеспечивает высокую производительность.

Количество контактов в семействе RL78 варьируется от 20 до 128 контактов, в то время как микроконтроллеры RX доступны в корпусах от 48 до 176 контактов.

Объем флэш-памяти также увеличен с 16 КБ до максимум 512 КБ для RL78 и от 32 КБ до 2 МБ для микроконтроллеров семейства RX.

Объем оперативной памяти в семействе RX составляет от 2 до 128 КБ.

Заключение

Каждый микроконтроллер имеет свои преимущества и недостатки. Для решения той или иной задачи всегда может быть найдено множество вариантов выбора. Выбор микроконтроллера в конечном счете зависит от требований и задач проекта. Применение современных материалов в электронных устройствах, предназначенных для радиофизических измерений, это тренд, нацеленный на совершенствование исследований. Микроконтроллеры на основе микропроцессоров PIC отличный вариант для простых проектов и обучения, благодаря наличию доступной обучающей системы и множеству доступных примеров проектирования в открытых библиотеках. PIC и AVR предлагают самые универсальные устройства, которые можно использовать практически для любых задач. ARM микроконтроллеры предлагают мощные возможности для разработки сложных систем. Микроконтроллеры на 8051 просты в изучении и доступны по стоимости.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20045, <https://rscf.ru/project/24-19-20045/>.

Список литературы / References

1. Isizoh A. N., Obiany O. R., Ejimofor I. A., Ebih U. J., Alagbu E. E. Application and Analyses of Microcontrollers in Real-Time Systems // International Journal of Advances in Engineering and Management. 2022. 4(4). 97-104. DOI: 10.35629/5252-040497104
2. Isen C., John L. K., John E. A Tale of Two Processors: Revisiting the RISC-CISC Debate // Lecture Notes in Computer Science. 2009. 5419. 57-76. DOI: 10.1007/978-3-540-93799-9_4
3. Kunikowski W., Czerwiński E., Olejnik P., Awrejcewicz J. An Overview of ATmega AVR Microcontrollers Used in Scientific Research and Industrial Applications // Pomiar Automatyka Robotyka. 2015. 19(1). 15-20. DOI: 10.14313/PAR_215/15
4. Vakaliuk T. A., Andreiev O. V., Nikitchuk T. M., Osadchyi V. V., Dubyna O. F. Using Esp32 Microcontroller For Physical Simulation Of The Wireless Remote Control Modem // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2023. 3. 206-214. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-3-20
5. Qureshi M. H., Akmal R. Microcontrollers. 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.29112.76800

6. Woo-Garcia R. M., Argüelles-Lucho P., Montes de Oca-Mora N. J., Salas-Rodriguez S., Sanchez-Vidal, A., Ceron-Alvarez C. A., Osorio-de la Rosa E. Evaluation of Assembler and C Programming Languages on PIC16F877 Microcontroller // Journal of Physics: Conference Series. 2024. 2699(1). 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/2699/1/012013

Информация об авторах

Яковлев Никита Сергеевич – студент, инженер-программист, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-8593-9758, nikita-yakovlev13@ya.ru

Михайлов Александр Александрович – студент, техник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0006-1087-4942, sanasanowich@gmail.com

Килиба Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-7660-6039, Roman.Petrov@novsu.ru

Петров Роман Валерьевич – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9751-116X, Roman.Petrov@novsu.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 544.2

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).416-424

Поступила в редакцию / Received 01.08.2024

ГРНТИ 31.15.25

Специальность ВАК 1.3.8

Принята к публикации / Accepted 20.08.2024

Научная статья

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ MP2 И DFT ДЛЯ РАСЧЕТА СТРУКТУРЫ И ИК-СПЕКТРОВ НА ПРИМЕРЕ СОЕДИНЕНИЙ МАГНИЯ С АМИНОКИСЛОТАМИ

Беспалов Д. В., Голованова О. А.

Омский государственный университет имени Ф. М. Достоевского (Омск, Россия)

Аннотация Построены структурные модели соединений магния с валином и глицином методом Мёллера-Плессе второго порядка (MP2) и методом функционала плотности (DFT) (функционал B3LYP) в базисе 6-31G(d). Рассчитаны частоты нормальных колебаний в ИК-спектре моделей. Показано сравнение рассчитанных ИК-спектров друг с другом и со спектрами синтезированных соединений, сделаны выводы об их строении. Полученные данные по координации соединений магния с аминокислотами могут помочь установить строение их комплексов.

Ключевые слова: *Метод функционала плотности, Мёллер-Плессе, теория возмущений, магний, аминокислота, ИК-спектр, синтез*

Для цитирования: Беспалов Д. В., Голованова О. А. Сравнение методов MP2 и DFT для расчета структуры и ИК-спектров на примере соединений магния с аминокислотами // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 416-424. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).416-424

Research Article

COMPARISON OF MP2 AND DFT METHODS FOR CALCULATING STRUCTURE AND IR SPECTRA USING THE EXAMPLE OF MAGNESIUM COMPOUNDS WITH AMINO ACIDS

Bespalov D. V., Golovanova O. A.

Dostoevsky Omsk State University (Omsk, Russia)

Abstract Structural models of magnesium compounds with valine and glycine have been constructed. MP2 and DFT (B3LYP functional) methods in the 6-31G(d) basis were used for the construction. The frequencies of normal oscillations in the IR spectrum of the models have been calculated. Comparison of the calculated IR spectra with each other and with the spectra of the synthesised compounds is shown. Conclusions about the structure of the compounds are drawn. The obtained data on coordination of magnesium compounds with amino acids can help to establish the structure of their complexes.

Keywords: *Density-functional method, Møller–Plesset, Perturbation theory, Magnesium, Amino acid, IR spectrum, Synthesis*

For citation: Bespalov D. V., Golovanova O. A. Comparison of MP2 and DFT methods for calculating structure and IR spectra using the example of magnesium compounds with amino acids // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 416-424. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).416-424

Введение

Исследование теории комплексообразования ионов магния (II) с биогенными аминокислотами, а также разработка методов для изучения строения этих соединений, представляет собой одну из наиболее перспективных и актуальных задач в физической химии. Актуальность данного исследования обусловлена отсутствием достоверно установленного строения изучаемых соединений и как следствие отсутствием достоверных данных о термодинамических параметрах соединений ионов магния (II) с аминокислотами, и различных констант устойчивости, на основании которых могут проводиться соответствующие биохимические исследования.

Магний является макроэлементом в организме человека. В ионизированном виде является универсальным регулятором физиологических процессов на биохимическом уровне, и, обеспечивает возможность метаболизма около 300 ферментов, в частности креатинкиназы, фосфофруктокиназы, трансмембранного транспорта ионов, необходим для синтеза и репродукции ДНК и РНК, участвует в процессах синтеза белка, в нервно-мышечной проводимости. Недостаток магния в организме человека является нарушением работы сердечно-сосудистой системы, опорно-двигательного аппарата, различные неврологические нарушения [1].

Аминокислоты (далее – АК) же являются строительным блоком для формирования всех органов человека и животных, всех мышц и связок, жидкостей, гормонов и ферментов. Также у некоторых АК есть другие функции, в частности валин способствует восстановлению мышц после нагрузки, при его недостатке наблюдают нарушение координации движений. Глицин – стимулирует выработку серотонина и влияет на память, при недостатке в организме человека наблюдается нарушение сна, слабость мышц. Снижение содержания глицина и валина в организме является фактором риска физического развития и некорректной работы центральной нервной системы [2]. По функциям в организме человека, видим, что существует множество областей пересечения, где могут взаимодействовать изучаемые АК и ионы магния. В результате взаимодействия могут образовываться соединения, комплексы – устойчивость, которых может определять скорость различных процессов в организме человека как физиологических, так и патогенных [3]. Механизм взаимодействия магния с АК не изучен до конца, сложность возникает и в изучении химического взаимодействия в сложной системе, которой является организм человека. Связи реакционной способности участников реакции с их строением, пространственной структурой и условиями осуществления, в настоящее время не существует. Отсутствие знаний в данной области, приводит к большому количеству дополнительных биохимических исследований, что влечёт за собой увеличение времени исследования и увеличивается вероятность побочных процессов. Поэтому изучение комплексообразования ионов магния с АК их термодинамические, кинетические

характеристики, а также их строение могут помочь также в оптимизации методов исследования.

В медицине, возможно применение комплексных соединений таких как валинат и глицинат магния. В частности, известно, что глицинат магния, помимо функций, характерных для АК (например, строительной), участвует в поддержании нормального уровня АТФ, и усиливает работу кишечника, улучшает проводимость нервной ткани [4]. Комплексы аминокислот с металлами являются важным предметом исследования в фармакологии с точки зрения химизма процессов; особенно после того, как была показана их возможное противодействие раку, и протестирована в качестве антиматериала, проявляющего противоопухолевую активность [5]. Более того, структура комплексов магния с АК будет способствовать пониманию механизмов их действия в тканях и жидкостях сложной системы, такой, какой является человеческий организм, тем более, когда физико-химическое состояние его подвержена изменению вследствие различных заболеваний. Подобная задача решается благодаря использованию систематического подхода к исследованию процессов образования комплексов ионов магния (II) с АК.

Один из методов исследования комплексообразования – квантовое моделирование. Расчёт моделей изолированных молекул, позволяют оценить, спрогнозировать стояние соединений, внося свой вклад в исследование. Рассчитать, возможно, не только саму структуру, но и оценить термодинамические характеристики в различных условиях, а также различные спектры, такие как, например ИК. Данные, полученные при помощи расчёта, могут помочь в улучшении синтеза соединений заранее определенного состава и структуры [6].

Наиболее достоверные методы квантового моделирования, результаты которых близки к реальным системам: метод функционала плотности (DFT) и теория возмущений Мёллера-Плессе второго порядка (MP2) [7, 8]. Данные методы вычислительной химии имеют разные подходы решению уравнения Шредингера для различных систем и имеют как свои достоинства и недостатки. Например, метод MP2 применяется для расчёта небольших систем, которыми чаще всего являются изолированные молекулы, давая возможность адекватно оценивать поведение в органических комплексах молекул металла комплексообразователя, имеющего больше электронов и их взаимодействий, чем, скажем, в атоме углерода. А метод DFT способен адекватно просчитывать и большие молекулы, поверхности, но исходя из того, что волновая функция заменяется электронной плотностью, некоторыми межмолекулярными взаимодействиями могут пренебрегать, несмотря на это результаты адекватно описывают реальность. Отсюда расчёт именно колебательных ИК спектров, их интерпретация и сравнение с экспериментом дают возможность понять, какой их методов в выбранном базисе будет лучше описывать органометаллические комплексные соединения, на примере валината и глицината магния.

Цель работы – построение моделей глицината и валината магния методами MP2 и DFT (с использованием функционала B3LYP) в базисе 6-31G (d), интерпретация расчетного и экспериментального ИК-спектров синтезированных соединений, уточнение строения, сравнение расчётных методов.

Основная часть

Для создания и расчета модельных структур применялся пакет программ для квантово-химического моделирования, в котором возможно использовать методы MP2 и DFT (B3LYP) в базисе 6-31G (d), GAMESS (US). Базис 6-31G (d) – применяют для расчёта структур металлоорганических соединений, данный базиспредставляет собой набор поляризационных функций с валентно-расщеплением, который добавляет к набору 6-31Gещё пять d – Декартово-Гауссовы поляризационные функции для увеличения точности расчёта магния в соединениях. Минимизирована энергия валината и глицината магния, рассчитаны структуры, и частоты нормальных мод для метода ИК-спектроскопии.

Мольное соотношение 1:2 было взято за основу синтеза. Ранее нами был осуществлён синтез аналогичных соединений [9]. Навеску АК (Gly0.225г, Val 351г) растворяли в 10 мл дистиллированной воды. Затем добавляли навеску $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (0.3048 г). Для активации механизма внутри конъюгированного основания, в каждом растворе с помощью 0,1М раствора NaOH и 0,1М раствора HCl доводили pH до 8. Раствор оставляли при комнатной температуре в закрытом виде. Происходит химическая реакция АК с ионами Mg^{2+} и кристаллизация полученного соединения. Через 7-14 дней получали кристаллический осадок, его промыли небольшим объёмом воды холодной, и сушили для удаления лишней влаги.

Для определения содержания ионов магния (II) использовали комплексно метрическое титрование. Полученные осадки растворяли заранее определенном объеме дистиллированной воды. Брали 10 мл раствора, прибавляли 15 мл аммиачного буфера и индикатор эриохром чёрный Т. Титровали стандартным раствором трилона Б (0,01 Н) до перехода вино-красной окраски в синюю. Объёмы, пошедшие на титрование проб, усредняли и рассчитывали содержание магния в полученных соединениях.

Формольным титрованием по методу Серенсена определяли количество АК. К точному объёму испытуемого образца прибавляли воду до объема 20 мл. Раствор доводили до pH 7,0 при помощи 0,1 М раствора NaOH или 0,1 М раствора HCl. Далее прибавляли 20 мл 35 %-го раствора формальдегида, нейтрализованного до pH 7,0 в день проведения анализа с помощью 10%-го раствора NaOH. Полученный раствор перемешивали и титровали 0,1 М раствором NaOH, индикатор фенолфталеин.

С помощью порошковой инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье получены Ик спектры исследуемых образцов. Прибор спектрофотометр ФСМ 2202. Образцы измельчали в порошок, затем смешивали с KBr и прессовали

в германиевой кювете. Диапазон регистрации спектров от 500 до 4000 см⁻¹ с разрешающей способностью 1 см⁻¹. Обработка данных осуществлялась при помощи программы OriginPro 2021.

Обсуждение результатов

Результаты исследования содержания магния (II) и аминокислот в синтезированных соединениях и их молярные соотношения представлены в таблице 1. Анализ полученных результатов показал, что молярное соотношение иона магния (II) и соответствующих лигандов (валин и глицин) в полученных соединениях составляет 1:2.

Таблица 1. Результаты определение молярного соотношения ионов магния (II) и АК в синтезированных соединениях

Определение количества ионов магния (II)			Определение количества аминокислот	
Соединение	Сн(трилон Б), моль-экв/л	n(Mg ²⁺), моль	См(NaOH), моль/л	n(АК), моль
Mg ²⁺ -Val	0,01	0,0011	0,1	0,0023
Mg ²⁺ -Gly	0,01	0,0006	0,1	0,0012

Были построены модели вероятных соединений, минимизирована энергия молекул валината магния, она равна -994,560 Хартри (-4,336*10⁻¹⁵ Дж) и глицината магния, она равна -761,065Хартри (-3,318*10⁻¹⁵ Дж). На рисунке 1 приведено строение исследуемых соединений.

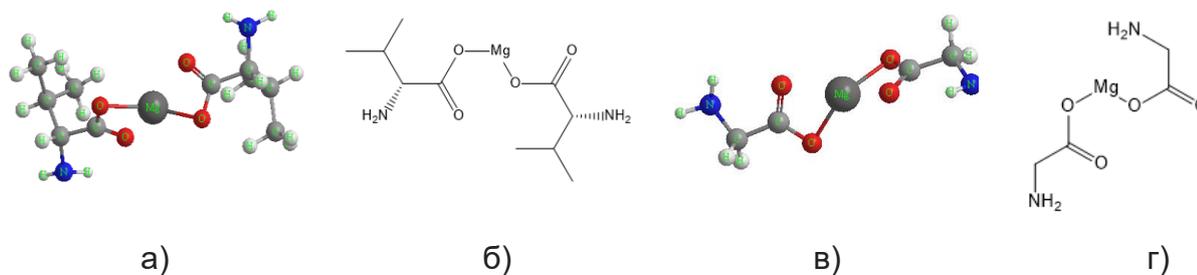


Рисунок 1. Строение исследуемых соединений: а) 3D модель валината Mg; б) структурная формула валината Mg; в) 3D модель глицината Mg; г) структурная формула глицината Mg

В таблице 2 приведены рассчитанные термодинамические характеристики моделей валината магния и глицината магния при температуре 298,15К. В таблице 3 обобщены расчётные и экспериментальные частоты колебаний ИК-спектров молекул валината и глицината магния.

Таблица 2. Расчетные характеристики модельной структуры комплексов валината магния и глицината магния при T=298,15 К

	Значение DFT 6- 31G(d)	Значение MP2 6- 31G(d)	Значение DFT 6- 31G(d)	Значение MP2 6- 31G(d)
Модель 1:2	Mg ²⁺ :Val		Mg ²⁺ :Gly	
Энтальпия H, ккал/моль	204,066	207,591	92,648	94,410
Энтропия S, кал/моль К	132,400	129,010	99,520	103,591
Свободная энергия Гиббса, ккал/моль	164,591	169,127	62,976	63,525
Внутренняя энергия U, ккал/моль	203,474	206,999	92,056	93,818

Таблица 3. Расчётные и экспериментальные частоты колебаний ИК-спектров молекул валината и глицината магния

Валинат магния(базис 6-31G(d))			Глицинат магния (базис 6-31G(d))		
Вэксп., CM ⁻¹	VDFT, CM ⁻¹	VMP2, CM ⁻¹	Вэксп., CM ⁻¹	VDFT, CM ⁻¹	VMP2, CM ⁻¹
627	623	588	557	557	573
666	670	607	672	671	701
700	681	716	709	708	704
715	732	717	749	738	732
755	760	789	786	781	788
848	849	835	800	803	795
889	883	880	872	883	858
948	944	932	921	921	962
966	988	964	964	964	987
1010	1025	1028	1035	1025	1051
1064	1069	1037	1088	1077	1060
1111	1107	1106	1113	1107	1133
1138	1138	1150	1154	1157	1140
1168	1164	1167	1186	1189	1191
1191	1189	1194	1247	1252	1245
1268	1265	1260	1285	1285	1254
1330	1327	1329	1308	1307	1331
1341	1344	1343	1368	1367	1352
1367	1367	1376	1391	1369	1382
1396	1406	1401	1427	1426	1429
1436	1441	1429	1459	1441	1457
1469	1471	1487	1512	1515	1480
1509	1515	1512	1600	1586	1632
1638	1635	1684	1661	1655	1662
1970	-	-	2006	-	-
2560	2546	2668	-	-	-
2617	2605	2738	-	-	-
2952	2934	2938	2938	2934	2972
2967	3003	2973	2968	3003	2993
3047	3066	3049	3051	3066	3053
3242	3199	3251	3250	3263	3254
3401	3358	3351	3403	3343	3441

Анализ рассчитанных и экспериментальных ИК-спектров соединений магния демонстрирует следующее.

1. В общем случае использование DFT как метода расчёта ИК спектров данных соединений в базисе 6-31G(d) наблюдается лучшая сходимость с экспериментальными данными для обоих соединений, чем при использовании метода MP2 в том же базисе. В области «отпечатков пальцев» (область 500-1500 см⁻¹) для данных соединений, метод DFT обладает погрешностью ~1%, тогда как для метода MP2 для некоторых пиков такова достигает ~5%, причём, в случае валината магния это наиболее заметно, и, вероятно, всё дело в количестве атомов в соединении. В случае валината магния их больше, из-за боковой группы валина – и так как модель имеет мольное соотношение металл: АК 1 к 2, размер расчётной системы увеличивается, увеличивается количество электронов и взаимодействий, что вероятно приводит к некорректному расчёту.

2. Так как расчёт производился изолированной молекулы, в области колебаний 2900-3500 см⁻¹ оба метода имеют погрешность ~5%, это связано с высокой подвижностью аминогруппы.

3. В расчётном спектре валината магния (MP2) область 2500-2900 имеет также большую погрешность (для некоторых пиков более 100 см⁻¹), вероятно это связано с большой подвижностью боковой группы валина, и, вероятно, некорректным расчётом вероятного взаимодействия магния с аминогруппой теорией возмущения.

4. Исходя из расчётных ИК спектров в сравнении с экспериментальным, можно выдвинуть предположение, что синтезированные соединения имеют такую же структуру, как и в предложенных моделях.

Говоря о том, что теория возмущений Мёллера-Плессе второго порядка плохо описывает большие системы, возникает вопрос – почему бы не попробовать повысить порядок – третий, четвертый, пятый. Чаще всего это не делают по нескольким причинам, первая и главная, что более сложный расчёт не всегда даёт большую точность, а в подобных системах может, наоборот, её снижать. При этом увеличивая сложность расчёта, увеличивается время – что так же является минусом.

Выводы

Используя формольное титрование по методу Серенсена, совместно с комплексометрическим титрованием установили, что полученных соединениях магния с аминокислотами мольное соотношение 1:2. Построены модели глицината магния и валината магния методами MP2 и DFT(B3LYP) в базисе 6-31G(d) рассчитаны термодинамические характеристики для изолированных молекул исследуемых соединений. Представлены данные ИК спектров моделей и дан их анализ. Основываясь на приведенных данных квантово-химических расчетах ИК спектра моделей соединений магния (II) с АК сделан вывод о строении синтезированных

соединений, они адекватно описывается с построенными моделями. Модель глицината магния адекватно описывается методом MP2, тогда как модель валината магния тем же методом описывается некорректно, следовательно, для описания органометаллических соединений аминокислот лучше использовать метод функционала плотности для расчёта ИК спектров и термодинамических характеристик.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №075-03-2023-«Фундаментальная теория кристаллизации ОМА и физико-химических методов исследования патогенного минералообразования в организме человека с целью профилактики, блокирования патогенов и создания биомиметических систем доставки лекарств»).

Список литературы

1. Юдина Н. В., Торшин И. Ю., Громова О. А., Егорова Е. Ю., Быков А. Т. Обеспеченность ионами калия и магния – фундаментальное условие для поддержания нормального артериального давления // Кардиология. 2016. 56 (10). 80-89. DOI: 10.18565/cardio.2016.10.80-89
2. Левчук Л. В., Бородулина Т. В., Санникова Н. Е., Данилова И. Г. Клиническое значение содержания свободных аминокислот для роста и развития детей // Уральский медицинский журнал. 2017. 5 (149). 11-15.
3. Waheed E. J., Obaid S. M. H., Abbas M. Ali. Biological Activities of Amino Acid Derivatives and their Complexes a Review // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2019. 10 (2). 1624-1641.
4. Кадырова Р. Г., Кабиров Г. Ф., Муллахметов Р. Р. Биогенные препараты, содержащие магний. Способ получения глицината магния // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2017. 229 (1). 52-55.
5. Милаева Е. Р., Додохова М. А., Шпаковский Д. Б., Антоненко Т. А., Сафроненко А. В., Котиева И. М., Комарова Е. Ф., Ганцгорн Е. В., Алхусейн-Кулягинова М. С. Механизмы цитотоксического действия оловоорганических соединений // Биомедицина. 2021. 17 (2). 88-99. DOI : 10.33647/2074-5982-17-2-88-99
6. Блинова А. А., Блинов А. В., Пирогов М. А., Огурков К. А., Маглакелидзе Д. Г., Яковенко А. А. Компьютерное квантово-химическое моделирование взаимодействия фосфата кальция с аминокислотами // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. 14. 352-361. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.352
7. Mamand D., Qadr H. Density Functional Theory and Computational Simulation of the Molecular Structure on Corrosion of Carbon Steel in Acidic Media of Some Amino Acids // Russian Journal of Physical Chemistry. 2022. 96. 2155-2165. DOI: 10.1134/S0036024422100193

8. Буглак А. А., Помогаев В. А., Кононов А. И. Расчет спектров поглощения комплексов серебра с тиолятами // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. 11 (2). 275-286. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-275-286

9. Беспалов Д. В., Голованова О. А. Синтез, расчет структуры и ИК-спектров методом DFT ряда соединений магния(II) с аминокислотами. // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2024. 17 (1). 74-84.

References

1. Yudina N. V., Torshin I. Y., Gromova O. A., Egorova E. Y., Bykov A. T. Availability of Potassium and Magnesium Ions Is a Fundamental Condition for Maintenance of Normal Arterial Pressure // *Cardiology*. 2016. 56 (10). 80-89. DOI: 10.18565/cardio.2016.10.80-89

2. Levchuk L. V., Borodulina T. V., Sannikova N. E., Danilova I. G. The clinical importance of free amino acids content for children's physical growth and development // *Urals Medical Journal*. 2017. 5 (149). 11-15.

3. Waheed E. J., Obaid S. M. H., Abbas M. Ali. Biological Activities of Amino Acid Derivatives and their Complexes a Review // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2019. 10 (2). 1624-1641.

4. Kadyrova R. G., Kabirov G. F., Mullakhmetov R. R. Biogenic medication which contains magnesium. Method of obtaining magnesium glycinate // *Academic notes of Kazan state academy of veterinary medicine named after N. Bauman*. 2017. 229 (1). 52-55.

5. Milaeva E. R., Dodokhova M. A., Shpakovsky D. B., Antonenko T. A., Safronenko A. V., Kotieva I. M., Komarova E. F., Ganzgorn E. V., Alkhusein-Kulyaginova M. S. Mechanisms of cytotoxic action of organo-tin compounds // *Journal Biomed*. 2021. 17 (2). 88-99. DOI : 10.33647/2074-5982-17-2-88-99

6. Blinova A. A., Blinov A. V., Pirogov M. A., Ogurkov K. A., Maglakelidze D. G., Yakovenko A. A. Computer quantum chemical modeling of the interaction of calcium phosphate with amino acids // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. 2022. 14. 352-361. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.352

7. Mamand D., Qadr H. Density Functional Theory and Computational Simulation of the Molecular Structure on Corrosion of Carbon Steel in Acidic Media of Some Amino Acids // *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2022. 96. 2155-2165. DOI: 10.1134/S0036024422100193

8. Буглак А. А., Помогаев В. А., Кононов А. И. Calculation of absorption spectra of silver-thiolate complexes // *Computer Research and Modeling*. 2019. 11 (2). 275-286. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-275-286

9. Беспалов Д. В., Голованова О. А. Synthesis, structure and IR spectra calculation by DFT of a number of magnesium (II) compounds and amino acids. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2024. 17 (1). 74-84.

Информация об авторах

Беспалов Дмитрий Вячеславович – преподаватель, Омский государственный университет имени Ф. М. Достоевского (Омск, Россия), ORCID:0009-0009-1479-8571, d.v.bespalov@rambler.ru

Голованова Ольга Александровна – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой, Омский государственный университет имени Ф. М. Достоевского (Омск, Россия), ORCID: 0000-0001-9995-5672, golovanoa2000@mail.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 537.8:539.2:517.9

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).425-435

Поступила в редакцию / Received 24.07.2024

ГРНТИ 29.19.37+29.19.04+27.39.29

Специальность ВАК 1.3.8, 2.2.2

Принята к публикации / Accepted 29.08.2024

Научная статья

ПРИНЦИПЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Захаров А. Ю.¹, Захаров М. А.¹, Зубков В. В.²

¹ Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

² Тверской государственный университет (Тверь, Россия)

Аннотация Построена релятивистская динамическая теория системы взаимодействующих атомов на основе концепции вспомогательного поля. Вариационная постановка задач релятивистской молекулярной динамики. Получена точная замкнутая релятивистская система уравнений, описывающая эволюцию системы атомов и скалярного поля, посредством которого взаимодействуют атомы. Проведен качественный анализ решений уравнений эволюции системы.

Ключевые слова: межатомные потенциалы, классическая релятивистская динамика, запаздывающие взаимодействия, явление необратимости, уравнение Клейна-Гордона-Фока

Для цитирования: Захаров А. Ю., Захаров М. А., Зубков В. В. Принципы релятивистской молекулярной динамики // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 425-435. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).425-435

Research Article

PRINCIPLES OF RELATIVISTIC MOLECULAR DYNAMICS

Zakharov A. Yu.¹, Zakharov M. A.¹, Zubkov V. V.²

¹ Yaroslavl-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

² Tver State University (Tver, Russia)

Abstract A relativistic dynamic theory of a system of interacting atoms is constructed based on the concept of an auxiliary field. Variational formulation of problems of relativistic molecular dynamics. An exact closed relativistic system of equations is obtained that describes the evolution of the system of atoms and the auxiliary field. An analysis of the qualitative properties of solutions to the system dynamics equations has been carried out.

Keywords: interatomic potentials, classical relativistic dynamics, retarded interactions, the phenomenon of irreversibility Klein-Gordon-Fock equation

For citation: Zakharov A. Yu., Zakharov M. A., Zubkov V. V. Principles of relativistic molecular dynamics // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 425-435. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).425-435

Введение

Молекулярная динамика в настоящее время является эффективным методом, позволяющим моделировать (точнее, имитировать) временную эволюцию системы взаимодействующих частиц и рассчитывать коллективные свойства систем, зависящих от этого движения. В рамках классической (не квантовой) механики суть метода заключается в отслеживании эволюция системы посредством интегрирования уравнений движения.

Как известно, все «реальные» взаимодействия между (нейтральными) атомами имеют электромагнитное происхождение. В молекулярной динамике, как правило, взаимодействие между атомами описывается мгновенными межатомными потенциалами, явный вид которых зависит от природы взаимодействующих атомов. Выбор модельного межатомного потенциала – важный первый шаг в исследовании динамики системы взаимодействующих частиц. В современной физике известно множество «модельных» межатомных потенциалов [1-3], часть которых применяют при машинном моделировании в рамках метода молекулярной динамики [4-6].

Однако, в такой постановке задач имеется несколько изначальных принципиальных (т.е. не сводящихся только к вычислениям) проблем. Важнейшей из них является проблема перехода от классической динамики системы, состоящей из взаимодействующих частиц, к термодинамике системы в целом. В настоящее время этот переход может быть реализовано с помощью «рукотворного» введения механизма стохастизации системы, включая вариант погружения ее в резервуар. Дело в том, что «мысленное» погружение исследуемой системы в резервуар основано на гипотезе, что механизм установления термодинамического равновесия внутри находится за пределами самой системы, т.е. в резервуаре.

Следует отметить, что в методе молекулярной динамики безусловно существует механизм стохастизации, обусловленный погрешностями численного решения уравнений движения частиц, включая эффект накопления погрешностей численных алгоритмов. Однако такой механизм стохастизации не является реальной причиной перехода системы частиц к равновесному термодинамическому состоянию. Нулевое начало термодинамики не может быть следствием погрешностей вычислений.

С фундаментальной физической точки зрения любая система взаимодействующих атомов состоит из двух незамкнутых подсистем, непрерывно обменивающихся энергией и импульсом. Первая подсистема – это система атомов, а вторая – это поля (вообще говоря, различной природы), порождаемые атомами и посредством которых эти атомы только и взаимодействуют. Первая подсистема характеризуется конечным числом степеней свободы, а вторая – бесконечно большим числом степеней свободы.

В рамках молекулярной динамики используется представление о мгновенных взаимодействиях между атомами, что означает пренебрежение бесконечным числом степеней свободы, связанных с подсистемой полей. Такая, основанная на классической механике, постановка задачи позволяет поставить задачу Коши для системы атомов и численно решить её с помощью ЭВМ. Вместе с тем решение задачи Коши для системы атомов, взаимодействие между которыми имеет полевое происхождение, неединственно, так как зависит не только от начальных условий для системы атомов, но и от начальных условий для полей. Другими словами, степени свободы полей приводят

к непредсказуемости динамики атомов, что в некоторой степени может прояснить возможную «природу» возникновения вероятностной концепции, свойственной кинетической теории материи.

Концепция вспомогательного поля

Будем полагать, что взаимодействие между покоящимися атомами описывается парным центральным потенциалом $v(r)$ и может быть представлено в виде интеграла Фурье

$$v(r) = \int \frac{dk}{(2\pi)^3} \tilde{v}(k^2) e^{ikr}. \quad (1)$$

Здесь $r = |\mathbf{r}|$, $k = |\mathbf{k}|$.

В общем случае эволюция системы атомов управляется вспомогательным релятивистским полем $\varphi(\mathbf{r}, t)$, через которое осуществляются межатомные взаимодействия. В свою очередь, атомы являются источниками вспомогательного поля. При этом требуется выполнение своеобразного граничного условия: в статическом случае, когда все атомы находятся в покое, вспомогательное поле тождественно статическому межатомному потенциалу $v(r)$.

Как показано в работах [7, 8], уравнение для вспомогательного поля имеет вид

$$(\tilde{v}(-\square))^{-1} \varphi(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}, t), \quad (2)$$

где Δ – оператор Лапласа, $\square = \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$ – оператор Даламбера, $\rho(\mathbf{r}, t)$ – плотность источников поля, т. е. микроскопическая плотность числа атомов

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \sum_{s=1}^N \delta(\mathbf{r} - \mathbf{R}_s(t)). \quad (3)$$

Уравнение для свободного вспомогательного поля $\varphi^{(0)}(\mathbf{r}, t)$ следует из уравнения (2) при $\rho(\mathbf{r}, t) \equiv 0$:

$$(\tilde{v}(-\square))^{-1} \varphi^{(0)}(\mathbf{r}, t) = 0. \quad (4)$$

Общим решением уравнения (4) является линейная комбинация **элементарных вспомогательных полей** $\varphi_s^{(0)}(\mathbf{r}, t)$, удовлетворяющих уравнениям типа Клейна-Фока-Гордона

$$(\square - \mu_s^2) \varphi_s^{(0)}(\mathbf{r}, t) = 0, \quad (5)$$

где μ_s – корни уравнения

$$(\check{v}(k^2))^{-1} = 0 \quad (6)$$

на комплексной плоскости переменной k .

Отсюда следует, что всякий межатомный потенциал, допускающий продолжение в релятивистскую область, является суперпозицией полей Клейна-Гордона-Фока $\varphi_s^{(0)}(\mathbf{r}, t)$, каждое из которых характеризуется комплексным параметром «массы» μ_s .

Вариационная постановка задач релятивистской молекулярной динамики

Полная система уравнений релятивистской динамики системы, состоящей из атомов и вспомогательного поля, может быть получена из вариационного принципа, т. е. принципа наименьшего действия. Функционал действия системы имеет вид [7]

$$S = -\sum_a m_a c \int ds_a - \sum_{s=1}^n \sum_a \frac{\gamma_s}{c} \int \varphi_s(x_a) ds_a + \sum_{s=1}^n \frac{\kappa_s}{2c} \int d^4x (\partial_\nu \varphi_s(x) \partial^\nu \varphi_s(x) - \mu_s^2 \varphi_s^2(x)), \quad (7)$$

где m_a и s_a – масса и мировая линия a -й частицы соответственно, γ_s – константа связи между частицей и s -м элементарным полем, κ_s – размерная константа, относящаяся к элементарному полю $\varphi_s(x_a)$.

Полная система уравнений динамики частиц и полей имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x^\nu} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\nu \varphi_s(x))} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \varphi_s(x)} = 0; \\ \frac{d}{d\tau_a} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_a^\nu} - \frac{\partial L}{\partial x_a^\nu} = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Представим два последних слагаемых в правой части выражения (7) в следующем виде:

$$\sum_a m_a c \int ds_a + \sum_{s=1}^n \sum_a \frac{\gamma_s}{c} \int \varphi_s(x_a) ds_a = c \sum_a m_a \int d\tau_a \sqrt{\dot{x}_a^\nu \dot{x}_{\nu a}} + \sum_{s=1}^n \sum_a \frac{\gamma_s}{c} \int d\tau_a \int d^4x \varphi_s(x) \sqrt{\dot{x}^\nu \dot{x}_\nu} \delta^4(x - x_a(\tau_a)). \quad (9)$$

Подставляя выражения (9) и (7) в уравнения (8), найдем следующую систему уравнений для полей

$$(\square - \mu_s^2) \varphi_s(x) = \frac{\gamma_s}{\kappa_s} \sum_a \int d\tau_a \sqrt{\dot{x}^\nu \dot{x}_\nu} \delta^4(x - x_a(\tau_a)) \equiv \frac{\gamma_s}{\kappa_s} \rho(x) \quad (10)$$

и частиц

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{1}{m_a c^2} \sum_{s=1}^n \gamma_s \varphi_s(x_a)\right) \frac{dp_{\mu a}}{d\tau_a} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_a^\mu} \left(\sum_{s=1}^n \gamma_s \varphi_s(x)\right) - \frac{p_a^\nu p_{\mu a}}{m_a^2 c^2} \frac{\partial}{\partial x_a^\nu} \left(\sum_{s=1}^n \gamma_s \varphi_s(x)\right), \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\rho(x) = \sum_a \int d\tau_a \sqrt{\dot{x}^\nu \dot{x}_\nu} \delta^4(x - x_a(\tau_a)) - \quad (12)$$

микроскопическая плотность числа частиц в пространстве Минковского, $p_{\nu a} = m_a u_{\nu a}$.

Уравнения (10), (11) составляют собой замкнутую систему уравнений, которая при соответствующих начальных и граничных условиях полностью и однозначно описывает динамику частиц и полей. В частности, решение уравнений (10) при заданных начальных и граничных условиях для полей, полностью определяет динамику полей $\varphi_s(x)$ при заданной динамике частиц. Суперпозиция элементарных вспомогательных полей $\varphi_s(x)$ составляет полное вспомогательное поле $\varphi(x)$, посредством которого частицы взаимодействуют между собой. В случае отсутствия границ решение системы определяется задачей Коши для полей и частиц, которая при определенных условиях имеет единственное решение.

Качественный анализ уравнений динамики частиц и вспомогательного поля

С физической точки зрения основной интерес представляет динамика частиц, а эволюция поля самостоятельного интереса не составляет. Динамика поля имеет значение лишь как промежуточное звено, определяющее траектории частиц. В принципе, это промежуточное звено может быть исключено из рассмотрения, используя общие решения линейных дифференциальных уравнений:

$$\varphi_s(x) = \varphi_s^{(0)}(x) + \varphi_s^{(1)}(x), \quad (13)$$

где $\varphi_s^{(0)}(x)$ — общее решение соответствующего однородного дифференциального уравнения (5), а $\varphi_s^{(1)}(x)$ — любое частное решение уравнения (10) для поля, порождаемого атомами.

Частное решение $\varphi_s^{(1)}(x)$ может быть найдено с помощью функций Грина оператора Клейна-Гордона. Подстановка функций $\varphi_s^{(1)}(x)$ в уравнения (11) при отсутствии внешних полей позволяет полностью исключить полевые переменные и получить замкнутую систему уравнений движения для частиц.

Динамика вспомогательного поля

Функция Грина уравнения Клейна-Фока-Гордона для элементарного поля $\varphi_s(\mathbf{r}, t)$ определяется следующим уравнением

$$(\square - \mu_s^2)G_s(\mathbf{r} - \mathbf{r}', t - t') = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t') \quad (14)$$

решение которого хорошо известно [9]

$$G_s(\mathbf{r} - \mathbf{r}', t - t') = \frac{\delta\left(t - t' - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{c}\right)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} - \theta\left(t - t' - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{c}\right) c\mu_s \frac{J_1\left(\mu_s\sqrt{c^2(t-t')^2 - |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2}\right)}{4\pi\sqrt{c^2(t-t')^2 - |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2}}. \quad (15)$$

Здесь $\theta(t)$ – ступенчатая функция Хевисайда, а $J_1(x)$ – функция Бесселя первого рода.

Отсюда (с учетом правой части уравнения (10)) найдем точную связь между эволюцией системы частиц $\rho(\mathbf{r}, t)$ и элементарным вспомогательным полем $\varphi_s(\mathbf{r}, t)$ [10]

$$\varphi_s^{(1)}(x) = \frac{\gamma_s}{\kappa_s} \int d\mathbf{r}' \left[\frac{\rho\left(\mathbf{r}', t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{c}\right)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} - \mu_s \frac{\gamma_s}{\kappa_s} \int_0^\infty \rho\left(\mathbf{r}', t - \frac{1}{c}\sqrt{\xi^2 + |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2}\right) \frac{J_1(\mu_s\xi)}{4\pi\sqrt{\xi^2 + |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2}} d\xi \right], \quad (16)$$

где $\rho(\mathbf{r}, t)$ – микроскопическая плотность распределения атомов:

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \sum_a \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a(t)). \quad (17)$$

Решение (16) определяется двумя принципиально различающимися слагаемыми. Первое слагаемое содержит минимальное время запаздывания τ_1 между точками \mathbf{r} и \mathbf{r}' при скорости распространения поля со скоростью света c :

$$\tau_1 = \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{c}. \quad (18)$$

Второе слагаемое содержит бесконечно много запаздываний $\tau_2(\xi)$ между теми же точками. Эти запаздывания параметризуются переменной ξ :

$$\tau_2(\xi) = \frac{\sqrt{\xi^2 + |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2}}{c} \geq \tau_1, \quad (0 \leq \xi < \infty), \quad (19)$$

Существенно, что времена $\tau_2(\xi)$ зависят не только от расстояния между точками, но и от параметра ξ , задающего волны Клейна-Фока-Гордона, распространяющиеся со скоростями от 0 до c . В силу того, что функция $\tau_2(\xi)$ принимает непрерывный ряд значений от времени запаздывания (18) $\tau_1 = \tau_2(\xi)|_{\xi=0}$ до $\lim_{\xi \rightarrow \infty} \tau_2(\xi) = \infty$, эволюция системы в текущий момент времени определяется абсолютно всей её предысторией. Это связано с тем, что в случае массивного поля вся мировая линия частицы внутри конуса причинности Гильберта вносит вклад в поле в точке \mathbf{r} в момент времени t .

Множественность запаздываний вспомогательных полей

Рассмотрим детально запаздывающий потенциал одной частицы, движущейся по закону $\mathbf{r} = \mathbf{r}_a(t)$. Этот потенциал состоит из двух вкладов

$$\varphi_s^{(1)}(x) = \varphi_s^{(\tau)}(\mathbf{r}, t) + \varphi_s^{(\tau, \xi)}(\mathbf{r}, t). \quad (20)$$

– Первый вклад – точный аналог потенциала Лиенара-Вихерта:

$$\varphi_s^{(\tau)}(\mathbf{r}, t) = \frac{\gamma_s}{\kappa_s} \frac{1}{4\pi \left(|r - r_a(\tau)| - \frac{(r - r_a(\tau)) \cdot r_a(\tau)}{c} \right)}, \quad (21)$$

где τ – переменная, связанная с t соотношением

$$\tau + \frac{|r - r_a(\tau)|}{c} = t. \quad (22)$$

Вклад от поля (21) в точке \mathbf{r} в момент времени t зависит от положения $\mathbf{r}_a(\tau)$ и скорости $\dot{\mathbf{r}}_a(\tau)$ порождающей его частицы в **единственный момент времени** τ , определяемый соотношением (22). Это связано с тем, что первое слагаемое в выражении для поля содержит однозначно определенное запаздывание τ_1 (18) между заданной точкой пространства \mathbf{r} и полдожением частицы $\mathbf{r}_a(\tau)$ в момент времени τ .

– Второй вклад $\varphi_s^{(\tau, \xi)}(\mathbf{r}, t)$ – потенциал, определяемый не единственной точкой траектории частицы, а всей ее траекторией от бесконечно удаленного прошлого до точки, определяемой условием (22):

$$\varphi_s^{(\tau, \xi)}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\gamma_s}{\kappa_s} \frac{\mu_s}{4\pi} \int_0^\infty \frac{J_1(\mu_s \xi)}{\sqrt{\xi^2 + |r - r_a(\tau(\xi, t))|^2} - \frac{(r - r_a(\tau(\xi, t))) \cdot r_a(\tau(\xi, t))}{c}} d\xi. \quad (23)$$

Существенно, что этот вклад $\varphi_s^{(\tau, \xi)}(\mathbf{r}, t)$ в поле в точке \mathbf{r} и в момент времени t зависит не только от бесконечного ряда положений $\mathbf{r}_a(\tau(\xi, t))$ порождающей его частицы, но и от бесконечного набора ее скоростей $\dot{\mathbf{r}}_a(\tau(\xi, t))$ в моменты времени, определяемые условием:

$$\tau + \frac{1}{c} \sqrt{\xi^2 + |r - r_a(\tau(\xi, t))|^2} = t. \quad (24)$$

Этот вклад параметризуется переменной ξ :

$$\tau_2(\xi) = \frac{\sqrt{\xi^2 + |r - r_a(\tau(\xi, t))|^2}}{c} \geq \tau_1, \quad (0 \leq \xi < \infty). \quad (25)$$

Отсюда следует, что «наблюдатель», который в момент времени t находится в точке \mathbf{r} вместо реальной точечной a -ю частицы «видит» кусок траектории этой частицы $\mathbf{r}_a(t')$ в прошлые времена $-\infty < t' \leq t - \tau_1$. В результате локальное поле, создаваемое в точке

\mathbf{r} в момент времени t коллективом частиц, определяется целым «клубком», состоящим из траекторий всех частиц системы. Такая картина эквивалентна фрагментации точечных частиц — источников поля — на «делокализованные» объекты. Таким образом, динамика частиц, взаимодействующих через релятивистское скалярное поле (16), нелокальна и по пространственным переменным, и по времени.

О задаче Коши для системы атомов, погруженных во вспомогательное скалярное поле

Релятивистская динамика системы, состоящей из атомов и создаваемых ими полей, определяется системой уравнений (10) и (11) вместе с начальными условиями для этих уравнений. Рассмотрим два варианта качественного исследования динамики системы.

1. Система уравнений (10) и (11) исследуется как единое целое вместе с начальными условиями для частиц и полей и граничными условиями для полей. Если условия существования и единственности решения этой системы уравнений выполнены, то в силу инвариантности уравнений движения по отношению к операции обращения времени $t \rightarrow -t$ динамика системы «частицы + поля» обратима. В этом случае начальное состояние системы однозначно определяет как ее будущее, так и ее прошлое.

2. Из системы уравнений (10) и (11) исключить полевые переменные $\varphi_s(x)$. Для этого требуется подставить решение (16) в уравнение движения для атомов. Поскольку согласно (16) функции $\varphi_s(x)$ зависят от всей предыстории динамики частиц, то уравнения, описывающие динамику атомов, являются функционально-дифференциальными уравнениями запаздывающего типа. Следовательно, задание начальных условий для подсистемы частиц недостаточно для однозначной разрешимости задачи Коши. Неоднозначность (непредсказуемость) решений задачи Коши уравнений динамики атомов обусловлена игнорированием «скрытых» полевых степеней свободы или (в другой форме) игнорированием всей «скрытой» предыстории динамики атомов. Введение нефизической концепции вероятности для объяснения неоднозначности эволюции классической системы атомов не является необходимым.

Заключение

Основные положения и выводы настоящей работы состоят в следующем.

– Каждому парному центральному межатомному потенциалу $v(r)$ соответствует однозначно определяемое дифференциальное уравнение в частных производных относительно вспомогательного статического поля $\varphi(\mathbf{r})$, создаваемого покоящимися атомами.

– Дифференциальному уравнению для статического вспомогательного поля соответствует однозначно определяемое ковариантное релятивистское динамическое

поле $\varphi(\mathbf{r}, t)$. Это поле обуславливает динамику атомов в терминах релятивистской классической теории частиц и полей. В случае неподвижных атомов это поле эквивалентно статическим межатомным потенциалам, широко используемым, например, при исследовании системы частиц в рамках молекулярной динамики.

– Вспомогательное скалярное поле как в статическом, так и в более общем динамическом случае является суперпозицией элементарных полей $\varphi_s(\mathbf{r}, t)$, каждое из которых удовлетворяет уравнениям типа Клейна-Фока-Гордона. Эволюция элементарных полей определяется мгновенной локальной плотностью числа частиц. Параметры μ_s этих элементарных полей определяются особыми точками фурье-образа межчастичного статического потенциала или уравнением (6).

– Функционал действия системы атомов, взаимодействующих через вспомогательное поле, содержит вклады свободных атомов, всех свободных элементарных полей и перекрёстных взаимодействий между всеми атомами с одной стороны и всеми элементарными полями с другой стороны.

– Описание необратимой динамики атомов и эволюции вспомогательного поля основано только на релятивистских ковариантных уравнениях и принципе причинности и не требует введение искусственных предположений и конструкций.

– Массивность элементарных вспомогательных полей приводит к множественности запаздываний взаимодействий между атомами. Поэтому потенциал поля точечного источника в 4-точке (\mathbf{r}, t) определяется не единственной точкой $(\mathbf{r}_a(\tau), \tau)$ мировой линии источника, удовлетворяющей условию (22), а всеми точками мировой линии, параметризуемыми переменной ξ в соответствии с условием (19).

– Задача Коши для системы «атомы + вспомогательные поля» при определенных условиях допускает существование и единственность динамики этой системы. Задание начальных условий только атомов недостаточно для однозначной разрешимости задачи Коши как для системы в целом, так и для подсистемы атомов. Это является одной из причин как необратимости, так и явления эредитарности систем.

Список литературы

1. Rowlinson J. S. Cohesion: A Scientific History of Intermolecular Forces. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 343 p.
2. Kaplan I. G. Intermolecular Interactions: Physical Picture, Computational Methods and Model Potentials. Chichester: Wiley, 2006. 375 p.
3. Stone A. The Theory of Intermolecular Forces. Oxford: Oxford University Press, 2013. 352 p.
4. Метод молекулярной динамики в физической химии: сборник обзоров: посвященных памяти А. Г. Гривцова / отв. редактор Ю. К. Товбин. Москва: Наука, 1996. 333 с.

5. Kamberaj H. *Molecular Dynamics Simulations in Statistical Physics: Theory and Applications*. Cham: Springer, 2020. 470 p.
6. Kun Zhou, Bo Liu. *Molecular Dynamics Simulation: Fundamentals and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2022. 374 p.
7. Zakharov A. Y., Zubkov V. V. Field-theoretical representation of interactions between particles: Classical relativistic probability-free kinetic theory // *Universe*. 2022. 8 (5). 281. DOI: 10.3390/universe8050281
8. Захаров А. Ю., Захаров М. А. Релятивистская модель межатомных взаимодействий в конденсированных системах // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023. 25 (4). 494-504. DOI: 10.17308/kcmf.2023.25/11480
9. Морс Ф., Фешбах Г. *Методы теоретической физики: в 2-х т: перевод с английского*. Москва: Изд-во инстран. лит., 1958-1960. Т.1. Москва, 1958. 932 с. Т. 2. Москва, 1960. 896 с.
10. Иваненко Д. Д., Соколов А. А. *Классическая теория поля: новые проблемы*. Москва; Ленинград: ГИТТЛ, 1951. 480 с.

References

1. Rowlinson J. S. C. *A Scientific History of Intermolecular Forces*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 343 p.
2. Kaplan I. G. *Intermolecular Interactions: Physical Picture, Computational Methods and Model Potentials*. Chichester: Wiley, 2006. 375 p.
3. Stone A. *The Theory of Intermolecular Forces*. Oxford: Oxford University Press, 2013. 352 p.
4. Metod molekulyarnoj dinamiki v fizicheskoj himii: sbornik obzorov: posvyashchennykh pamyati A. G. Grivtsova [The method of molecular dynamics in physical chemistry: collection of reviews: dedicated to the memory of A. G. Grivtsov]. Exec. editor Yu. K. Tovbin. Moscow: Nauka, 1996. 169 p.
5. Kamberaj H. *Molecular Dynamics Simulations in Statistical Physics: Theory and Applications*. Cham: Springer, 2020. 470 p.
6. Kun Zhou, Bo Liu. *Molecular Dynamics Simulation: Fundamentals and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2022. 374 p.
7. Zakharov A. Y., Zubkov V. V. Field-theoretical representation of interactions between particles: Classical relativistic probability-free kinetic theory // *Universe*. 2022. 8 (5). 281. DOI: 10.3390/universe8050281
8. Zakharov A. Yu., Zakharov M. A. Relativistic model of interatomic interactions in condensed systems // *Kondensirovannyye Sredy I Mezhfaznye Granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2023. 25 (4). 494-504. DOI: 10.17308/kcmf.2023.25/11480

9. Morse Ph., Feshbach H. *Metody teoreticheskoy fiziki [Methods of Theoretical Physics]: in 2 volumes: translated from English. Vol. 1. Moscow: Izd-vo Inostran. lit., 1958. 932 p. Vol. 2. Moscow, 1960. 896 p.*

10. Ivanenko D. D., Sokolov A. A. *Klassicheskaya teoriya polya: novyye problemy [Classical Field Theory: new challenges]. Moscow-Leningrad: GITTL, 1951. 480 p.*

Информация об авторах

Захаров Анатолий Юльевич – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-7850-0086, Anatoly.Zakharov@novsu.ru

Захаров Максим Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9144-340X, Maxim.Zakharov@novsu.ru

Зубков Виктор Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Тверской государственный университет (Тверь, Россия), ORCID: 0000-0003-0745-7807, Zubkov.VV@tversu.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 535-6:539.382:539.52

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).436-452

Поступила в редакцию / Received 24.06.2024

ГРНТИ 25.31.21+30.19.57+30.19.25

Специальность ВАК 1.3.8; 2.2.2

Принята к публикации / Accepted 28.08.2024

Научная статья

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ДЕФОРМАЦИИ СТРУКТУР НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ X30H60M9 И X23H65M13 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Михайлов Д. Л.^{1,2}, Ермишкин В. А.², Минина Н. А.²

¹ ООО «Промдеталь» (Великий Новгород, Россия)

² Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия)

Аннотация Исследована связь между кинетикой деформации и внутренними напряжениями образцов однофазных никелевых сплавов X30H60M9 и X23H65M13, формирующимися в процессе деформации растяжением с одинаковой скоростью. Определено, что одним из показателей, определяющих и характеризующих структурное состояние, является показатель скорости деформационного упрочнения – θ ($\theta=d\sigma/d\varepsilon$). С помощью фотометрических методов произведена оценка структурного состояния образцов. Результаты теоретической оценки, полученные фотометрическим способом, подтверждены экспериментом. Определено, что более стабильным является структурное состояние образца сплава X30H60M9.

Ключевые слова: яркость, тон, растяжение, коэффициент деформационного упрочнения, стабильность структуры, сплав X30H60M9, сплав X23H65M13

Для цитирования: Михайлов Д. Л., Ермишкин В. А., Минина Н. А. Сравнительный анализ кинетики деформации структур никелевых сплавов X30H60M9 и X23H65M13 по результатам испытаний на растяжение // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 436-452. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).436-452

Research Article

COMPARATIVE ANALYSIS OF DEFORMATION KINETICS OF STRUCTURES OF NICKEL ALLOYS X30H60M9 AND X23H65M13 ACCORDING TO THE RESULTS OF TENSILE TESTS

Mikhailov D. L.^{1,2}, Ermishkin V. A.², Minina N. A.²

¹ LLC "PROMDETAL" (Veliky Novgorod, Russia)

² A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Abstract The relationship between the kinetics of deformation and internal stresses of samples of single-phase nickel alloys X30H60M9 and X23H65M13, formed during tensile deformation, has been studied. It has been established that one of the indicators that determines and characterizes the structural state is the indicator of the strain hardening coefficient – θ ($\theta=d\sigma/d\varepsilon$). Using photometric methods, the structural state of the samples was assessed. It was determined by theory and confirmed by experiment that the structural state of the X30H60M9 alloy sample is more stable, for identical test conditions.

Keywords: *brightness, tone, stretching, strain hardening coefficient, structure stability, alloy X30N60M9, alloy X23N65M13*

For citation: Mikhailov D. L., Ermishkin V. A., Minina N. A. Comparative analysis of deformation kinetics of structures of nickel alloys X30N60M9 and X23N65M13 according to the results of tensile tests // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 436-452. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).436-452

Введение

Одним из основополагающих факторов кинетики деформации необратимого формоизменения кристаллических, металлических, материалов при внешнем воздействии, при механическом растяжении, является величина и распределение внутренних напряжений, возникающих в процессе деформирования и возможностями их релаксации.

Экспериментальные исследования деформации и внутренних напряжений образцов сплавов X30N60M9 и X23N65M13 были проведены при комнатной температуре и постоянной скорости. Скорость растяжения образцов составила $v_p = 1$ мм/мин.

Цель работы – экспериментально подтвердить результаты, полученные фотометрическим способом, в различии кинетических характеристик деформирования образцов сравниваемых сплавов в условиях развития дислокационной структуры сплавов. Данные исследования необходимы по причине того, что сравниваемые сплавы являются перспективными, конструкционными материалами и предназначены для химических реакторов на переделах минерального сырья в условиях нагрева до 650°C. На основании этого сплавы должны быть прочными, деформируемыми и свариваемыми. Для чего определим различие в стабильности структур к механическому нагружению. Известно, что именно кинетика накопления микротрещин определяет долговечность материала сплава. Кинетическое учение академика Журкова С. Н. утверждает [1], что в классической области температур, когда тепловые колебания починаются статистике Больцмана, элементарными актами процессов, ведущих к разрушению твердого тела, являются разрывы напряженных межатомных связей, локальными флуктуациями энергии.

В ходе выполнения работы экспериментально необходимо подтвердить, что всякое изменение формы отдельного зерна как кристалла, входящего в некоторую систему, требует какого-то количества независимых систем скольжения. Соответственно, можем допустить некоторую комбинацию систем скольжения (далее КСС) которая обеспечивает долговечность материала. Когда КСС имеет большую степень свободы, в этом случае будет разрешена меньшая скорость деформационного сдвига, соответственно, большая скорость убывания деформационного упрочнения – θ .

Исследуемые материалы и методы исследования

В настоящей работе исследовались образцы коррозионностойких металлических материалов – никелевых композиций, сплавов Х30Н60М9 [2], Х23Н65М13, структуры обоих зафиксированы в однофазном состоянии, ГЦК-решетка, закалкой, закалочные мероприятия проведены при температурах 1107°С и 1135 °С, соответственно. Охлаждение образцов произведено погружением в воду, $T_{\text{воды}} = 23^{\circ}\text{C}$, балл зерна для структур обоих сплавов составил №2-3. Данные о химическом составе образцов исследованных сплавов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Химические составы сплавов Х30Н60М9 и Х23Н65М13

№ обр.	Элементный состав, мас. %											
	Ni	Cr	Mo	Al	Fe	Mn	C	La	Nb	Si	S	P
1	Осн.	29,6	8,75	0,21	0,01	0,003	0,006	0,002	0,00	0,018	0,0025	0,0074
2	Осн.	23,21	12,78	0,11	0,47	0,03	0,005	0,00	0,03	0,06	0,003	0,004

Сплав №1 – сплав Х30Н60М9 (шифр «Раствор-Н», изготовитель: ФГУП «ВИАМ», г. Москва).

Сплав №2 – сплав Х23Н65М13 (в марке ХН62М, изготовитель: АО «МЗ Электросталь», г. Электросталь).

Теоретические данные

Более оптимальное структурное состояние образца сплава Х30Н60М9, после проведенной общей деформации растяжением, засвидетельствовал разработанный фотометрический метод оценки структурного состояния твердого тела [3].

Для цветных изображений эталонов образцов (образцов до деформации, индекс «0») и рабочих частей – «шеек» (образцов после деформации, индекс «1»), (рисунок 1), были применены вычислительные процедуры, с помощью которых были рассчитаны нормированные показатели отраженных плотностей тонов и яркостей в спектральных группах, соответственно – Q и L, светового потока от поверхности образца, в интервале [0, 1], где 0 – полное поглощение образцом светового потока, 1 – полное отражение. Расчет был произведен для равнозначных размером изображений, 72x242 пкс., в графическом формате .jerg. Были оценены поверхности образцов с чистотой не менее 0,8 мкм.



Рисунок 1. Изображение сравниваемых образцов сплавов, в графическом формате .jerg. Поз.1, Поз.2 – «шейки».

Далее в работе был введен безразмерный фотометрический параметр оценки – Ψ структурного состояния поверхностей как частное текущих показателей тона и яркости.

$$\Psi_i = Q_i / L_i, \quad (1)$$

где Q и L – показатели отраженных плотностей тона и яркости в спектральных группах, соответственно. Индекс – i : 0 – изображение образцов до деформации, 1 – после деформации (таблица 2).

Таблица 2. Показатели яркости (Li) и тона (Qi) отраженного видимого света в цветовой спектральной группе для образцов X30H60M9 и X23H65M13

№ обр.	Сплав	L ₀	Q ₀	Ψ_0	L ₁	Q ₁	Ψ_1
1	X30H60M9	0,5230	0,4986	0,9534	0,5232	0,4340	0,8295
2	X23H65M13	0,5914	0,4454	0,7532	0,6035	0,3323	0,5006

Спектр яркости отражения от поверхности материала формируется в результате отражения фотонов видимого света на электронах. Любые химические (атомы легирующих и примесных элементов и их скопления, выделения фазовых составляющих) или физические (дефекты кристаллической решетки, границы зерен, субзерен) неоднородности материалов меняют плотность электронных состояний [4]. Поэтому различие в результатах отраженного, для одинаковых условий эксперимента, свидетельствует о различиях электронных состояний для отражаемых металлических поверхностей. Следовательно, можем заключить о различиях в структурных состояниях основной фазы, которая в нашем исходном случае является однофазной.

Кинетика фотометрического показателя (таблица 2, рисунок 2) для сравниваемых сплавов была определена как

$$d\Psi_i = d(Q_i / L_i) / d\varepsilon_i, \quad (2)$$

где Q_i, L_i, ε_i – соответственно, плотность тона, плотность яркости, деформация

Анализируя зависимости на рисунке 2, необходимо отметить о различии в кинетике зависимостей 1 и 2 образцов сплавов. Установлено, что зависимости являются убывающими, скорость убывания для зависимости 2 выше. Установленный факт позволяет заключить о различном изменении излучательной способности образца 2 для видимого света, о большем количестве рассеяного, соответственно, о различной стабильности структурных состояний, структур твердого раствора для сравниваемых сплавов, относя более качественное состояние, соответственно, лучшее сопротивление деформации (прочность) в пользу структуры сплава Х30Н60М9.

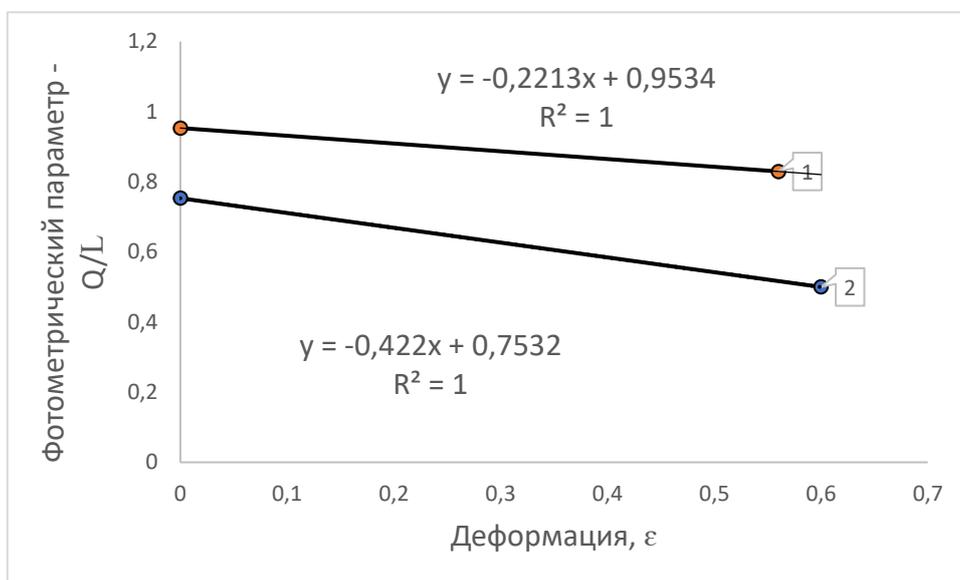


Рисунок 2. Изменение фотометрического показателя в интервале общей деформации образцов сплавов Х30Н60М9, кривая 1 – Х23Н65М13, кривая 2 – данные таблицы 2

Подтверждая вышеобозначенное, также необходимо привести данные, полученные расчетом тонов для сравниваемых образцов, сравнивая рисунки 3 и 4, можем установить, что плотность тона для состояния образца 1 выше, что характеризует структурное состояние с большей степенью организации.

Экспериментальные данные

Основным инструментом оценки стабильности параметров механических свойств металлических материалов сплавов, их поведения, является построение диаграммы деформирования. Диаграмма деформирования строится в результате стандартного эксперимента на растяжение образца, который в нашем случае был плоским.

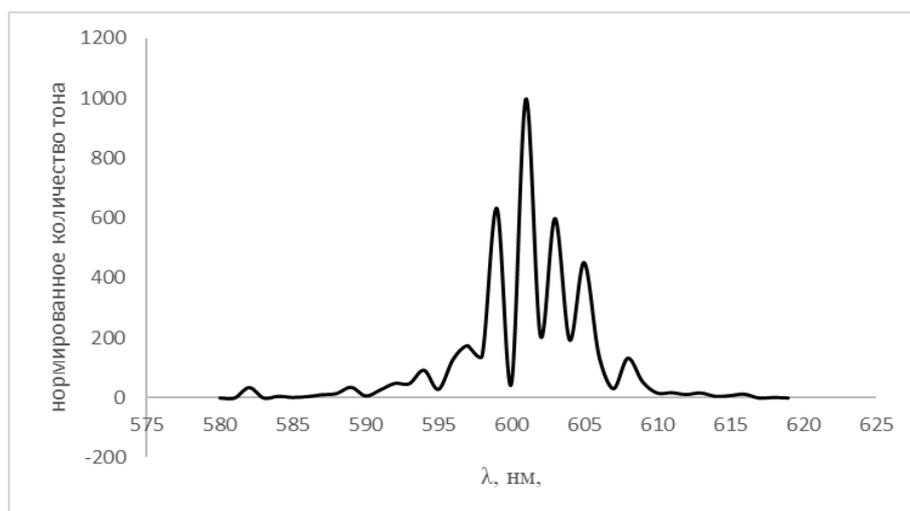


Рисунок 3. Сплав Х30Н60М9. Зависимость нормированного количества тона в спектральной цветовой группе, для «шейки». Количество тона на пиксел в спектральной группе – 0,4340

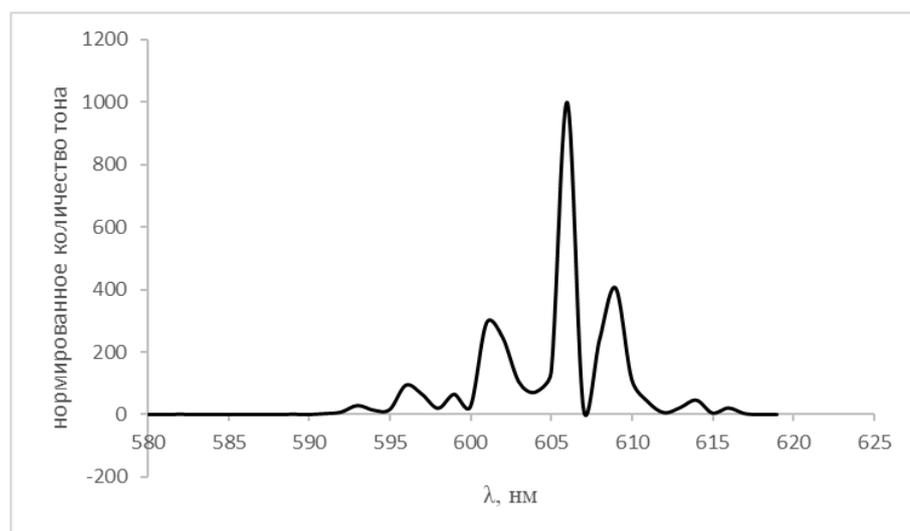


Рисунок 4. Сплав Х23Н65М13. Зависимость нормированного количества тона в спектральной цветовой группе, для «шейки». Количество тона на пиксел в спектральной группе – 0,3323

В работе испытания образцов на растяжение были проведены с помощью разрывной машины ИНСТРОН (усилие 10 тн.) в соответствии с требованиями отечественного стандарта [5]. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты испытаний на растяжение плоских образцов сплавов Х30Н60М9 и Х23Н65М13, $v_{\text{растяжение}} = 1 \text{ мм/мин.}$, RT (комнатная температура)

	Отн. удл.	Предел текучести (МПа)	Предел прочности (МПа)	Нагрузка (kgf)	Длина (mm)	Толщина (mm)	Ширина (mm)	Примечание
1	66,10	334	768	4569	50,00	5,750	10,15	Х30Н60М9
2	75,63	339	735	4686	50,00	6,040	10,35	Х23Н65М13

По результатам эксперимента на растяжение была построена условная диаграмма деформирования, представляющая собой связь между напряжениями σ и деформациями ε (рисунки 5, 6). Формулы для расчета представлены ниже:

$$\sigma = P / S_0, \quad (3)$$

$$\varepsilon = \Delta l / l_0, \quad (4)$$

где P – осевая нагрузка (деформирующее усилие), S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, l_0 – начальная расчетная длина образца, Δl – абсолютное удлинение образца.

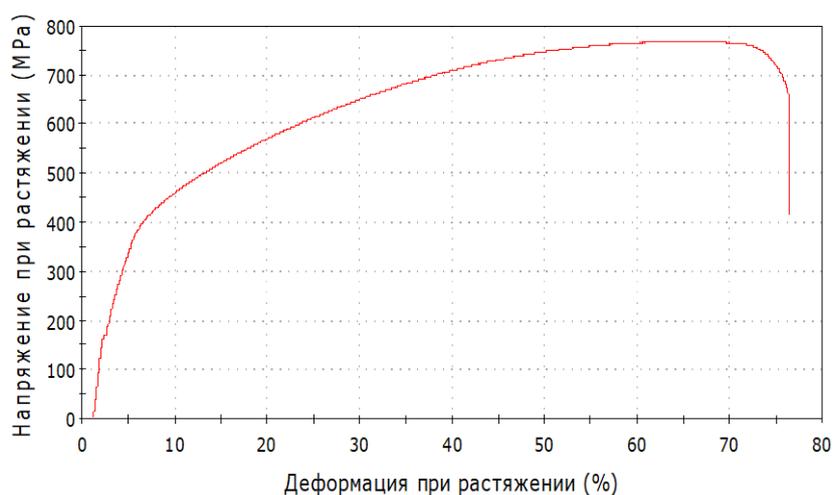


Рисунок 5. Образец 1, сплав X30H60M9

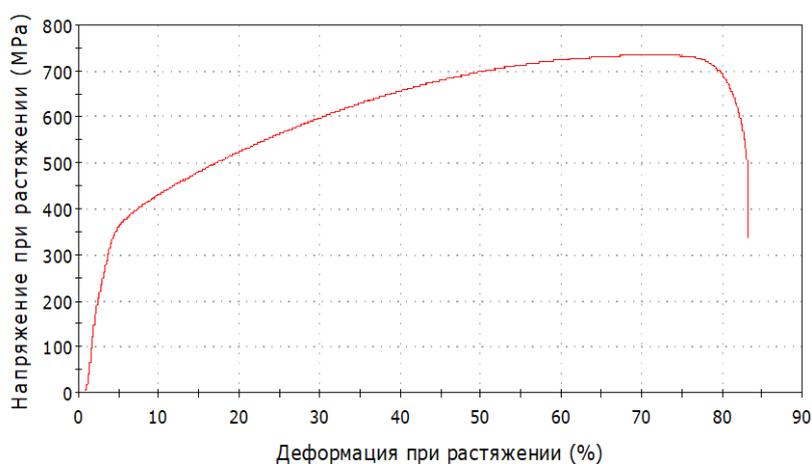


Рисунок 6. Образец 2, сплав X23H65M13

На рисунках 5 и 6 представлены условные кривые упрочнения, которые были получены в результате эксперимента. Существенным недостатком стандартной методики является невозможность учесть процесс разупрочнения, который в обязательном порядке сопровождает процесс упрочнения. С физической точки зрения необходимо понимания напряжения с учетом изменения площади поперечного сечения образца, в этом случае оно будет объективным – истинным, соответственно, необходимо понимание предела текучести для каждого значения степени деформации.

Очевидно, что истинные напряжения вследствие образования шейки растут до разрушения образца. Следует отметить, что условные и истинные кривые деформирования начинают расходиться еще до образования шейки, вследствие утонения образца.

Значение деформации ε_b , соответствующее моменту начала образования шейки, необходимо для корректного построения расчётной условной кривой деформирования, так как основные используемые для расчётов прочности программные комплексы не допускают ввод участка кривой деформирования, соответствующего этапу развития шейки. Использование вместо ε_b относительного удлинения (δ) некорректно ввиду различий их величин. Стоит отметить и то, что ε_b по сравнению с δ является более стабильной характеристикой [6].

Для повышения точности описания поведения структур сплавов Х30Н60М9 и Х23Н65М13 необходимо провести дополнительные исследования. Применим истинные кривые деформирования. Для построения которых необходимо знать, в том числе, величину напряжения, соответствующую моменту разрушения – $\sigma_{разр}$.

При проведении испытаний на растяжение не фиксируется значение деформации ε_b , соответствующее моменту начала образования шейки. Это обусловлено как тем, что в ГОСТ на проведение испытания на растяжение, определение этой величины не регламентировано.

Условная диаграмма деформирования недостаточно точно представляет свойства материала, так как не учитывается изменение площади сечения в процессе испытания и образование шейки. До образования шейки, то есть максимума на условной диаграмме деформирования, для определения истинных напряжений $\sigma_{ис}$ и деформаций $\varepsilon_{ис}$ пользуются следующими соотношениями:

$$\sigma_{ис} = \sigma_{усл} (1 + \varepsilon_{ис}), \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ис} = \ln(1 + \varepsilon_{усл}). \quad (6)$$

Для сравнительного анализа, были рассчитаны зависимости, где за исходные данные были взяты результаты испытания на растяжение, в интервале деформации. Для обоих сплавов были обработаны массивы данных и построены диаграммы в

истинных значениях деформаций и напряжений структурных состояний сплавов. Зависимости определены из расчета 30 тыс. точек исходных данных для каждого образца. Отметим, что на рисунках 5 и 6 показаны условные машинные кривые растяжения исследуемых образцов. Видно, что деформационное упрочнение материалов образцов сплавов протекает похожим образом. Прочностные характеристики также схожи.

Геометрическая форма кривых на рисунках 5 и 6 – параболическая, подсказывает класс функций, дающих их математическое описание в координатах « $\sigma_i - \epsilon^{0,5}$ ». Из сопоставления рисунков 5 и 6 для условных значений и рисунков 7 и 8 для истинных значений в координатах « $\sigma_i - \epsilon^{0,5}$ » в наглядной форме видны преимущества в представлении результатов испытаний на растяжение.

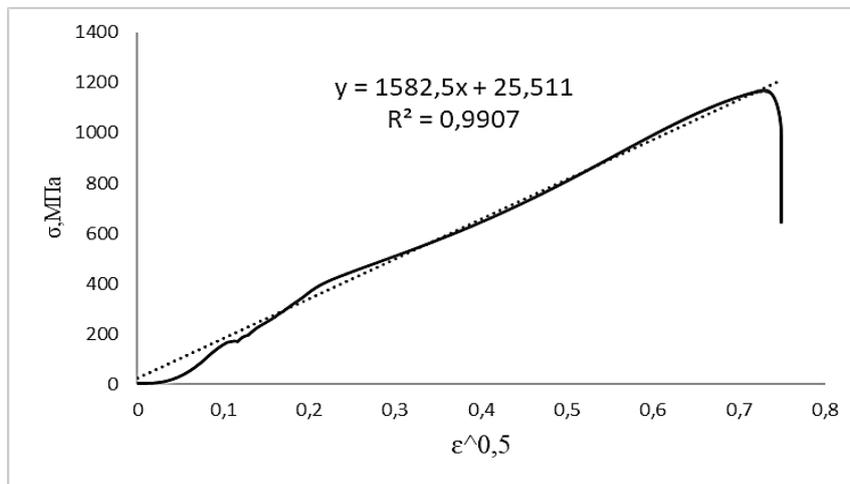


Рисунок 7. Сплав X30N60M9. Диаграмма деформирования в осях $\sigma_i - \epsilon_i^{0,5}$, в интервале общей деформации. Кривая характеризует деформационное упрочнение структуры образца, $x_i = \epsilon_i^{0,5}$

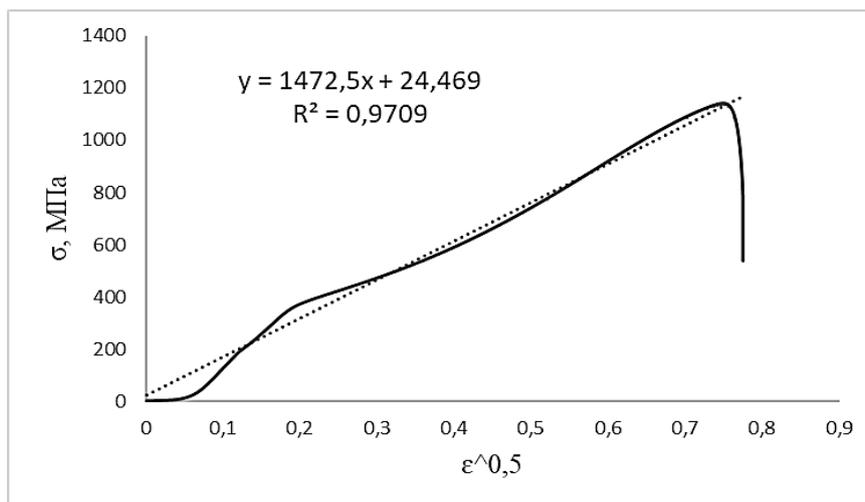


Рисунок 8. Сплав X23N65M13. Диаграмма деформационного упрочнения, $\sigma_i - \epsilon_i^{0,5}$, в интервале общей деформации. Кривая характеризует деформационное упрочнение структуры образца, $x_i = (\epsilon_i)^{0,5}$

Выполнив дифференциальное исчисление аппроксимирующей функции (рисунок 7), имеем: $y' = f(\epsilon_i) d\epsilon$, $y' = 1582,5 / 2 (\epsilon_i^{-0,5})$. Графический зависимость представлена на рисунке 9.

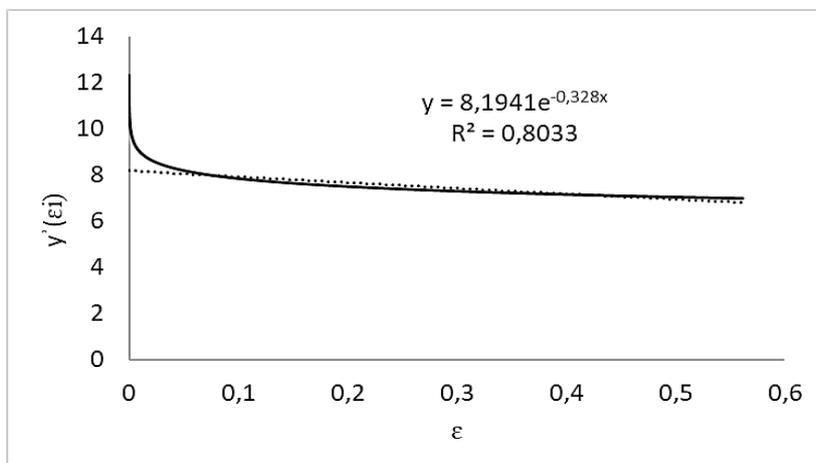


Рисунок 9. Сплав X30H60M9. Дифференциальная кривая функции упрочнения. Ось ординат в логарифмических координатах. Описан интервал общей деформации

Анализируя рисунок 9, очевидно, что функция является убывающей, показатель скорости затухания деформационного упрочнения для аппроксимирующей функции образца сплава X30H60M9 $\theta_1 = -0,328$, функция является убывающей. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,8033$, обеспечивает высокий показатель коэффициента корреляции, не менее 0,85.

Выполнив дифференциальное исчисление аппроксимирующей функции (данные на рисунке 8), имеем: $y' = f(\epsilon_i) d\epsilon$, $y' = 1472,5 / 2 (\epsilon_i^{-0,5})$. Графически зависимость представлена на рисунке 10.

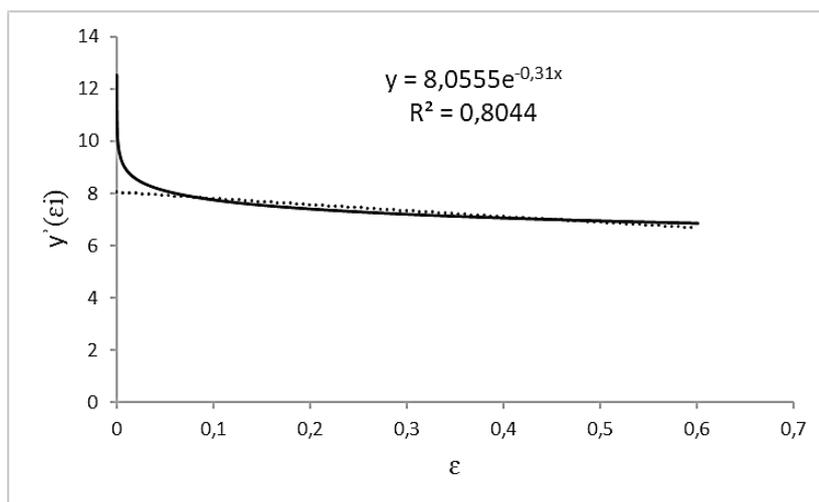


Рисунок 10. Сплав X23H65M13. Дифференциальная кривая функции упрочнения. Ось ординат в логарифмических координатах. Описан интервал общей деформации

Как показано на рисунке 10, показатель скорости затухания деформационного упрочнения образца сплава Х23Н65М13 $\theta_2 = -0,31$, функция является убывающей. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,8044$, обеспечивает высокий показатель коэффициента корреляции, не менее 0,85.

Необходимо отметить, что, анализируя полученные данные (рисунки 7 и 8), был сделан вывод, который поставил под сомнение результаты, полученные с помощью условных диаграмм деформации. Рассчитанные истинные диаграммы свидетельствуют о корректировке в оценке пластичности образца сплава Х30Н60М9, вкпе с прочностными характеристиками и определением стабильного структурного состояния в пользу образца сплава Х30Н60М9.

На основании полученных экспериментальных данных, полученных при растяжении, т. е. при производстве деформации, в идентичных условиях, когда скорость растяжения постоянна, было определено, что скорости убывания деформационного упрочнения (или коэффициентов деформационного упрочнения - КДУ) для структур сплавов Х30Н60М9 и Х23Н65М13 различны (рисунки 9 и 10 соответственно). Для сплава Х30Н60М9 скорость убывания выше. Скорости были определены как показатели экспоненциальной зависимости для остатка (предэкспоненциальный множитель) аппроксимирующей функции ($|-0,328| > |-0,31|$).

По результатам расчетов можем заключить, что чем выше скорость убывания деформации, тем более термодинамически устойчивой остается структура образца. В рассматриваемом случае ею является структура материала сплава Х30Н60М9.

Используя знания классической механики, необходимо заключить, что время разрушения образца Х30Н60М9 будет более продолжительным для одинаковых условий испытания образцов. Следовательно, можно утверждать о различии энергосостояний межатомных связей, о более равновесной структуре образца Х30Н60М9.

По данным АО «ЧМЗ», г. Глазов относительное удлинение образцов листового проката сплава «Раствор-Н», содержание С<0,1мас. %, из-ль ФГУП ВИАМ, в состоянии поставки, до испытаний, составило 58%, соответственно, $\sigma = 740$ МПа, $\sigma_{0,2} = 375$ МПа. После выдержки при температуре 550°С в течение 550 часов относительное удлинение для образца сплава «Раствор-Н» (Х30Н60М9) составило 53%, соответственно, $\sigma = 1010$ МПа, $\sigma_{0,2} = 580$ МПа [7]. Соответственно, изменение показателя относительного удлинения – δ , в логарифмических координатах составило – 9%.

По данным АО «НИИ химмаш» г. Москва [8], относительное удлинение образцов листового проката сплава ХН62М (сплав Х23Н65М13), опытная плавка РИ51149 (С = 0,005 мас. %), сертификат №5-67822, АО «МЗ «Электросталь» в состоянии поставки, до испытаний, составило 71%, соответственно, $\sigma = 719$ МПа, $\sigma_{0,2} = 336$ Мпа. После выдержки при температуре 550°С в течение 450 часов относительное удлинение составило 44,4%, соответственно, $\sigma = 1145,5$ МПа, $\sigma_{0,2} =$

570 Мпа. Установлено, что изменение показателя относительного удлинения – δ , по шкале натурального логарифма составило – 46,9%.

Таким образом различие в пластичности сплавов после длительной высокотемпературной выдержки свидетельствует о различной восприимчивости структур образцов сплавов к превращению в идентичных условиях нагружения, о различии структурных состояний.

Из литературных источников [9, 10] известно, что различие в коэффициентах деформационного упрочнения структур твердых растворов сплавов устанавливает различие в показателях энергии дефекта упаковки (ЭДУ) сплавов. Следовательно, в нашем случае (рисунки 7 и 8), можем заключить о различии в ЭДУ – γ , рассматриваемых сплавов, эти показатели пропорциональны [11].

Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований установлено, что релаксация напряженного состояния при производстве общей деформации растяжением происходит посредством развития дислокационной структуры и отдельных двойников (рисунки 11, 12).



Рисунок 11. Сплав X23N65M13. Изображение дислокационной структуры и двойников, x15000

Полученные изображения могут быть прокомментированы следующими размышлениями.

Известно, что деформация преимущественно происходит скольжением по направлениям и плоскостям с плотным участием атомов, и дислокационного механизма, где инструментами является:

- диффузионное скольжение краевых дислокаций,
- диффузионное переползание винтовых дислокаций.

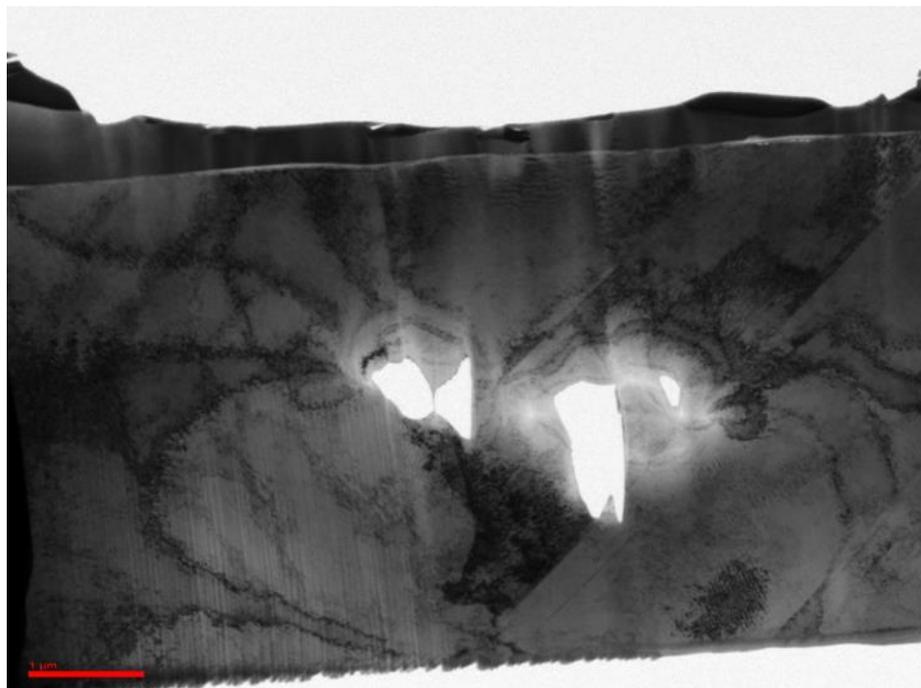


Рисунок 12. Сплав X30Ni60M19. Изображение дислокационной структуры и отдельных двойников, $\times 2550$

Это происходит по причине того, что в процессе деформации резко увеличивается концентрация точечных дефектов (вакансий). Это приводит к ускорению диффузионных процессов. Если эти механизмы не обеспечивают минимального энергосостояния структуры, в этом случае можем ожидать развития деформации структуры двойникованием, где деформация будет локализована на двойниковых границах.

1. Известно, что превращение дислокационной структуры включает в себя скольжение в плоскости сдвига, переползание краевых компонент в соседние плоскости и поперечное скольжение винтовых компонент. Скорость всего регулируется возможностью притока вакансий к дислокациям или возникновением новых вакансий на дислокациях. Легче всего вакансии присоединяются к дислокациям на ступеньках. Поэтому большая концентрация ступенек на дислокациях облегчает процесс перестройки дислокационной структуры. Появление вакансий – это процесс, активируемый внесённой энергией. Скорость превращения V_p можно определить следующим выражением:

$$V_p \sim \exp(-E_p/kT), \quad (7)$$

где $E_p = E_j + E_f + E_m$ – энергия активации процесса перестройки дислокационной структуры. В последнем выражении E_j – энергия активации образования ступеньки, E_f – энергия активации образования вакансии, E_m – энергия

активации миграции вакансий. Сумма $E_f + E_m$ равна энергии активации самодиффузии.

2. На рисунках 9 и 10 приведены показатели скоростей (коэффициенты) деформационного упрочнения – θ ($\theta_1 > \theta_2$). Данные были получены расчетным способом по экспериментальным результатам растяжения образцов в одинаковых условиях испытаний. Соответственно, можем заключить о соответствии для ЭДУ сплавов - γ . Таким образом $\gamma_{X30H60M9} > \gamma_{X23H65M13}$.

3. Известно, что определяющую роль играет энергия активации образования ступеньки E_j (5). Известно, что величина E_j связана с энергией дефекта упаковки материала γ : она тем меньше, чем больше γ . Равновесная концентрация ступенек на дислокациях зависит от вложенной энергии также по экспоненциальному закону [11]:

$$n_j \sim \exp(-E_j/kT). \quad (8)$$

4. Следовательно, при меньшей E_j , соответственно, большей ЭДУ, увеличивается концентрация ступенек; следовательно, увеличивается число образующихся на них вакансий и увеличивается скорость перестройки, связанная с переползанием дислокаций, отметим, что в этом случае винтовые дислокации более подвижны.

5. Также необходимо отметить, что, величина энергии дефекта упаковки определяет ширину расщепления дислокаций. Растянутая дислокация может скользить лишь в плоскости дефекта упаковки. Чтобы произошел переход из одной плоскости скольжения в другую, необходимо предварительное стягивание частичных дислокаций в единичную. Это осложняет поперечное скольжение и, следовательно, уменьшает скорость перестройки, особенно если энергия дефекта упаковки мала. В этом случае производство деформации происходит уже с бóльшим участием двойникования структуры.

Обозначенные выше аргументы подтверждают предложенный теоретическим инструментом и подтвержденный экспериментально факт лучшего сопротивления деформации сплава X30H60M9.

Выводы

Одним из определяющих факторов, характеризующим кинетику перестройки структуры, стабильности структурно-фазового состояния, является показатель скорости (коэффициента) деформационного упрочнения, который пропорционален величине энергии дефекта упаковки. Для сравниваемых сплавов было установлено, что чем выше скорость затухания деформационного упрочнения при производстве общей деформации, тем стабильнее (прочнее) своим структурным состоянием остается материал сплава для одинаковых условий нагружения, что позволяет сделать вывод в пользу структурного состояния сплава X30H60M9. Структура сплава

X30H60M9 лучшим способом распределяет внешнее воздействие, участием большего количества систем скольжения, предлагая более устойчивое термодинамическое состояние в идентичных условиях испытаний.

Необходимо отметить, что теоретический результат более стабильного структурного состояния сплава X30H60M9, предложенный оценкой фотометрического параметра, был подтвержден экспериментальными данными, что доказывает возможность оценки кинетики структурного состояния однофазных металлических материалов параметрами видимого света, что предлагает новый, удобный, менее затратный инструмент неразрушающего контроля прогноза повреждаемости металлических конструкций, например, химических реакторов, где конструкционным материалом являются однофазные материалы.

Список литературы

1. Слуцкер А. И. Формула Журкова // XV Петербургские Чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2005 г.: сборник тезисов. Санкт-Петербург. С. 3-4. URL: http://www.issp.ac.ru/ebooks/conf/Chteniya_2005.pdf (Дата обращения: 06.04.2024).
2. Михайлов Д. Л. Патент № 2613805 Российская Федерация, МПК C22C 19/05 (2006.01), C22C 30/00 (2006.01). Коррозионно-стойкий сплав на основе никеля: № 2016105314: заявл. 02.17.2016: опубл. 02.03.2017. 3 с.
3. Михайлов Д. Л., Ермишкин В. А., Минина Н. А., Кулагин С. П. Экспресс-анализ коррозионной стойкости сплавов системы Ni-Cr-Mo (Ni-Cr, Ni-Mo) согласно установленного количества тона в спектральной группе отраженного света // Вестник Новгородского государственного университета. 2023. 3 (132). 470-480. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).470-480
4. Ермишкин В. А., Минина Н. А., Федотова Н. Л. Патент № 2387978 Российская Федерация, МПК G01N 21/55 (2006.01), G01N 25/05 (2006/01). Способ фотометрической диагностики фазовых превращений в твердых телах по данным анализа спектров яркости отражения света от их поверхности: № 2008150799/28: заявл. 12.23.2008: опубл. 04.22.2010 / заявитель Учреждение Российской академии наук Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. 4 с.
5. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение: межгосударственный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 16.07.84 № 2515: взамен ГОСТ 1497-73 / разработан и внесен Министерством черной металлургии СССР. Москва: Стандартиформ, 1986. 24 с.
6. Васильев Б. Е., Волков М. Е., Бредихина Е. Н., Плещеев И. И. Построение расчетных кривых деформирования в обеспечение наполнения банка данных по конструкционной прочности материалов авиационных двигателей // Materials Physics and Mechanics. 2019. 42 (5). 656-670. DOI: 10.18720/MPM.4252019_19
7. Письмо-протокол АО «ЧМЗ» в адрес ИМЕТ РАН №19-101/1860-ИС, 07.02.2022.
8. Харин П. А., Зинченко Н. Г., Медведева Т. М., Шевакин А. Ф., Пантюхин А. П., Половов И. Б., Кабанов И. В. Эксплуатационные и технологические

свойства сплава ХН62М-ВИ // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2019. 3. 48-58.

9. Гиндин И. А., Неклюдов И. М., Оковит В. С., Старолат В. П., Дятлов В. П., Стратиенко В. А. Исследование влияния облучения высокоэнергетичными электронами (250 МэВ) на структуру и свойства алюминия // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение: научно-технический сборник. 1974. 1 (1). 71-73.

10. Вотинов С. Н., Максимкин О. П. К вопросу о роли энергии дефекта упаковки в изменении структуры и свойств металлов и сплавов в результате радиационного и термического воздействия // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение: научно-технический сборник. 2002. 3 (81). 23-30.

11. Пронина Л. Н., Мазилкин А. А., Аристова И. М. Исследование процессов разупрочнения в монокристаллических лентах вольфрама // Физика твердого тела. 1998. 40 (3). 498-502.

References

1. Slutsker A. I. Formula Zhurkova [Zhurkov's Formula] // XV Peterburgskie Chteniya po problemam prochnosti [St. Petersburg Readings on Strength Problems]. Sankt-Peterburg, 12–14 aprelya 2005 g.: sbornik tezisov. Saint-Petersburg. P. 3-4. URL: http://www.issp.ac.ru/ebooks/conf/Chteniya_2005.pdf (Accessed: 06.04.2024).

2. Mikhailov D. L. Patent RF RU № 2613805, MPK S22S 19/05 (2006.01), C22C 30/00 (2006.1). Korrozionno-stoikii splav na osnove nikele [Corrosion-resistant nickel-based alloy]: № 2016105314: decl. 02.17.2016: publ. 02.03.2017. 3 p.

3. Mikhailov D. L., Yermishkin V. A., Minina N. A., Kulagin S. P. Express analysis of the corrosion resistance of alloys of the Ni-Cr-Mo system (Ni-Cr, Ni-Mo) according to the set amount of tone in the reflected-light spectral group // Vestnik NovSU. 2023. 3 (132). 470-480. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).470-480

4. Yermishkin V. A., Minina N. A., Fedotova N. L. Patent RF RU №2387978, MPK GO1N 21/55 (2006.01), GO1N 25/05 (2006/01). Sposob fotometricheskoi diagnostiki fazovikh prevrashchenii v tverdkh telakh po dannim analiza spektrov yarkosti otrazheniya sveta ot ikh poverkhnosti [A method for photometric diagnostics of phase transformations in solids based on the analysis of the brightness spectra of light reflection from their surface]: № 2008150799/28: decl. 12.23.2008: publ. 04.22.2010 / applicant is an institution of the Russian Academy of Sciences, the A. A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences. 4 p.

5. GOST 1497-84. Metalli. Metodi ispitanii na rastyazhenie: mezhgosudarstvennyj standart Rossijskoj Federacii: izdanie oficial'noe: utverzhden i vveden v dejstvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartam ot 16.07.84 № 2515: vzamen GOST 1497-73 / razrabotan i vnesen Ministerstvom chernoj metallurgii SSSR. [Metals. Tensile testing methods: interstate standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Resolution of the USSR State Committee for Standards dated 07/16/84 No. 2515: instead of GOST 1497-73 / developed and introduced by the Ministry of Ferrous Metallurgy of the USSR] Moscow: Standartinform; 1986. 24 p.

6. Vasilev B. Ye., Volkov M. Ye., Bredikhina Ye. N., Pleshcheev I. I. Construction of stress-strain curves for aviation materials database formation // *Materials Physics and Mechanics*. 2019. 42 (5). 656-670. DOI: 10.18720/MPM.4252019_19
7. Pismo-protokol AO «ChMZ» v adres IMET RAN [Protocol letter from ChMZ JSC to IMET RAS] №19-101/1860 -IC, 07.02.2022.
8. Kharin P.A., Zinchenko N.G. Medvedeva T.M., Shevakin A. F., Pantyukhin A. P., Polovov I. B., Kabanov I.V. Operational and technological properties of the CRNi62MO-VI alloy // *Problemi chernoi metallurgii i materialovedeniya* [Problems of ferrous metallurgy and materials science]. 2019. 3. 48-58.
9. Gindin I. A., Neklyudov I. M., Okovit V. S., Starolat V. P., Dyatlov V. P., Stratienco V. A. Issledovanie vliyaniya oblucheniya visokoenergetichnimi elektronami (250 MeV) na strukturu i svoystva alyuminiya [Investigation of the effect of irradiation with high-energy electrons (250 MeV) on the structure and properties of aluminum] // *Voprosi atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnikh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie* [Issues of atomic science and technology. Series: Physics of radiation damage and radiation materials science: scientific and technical collection]. 1974. 1 (1). 71-73.
10. Votinov S. N., Maksimkin O. P. K voprosu o roli energii defekta upakovki v izmenenii strukturi i svoystv metallov i splavov v rezultate radiatsionnogo i termicheskogo vozdeistviya [On the role of packaging defect energy in changing the structure and properties of metals and alloys as a result of radiation and thermal effects] // *Voprosi atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnikh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie* [Issues of atomic science and technology. Series: Physics of radiation damage and radiation materials science: scientific and technical collection]. 2002. 3 (81). 23-30.
11. Pronina L. N., Mazilkin A. A., Aristova I. M. Softening Processes In Single-Crystal Tungsten Ribbons // *Physics of the Solid State*. 1998. 40 (3). 498-502.

Информация об авторах

Михайлов Дмитрий Леонидович – соискатель, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия); директор, ООО «Промдеталь» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-1609-840X, oopromkey@gmail.com

Ермишкин Вячеслав Александрович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9093-8294, vermishkin@imet.ac.ru

Минина Наталья Анатольевна – старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-3782-3858, minina@imet.ac.ru, minina1951@rambler.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 537.9:681.586.773

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).453-465

Поступила в редакцию / Received 29.08.2024

ГРНТИ 29.05.33+47.09.33

Специальность ВАК 1.3.8

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

Научная статья

ВЛИЯНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ НА МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ: ОБЗОР

Саплев А. Ф., Петров В. М.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В статье представлен обзор по изучению влияния внешнего электрического поля на параметры спектра магнитного резонанса в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах. Показано, что в симметричных структурах наблюдается электрически индуцированный сдвиг основной линии магнитного резонанса без изменения ширины линии. В антисимметричных структурах имеет место неоднородное уширение линии, при этом сдвиг линии не наблюдается. В общем случае наблюдается сдвиг резонансной линии и ее уширение. Определены оптимальные соотношения толщин компонентов слоистых структур различных типов для получения наибольшей величины смещения и уширения резонансной линии. Рассмотрен также магнитоэлектрический эффект в области магнитоакустического резонанса. При этом использование биморфного пьезоэлектрического слоя позволяет наблюдать гигантский МЭ эффект при наложении частот магнитного резонанса и высших мод электромеханического резонанса.

Ключевые слова: *магнитный резонанс, магнитоакустический резонанс, слоистая структура, магнитоэлектрический эффект, биморфный пьезоэлектрический преобразователь*

Для цитирования: Саплев А. Ф., Петров В. М. Влияние пьезоэлектрической фазы на магнитный резонанс в слоистых структурах: обзор // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 453-465. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137). 453-465

Research Article

PIEZOELECTRIC PHASE EFFECT ON MAGNETIC RESONANCE IN LAYERED STRUCTURES: A REVIEW

Saplev A. F., Petrov V. M.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The article presents a review of the external electric field effect on the magnetic resonance spectrum in layered ferrite-piezoelectric structures. It is shown that in symmetric structures, an electrically induced shift of the magnetic resonance line is observed without line broadening. In antisymmetric structures, an inhomogeneous line broadening takes place, while a line shift is not observed. In the general case, a shift of the resonance line and its broadening are observed. For the different layered structures, the optimum component thickness ratios are determined to obtain the maximal values of the resonance line shift and broadening. The magnetoelectric (ME) effect in the magnetoacoustic resonance region is also considered. In this case, the use of a piezoelectric bimorph layer makes it possible to observe a giant ME effect at overlaying the magnetic resonance frequency and electromechanical resonance higher modes frequencies.

Keywords: *magnetic resonance, magnetoacoustic resonance, layered structure, magnetoelectric effect, piezoelectric bimorph*

For citation: Saplev A. F., Petrov V. M. Piezoelectric phase effect on magnetic resonance in layered structures: a review // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 453-465. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).453-465

Введение

Одним из актуальных объектов исследований в области физического материаловедения является магнитоэлектрическое (МЭ) взаимодействие композиционных материалов [1-4]. Большинство однофазных материалов обладают малыми значениями МЭ коэффициентов, что затрудняет их практическое использование. При этом композиционные магнитоэлектрические материалы и структуры позволяют получить более сильный МЭ эффект, наблюдаемый при комнатной температуре. Имеющаяся связь между электрической и магнитной подсистемами открывает возможность использования таких материалов при проектировании датчиков магнитного поля, переключателей устройств, фильтров и других электронных компонентов. К достоинствам слоистых структур можно отнести высокую степень поляризации сегнетоэлектрической фазы, а также возможность использования магнитной компоненты с большой магнитоэлектрической связью. Указанные свойства позволили получить слоистые структуры с гигантским МЭ взаимодействием.

Известны многочисленные исследования МЭ эффекта в слоистых структурах [5-8], изучающих возникновение электрической поляризации, когда материал подвергается воздействию внешнего магнитного поля, или намагниченности, когда материал подвергается воздействию внешнего электрического поля. Доказано, что сила МЭ коэффициентов на несколько порядков превышает значения этих коэффициентов в однофазных материалах. Поэтому создание новых МЭ материалов с гигантским МЭ взаимодействием является важным шагом, направленным на практическое применение МЭ взаимодействия в композиционных материалах.

Представленная работа посвящена рассмотрению микроволнового МЭ эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах и влиянию пьезоэлектрической фазы на параметры магнитного резонанса.

Микроволновый магнитоэлектрический эффект в магнитоэлектрических структурах

Рассмотрим ферритовый слой, помещенный в смещающее магнитное поле H_0 . Будем считать это поле достаточно сильным для того, чтобы магнитоэлектрический слой был однородно намагничен. Известно, что для наблюдения ферромагнитного резонанса необходимо присутствие переменного магнитного поля. Пусть подмагничивающее поле H_0 направлено вдоль оси OZ , тогда переменное поле H должно лежать в плоскости $ХОУ$.

Для расчета изменения спектра магнитного резонанса под действием электрически индуцированного механического напряжения необходимо найти решение уравнения движения намагниченности [7-10].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\gamma[M, H_{eff}] \quad (1)$$

Методика определения эффективного поля H_{eff} и решения уравнения движения намагниченности подробно рассмотрена в [7-9]. При этом в плотности свободной энергии монокристалла феррита учтена энергия магнитокристаллической анизотропии, анизотропии формы и магнитоупругой энергии

Для расчета смещения линии ФМР определен тензор механических напряжений, в ферритовом слое [3, 4, 11] использован обобщенный закон Гука и материальные уравнения для фаз используемого образца. При этом учтены изгибные деформации структуры. Предполагается, что все слои конструкции имеют идеальный механический контакт.

Применим предложенную модель к важному случаю, когда в двухслойной структуре ЖИГ – ЦТС магнитное поле H параллельно оси ЖИГ [11]. В этом случае геометрические коэффициенты размагничивания составляют $N_{11}^F = N_{22}^F = 0$ и $N_{33}^F = 4\pi$. Полученное уравнение средней восприимчивости довольно длинное, что упрощает поиск численного решения и его графическое отображение. При численной оценке использовались следующие материальные параметры материала ЦТС: пьезоэлектрический коэффициент $\rho_{d31} = -175 \cdot 10^{-12}$ м/В, коэффициент податливости $\rho_{s11} = 15 \cdot 10^{-12}$ м²/Н. Для ЖИГ использованы материальные параметры: константы магнитострикции $\lambda_{100} = -1,4 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{111} = -2,4 \cdot 10^{-6}$. $4\pi M_0 = 1750$ Гс; поле кристаллографической анизотропии $H_a = -42$ Э; коэффициент податливости ${}^m s_{11} = 4,8 \cdot 10^{-12}$ м²/Н.

Двухслойная структура состава железо-итриевый гранат (ЖИГ) – пьезоэлектрик ЦТС показана на рисунке 1.

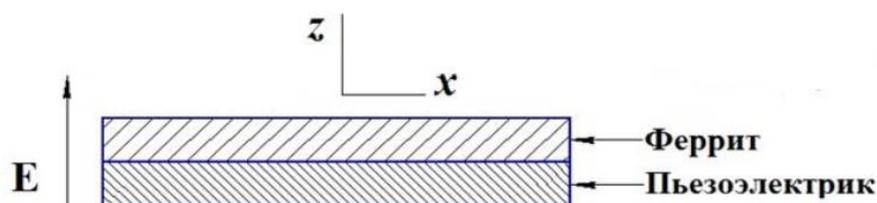


Рисунок 1. Двухслойная структура феррит-пьезоэлектрик

На рисунке 1 представлена зависимость мнимой части микроволновой восприимчивости от поля смещения на частоте 9,3 ГГц. 5 для двухслойного (111) ЖИГ и ЦТС.

На рисунке 2 ясно видны два важных эффекта. Приложение электрического поля напряженностью 30 кВ/см уширяет резонансную кривую и слегка смещает ее вниз. Ширина линии ФМР увеличилась до 20 Э.

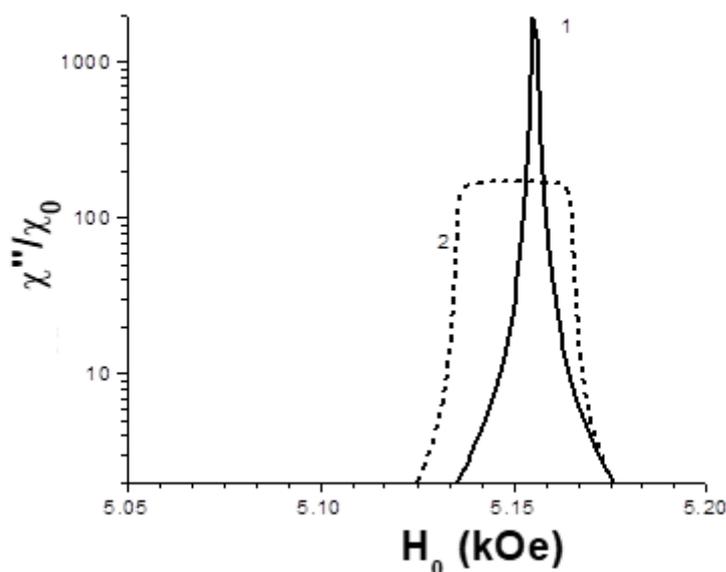


Рисунок 2. Теоретическая зависимость мнимых частей магнитной восприимчивости от магнитного поля для двухслойной структуры состава ЖИГ (111) и ЦТС на частоте 9,3 ГГц в отсутствие внешнего электрического поля (1) и в электрическом поле $E=30$ кВ/см (2). Отношение толщины ЖИГ к толщине ЦТС равно 1,2

На рисунке 3 показана зависимость от магнитного поля уширения линии ФМР бислоев ЦТС и ЖИГ на подложке из гадолиний-галлиевого граната. Как видно из рисунка 3, максимальное уширение линии ФМР равно 2,5 Э наблюдается при отношении толщины слоя ЖИГ к толщине слоя ЦТС, равном 1,2.

Трехслойная структура из пьезоэлектрического материала, ферритового материала и пьезоэлектрического материала, в которой направления поляризации пьезоэлектрических материалов одинаковы. Приложение к пьезоэлектрическому слою электрического поля той же величины и направления вызывает продольную деформацию, но образец не изгибается. В результате наблюдалось смещение резонансной линии, делающее невозможным ее уширение.

Трёхслойная структура состава железо-иттриевый гранат (ЖИГ) – пьезоэлектрик ЦТС показана на рисунке 4.

Трехслойная структура из пьезоэлектрического материала, ферритового материала и пьезоэлектрического материала с противоположными направлениями поляризации. Приложение электрического поля той же величины и направления к пьезоэлектрическому слою в конечном итоге приведет к изгибу образца. В этом случае наблюдается лишь неоднородное уширение резонансных линий.

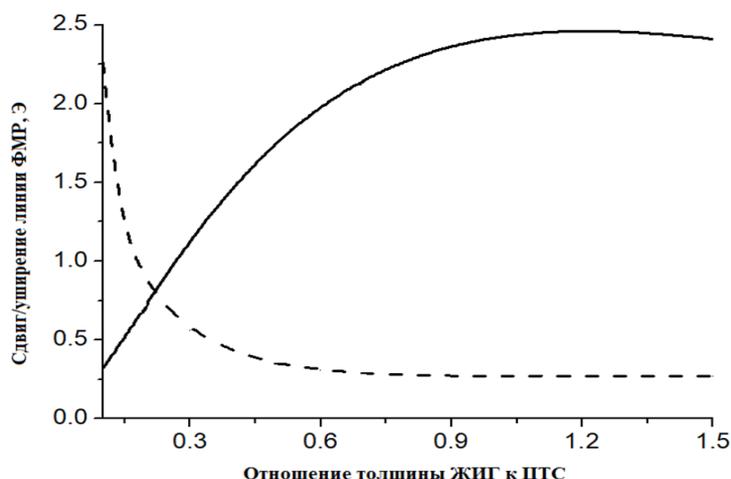


Рисунок 3. Зависимость сдвига (пунктирная линия) и уширения (сплошная линия) линии ФМР от отношения толщины слоя ЖИГ к ЦТС для двухслойной структуры

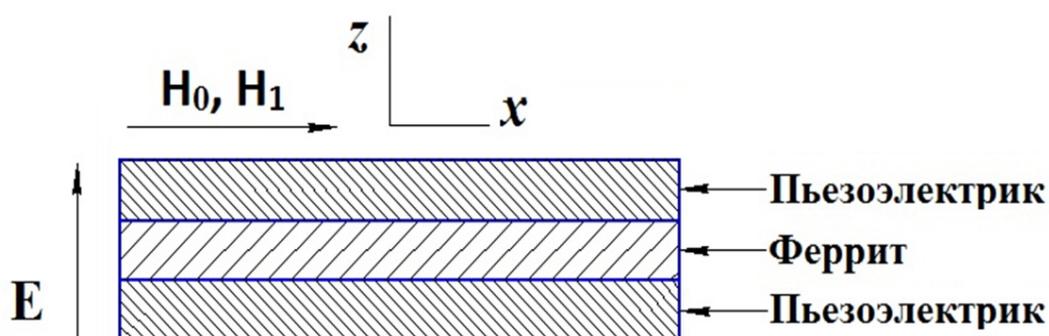


Рисунок 4. Структура пьезоэлектрик – феррит – пьезоэлектрик

Результаты моделирования показывают, что при соотношении толщин ЖИГ и ЦТС, равном 1,7, линия ФМР структуры ЦТС-ЖИГ-ЦТС с двумя слоями ЦТС с противоположными направлениями поляризации расширяется до максимума. На рисунке 5 показано влияние электрического поля $E = 30$ кВ/см на мнимую часть магнитной восприимчивости χ''/χ_0 (χ_0 – статическая восприимчивость) для трехслойного ЦТС-ЖИГ-ЦТС с параллельным и противоположным направлениями полярности слоев ЦТС.

Рисунок 6 показывает, что максимальное уширение линии ФМР 9.2 Э наблюдается при отношении толщин слоев ЦТС к ЖИГ, равном 1.7.

Как видно на рисунке 7 сдвиг линии для трёхслойной структуры совпадает со сдвигом линии в двухслойной структуре.

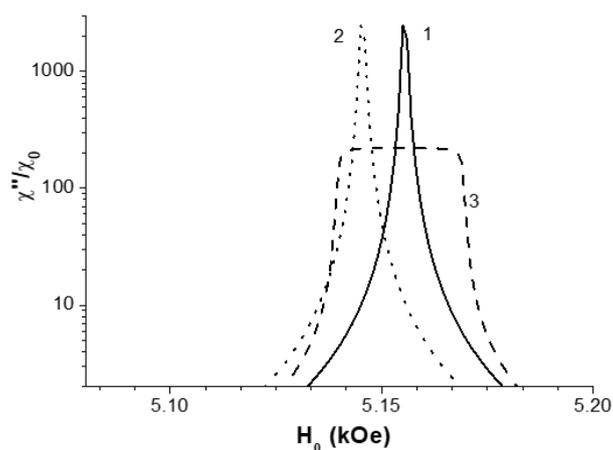


Рисунок 5. Зависимость мнимой части магнитной восприимчивости от подмагничивающего поля для структур ЦТС-ЖИГ-ЦТС при 9.3 ГГц: 1 - для $E=0$, 2 – для $E=30$ кВ/см для структуры с параллельными направлениями поляризации слоев ЦТС для отношения толщины слоя ЖИГ к ЦТС, равному 0.1, 3 – для $E=30$ кВ/см для структуры с противоположными направлениями поляризации слоев ЦТС для отношения толщины слоя ЖИГ к ЦТС, равном 1.7

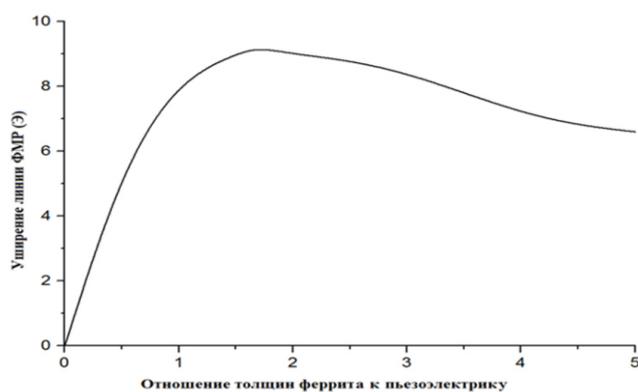


Рисунок 6. Зависимость уширения линии ФМР от отношения толщины ЖИГ и двух слоев ЦТС с противоположными направлениями поляризации

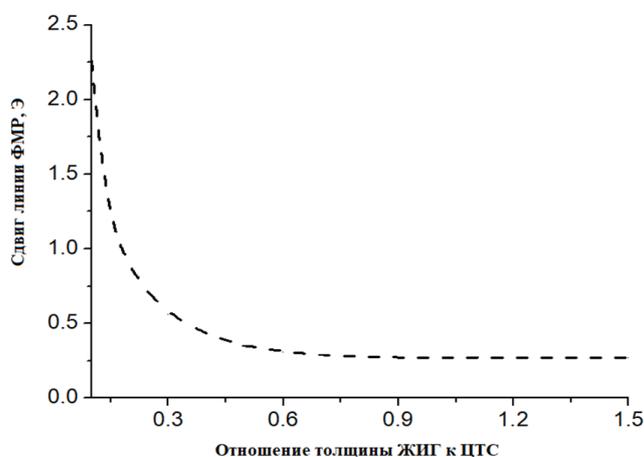


Рисунок 7. Зависимость сдвига линии ФМР от отношения толщины ЖИГ и двух слоев ЦТС с противоположными направлениями поляризации

Для уменьшения влияния пьезоэлектрического слоя на СВЧ поле феррита между слоями можно использовать дополнительный буферный слой, как показано на рисунке 8.

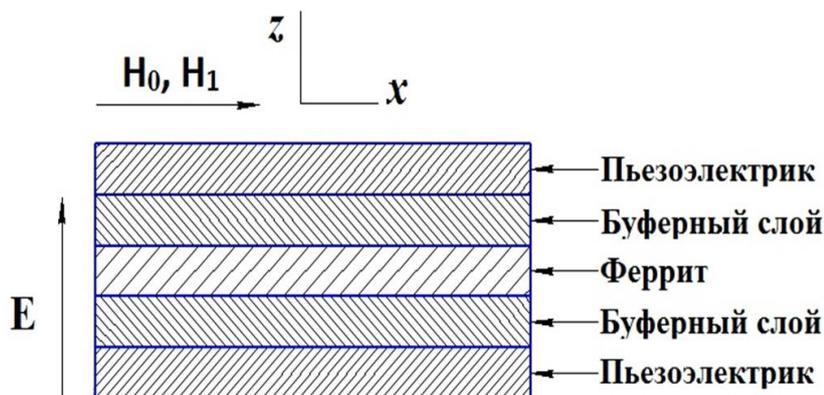


Рисунок 8. Пятислойная структура: Пьезоэлектрик – буферный слой – феррит – буферный слой – пьезоэлектрик

Рисунок 9 показывает, что максимальное уширение линии ФМР 9.3 Э наблюдается при отношении толщин слоев ЦТС к ЖИГ, равном 1.5.

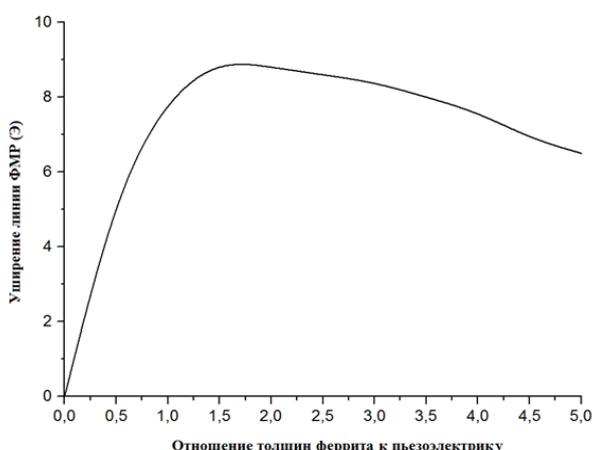


Рисунок 9. Зависимость неоднородного уширения линии ФМР от отношения толщины слоя ЖИГ к ЦТС в пятислойной структуре

На рисунке 10 видно, что зависимость уширения спектральной линии ФМР от толщины буферного слоя имеет максимальное значение. Обратите внимание, что буферный слой может использоваться для уменьшения влияния слоя ЦТС на диаграмму направленности микроволнового поля. Это объясняется перераспределением осевой деформации, вызванной буферным слоем. Среднее смещение линий ФМР составляет около 3 Э.

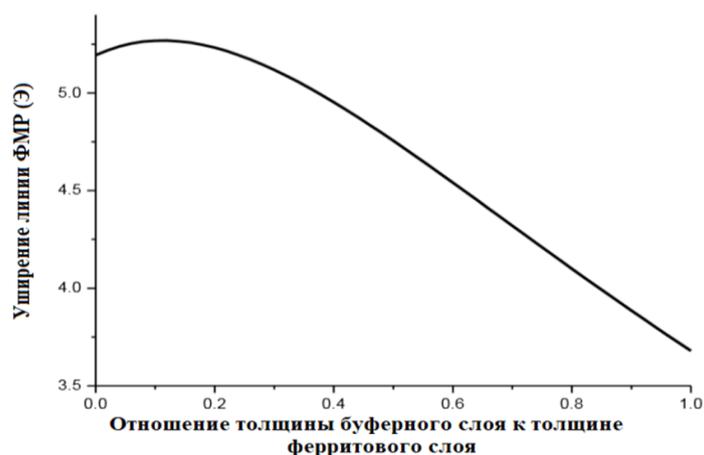


Рисунок 10. Зависимость неоднородного уширения линии ФМР от отношения толщины буферного слоя к толщине ЖИГ

Магнитоэлектрический эффект в области магнитоакустического резонанса

Как уже упоминалось, МЭ эффект в слоистых магнитоэлектрических структурах существует благодаря связи магнитной и электрической подсистем посредством упругих деформаций. Внешнее магнитное поле вследствие магнитоэлектрического эффекта в магнитной компоненте ведет к возникновению упругих напряжений. Механические напряжения передаются в пьезоэлектрическую компоненту и индуцируют поляризацию электрической компоненты [1-7, 10].

Теоретическое моделирование показывает, что между механическим напряжением и однородной прецессией намагниченности ферритовой фазы существует связь через граничные условия на поверхностях пластинки. При приближении частоты переменного магнитного поля к частоте однородной прецессии намагниченности $\omega_0 = \gamma H_0 - 4\pi\gamma M_0$ величина механического напряжения резко возрастает. Механическое напряжение благодаря пьезоэлектрическому эффекту индуцирует электрическое поле в пьезоэлектрической компоненте. Теоретические оценки приводят к гигантским значениям МЭ коэффициента по напряжению порядка 80 – 480 В/(см Э) для двухслойных структур ЖИГ – ЦТС.

Рассмотрим результаты исследования индуцированного механического напряжения выходное электрическое поле в области магнитоакустического резонанса в слоистой структуре на основе ферритового слоя и биморфного пьезоэлектрического преобразователя [10, 12]. При этом подмагничивающее поле полагается достаточно большим для обеспечения малых магнитных потерь ферритового слоя. Биморфный пьезоэлектрический слой используется для преобразования механической энергии в электрическую. Таким образом, такой преобразователь дает возможность подавлять выходной электрический сигнал на некоторых типах колебаний, в то время как на других типах колебаний имеет место существенное увеличение выходного напряжения. Замена керамики ЦТС на монокристаллический лангитат позволило

уменьшить зависимость пьезоэлектрических модулей от напряженности электрического поля и температуры, а также расширить температурный интервал использования. В предлагаемой работе в качестве пьезоэлектрической фазы используется двухслойная компонента на основе Y-среза бессвинцового монокристаллического лангатата, при этом два слоя лангатата имеют противоположные направления оси Y. При выборе лангатата учтено, что отношение пьезоэлектрического модуля к диэлектрической проницаемости для лангатата материала выше, чем у ЦТС. Известно, что прямой МЭ эффект пропорционален отношению пьезоэлектрического модуля к диэлектрической проницаемости. Таким образом, можно ожидать, что использование лангатата приводит к большому МЭ эффекту. Используется Y-срез лангатата, у которого наблюдается реакция только на сдвиговые деформации. При получении теоретических оценок предполагалось, что постоянное магнитное поле перпендикулярно плоскости образца. Переменное внешнее магнитное поле лежит в плоскости образца.

Для моделирования МЭ взаимодействия в качестве исходных используются уравнения движения ферритового и двух пьезоэлектрических слоев, уравнение движения намагниченности ферритовой фазы, а также обобщенный закон Гука аналогично [13]. Для совместного решения указанных уравнений используются стандартные граничные условия, соответствующие непрерывности смещений и напряжений на границах раздела. Результаты численного решения указанных уравнений для слоистой структуры ЖИГ – биморфный пьезопреобразователь из Y-среза лангатата приведены на рисунке 11. Толщина слоя ЖИГ выбрана равной 0,4 мкм, общая толщина биморфного пьезоэлемента – 0.52 мкм. На рисунке 11 приведена частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для третьей резонансной частоты при подмагничивающем поле $H_0=3520$ Э. Для сравнения на этом же рисунке приведен аналогичный график для обычной двухслойной структуры ЖИГ-лангатат.

Как следует из графика на рисунка 11, МЭ эффект подавляется на третьей резонансной частоте 4.96 GHz для двухслойной структуры ЖИГ-лангатат, в то время как для структуры ЖИГ - биморфный слой наблюдается значительное увеличение МЭ коэффициента по напряжению. Гигантский МЭ эффект связан с особенностями колебаний на частоте 4.96 GHz.

На рисунке 12 приведено распределение индуцированного электрического поля по толщине пьезоэлектрика. Из этого графика видно, что в случае двухслойной структуры ЖИГ-лангатат среднее значение индуцированного напряжения за полный период колебаний приблизительно равно нулю.

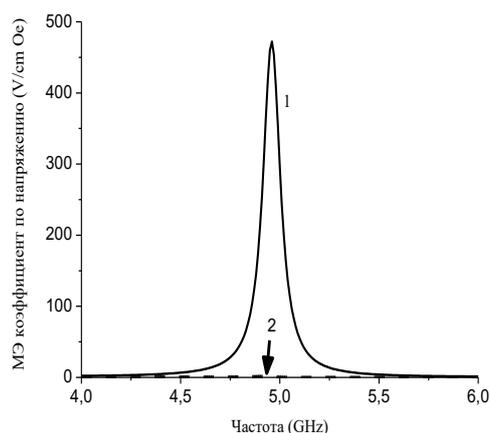


Рисунок 11. Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для слоистой структуры ЖИГ - биморфный пьезоэлемент на основе Y-среза лангатата (1) и двухслойной структуры ЖИГ - Y-срез лангатата (2) для $H_0=3520$ Oe

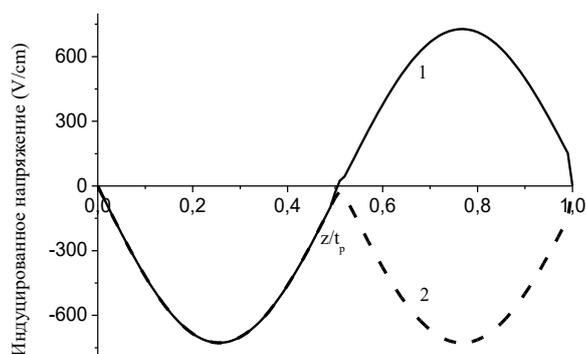


Рисунок 12. Распределение индуцированного электрического поля по толщине пьезоэлектрика для двухслойной структуры ЖИГ – лангатат (1) и слоистой структуры ЖИГ - биморфный пьезоэлемент на основе Y-среза лангатата (2) для $H_0=3520$ Oe и переменного магнитного поля 1 Oe

В случае слоистой структуры ЖИГ - биморфный пьезоэлемент индуцированное напряжение имеет одинаковые знаки в первом и втором полупериоде колебаний, при этом суммарное значение выходного сигнала существенно больше нуля по абсолютной величине.

Обнаруженный эффект может быть использован при исследовании МЭ эффекта в области наложения частот магнитного резонанса и высших типов механических колебаний образца для увеличения МЭ коэффициента [12].

Заключение

В работе приведены результаты рассмотрения микроволнового МЭ эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах и влиянию состава пьезоэлектрической фазы на параметры магнитного резонанса. Рассмотрены слоистые структуры на основе однородной пьезоэлектрической фазы, на основе

биморфного пьезоэлектрического преобразователя, определены оптимальные значения отношения толщин феррита и пьезоэлектрика. Рассмотрена также возможность уменьшения влияния пьезоэлектрического слоя на СВЧ поле феррита путем размещения между слоями дополнительного буферного диэлектрического слоя.

Наблюдаемый гигантский МЭ эффект в слоистой структуре состав феррит - биморфный пьезоэлемент рекомендуется использовать при исследовании МЭ эффекта в области наложения частот магнитного резонанса и высших типов механических колебаний образца. При этом наблюдаемое значение МЭ коэффициента значительно превышает его значение для стандартной двуслойной структуры.

Список литературы

1. Nan C.-W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics*. 2008. 103 (3). 031101. DOI: 10.1063/1.2836410.
2. Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. 38 (8). R123-R152. DOI: 10.1088/0022-3727/38/8/R01
3. Bichurin M. I., Petrov V. M. *Modeling of Magnetoelectric Effects in Composites*. Springer Netherlands, 2014. Springer in Materials Science. Series 201. DOI: 10.1007/978-94-017-9156-4
4. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. *Magnetoelectric Composites*. Pan Stanford Publishing. Pte. Ltd, 2019. DOI: 10.1201/9780429488672
5. Bichurin M. I., Kornev I. A., Petrov V. M., Tatarenko A. S., Kiliba Yu. V., Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects at microwave frequencies in a piezoelectric/magnetostrictive multilayer composite. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2001. 64 (9). 944091-944096. DOI: 10.1103/PhysRevB.64.094409
6. Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M. I., Petrov V. M., Tatarenko A. S. Microwave magnetoelectric effects in single crystal bilayers of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2004. 70 (6). 064416. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.064416
7. Petrov V. M., Bichurin M. I., Saplev A. F., Tatarenko A. S., Lobekin V. N. Electric field induced broadening of magnetic resonance line in ferrite/piezoelectric bilayer. *Journal of Applied Physics*. 2017. 121 (22). 224103. DOI: 10.1063/1.4985069
8. Саплев А. Ф., Петров В. М. Управление параметрами магнитного резонанса в слоистой структуре феррит-пьезоэлектрик. *Вестник НовГУ*. 2022. 3 (128). 108-110. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).108-110
9. Pettiford C., Dasgupta S., Lou J., Yoon S. D., Sun N. X. Bias Field Effects on Microwave Frequency Behavior of PZT/YIG Magnetoelectric Bilayer. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. 43 (7). 3343-3345. DOI: 10.1109/TMAG.2007.893790
10. Петров В. М., Саплев А. Ф. Магнитоакустический резонанс в слоистой структуре ферритбиморфный пьезоэлемент. *Мультиферроики: получение, свойства, применение: материалы международной научно-практической конференции, Витебск, 24-27 сентября 2019 г. / под. редакцией В. В. Рубаника. Витебск: УО «ВГТУ», 2019. С. 88-90. DOI: 10.26201/ISSP.2019.45.557/MFerro.36*
11. Лобекин В. Н., Бичурин М. И., Кафаров Р. Г., Петров Р. В. Исследование зависимости сдвига линии ферромагнитного резонанса от параметров

пъезоэлектриков. Вестник НовГУ. 2023. 5 (134). 773-779. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).773-779

12. Petrov V., Saplev A., Srinivasan G. Magneto-acoustic resonance in layered structure of ferrite and piezoelectric bimorph. *Ferroelectrics*. 2020. 569 (1). 196-200. DOI: 10.1080/00150193.2020.1822676

13. Bichurin M. I., Petrov V. M., Ryabkov O. V., Averkin S.V., Srinivasan G. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2005. 72. 060408(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.72.060408

References

1. Nan C.-W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics*. 2008. 103 (3). 031101. DOI: 10.1063/1.2836410.

2. Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. 38 (8). R123-R152. DOI: 10.1088/0022-3727/38/8/R01

3. Bichurin M. I., Petrov V. M. *Modeling of Magnetoelectric Effects in Composites*. Springer Netherlands, 2014. Springer in Materials Science. Series 201. DOI: 10.1007/978-94-017-9156-4

4. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. *Magnetoelectric Composites*. Pan Stanford Publishing. Pte. Ltd, 2019. DOI: 10.1201/9780429488672

5. Bichurin M. I., Kornev I. A., Petrov V. M., Tatarenko A. S., Kiliba Yu. V., Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects at microwave frequencies in a piezoelectric/magnetostrictive multilayer composite. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2001. 64 (9). 944091-944096. DOI: 10.1103/PhysRevB.64.094409

6. Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M. I., Petrov V. M., Tatarenko A. S. Microwave magnetoelectric effects in single crystal bilayers of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2004. 70 (6). 064416. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.064416

7. Petrov V. M., Bichurin M. I., Saplev A. F., Tatarenko A. S., Lobekin V. N. Electric field induced broadening of magnetic resonance line in ferrite/piezoelectric bilayer. *Journal of Applied Physics*. 2017. 121 (22). 224103. DOI: 10.1063/1.4985069

8. Saplev A. F., Petrov V. M. Control of magnetic resonance parameters in the layered structure of ferrite-piezoelectric. *Vestnik NovSU*. 2022. 3 (128). 108-110. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).108-110

9. Pettiford C., Dasgupta S., Lou J., Yoon S. D., Sun N. X. Bias Field Effects on Microwave Frequency Behavior of PZT/YIG Magnetoelectric Bilayer. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. 43 (7). 3343-3345. DOI: 10.1109/TMAG.2007.893790

10. Petrov V. M., Saplev A. F. Magnitoakusticheskiy rezonans v sloistoj strukture ferritbimorfnyj p'ezoelement [Magnetoacoustic resonance in a layered structure of a ferrite-dimorphic piezoelectric element] // *Mul'tiferroiki: poluchenie, svojstva, primenenie: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Multiferroics: preparation, properties, application: materials of the international scientific and practical conference]*, Vitebsk, September 24-27, 2019 / ed. V. V. Rubanik. Vitebsk: UO «VGTU», 2019. P. 88-90. DOI: 10.26201/ISSP.2019.45.557/MFerro.36

11. Lobekin V. N., Bichurin M. I., Kafarov R. G., Petrov R. V. Investigation of the dependence of the shift of the ferromagnetic resonance line on the parameters of piezoelectric. *Vestnik NovSU*. 2023. 5 (134). 773-779. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).773-779

12. Petrov V., Saplev A., Srinivasan G. Magneto-acoustic resonance in layered structure of ferrite and piezoelectric bimorph. *Ferroelectrics*. 2020. 569 (1). 196-200. DOI: 10.1080/00150193.2020.1822676

13. Bichurin M. I., Petrov V. M., Ryabkov O. V., Averkin S.V., Srinivasan G. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2005. 72. 060408(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.72.060408

Информация об авторах

Саплев Алексей Фёдорович – преподаватель, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0008-9052-7987, Alexey.Saplev@novsu.ru

Петров Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-7733-1030, Vladimir.Petrov@novsu.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.791.75

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).466-477

Поступила в редакцию / Received 06.05.2024

ГРНТИ 45.45.29

Специальность ВАК 1.3.8

Принята к публикации / Accepted 27.08.2024

Научная статья

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ УГЛЕРОДИСТАЯ СТАЛЬ – АУСТЕНИТНАЯ НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ

Шляхова Г. В., Орлова Д. В., Немлиенко Т. С., Сороков Н. Н.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

Аннотация В работе исследовали структуру и механические свойства биметаллического соединения, полученного электродуговой наплавкой высоколегированной нержавеющей стали на углеродистую сталь. Проведённые исследования микроструктуры и измерения микротвердости показали, что со стороны углеродистой стали образуется обезуглероженный слой, со стороны нержавеющей стали высокопрочная белая мартенситная область, а непосредственно на границе сплавления наблюдается прослойка с большой долей карбидной составляющей. Последующий нагрев до 950 °С с выдержкой 1 час приводит к улучшению напряженно-деформированного состояния наплавленного металла, но в мартенситной области у границы сплавления наблюдается рост микротвердости. Для получения оптимальных характеристик необходимо снизить температуру отжига и увеличить его продолжительность.

Ключевые слова: *электродуговая наплавка, высоколегированная проволока, микроструктура, микротвердость, аустенит, карбиды, отжиг*

Для цитирования: Шляхова Г. В., Орлова Д. В., Немлиенко Т. С., Сороков Н. Н. Структура и свойства биметаллического соединения углеродистая сталь – аустенитная нержавеющая сталь, полученного электродуговой наплавкой // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 466-477. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).466-477

Research Article

STRUCTURE AND PROPERTIES OF A BIMETALLIC COMPOUND OF CARBON AND AUSTENITIC STAINLESS STEEL PRODUCED BY ELECTRIC ARC SURFACING

Shlyakhova G. V., Orlova D. V., Nemlienko T. S., Sorokov N. N.

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (Tomsk, Russia)

Abstract The structure and mechanical properties of a bimetallic joint obtained by electric arc surfacing of high-alloy stainless steel onto carbon steel were investigated. Metallographic studies and microhardness measurements have shown that a decarburized layer is formed on the carbon steel side, a high-strength white martensitic area on the stainless-steel side, and a layer with a large proportion of the carbide component is observed directly at the fusion boundary. Subsequent heating to 950°C with a holding time of 1 hour leads to an improvement in the stress-strain state of the deposited metal, but an increase in microhardness is observed in the martensitic region near the fusion boundary. To obtain optimal characteristics, it is necessary to reduce the annealing temperature and increase its duration.

Keywords: *electric arc surfacing, high-alloy wire, microstructure, microhardness, austenite, carbides, annealing*

For citation: Shlyakhova G. V., Orlova D. V., Nemlienko T. S., Sorokov N. N. Structure and properties of a bimetallic compound of carbon and austenitic stainless steel produced by electric arc surfacing // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 466-477. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).466-477

Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется созданию двухслойных металлических структур из углеродистой стали с нанесенным защитным покрытием из нержавеющей стали. Такие материалы позволяют сочетать хорошую свариваемость, формуемость, пластичность и теплопроводность слоя углеродистой стали с высокой коррозионной стойкостью и стойкостью к истиранию слоя нержавеющей стали. Экономическая целесообразность ввиду экономии легирующих элементов (Cr, Ni) значительно расширяет область их потенциальных применений: сосуды под давлением, теплообменники, элементы энергетического и опреснительного оборудования, и т. д. Методы получения данных объектов достаточно широко представлены. Это – сварка взрывом, диффузионная сварка, вакуумная пайка, сварка в переходной жидкой фазе, горячее прессование, литье и прокатка [1-4].

Весьма перспективна в этом плане технология электродуговой наплавки с помощью сплошных или порошковых плавящихся электродов [1, 5, 6], которая позволяет наносить слои металла с нужными физико-механическими свойствами и геометрическими параметрами. Однако остаются проблемы, связанные с остаточными напряжениями, анизотропией и образованием пор. Как известно, при наплавке или сварке в результате действия источника тепла образуется ванна расплавленного металла, которая после затвердения (кристаллизации) образует металлическую связь с нерасплавленными зонами защищаемой поверхности [7-10]. При этом металл наплавки приобретает либо литую структуру (при однослойной наплавке), либо структуру литого металла, подвергшегося в отдельных зонах дополнительной термической обработке при последующих нагревах (при многопроходной наплавке). При наплавке коррозионностойких сталей на углеродистую сталь в зоне сплавления могут формироваться мартенситные или аустенитно-ферритные структуры в зависимости от содержания и диффузии углерода. При недостаточном содержании никеля и хрома металл наплавки может иметь вторичную аустенитно-мартенситную структуру [6]. Возможность существования таких структур с неизбежностью приводит к формированию сложного напряженного состояния в зоне контакта и вблизи нее. Кроме того, на напряженно деформированное состояние биметалла большое влияние оказывает объем перемешивания основного и присадочного металлов. Все эти факторы, в конечном счете, определяют эксплуатационные свойства покрытия.

Таким образом, для эффективного формирования защитных покрытий на углеродистых сталях требуется не только разработка технологических параметров процесса, но и тщательные исследования структуры и свойств получаемого

материала. В связи с этим, целью настоящей работы явилось исследование структуры и механических свойств соединения углеродистая сталь/нержавеющая высоколегированная сталь в исходном состоянии и после термической обработки.

Методы исследования

В данной работе биметаллические соединения получали электродуговой наплавкой в среде аргона в несколько проходов плавящимся порошковым электродам диаметром 1,5 мм состав которого представлен в таблице 1, на пластину углеродистой стали 20 состава, приведенного в таблице 2. Толщина пластины 8 мм, ширина наплавленного валика 20 мм, высота валика в среднем 10 мм. Для предотвращения растрескивания пластина подогревалась до ~ 300С.

Таблица 1. Химический состав порошковой проволоки, %

C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	Ti	S	P
≤ 0,12	~18,0	~1,0	~5,0	~9,0	~1,0	~0,2	<0,04	<0,04

Таблица 2. Химический состав основного металла, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Fe
0,17 – 0,24	0,17 – 0,37	0,35 – 0,65	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,3	до 0,08	~98

Из пластины вдоль оси наплавки электроискровым способом были вырезаны прямоугольные образцы размерами 40×15×3 мм для исследования микроструктуры и измерения микротвердости. Доля наплавленного и основного металла в образцах были сопоставимы. Часть образцов для гомогенизации наплавленного металла и улучшения напряженного состояния были отожжены при температуре 950 0С с выдержкой 1 ч и охлаждением с печью. Для исследования микроструктуры в образцах обоих типов были изготовлены шлифы. При приготовлении шлифов использовались механическая шлифовка, механическая полировка на алмазном синтетическом материале с переходом от крупного алмазного порошка к мелкому и химическое травление [11]. Исследование структуры наплавленного металла и индентирование полированных образцов выполнялись по схеме, представленной на рисунке 1. Макро и микроисследования проводились методом оптической микроскопии на микроскопе Neophot-21. Микроэлементный анализ наплавленного слоя проводили на растровом электронном микроскопе EVO 50 (Carl Zeiss, Германия) с приставкой Oxford Instruments для рентгеновского дисперсионного микроанализа (ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН). Значения твердости определяли на микротвердомере «ПМТ-3» при нагрузке 1 Н.



Рисунок 1. Схема проведения металлографических исследований: 1 – верхняя часть наплавленного металла; 2 – средняя часть наплавленного металла; 3 – нижняя часть наплавленного металла; 4 – зона сплавления валика и основного металла; 5 – основной металл; 6 – линия измерения микротвердости

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 2 представлены результаты макроанализа биметалла. Видно, что вследствие разнородности химического состава, между наплавленным и основным металлом сформировался резкий переход. Толщина слоя наплавленного металла ~ 9 мм, а основного металла ~ 6 мм. Следует отметить, что и в наплавленном, и основном металле присутствуют редкие мелкие одиночные дефекты в виде пор сферической формы. Их максимальные размеры, измеренные методом секущих в поперечном и продольном сечении, составили соответственно: 25 мкм и 20 мкм.

Наплавленный металл в образцах в исходном состоянии имеет слоистое строение с хорошо различимыми границами (рисунок 2 а). После отжига границы между слоями становятся более размытой (рисунок 2 б). Условно весь наплавленный металл можно разделить на четыре разноструктурные области, ширина которых приведена в таблице 3.

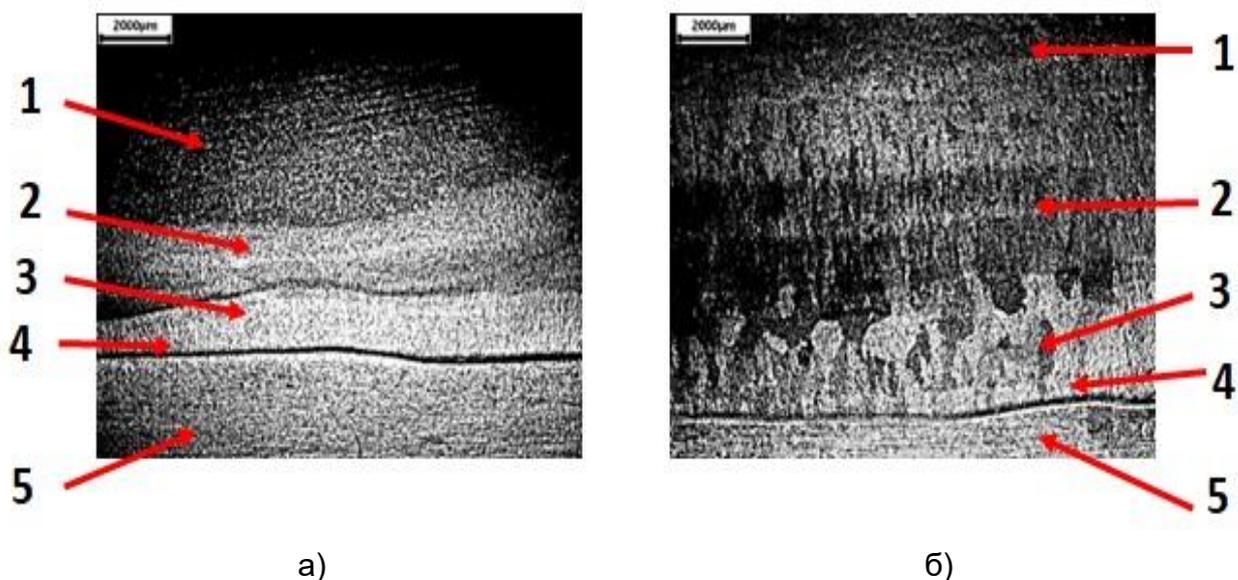


Рисунок 2. Исследование макроструктуры наплавленного металла (как показано на рисунке 1): а) – исходный образец; б) – после отжига при 950 °С с выдержкой 1 час

Таблица 3. Ширина структурных областей наплавленного металла

Состояние образца	Ширина структурных областей, мкм			
	1	2	3	4
Исходное	5050	1800	2050	30
После отжига	4800	2230	2300	40

В каждой из указанных областей производилось измерение микротвердости. Распределение микротвердости в образцах в исходном состоянии и после отжига приведено на рисунке 3. Видно, что в обоих состояниях значения микротвердости наплавленного металла практически в два раза выше, чем основного металла.

Микроструктура основного металла (область 5) в обоих состояниях соответствует структуре углеродистой стали и представлена полиэдрическими зернами феррита с небольшим количеством перлита (рисунок 4). В исходном состоянии средний размер зерна составил 21 ± 5 мкм, что соответствует 8-9 номеру зерна, а в образце после отжига средний размер зерна составил 52 ± 18 мкм, что соответствует 5 номеру зерна [11]. Микротвердость основного металла у образцов в исходном состоянии и после отжига составила, соответственно, 1750 и 1400 МПа (рисунок 3).

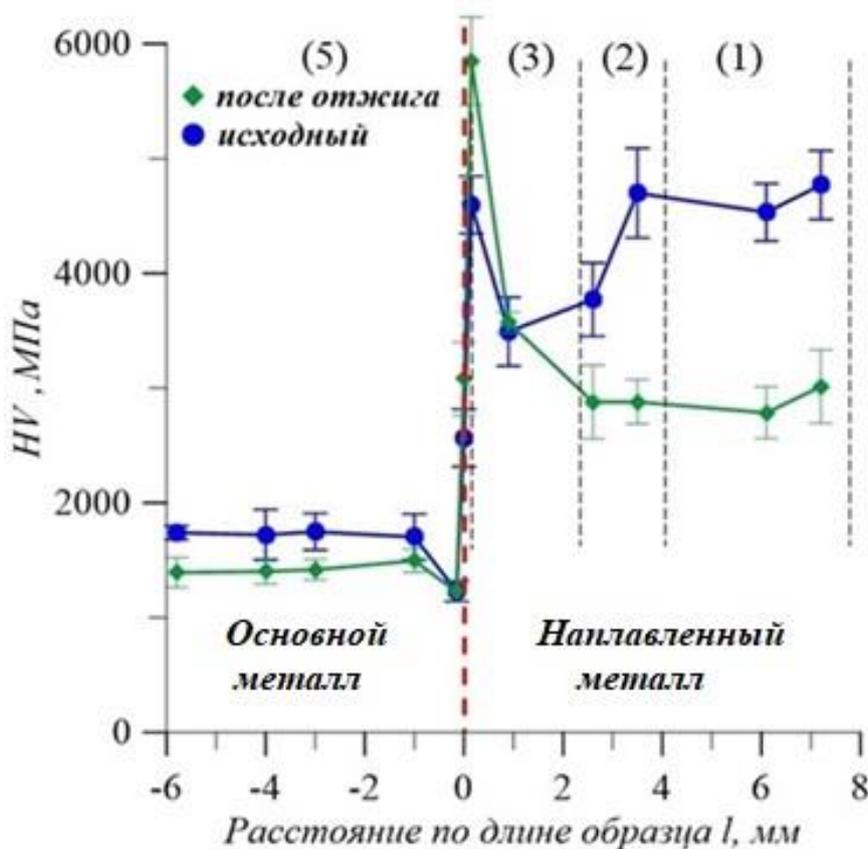


Рисунок 3. Распределение микротвердости; отсчет от границы сплавления

В основном металле у линии сплавления и в исходном образце, и после отжига образуется обезуглероженная (ферритная) зона с пониженной твердостью $HV_{0,1}=1230$ МПа (рисунки 3 и 4). У образцов в исходном состоянии ширина этой зоны составила - 180 мкм (рисунок 4 а). После отжига ширина обезуглероженной зоны уменьшилась до 120 мкм (рисунок 4 б).

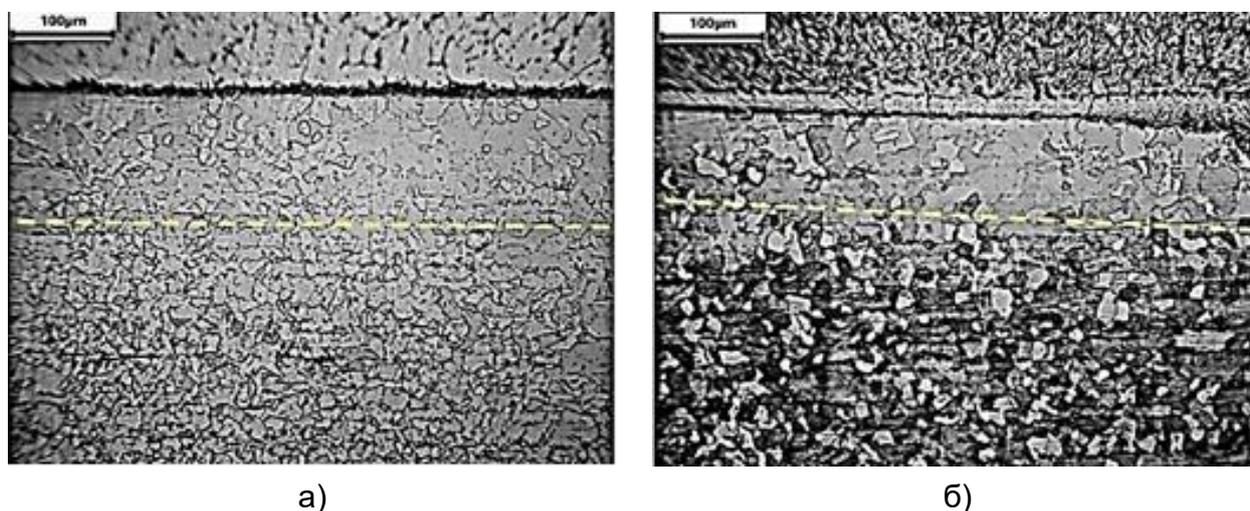


Рисунок 4. Структура основного металла: а) – исходный образец; б) – после отжига; пунктирной линией показана граница обезуглероженной зоны

В наплавленном металле вблизи линии сплавления образовалась бесструктурная узкая зона. В таблице 3 она обозначена как область 4. Видно, что в исходном состоянии она имеет меньшую ширину (рисунок 5). Формирование таких областей «белых зон» характерно сварных соединений высоколегированных сталей с низколегированными. Авторы работ [12-13] утверждают, что такие зоны имеют мартенситную структуру, а потому они практически не травятся.

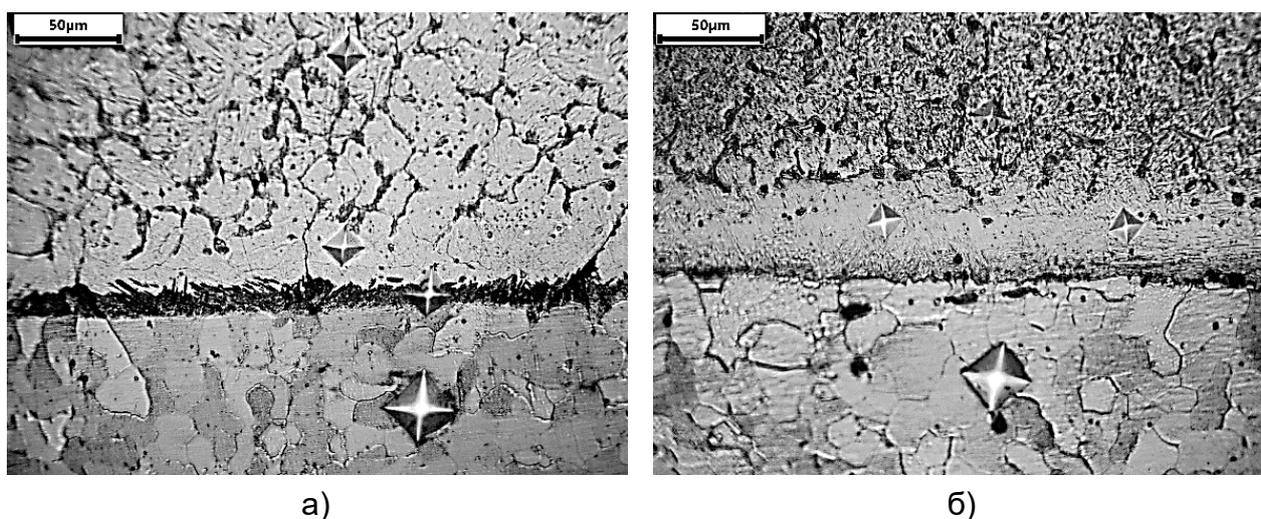


Рисунок 5. Структура биметалла вблизи зоны сплавления; а) – в исходном состоянии и б) после отжига

Данное предположение подтверждается результатами измерения микротвердости (рисунок 3). Здесь она достигает максимальных значений: 4770 МПа в исходном образце и 5850 МПа в отожженном. Вблизи линии сплавления (основной металл и наплавленный металл) происходит наибольшее диффузионное перераспределение углерода и легирующих элементов. Об этом свидетельствуют результаты элементного анализа (таблица 4). Изменения количественного содержания элементного состава по мере приближения к границе сплавления отмечено и у авторов в работах [12-14].

Таблица 4. Элементный состав наплавленного металла

Структурные области	Содержание легирующих элементов, % (вес.)			
	Si	Cr	Mn	Ni
1 и 2	5,4	15,28	1,31	10,31
3	3,32	7,63	1,59	3,57
4	1,81	5,19	1,49	1,84

В первой и второй структурных областях наплавленного металла содержание легирующих элементов фактически совпадает с химическим составом порошковой проволоки (таблица 1). Зато в третьей и особенно в четвертой областях содержание основных легирующих резко падает. Количество никеля уменьшается в 5 раз, кремния и хрома в 3 раза.

В исходном состоянии наплавленный металл имеет типичную литую аустенитную структуру, где размер и морфология структурных элементов существенно различны в указанных выше областях 1–4 (рисунок 6). В областях 1–3 строение дендритное с темными междендритными прослойками. Вблизи наружной поверхности наплавленного слоя (область 1) дендриты мелкие и разнонаправленные (рисунок 6). Междендритные прослойки по толщине соизмеримы с самими дендритами. При плавном переходе к области 2 размеры дендритов увеличиваются, а толщина междендритных прослоек уменьшается. В целом структура становится более однородной, соотношение дендритных прослоек и самих дендритов примерно одинаково 1:1. В области 3 толщина дендритных прослоек заметно уменьшается и соотношение дендритов к прослойкам становится $\approx 1:2$. Здесь наблюдаются столбчатые дендриты с поперечником до 20 мкм и тонкими ~ 2 мкм междендритными прослойками. На границе между областями 3 и 4 поперечные размеры дендритов увеличиваются 30 мкм, а междендритные прослойки переходят в межзеренные границы. Внутри дендритов появляется игольчатая составляющая. Такая структура плавно переходит в нетравящуюся область 4.

После отжига строение 1 и 2 областей существенно не изменилось, но поперечные размеры дендритов увеличились (рисунок 6). Ширина междендритных прослоек, наоборот, уменьшилась. Строение области 3 в отожженном образце

является переходным от дендритного к зеренному. Особенно это хорошо видно на переходе от области 3 к области 4. В зернах здесь отчетливо наблюдается игольчатая составляющая и мелкие карбидные включения.

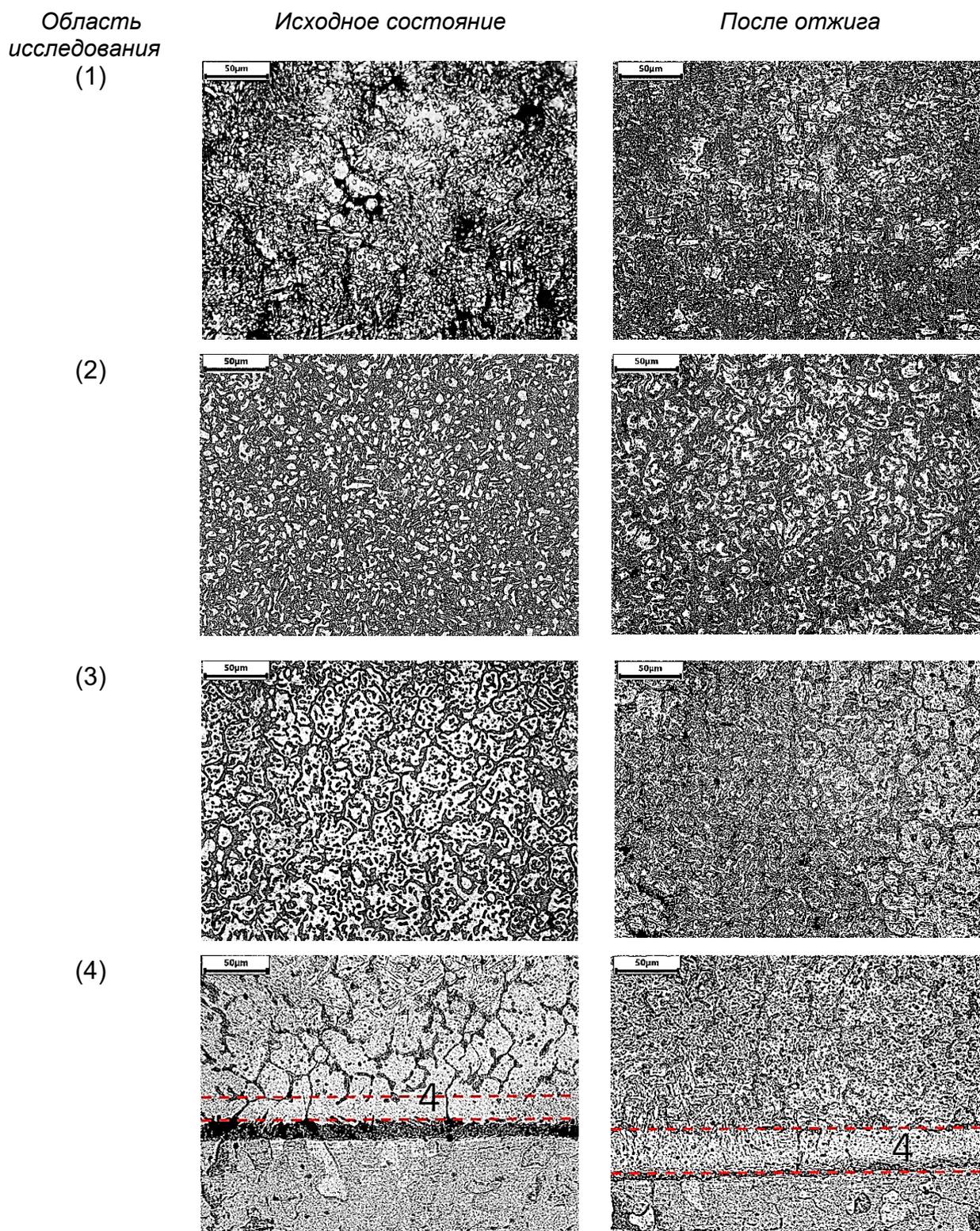


Рисунок 6. Структура зоны соединения (4) и наплавленного металла (1-3) в исходном состоянии и после нагрева до 950 °С с выдержкой 1 час

Изложенные результаты исследования микроструктуры и данные микротвердости позволяют предположить, что наблюдаемая в исходном состоянии высокая (нехарактерная для аустенита) микротвердость в областях 1 и 2 (рисунок 3) обусловлена повышенными внутренними напряжениями, которые обусловлены резко неоднородной дисперсной аустенитной структурой. Переход к области 3 сопровождается укрупнением структурных элементов повышением однородности структуры и снижением концентрации легирующих элементов. По-видимому, хром и особенно никель активно диффундируют в основной металл. Твердорастворное упрочнение аустенита уменьшается. Однако в области 3 диффузия углерода из основного металла и уход никеля (таблица 4) приводят к тому, что аустенитная фаза становится неустойчивой, образуется мартенсит и твердость опять возрастает. Однако к этой области со стороны основного металла прилегает обезуглероженный слой. Данный факт предполагает, что на границе сплавления образуется нежелательное напряженно деформированное состояние, которое из-за эксплуатационных нагрузок может привести к формированию трещин и отслаиванию покрытия. Ситуация может быть исправлена отжигом.

Действительно, проведенный в работе отжиг привел к более равновесному напряженно деформированному состоянию наплавленного металла в областях 1-3. Микроструктура в этих областях стала более равновесной. Но в области 4 напряженно деформированное состояние ухудшилось. Микротвердость здесь резко возросла. В то же время в зоне термического влияния основного металла она уменьшилась, а также увеличился размер зерна. По-видимому, температура отжига была неоправданно высокой, что привело, не только к росту зерна в основном металле, но и к интенсивной диффузии легирующих (в первую очередь хрома) в мартенситную область наплавленного металла, где образовались карбиды.

Выводы

1. Показано, что электродуговой наплавкой в среде аргона плавящимся порошковым электродом в несколько проходов может быть получено композиция из массивного (~ 9 мм) антикоррозионного слоя высоколегированной нержавеющей стали и низкоуглеродистой стали.

2. Металлографические исследования и измерения микротвердости показали, что антикоррозионный слой имеет литую структуру из аустенитных дендритов. Размеры дендритов увеличиваются по мере перехода от внешней поверхности к линии сплавления с основным металлом. Микротвердость в верхних областях наплавленного слоя достигает 5000 МПа, что нехарактерно для аустенитной стали и свидетельствует о высоких внутренних напряжениях.

3. На расстоянии ~ 1 мм от линии сплавления микротвердость слоя падает до минимального значения 3500 МПа, а затем вновь возрастает до 5000 МПа на расстоянии ~ 30 мкм. В области минимальных значений микротвердости дендритная

структура переходит в зёрненную. Непосредственно у линии сплавления наблюдается «белая» мартенситная область, что и объясняет высокую микротвердость.

4. В зоне термического влияния в основном металле обнаружена обезуглероженная зона шириной ~ 200 мкм, где микротвердость составляет 1200 МПа. Такое большое различие по микротвердости соседствующих зон основного и наплавленного металла предполагает наличие высоких внутренних напряжений на границе сплавления.

5. Для улучшения напряженно деформированного состояния полученной биметаллической композиции был проведен отжиг 960°C с выдержкой 1 час, охлаждение с печью, который привел к улучшению напряженно деформированного состояния наплавленного металла. Микротвердость его снизилась до 3000 МПа, а структура стала более равновесной. На границе сплавления ситуация, наоборот, ухудшилась. Микротвердость мартенситной области возросла до 5800 МПа, а ее ширина увеличилась до 40 мкм.

6. Для получения оптимальных характеристик необходимо снизить температуру отжига и увеличить его продолжительность.

Благодарности

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 24-29-00580, <https://rscf.ru/project/24-29-00580/>.

Список литературы

1. Бирюков В., Татаркин Д., Хриптович Е., Фишков А. Разработка технологий и оборудования для лазерного упрочнения и наплавки деталей станков и машин // Станкоинструмент. 2017. 009 (4). 42-47. DOI: 10.22184/24999407.2017.9.4.42.47
2. Bandyopadhyay A., Heer B. Additive manufacturing of multi-material structures // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2018. 129. 1-16. DOI: 10.1016/j.mser.2018.04.001
3. Xi W., Song B., Zhao Y., Yu T., Wang J. Geometry and dilution rate analysis and prediction of laser cladding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. 103. 4695-4702. DOI: 10.1007/s00170-019-03932-7
4. Сидоров В. П., Мельзитдинова А. В. Методика определения требований к точности параметров сварки // Сварка и диагностика. 2014. 3. 10-13.
5. Борисова А. Л., Миц И. В., Кайда Т. В., Дзыкович И. Я., Коржик В. Н. Структура и свойства электродуговых покрытий на основе ферробора, полученных из порошковых проволок // Автоматическая сварка. 1991. 9. 66-68.
6. Скобло Т. С., Тихонов А. В., Рыбалко И. Н. Новый способ восстановления деталей // Автомобильный транспорт. 2012. 31. 124-128.
7. Козырев Н. А., Кибко Н. В., Уманский А. А., Титов Д. А., Соколов П. Д. Повышение качества наплавленного слоя прокатных валков за счет оптимизации состава порошковых проволок // Сварочное производство. 2017. 7. 29-34.
8. Кузнецов М. А., Зернин Е. А., Колмогоров Д. Е., Шляхова Г. В., Данилов В. И. Строение, морфология и дисперсность металла, наплавленной дуговой сваркой плавящимся электродом в аргоне в присутствии наноструктурированных модификаторов // Сварка и диагностика. 2012. 6. 8-10.

9. Wielage B., Pokhmurska H., Student M., Gvozdeckii V., Stupnyckij T., Pokhmurskii V. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures // *Surface & Coatings Technology*. 2013. 220. 27-35. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.12.013
10. Бороненков В. Н., Коробов Ю. С. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. 264 с.
11. ГОСТ Р ИСО 643-2011. Сталь. Металлографическое определение наблюдаемого размера зерна = Steels. Micrographic determination of the apparent grain size: национальный стандарт Российской Федерации / подготовлен техническим комитетом по стандартизации ТК 145 «Методы контроля металлопродукции». Издание официальное. Москва: Стандартинформ, 2014. 34 с.
12. Трудов А. Ф., Трыков Ю. П., Клочков С. В., Донцов Д. Ю., Войнов М. О. Влияние термообработки на структурно-механическую неоднородность сваренного взрывом биметалла ст3+12х18н10т // *Деформация и разрушение материалов*. 2009. 12. 41-44.
13. Shlyakhova G. V., Barannikova S. A., Bochkareva A. V., Li Y. V., Zuev L. B. Structure of a Carbon Steel–Stainless Steel Bimetal // *Steel in Translation*. 2018. 48 (4). 219-223. DOI: 10.3103/S0967091218040101
14. Гельман А. С., Чудновский А. Д., Цемахович Б. Д., Харина И. Л. Плакирование стали взрывом: структура и свойства биометалла / под редакцией А. С. Гельмана. Москва: Машиностроение, 1978. 191 с.

References

1. Biryukov V., Tatarkin D., Khriptovich Ye., Fishkov A. Razrabotka tekhnologiy i oborudovaniya dlya lazernogo uprochneniya i naplavki detaley stankov i mashin [Development of technologies and equipment for laser hardening and surfacing of machine and machine parts]. *Stankoinstrument*. 2017. 009 (4). 42-47. DOI: 10.22184/24999407.2017.9.4.42.47
2. Bandyopadhyay A., Heer B. Additive manufacturing of multi-material structures // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2018. 129. 1-16. DOI: 10.1016/j.mser.2018.04.001
3. Xi W., Song B., Zhao Y., Yu T., Wang J. Geometry and dilution rate analysis and prediction of laser cladding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. 103. 4695-4702. DOI: 10.1007/s00170-019-03932-7
4. Sidorov V. P., Melzitdinova A. V. Metodika opredeleniya trebovaniy k tochnosti parametrov svarki [Methodology for determining requirements for the accuracy of welding parameters] // *Welding and diagnostics*. 2014. 3. 10-13.
5. Borisova A.L., Mits I.V., Kayda T.V., Dzykovich I. Ya., Korzhik V. N. Struktura i svoystva elektrodugovykh pokrytiy na osnove ferrobora, poluchennykh iz poroshkovykh provolok [Structure and properties of electric arc coatings based on ferroboron obtained from powder wires] // *The Paton Welding Journal*. 1991. 9 (462). 66-68.
6. Skoblo T.S., Tikhonov A.V., Rybalko I.N. Novyy sposob vosstanovleniya detaley [New method of parts restoration] // *Avtomobil'nyy transport*. 2012. 31. 124-128.
7. Kozyrev N. A., Kibko N. V., Umanskiy A. A., Titov D. A., Sokolov P. D. Povysheniye kachestva naplavlennogo sloya prokatnykh valkov za schet optimizatsii sostava poroshkovykh provolok [Improving the quality of the deposited layer of rolling rolls by optimizing the composition of powder wires] // *Welding Production*. 2017. 7. 29-34.
8. Kuznetsov M.A., Zernin Ye.A., Kolmogorov D.Ye., Shlyakhova G.V., Danilov V.I. Stroyeniye, morfologiya i dispersnost' metalla, naplavlennoy dugovoy svarkoy plavyashchimsya elektrodom v argone v prisutstvii nanostrukturirovannykh modifikatorov

[Structure, morphology and dispersion of metal deposited by arc welding with a consumable electrode in argon in the presence of nanostructured modifiers] // *Welding and diagnostics*. 2012. 6. 8-10.

9. Wielage B., Pokhmurska H., Student M., Gvozdeckii V., Stupnyckij T., Pokhmurskii V. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures // *Surface & Coatings Technology*. 2013. 220. 27-35.

10. Boronenkov V.N., Korobov YU.S. Osnovy dugovoy metallizatsii. Fiziko-khimicheskiye zakonomernosti [Fundamentals of arc metallization. Physical and chemical laws]. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2012. 268 p.

11. GOST R ISO 643-2011. Stal'. Metallograficheskoye opredeleniye nablyudayemogo razmera zerna [Steels. Micrographic determination of the apparent grain size]. Moscow: Standartinform, 2014. 36 p.

12. Trudov A. F., Trykov Yu. P., Klochkov S. V., Dontsov D. Yu., Voynov M. O. Effect of heat treatment on structural and mechanical heterogeneity of explosion-welded bimetal st3+12x18n10t [Effect of heat treatment on structural and mechanical heterogeneity of explosion-welded bimetal st3+12x18n10t] // *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2009. 12. 41-44.

13. Shlyakhova G. V., Barannikova S. A., Bochkareva A. V., Li Y. V., Zuev L. B. Structure of a Carbon Steel–Stainless Steel Bimetal // *Steel in Translation*. 2018. 48 (4). 219-223. DOI: 10.3103/S0967091218040101

14. Gelman A. S., Chudnovsky A. D., Tsemakhovich B. D., Kharina I. L. Plakirovaniye stali vzryvom: struktura i svoystva biometalla [Explosion cladding of steel: structure and properties of biometal] / edited by A. S. Gelman. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 191 p.

Информация об авторах

Шляхова Галина Витальевна – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия), ORCID: 0000-0001-9578-2989, shgv@ispms.ru

Орлова Дина Владимировна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия). ORCID: 0000-0003-0068-2542, dvo@ispms.ru

Немлиенко Тимур Сергеевич – студент, инженер-исследователь, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия), ORCID: 0009-0005-2203-7351, tsn4@tpu.ru

Сороков Николай Николаевич – студент, лаборант-исследователь, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия), ORCID: 0009-0009-9901-9089, sorokov105@gmail.com

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.397: 519.65

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).478-488

Поступила в редакцию / Received 03.07.2024

ГРНТИ 47.51.39+27.41.24

Специальность ВАК 2.2.13

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

Научная статья

КОМПЕНСАЦИЯ ЭФФЕКТА НАРЦИССА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДИСТАНЦИЯХ ФОКУСИРОВКИ

Гарбарь С. В., Ласков И. А.

АО «ЭЛСИ» (Великий Новгород, Россия)

Аннотация Охлаждаемые инфракрасные детекторы зачастую подвержены эффекту Нарцисса. В работе рассмотрен алгоритмический подход к коррекции эффекта для оптической системы с переменным фокусным расстоянием при различных дистанциях фокусировки, основанный на интерполяции некоторого базового набора корректирующих кадров. Отдельно рассматривается интерполяция при изменении фокусного расстояния и при изменении дистанции фокусировки. Представлена процедура интерполяции при изменении обоих параметров. Описаны требования к базовому набору компенсирующих кадров. Рассмотрен пример применения алгоритма.

Ключевые слова: эффект Нарцисса, инфракрасный детектор

Для цитирования: Гарбарь С. В., Ласков И. А. Компенсация эффекта нарцисса для оптической системы с переменным фокусным расстоянием при различных дистанциях фокусировки // Вестник НовГУ. 2024. 3(137). 478-488. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).478-488

Research Article

COMPENSATION OF NARCISSUS EFFECT FOR AN OPTICAL SYSTEM WITH VARIABLE FOCAL LENGTH FOR DIFFERENT FOCUSING DISTANCES

Garbar S. V., Laskov I. A.

JSC "ELSI" (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract Cooled infrared detectors are often subject to Narcissus effect. Article describes an algorithmic approach to its correction for an optical system with variable focus length for different focusing distances. It is based on interpolating of a small number of base correcting frames. Procedures of interpolation for the case of changing only focus length or only focusing distance are described. Procedure for the case of changing the both parameters simultaneously is also presented. Requirements for base set of correcting frames are described. An example of algorithm application is also presented.

Keywords: Narcissus effect, infrared detector

For citation: Garbar S. V., Laskov I. A. Compensation of narcissus effect for an optical system with variable focal length for different focusing distances // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 478-488. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).478-488

Введение

Эффект Нарцисса возникает в том случае, когда инфракрасный детектор фиксирует отражения собственных холодных поверхностей в более тёплых поверхностях оптической системы – линзах объектива и защитных стёклах [1].

В центральной части изображения наблюдаются изображения колец или пятен, накладывающиеся на изображение реального объекта.

Оптическая система может состоять из большого количества отражающих поверхностей, соответственно, картина Нарцисса представляет собой сумму отдельных отражений (от различных поверхностей). Минимизация эффекта Нарцисса – это одна из задач, которая решается при разработке оптической системы [2-4].

Абсолютная величина ошибки, вносимой эффектом Нарцисса, незначительна. Влияние эффектно визуально наиболее заметно на однородных сценах и/или при высоком уровне контрастирования. В противном случае им можно пренебречь. В работах [5, 6] рассмотрены статистические подходы к компенсации эффекта. Дополнительно на эффект Нарцисса может оказать влияние изменение температуры оптической системы в процессе её работы. Подход к компенсации этого эффекта рассмотрен, например, в [7].

В соответствии с линейной моделью неоднородности изображения [8], каждый отдельный пиксель с координатами i, j имеет собственные коэффициент усиления g_{ij} и смещение o_{ij} . Различие в усилении и смещении каждого пикселя являются причиной наличия на получаемом изображении статических шумов, которые для охлаждаемого тепловизионного детектора требуют обязательной коррекции. Для линейной (также зачастую называемой двухточечной) коррекции пикселя с координатами i, j используется преобразование по формуле

$$v'_{ij} = g_{ij} \cdot v_{ij} + o_{ij}, \quad (1)$$

При фиксированных величинах фокусного расстояния и точки фокусировки эффект Нарцисса может быть рассмотрен как дополнительное низкочастотное смещение для каждого из пикселей [9]. Коррекция предполагает вычитание этого дополнительного смещения $n_{ij}(z, f)$ из каждого пикселя изображения. Совокупность пикселей $n_{ij}(z, f)$ формирует компенсирующий кадр $C(z, f)$.

Сложность компенсации для системы с изменяемым фокусным расстоянием z либо при изменении дистанции фокусировки f заключается в том, что при их изменении меняется взаимное расположение компонентов оптической системы, а значит и картина эффекта Нарцисса.

Компенсирующий кадр может быть получен как попиксельная разность однородного кадра для данных z, f и кадра, использованного для получения коэффициента усиления g_{ij} и смещения o_{ij} .

Компенсация эффекта Нарцисса может быть реализована как

$$v''_{ij} = v'_{ij} - n_{ij}(z, f) = g_{ij} \cdot v_{ij} + o_{ij} - n_{ij}(z, f), \quad (2)$$

где $n_{ij}(z, f)$ – дополнительное смещение интенсивности пикселя, вызванное эффектом Нарцисса.

Даже незначительные изменения z влекут за собой изменения картины эффекта Нарцисса. Влияние изменения f менее значительны, но тем не менее тоже должны быть учтены. Таким образом, для каждой возможной пары значений z, f нужно иметь отдельный компенсирующий кадр. Как съёмка, так и хранение и загрузка для последующего использования могут представлять сложности.

В данной работе рассматривается задача компенсации эффекта Нарцисса для оптической системы с изменяемым фокусным расстоянием при различных дистанциях фокусировки. При предлагаемом подходе к решению предполагается наличие небольшого количества заранее подготовленных компенсирующих кадров для ограниченного набора значений (z, f) , который мы в дальнейшем называем узлами сетки опорных кадров. Для промежуточных значений между узлами предлагается использовать методы интерполяции. Далее рассматривается получение компенсирующего кадра при изменении только одного из параметров z, f относительно узлов сетки, а также нахождение компенсирующего кадра для произвольных значений (z, f) . Также приведён пример применения алгоритма.

Получение корректирующего кадра для промежуточных значений фокусного расстояния

Рассмотрим случай, когда имеются два компенсирующих кадра $C(z_0, f_0)$, $C(z_1, f_1)$ одинаковой резкости для разных значений фокусного расстояния z_0, z_1 . Поставим задачу получения компенсирующего кадра для промежуточного значения $z \in (z_0; z_1)$. Заметим, что одинаковая резкость кадров не означает того, что дистанции фокусировки объектива одинаковы.

При небольшой разнице между z_0, z_1 сделаем предположение о том, что один из компенсирующих кадров может быть получен из другого растяжением и сдвигом. Также предполагаем, что при не очень значительных изменениях фокусного расстояния зависимость параметров данного аффинного преобразования от z может быть приближена линейной.

Описанное преобразование является частным случаем преобразования, и описывается матрицей:

$$M_{z_0, z_1} = \begin{pmatrix} s_{z_0, z_1} & 0 & \Delta i_{z_0, z_1} \\ 0 & s_{z_0, z_1} & \Delta j_{z_0, z_1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где s_{z_0, z_1} — коэффициент масштабирования, $\Delta i_{z_0, z_1}, \Delta j_{z_0, z_1}$ — сдвиги по соответствующим координатам. В данной матрице обнулены элементы, соответствующие преобразованию поворота, и предполагается, что растяжения по обеим осям одинаковы. В случае если для каких-то конкретных устройств какие-то из этих предположений неверны, матрица может быть выписана в более общем виде.

Промежуточную матрицу определим как матрицу частичного применения данного преобразования. Найдём относительное положение z между z_0, z_1 :

$$r_z = \frac{z - z_0}{z_1 - z_0}, \quad (4)$$

Модифицированная матрица имеет вид:

$$M_{z_0,z} = \begin{pmatrix} s_{z_0,z_1}^{r_z} & 0 & r_z \cdot \Delta i_{z_0,z_1} \\ 0 & s_{z_0,z_1}^{r_z} & r_z \cdot \Delta j_{z_0,z_1} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $s_{z_0,z_1}^{r_z} = e^{r_z \cdot \ln s_{z_0,z_1}}$ – взвешенное среднее геометрическое чисел s_{z_0,z_1} и единицы. Значение $s_{z_0,z_1} = 1$ здесь означает отсутствие масштабирования. Если кадры незначительно отличаются друг от друга, то s_{z_0,z_1} будет близким к единице, а значит, среднее геометрическое можно на практике заменить на среднее арифметическое.

Применение преобразования, описываемого матрицей $M_{z_0,z}$, к кадру $C(z_0, f_0)$ позволяет получить приближение к значению корректирующего кадра для фокусного расстояния z той же резкости, что исходный кадр.

Заметим, что если $r_z > 0,5$, то разумным будет обратное преобразование компенсирующего кадра $C(z_1, f_1)$, соответствующее фокусному расстоянию z_1 . Матрица обратного частичного аффинного преобразования в этом случае имеет вид:

$$M_{z_1,z} = \begin{pmatrix} s_{z_0,z_1}^{-(1-r_z)} & 0 & -(1-r_z) \cdot s_{z_0,z_1}^{-1} \Delta i_{z_0,z_1} \\ 0 & s_{z_0,z_1}^{-(1-r_z)} & -s_{z_0,z_1}^{-1} (1-r_z) \cdot \Delta j_{z_0,z_1} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

Корректирующий кадр можно сформировать как взвешенное среднее кадров, полученных применением аффинного преобразования, описанного матрицей $M_{z_0,z}$, к кадру $C(z_0, f_0)$ с весом $(1-r_z)$ и применением аффинного преобразования, описанного матрицей $M_{z_1,z}$, к кадру $C(z_1, f_1)$ с весом r_z . Полученный корректирующий кадр будет линейной комбинацией кадров $C(z_0, f_0)$ и $C(z_1, f_1)$. При этом будет отсутствовать резкая смена корректирующего кадра при плавном изменении фокусного расстояния при $r_z = 0,5$.

Для получения матрицы перехода между базовыми кадрами можно применить несколько подходов. Аффинное преобразование однозначно определяются координатами трёх точек, не лежащих на одной прямой, и их образов. Такие характерные точки и их образы могут быть фиксированы относительно картины эффекта Нарцисса на $C(z_0, f_0)$ и $C(z_1, f_1)$. Возможно также применение методов глобальной оптимизации относительно параметров s_{z_0,z_1} , $\Delta i_{z_0,z_1}$, $\Delta j_{z_0,z_1}$, при этом может потребоваться предобработка базовых кадров, например, контрастирование и размытие. Конкретные параметры предобработки будут зависеть от используемой оптической системы. В качестве функции потерь можно рассматривать дисперсию разности между целевым и преобразованным кадрами.

Получение корректирующего кадра для промежуточных значений дистанции фокусировки

Чтобы получить картину эффекта Нарцисса одинаковой резкости при разных фокусных расстояниях, может оказаться необходимым установить разные величины дистанции фокусировки. То есть для каждого значения z значение f , для которого эффект Нарцисса имеет наибольшую резкость. Множество всех пар значений z и f , для которых выполняется это условие, далее будем называть линией резкой картины эффекта Нарцисса на плоскости возможных значений (z, f) .

При фиксированной величине z изменение f как в сторону увеличения, так и уменьшения относительно точки на линии резкой картины эффекта Нарцисса, уменьшает резкость картины.

При фиксированном значении фокусного расстояния z поставим задачу нахождения компенсирующего кадра для некоторой дистанции фокусировки f . Считаем, что мы имеем пару компенсирующих кадров $C(z, f_0), C(z, f_1), f \in [f_0, f_1]$. Не уменьшая общности, будем предполагать, что кадр $C(z, f_1)$ соответствует менее резкой картине Нарцисса, чем $C(z, f_0)$.

Найдём относительное положение f между f_0, f_1 :

$$r_f = \frac{f - f_0}{f_1 - f_0}, \quad (7)$$

Будем считать, что при достаточно близких f_0, f_1 уменьшение резкости картины Нарцисса может быть приближено гауссовым размытием с ядром размера k , и при небольших изменениях f зависимость k от r_f приблизительно линейна.

Тогда получение компенсирующего кадра для пары параметров (z, f) может быть реализовано как гауссово размытие кадра $C(z, f_0)$ с ядром размера $r_f \cdot k$ (округлённым до ближайшего допустимого значения).

Подбор подходящего значения k также можно осуществить, предварительно обрабатывая кадры и оценивая дисперсию разности между ними при различных размерах ядра свёртки. Параметры предобработки также будут зависеть от параметров используемой оптической системы.

Получение корректирующего кадра для произвольных значений фокусного расстояния и дистанции фокусировки

Рассмотрим решение задачи получения компенсирующего кадра для произвольных значений (z, f) . Для решения задачи предполагаем наличие набора компенсирующих кадров $C(z_0, f_0), C(z_1, f_1), \dots, C(z_n, f_n)$, где точки $(z_0, f_0), (z_1, f_1), \dots, (z_n, f_n)$ находятся на линии резкой картины эффекта Нарцисса. Данный набор позволяет получить приближение промежуточного компенсирующего кадра, также лежащего на этой линии, для этого следует предварительно найти все матрицы преобразования между соседними кадрами.

Для получения компенсирующих кадров меньшей резкости при уменьшении и увеличении дистанции фокусировки выберем набор смещений относительно линии резкой картины эффекта Нарцисса $(d_{-l}, d_{-(l-1)}, \dots, d_{-1}, 0, d_1, d_2, \dots, d_k)$ таких, что $d_{-l} < d_{-(l-1)} < \dots < d_{-1} < 0 < d_1 < d_2 < \dots < d_k$. Для каждого d_j , $j = -l, \dots, k$ получим компенсирующие кадры $C(z_i, f_i + d_j)$, где $C(z_i, f_i)$ принадлежит линии резкой картины эффекта Нарцисса.

Таким образом, построена «сетка» опорных кадров на плоскости возможных значений фокусных расстояний и дистанций фокусировки.

Для каждой точки сетки с $d = 0$ (то есть для кадров, обладающих максимальной резкостью, лежащих на линии резкой картины Нарцисса) следует найти матрицу перехода из соседней точки с $d = 0$. Для каждой точки сетки с $d \neq 0$ следует найти ядро размытия кадра с соседним меньшим по модулю значением смещения дистанции фокусировки.

Для имеющегося целевого значения z нужно выбрать соседние значения z_{i-1}, z_i , которые зададут опорные кадры, $z \in [z_{i-1}, z_i)$, $i = 1, \dots, n$. Найдём смещение целевого значения f относительно значения дистанции фокусировки для полученного кадра заданной резкости

$$d = f - \left(f_{i-1} + \frac{z - z_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \cdot (f_i - f_{i-1}) \right), \quad (8)$$

где f_{i-1}, f_i — значения дистанции фокусировки для использованных ранее опорных кадров.

Для полученного значения смещения определяем, между которыми значениями d_{j-1}, d_j оно расположено.

При помощи процедуры, описанной в первом разделе статьи, получаем кадр возможно более резкий, чем необходимо, из компенсирующих кадров $C(z_{i-1}, f_{i-1} + d_{j-1})$ и $C(z_i, f_i + d_{j-1})$. Далее следует получить более размытый вариант этого кадра, для этого усредним значения размеров ядер размытия для точек $(z_{i-1}, f_{i-1} + d_j)$ и $(z_i, f_i + d_j)$.

Таким образом получен компенсирующий кадр для заданных значений (z, f) .

Пример применения алгоритма

В качестве примера рассмотрим систему, состоящую из инфракрасного детектора с разрешением 640×512 и объектива с переменным фокусным расстоянием 15–300mm f/4,0. Обработка данных производится в 16-битном формате.

Значения фокусного расстояния и дистанции фокусировки параметризуются 32-битным и 16-битным целыми числами соответственно. Меньшее значение параметра фокусного расстояния z соответствует большему фокусному расстоянию,

то есть более узкому полю зрения. Большее значение параметра дистанции фокусировки f соответствует более близкой точке фокусирования.

Объектив позволяет установить дистанции фокусировки, не применяющиеся на практике, то есть фокусироваться дальше, чем фокус на бесконечность, и ближе, чем на стекле самого объектива. На рисунке 1 штриховкой показаны области на плоскости фокусное расстояние — дистанция фокусировки, которые в связи с этим не представляют интереса при практическом использовании. Сплошной линией показаны соотношения параметров, при которых наблюдаемый эффект Нарцисса является наиболее резким, то есть линия резкой картины эффекта Нарцисса. Как видно, при некоторых значениях фокусного расстояния он присутствует и при фокусировании на бесконечность, что зачастую может служить режимом работы оптической системы по умолчанию.

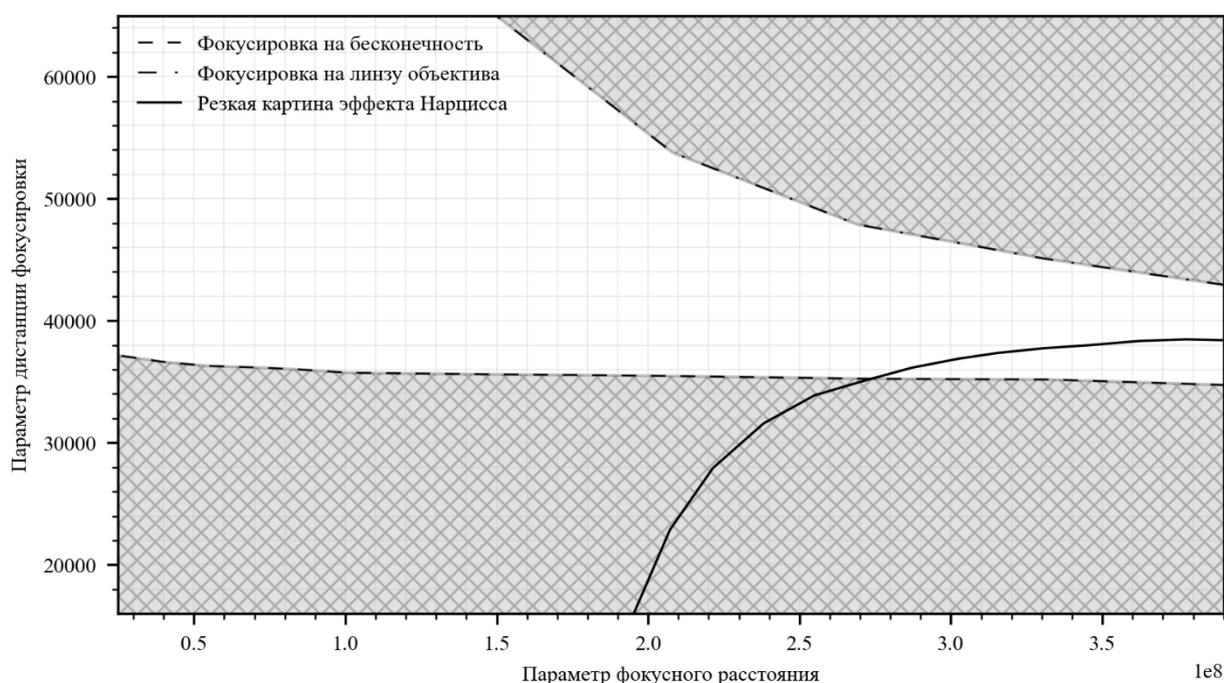


Рисунок 1. Линия резкой картины эффекта Нарцисса на плоскости параметров фокусного расстояния и дистанции фокусировки

Рассмотрим часть построенной сетки опорных кадров.

Точки, лежащие на линии резкой картины эффекта Нарцисса: $(z_0, f_0) = (254909000, 33880)$, $(z_1, f_1) = (270371000, 35010)$, $(z_2, f_2) = (287122000, 36150)$.

Матрицы перехода:

$$M_{z_0, z_1} = \begin{pmatrix} 0,765 & 0 & 71 \\ 0 & 0,765 & 55 \end{pmatrix}, M_{z_1, z_2} = \begin{pmatrix} 0,798 & 0 & 57 \\ 0 & 0,798 & 53 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Размеры ядер для Гауссова размытия для получения приближения кадра текущей резкости из более резкого представлены в таблице 1. В таблицу не включены узлы сетки со смещением дистанции фокусировки, равным нулю.

Таблица 1. Размеры ядер для Гауссова размытия для узлов сетки

Параметр фокусного расстояния	Параметр смещения дистанции фокусировки		
	-1000	1000	2000
254909000	59	49	9
270371000	87	55	9
287122000	95	53	11

На рисунке 2 представлен кадр, полученный при съёмке модели абсолютно чёрного тела при температуре 25°C при параметрах $z = 280421600$, $f = 36200$, смещение относительно линии резкой картины Нарцисса $d = 506$. К кадру применена двухточечная коррекция неоднородностей отклика матрицы. Исходя из условий съёмки, кадр должен иметь равномерную интенсивность, однако для демонстрации эффекта Нарцисса к нему было применено локальное контрастирование, из-за которого хорошо заметны незначительные неоднородности.

Рисунок 3 показывает точки, соответствующие параметрам опорных кадров сетки и целевого кадра, расположенные на плоскости значений параметров z, f .

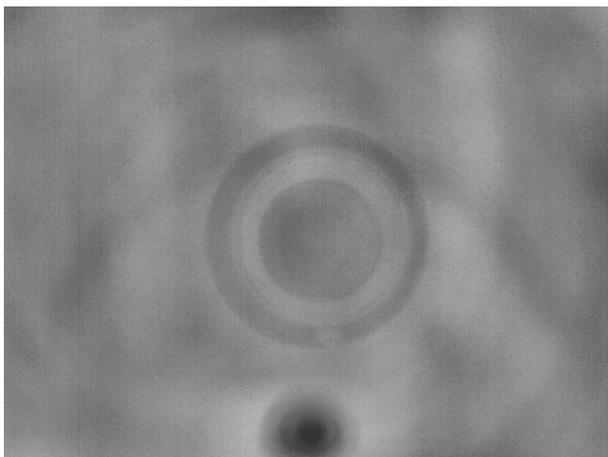


Рисунок 2. Снимок модели абсолютно чёрного тела, подлежащий коррекции эффекта Нарцисса

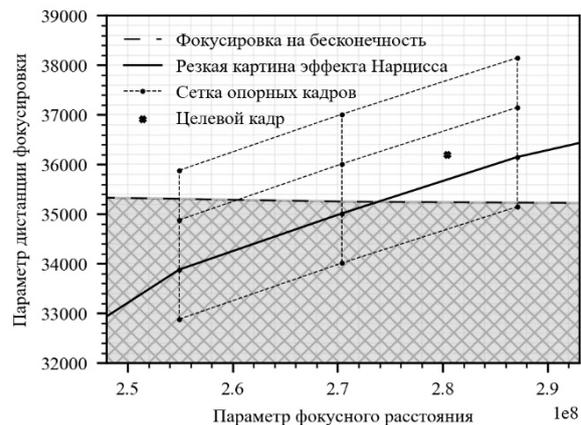


Рисунок 3. Параметры для сетки опорных кадров и целевого кадра

Рисунки 4 и 5 показывают базовые компенсирующие кадры, на основании которых получено приближение: $(z_1, f_1) = (270371000, 35010)$, $(z_2, f_2) = (287122000, 36150)$.

Результаты применения этих кадров в исходном виде в качестве компенсирующих показаны на рисунках 6, 7. Видно, что даже небольшое отклонение в форме картины эффекта Нарцисса приводит к значительным искажениям исходного изображения.

Получим компенсирующий кадр, используя описанный подход. Относительное положение z между z_1, z_2 : $r_z = 0,6$. Матрицы преобразования

$$M_{z_1,z} = \begin{pmatrix} 0,928 & 0 & 22 \\ 0 & 0,928 & 17 \end{pmatrix}, M_{z_2,z} = \begin{pmatrix} 1,051 & 0 & -17 \\ 0 & 1,051 & -13 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

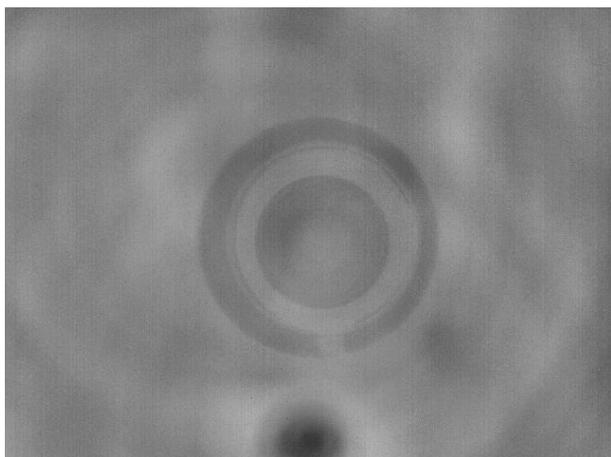


Рисунок 4. Базовый корректирующий кадр при $z_1 = 270371000$

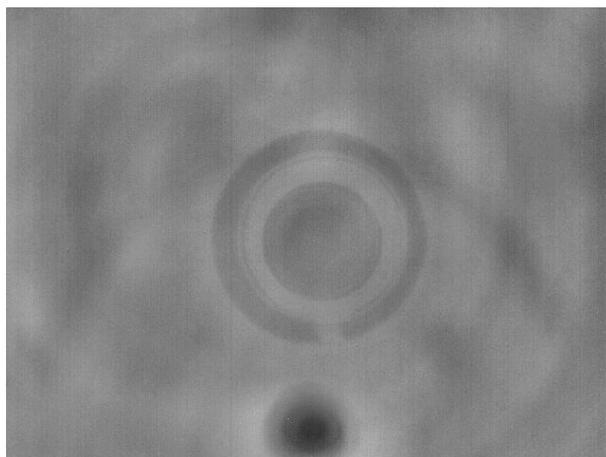


Рисунок 5. Базовый корректирующий кадр при $z_2 = 287122000$

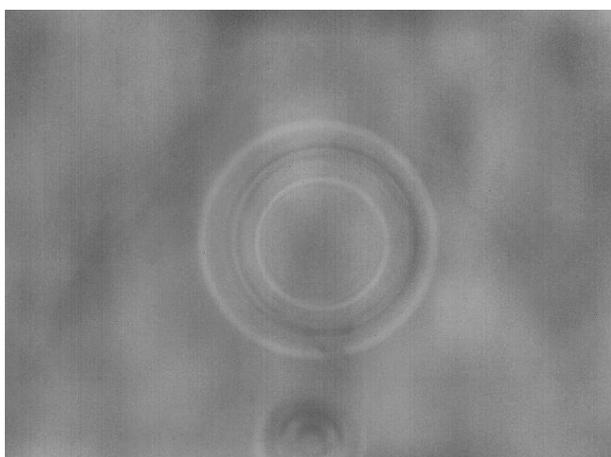


Рисунок 6. Использование корректирующего кадра $z_1 = 270371000$ для коррекции сцены с $z = 280421600$

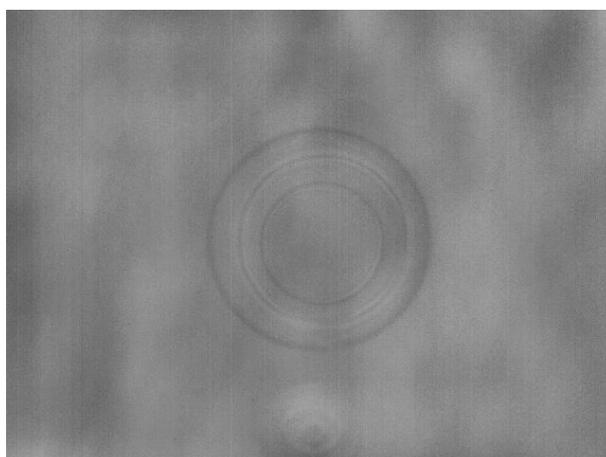


Рисунок 7. Использование корректирующего кадра $z_2 = 287122000$ для коррекции сцены с $z = 280421600$

Для Гауссова размытия используется ядро размера 5.

На рисунке 8 представлен компенсирующий кадр, вычитание которого из снимка сцены устранил эффект Нарцисса. Так как в данном случае сцена представляет собой множество пикселей одинаковой интенсивности, то компенсирующий кадр по сути является приближением самой сцены, представленной на рисунке 2.

Результат коррекции (с применённым локальным контрастированием) представлен на рисунке 9. На изображении видно, что расположенное в нижней части кадра тёмное пятно скомпенсировано хуже, так как матрицы преобразования были подобраны для основной части картины Нарцисса. Однако, учитывая однородность сцены и применение локального контрастирования, то есть наиболее сложных условий, можно говорить о том, что предложенный алгоритм является эффективным.

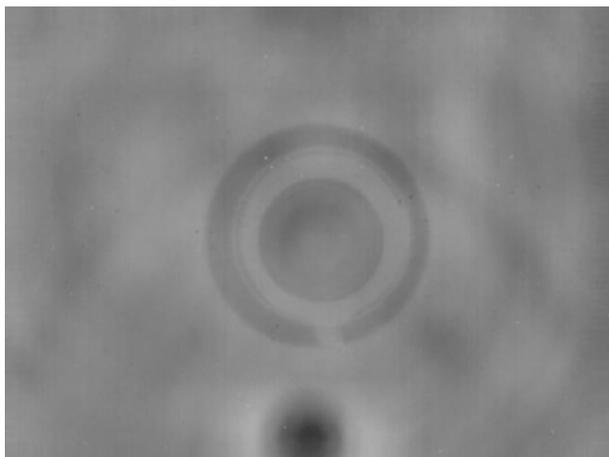


Рисунок 8. Приближение компенсирующего кадра, полученного из двух базовых кадров аналогичной резкости

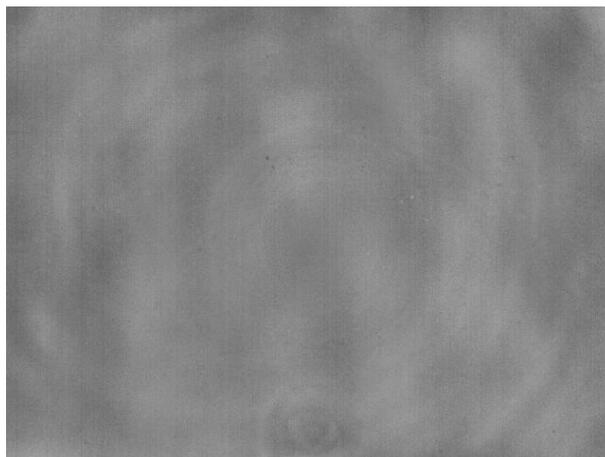


Рисунок 9. Результат коррекции, полученный с использованием приближения компенсирующего кадра

Заключение

В данной работе предложен подход к компенсации эффекта Нарцисса для объектива с переменным фокусным расстоянием при различных дистанциях фокусировки.

Предложенный метод требует некоторого объёма предварительной работы для съёмки базовых компенсирующих кадров и вычисления параметров преобразований для получения из каждого из них приближения для некоторого количества других. Однако полученные результаты позволяют компенсировать эффект Нарцисса для произвольных значений фокусного расстояния и дистанции фокусировки.

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность коллегам из сектора прикладного программного обеспечения за плодотворные дискуссии и ценные замечания.

Список литературы

1. Lau A. S. The Narcissus Effect In Infrared Optical Scanning Systems // Stray Light Problems in Optical Systems; Proceedings of the Seminar, Reston, Va., April 18-21, 1977 / Edited by J.D. Lytle, H. Morrow. SPIE Proceedings, Vol. 107. Bellingham, WA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1977. P. 57. DOI: 10.1117/12.964596
2. Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, Yang Jianguo, Cai Zhan'en, Lin Futiao. Analysis of Stray Light Caused by Thermal Radiation of Infrared Detection System // Acta Optica Sinica. 2010. 30 (8). 2267-2271. DOI: 10.3788/aos20103008.2267
3. Mei Chaoyang, Cui Qingfeng, Hu Yang, Sun Lin, Gao Xudohg, Zheng Hanqin. Correction Method of Narcissus Effect of Cooled Infrared System Based on Differential Threshold // Acta Photonica Sinica. 2021. 50 (11). 1111003. DOI: 10.3788/gzxb20215011.1111003
4. Lei Li, Xing Zhong, Zheng Qu, Guangqing Xia, Yuanhang Wang, Chaoli Zeng. Spherical aberration-based compensation method for Narcissus // Applied Optics. 2023. 62 (34). 9082-9088. DOI: 10.1364/AO.502095
5. Cangzhou Shi, Junming Hao. A real-time Narcissus correction algorithm based on Gaussian mixture models // Infrared Physics & Technology. 2021. 117. 103855. DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103855

6. Yang Cao, Wei-qi Jin, Chong-liang Liu, Xiu Liu, Fu-wen Li, Wei-li Chen. Research on scene-based Narcissus correction algorithm in infrared focal plane arrays // International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Imaging and Process Technology (SPIE). 2009. 7513. 75131S. DOI: 10.1117/12.837890
7. Соболев П. С., Черняк Б. В., Петров М. Н. Коррекция влияния температуры окружающей среды на оптическую систему тепловизионного канала // Вестник НовГУ. 2019. 2 (114). 27-30. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.2(114).27-30
8. Perry D. L., Dereniak E. L. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors // Optical Engineering. 1993. 32 (8). 1854-1859. DOI: 10.1117/12.145601
9. Zhang Bob, Hong Y.-F, Shi G.-H. Application of non-uniformity correction to stray radiation suppression of infrared optical system // Optics and Precision Engineering (Chinese). 2008. 16 (12). 2421-2428.

References

1. Lau A. S. The Narcissus Effect In Infrared Optical Scanning Systems // Stray Light Problems in Optical Systems; Proceedings of the Seminar, Reston, Va., April 18-21, 1977 / Edited by J.D. Lytle, H. Morrow. SPIE Proceedings, Vol. 107. Bellingham, WA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1977. P. 57. DOI: 10.1117/12.964596
2. Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, Yang Jianguo, Cai Zhan'en, Lin Futiao. Analysis of Stray Light Caused by Thermal Radiation of Infrared Detection System // Acta Optica Sinica. 2010. 30 (8). 2267-2271. DOI: 10.3788/aos20103008.2267
3. Mei Chaoyang, Cui Qingfeng, Hu Yang, Sun Lin, Gao Xudohg, Zheng Hanqin. Correction Method of Narcissus Effect of Cooled Infrared System Based on Differential Threshold // Acta Photonica Sinica. 2021. 50 (11). 1111003. DOI: 10.3788/gzxb20215011.1111003
4. Lei Li, Xing Zhong, Zheng Qu, Guangqing Xia, Yuanhang Wang, Chaoli Zeng. Spherical aberration-based compensation method for Narcissus // Applied Optics. 2023. 62 (34). 9082-9088. DOI: 10.1364/AO.502095
5. Cangzhou Shi, Junming Hao. A real-time Narcissus correction algorithm based on Gaussian mixture models // Infrared Physics & Technology. 2021. 117. 103855. DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103855
6. Yang Cao, Wei-qi Jin, Chong-liang Liu, Xiu Liu, Fu-wen Li, Wei-li Chen. Research on scene-based Narcissus correction algorithm in infrared focal plane arrays // International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Imaging and Process Technology (SPIE). 2009. 7513. 75131S. DOI: 10.1117/12.837890
7. Sobolev P. S., Chernyak B. V., Petrov M. N. Korrektsiya vliyaniya temperatury okruzhayushchey sredy na opticheskuyu sistemu teplovizionnogo kanala [Correction of the influence of ambient temperature on the optical system of the thermal imaging channel] // Vestnik NovSU. 2019. 2 (114). 27-30. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.2(114).27-30
8. Perry D. L., Dereniak E. L. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors // Optical Engineering. 1993. 32 (8). 1854-1859. DOI: 10.1117/12.145601
9. Zhang Bob, Hong Y.-F, Shi G.-H. Application of non-uniformity correction to stray radiation suppression of infrared optical system // Optics and Precision Engineering (Chinese). 2008. 16 (12). 2421-2428.

Информация об авторах

Гарбарь Сергей Владиславович – ведущий инженер, АО «ЭЛСИ» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-5205-5252, Sergey.Garbar@novsu.ru

Ласков Илья Анатольевич – инженер, АО «ЭЛСИ» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0001-7731-4900, laskovi.workmail@gmail.com

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 519.7:517.521.1

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).489-497

Поступила в редакцию / Received 04.07.2024

ГРНТИ 27.47.17

Специальность ВАК 2.2.13; 1.3.4

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

Научная статья

О СИММЕТРИЧНОЙ 2-АДИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЛЕЖАНДРА

Едемский В. А., Дроганова Д. С.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация 2-адическая сложность, наряду с линейной сложностью, являются важными характеристиками псевдослучайных последовательностей, значимыми для их практических приложений. Для оценки непредсказуемости бинарных последовательностей предпочтительнее симметричная 2-адическая сложность, которая определяется как наименьшая из 2-адической сложности последовательности и 2-адической сложности последовательности, записанной в обратном порядке. В статье исследуется симметричная 2-адическая сложность чередующихся бинарных последовательностей, обладающих высокой линейной сложностью и хорошими автокорреляционными свойствами. Для определения рассматриваемых последовательностей используются циклические сдвиги последовательностей Лежандра и их дополнения. Показано, что для этих последовательностей симметричная 2-адическая сложность близка к максимально возможной и достаточна для отражения атак посредством алгоритма рациональной аппроксимации. Метод исследования основан на анализе соотношения между периодической автокорреляционной функции последовательности, значения которой известны, и порождающего многочлена последовательности, инверсной к искомой.

Ключевые слова: бинарные последовательности, симметричная 2-адическая сложность, чередование последовательностей Лежандра

Для цитирования: Едемский В. А., Дроганова Д. С. О симметричной 2-адической сложности чередующихся последовательностей на основе последовательностей Лежандра // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 489-497. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).489-497

Research Article

ABOUT SYMMETRIC 2-ADIC COMPLEXITY OF INTERLEAVING SEQUENCES BASED ON LEGENDRE SEQUENCES

Edemskiy V. A., Droганova D. S.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract 2-adic complexity, along with linear complexity, are important characteristics of pseudorandom sequences that are significant for their practical applications. To assess the unpredictability of binary sequences, symmetric 2-adic complexity is preferred, which is defined as the lesser of the 2-adic complexity of the sequence and the 2-adic complexity of the sequence written in reverse order. The article studies the symmetric 2-adic complexity of alternating binary sequences with high linear complexity and good autocorrelation properties. To determine the sequences under consideration, cyclic shifts of Legendre sequences and their complements are used. It is shown that for these sequences the symmetric 2-adic complexity is close to the maximum possible and is sufficient to repel attacks using the rational approximation algorithm. The research method is based on the analysis of the relationship between the periodic autocorrelation function of a sequence, the values of which are known, and the generating polynomial of the sequence, inverse to the desired one.

Keywords: *binary sequences, symmetric 2-adic complexity, interleaving Legendre sequences*

For citation: Edemskiy V. A., Drozanova D. S. About symmetric 2-adic complexity of interleaving sequences based on Legendre sequences // Vestnik NovSU. 2024. 3(137). 489-497. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).489-497

Введение

Для оценки непредсказуемости бинарных псевдослучайные последовательности применяются различные виды сложностей, в частности 2-адическая и симметричная 2-адическая сложности [1, 2]. Понятие 2-адической сложности предложено Горески и Клаппер в [1] при исследовании свойств последовательностей, формируемых посредством нового регистра сдвига, который они назвали регистром сдвига с обратной связью с переносом.

Изучению 2-адической сложности и симметричной 2-адической сложности бинарных последовательностей, в частности циклотомических и полученных их чередованием, посвящено много работ [3-9]. В настоящей статье продолжим исследование 2-адической сложности, начатое в [8, 9] и изучим симметричную 2-адическую сложность бинарных последовательностей, которые получаются чередованием циклических сдвигов последовательностей Лежандра и их дополнений.

Определение последовательностей

Рассмотрим множество из M последовательностей $\{a_0, a_1, \dots, a_{M-1}\}$ с периодом N . Через $u = I(a_0, a_1, \dots, a_{M-1})$ будем обозначать чередующуюся последовательность, полученную из a_0, a_1, \dots, a_{M-1} . Здесь, I – оператор чередования. Как показано в [10-14], при соответствующем выборе a_0, a_1, \dots, a_{M-1} последовательность u , имеющую высокую линейную сложность и хорошие автокорреляционные свойствами, в частности, если в качестве последовательностей a_0, a_1, \dots, a_{M-1} использованы циклические сдвиги последовательностей Лежандра и их дополнения [10]. Здесь исследуем симметричную 2-адическую сложность двух семейств таких.

Пусть $p > 5$ – нечетное простое число. Множества квадратичных вычетов и невычетов по модулю p обозначим через QR и NR , соответственно. Эти множества образуют разбиение группы обратимых элементов: $\mathbb{Z}_N^* = QR \cup NR$.

Пусть $\left(\frac{m}{p}\right)$ - символ Лежандра, то есть

$$\left(\frac{m}{p}\right) = \begin{cases} 0, & \text{если } m = 0, \\ 1, & \text{если } m \in QR, \\ -1, & \text{если } m \in NR. \end{cases}$$

Двоичные последовательности Лежандра l и l' определяются по следующим формулам

$$l(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t = 0, \\ 1, & \text{если } t \in \mathbb{QR}, \\ 0, & \text{если } t \in \mathbb{NR}. \end{cases} \quad \text{и} \quad l'(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t = 0, \\ 1, & \text{если } t \in \mathbb{QR}, \\ 0, & \text{если } t \in \mathbb{NR}. \end{cases}$$

2-адическая сложность двух семейств последовательностей, получающихся из последовательностей l и l' исследована в [13], но вопрос об их симметричной 2-адической сложности остался открытым.

Рассмотрим бинарную последовательность s с периодом $4p$, получаемую посредством формулы (1) из пары l и l' :

$$s = I(l, L^d(l) + b(1), L^{2d}(l) + b(2), L^{3d}(l') + b(3)), \quad (1)$$

где L - оператор циклического сдвига на единицу влево, $p \equiv 3 \pmod{4}$, $d = (p+1)/4$ и числа $b(1), b(2), b(3)$ равны нулю или единице. В [13] рассмотрено четыре варианта значений $(b(1), b(2), b(3))$, когда они равны соответственно $(0, 0, 1), (0, 1, 0), (1, 0, 0)$ или $(1, 1, 1)$. Для последовательности s в этих случаях будем применять обозначение $s_k, k = 1, 2, 3, 4$, как и в [13]. Многочлены этих последовательностей обозначим через $S_k(x), k = 1, 2, 3, 4$, соответственно.

Пример 1. Пусть $p = 7$. Тогда $l = (1, 1, 1, 0, 1, 0, 0)$ и $l' = (0, 1, 1, 0, 1, 0, 0)$. Рассмотрим первый случай, когда $(b(1), b(2), b(3)) = (0, 0, 1)$. Здесь $d = 2$, следовательно: $L^d(l) = L^2(l) = (1, 0, 1, 0, 0, 1, 1)$; $L^{2d}(l) = L^4(l) = (1, 0, 0, 1, 1, 1, 0)$; $L^{3d}(l') = L^6(l') = (0, 0, 1, 1, 0, 1, 0)$ и $L^{3d}(l') + b(3) = (1, 1, 0, 0, 1, 0, 1)$ и окончательно получаем, что

$$s = 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1.$$

Во втором случае, чередующаяся последовательность v также с периодом равным $4p$, определяется по формуле

$$v = I(l, L^d(l) + b(1), L^{2d}(l') + b(2), L^{3d}(l') + b(3)), \quad (2)$$

где $d = (p+1)/4$, если $p \equiv 3 \pmod{4}$ и $d = (3p+1)/4$, когда $p \equiv 1 \pmod{4}$. Здесь в [13] также рассмотрено четыре варианта последовательностей, в зависимости от значений $b(1), b(2), b(3)$.

Вспомогательные леммы

Пусть $S(x) = \sum_{t=0}^{4p-1} s(t)x^t$ - многочлен, соответствующий рассматриваемой последовательности. Для вычисления 2-адической сложности воспользуемся хорошо известной формулой

$$\Phi_2(s) = \log_2 \left(\frac{2^{4p}-1}{\text{НОД}(S(2), 2^{4p}-1)} \right),$$

где, как обычно, $\text{НОД}(m, n)$ – наибольший общий делитель двух чисел m, n [1].

Следовательно, если $S(x)$ – порождающий многочлен последовательности $\tilde{s} = (s(N - 1), s(N - 2), \dots, s(0))$, то её 2-адическая сложность вычисляется по следующей формуле:

$$\Phi_2(\tilde{s}) = \log_2 \left(\frac{2^{4p-1}}{\text{НОД}(S(2), 2^{4p-1})} \right). \quad (3)$$

Так как, $\tilde{\Phi}_2(s) = \min(\Phi_2(s), \Phi_2(\tilde{s}))$, то для вычисления симметричной 2-адической сложности последовательности, 2-адическая сложность которой известна, достаточно найти $\text{НОД}(S(2), 2^{4p} - 1)$.

Для этого напомним свойства многочлена чередующейся последовательности, которые доказаны в [14]. Требуемые для дальнейшего свойства приведены в следующей лемме.

Лемма 1. Пусть c, e, f, h – бинарные последовательности с периодом N . Тогда для их многочленов над конечным полем второго порядка справедливы следующие соотношения:

1. $S_e(x) \equiv x^{N-d} S_c(x) \pmod{x^N - 1}$, если $e = L^d(c)$;
2. $S_e(x) = S_c(x) + \frac{x^N - 1}{x - 1}$, если e – дополнение последовательности c ;
3. $S_u(x) = S_c(x^4) + x S_e(x^4) + x^2 S_f(x^4) + x^3 S_h(x^4)$, если $u = I(c, e, f, h)$.

Лемма 2. Пусть s – двоичная последовательность, определенная по формуле

$$(1). \text{ Тогда } \tilde{s} = I \left(L^{p-3d}(\tilde{l}') + b(3), L^{p-2d}(\tilde{l}) + b(2), L^{p-d}(\tilde{l}) + b(1), \tilde{l} \right).$$

Утверждение этой леммы следует из определения обратной последовательности и леммы 1.

Пример 2. Пусть $p = 7, (b(1), b(2), b(3)) = (0, 0, 1)$, как u в примере 1. Тогда $\tilde{l} = (0, 0, 1, 0, 1, 1, 1)$, $\tilde{l}' = (0, 0, 1, 0, 1, 1, 0)$, следовательно, $L^{p-3d}(\tilde{l}') = L(\tilde{l}') = (0, 1, 0, 1, 1, 0, 0)$, $L^{p-3d}(\tilde{l}') + b(3) = (1, 0, 1, 0, 0, 1, 1)$, $L^{p-2d}(\tilde{l}) = L^3(\tilde{l}) = (0, 1, 1, 1, 0, 0, 1)$ и $L^{p-d}(\tilde{l}) = L^5(\tilde{l}) = (1, 1, 0, 0, 1, 0, 1)$. Таким образом,

$$\tilde{s} = 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1.$$

Лемма 3. Пусть $S_k(x)$ – многочлен последовательности $s_k, k = 1, 2, 3, 4$. Тогда

$$\text{НОД}(\tilde{S}_k(2), 15) = \begin{cases} 15, & \text{если } k = 1, \\ 5, & \text{если } k = 3. \\ 3, & \text{если } k = 2, 4 \end{cases}$$

Доказательство. Положим $c = L^{p-3d}(\tilde{l}') + b(3), e = L^{p-2d}(\tilde{l}) + b(2), f = L^{p-d}(\tilde{l}) + b(1), h = \tilde{l}$. Тогда, по леммам 1 и 2 получаем, что

$$\tilde{S}_k(2) = S_c(2^4) + 2S_e(2^4) + 2^2S_f(2^4) + 2^3S_h(2^4).$$

Следовательно, справедливо сравнение

$$\tilde{S}_k(2) \equiv S_c(1) + 2S_e(1) + 2^2S_f(1) + 2^3S_h(1) \pmod{15}. \quad (4)$$

Так как коэффициенты используемых многочленов равны 0 или 1, то значение $S_c(1)$ равно числу ненулевых членов в многочлене $S_c(x)$, то есть в соответствующей последовательности c . Этот же факт имеет место и для других многочленов, участвующих в сравнении (4).

По определению, последовательность l имеет $(p + 1)/2$ ненулевых элементов, а последовательность l' соответственно $(p - 1)/2$.

Пусть $k = 1$. Здесь, $b(3) = 1$ и $S_c(1) = p - (p - 1)/2 = (p + 1)/2$, $b(2) = 0$ и $S_e(1) = (p + 1)/2$, $b(1) = 0$ и $S_f(1) = (p + 1)/2$, а также $S_h(1) = (p + 1)/2$. В итоге, применяя сравнение (4), получаем, что $\tilde{S}_1(2) \equiv 0 \pmod{15}$. Значит, 15 делит $\tilde{S}_1(2)$. Утверждение этой леммы для других трех оставшихся случаев может быть показано тем же самым образом.

Лемма 4. Пусть $G(x^{-1}) = \sum_{t=0}^{4p-1} (-1)^{s(t)} x^t$. Тогда

$$2^{4p}G(2^{-1}) \equiv -4\tilde{S}(2) \pmod{2^{4p} - 1}.$$

Доказательство. По определению имеем $2^{4p}G(2^{-1}) = \sum_{t=0}^{4p-1} (-1)^{s(t)} 2^{4p-t}$. Ясно, что $(-1)^{s(t)} = 1 - 2s(t)$. Следовательно,

$$2^{4p}G(2^{-1}) = \sum_{t=0}^{4p-1} (1 - 2s(t))2^{4p-t} = 2^{4p} - 1 - 2 \sum_{t=0}^{4p-1} s(t)2^{4p-t}.$$

Далее, $\tilde{S}(2) = s(4p - 1) + s(4p - 2)2 + \dots + s(0)2^{4p-1}$. Значит, $\tilde{S}(2) = \sum_{t=0}^{4p-1} s(t)2^{4p-t}$. Из последнего равенства следует утверждение этой леммы.

Симметричная 2-адическая сложность чередующихся последовательностей

Основные результаты работы представлены в этом разделе.

Теорема 1. Пусть $p > 3$. Тогда

$$\Phi_2(s) = \Phi_2(\tilde{s}) = \Phi_2(s) = \begin{cases} \log_2\left(\frac{2^{4p} - 1}{15}\right), & \text{если } k = 1, \\ \log_2\left(\frac{2^{4p} - 1}{5}\right), & \text{если } k = 3, \\ \log_2\left(\frac{2^{4p} - 1}{15}\right), & \text{если } k = 2, 4. \end{cases}$$

Доказательство. Согласно [13] имеем, что

$$\Phi_2(s) = \begin{cases} \log_2\left(\frac{2^{4p} - 1}{15}\right), & \text{если } k = 1, \\ \log_2\left(\frac{2^{4p} - 1}{5}\right), & \text{если } k = 3, \\ \log_2\left(\frac{2^{4p} - 1}{15}\right), & \text{если } k = 2, 4. \end{cases}$$

Следовательно, для доказательства теоремы 1 достаточно показать, что $\Phi_2(\tilde{s}) = \Phi_2(s)$. Как замечено выше, для вычисления симметричной 2-адической сложности последовательностей по формуле (3) достаточно определить $\text{НОД}\left(\tilde{S}_k(2), 2^{4p} - 1\right)$.

Следующее сравнение, устанавливающее связь между многочленом последовательности $S(x) = \sum_{t=0}^{4p-1} s(t)x^t$ и её периодической автокорреляционной функцией $R_s(t) = \sum_{i=0}^{4p-1} (-1)^{s(i+t)+s(i)}$, доказано в [13]:

$$-2S(x)G(x^{-1}) \equiv 4p + \sum_{t=0}^{4p-1} R_s(t)x^t - G(x^{-1})\sum_{t=0}^{4p-1} x^t \pmod{x^{4p} - 1},$$

где $G(x^{-1}) = \sum_{t=0}^{4p-1} (-1)^{s(t)}x^t$.

В силу леммы 4 имеем, что $2^{4p}G_k(2^{-1}) \equiv -4\tilde{S}_k(2) \pmod{2^{4p} - 1}$. Воспользовавшись леммой 11 из [13], получаем следующие сравнения:

$$1. \quad -4\tilde{S}_k(2)S_k(2) \equiv 2\left[\frac{2^{4p}-1}{15} - (1 + (-1)^{b(1)}2^p)(2^{2p} + 1) - p\right] \pmod{2^{4p} - 1}, \quad (5)$$

если $k = 1, 3$;

$$2. \quad -4S_k(2) \tilde{S}_k(2) \equiv 2 \left[\frac{2^{4p}-1}{15} 16 + (-1)^{b(3)} 2^p (2^{2p} - 1) \sum_{\mathbb{Z}_p^*} \frac{i}{p} \right] 2^{4i} - p \text{right}(\text{mod } 2^{4p} - 1),$$

если $k = 2, 4$.

Так как справедливо разложение $2^{4p} - 1 = 15 \cdot \frac{2^{4p}-1}{15}$ и $\text{НОД}(15, (2^{4p} - 1)/15) = 1$ для $p > 5$, то дальше рассмотрим два наибольших общих делителя $\text{НОД}(\tilde{S}_k(2), (2^{4p} - 1)/15)$ и $\text{НОД}(\tilde{S}_k(2), 15)$ [13].

Пусть $k = 1$ и q - простое число, делящее $\text{НОД}(\tilde{S}_1(2), (2^{4p} - 1)/15)$. Значение $b(1) = 0$ для $k = 1$. Тогда в силу сравнения (5) число q делит $\frac{2^{4p}-1}{15} - (1 + 2^p)(2^{2p} + 1) - p$. Так как q делит также $(2^{4p} - 1)/15$, то отсюда имеем, что q делит $p(2^p - 1)$, а именно, $2^p - 1$. Тогда q делит $-4 - p$, что противоречит малой теореме Ферма, согласно которой p делит $q - 1$, так как q и p - простые числа. Следовательно, $\text{НОД}(\tilde{S}_1(2), (2^{4p} - 1)/15) = 1$. Это утверждение также можно получить, воспользовавшись леммами 12-15 из [13].

Таким образом, $\text{НОД}(\tilde{S}_1(2), 2^{4p} - 1) = \text{НОД}(\tilde{S}_1(2), 15)$. Далее, согласно лемме 3 имеем $\text{НОД}(\tilde{S}_1(2), 15) = 15$. Таким образом, утверждение теоремы 1 для $k = 1$ следует из последнего равенства.

Доказательство теоремы 1 для $k = 2, 3, 4$ может быть получено подобным же образом.

Рассмотрим теперь второе семейство последовательностей, когда для определения последовательности v , применяется формула (2). Здесь, как и ранее, также рассмотрим четыре варианта для значений $(b(1), b(2), b(3))$, обозначая соответствующие последовательности через $v_k, k = 1, 2, 3, 4$, а их многочлены через $V_k(x), k = 1, 2, 3, 4$.

Теорема 2. Пусть $p > 5$. Тогда симметричная 2-адическая сложность последовательности v_k равна $\Phi_2(v_k) = \Phi_2(\tilde{v}_k) = \Phi_2(v_k) = \log_2(2^{4p} - 1)$ для $k = 1, 2, 3, 4$.

Доказательство. Используя те же самые рассуждения, как и при доказательстве теоремы 1, получаем, что $\text{НОД}(\tilde{V}_k(2), 2^{4p} - 1) = \text{НОД}(\tilde{V}_k(2), 15)$. Далее, как и в леммах 2 и 3 получаем, что справедливо сравнение

$$\tilde{V}_k(2) \equiv S_c(1) + 2S_e(1) + 2^2S_f(1) + 2^3S_h(1) \pmod{15}, \quad (6)$$

где $c = L^{p-3d}(\tilde{l}') + b(3)$, $e = L^{p-2d}(\tilde{l}') + b(2)$, $f = L^{p-d}(\tilde{l}) + b(1)$, $h = \tilde{l}$.

Пусть $k = 1$. Здесь, $b(3) = 1$ и $S_c(1) = p - (p - 1)/2 = (p + 1)/2$, $b(2) = 0$ и $S_e(1) = (p - 1)/2$, $b(1) = 0$ и $S_f(1) = (p - 1)/2$, а также $S_h(1) = (p + 1)/2$. В итоге, из сравнения (6), видим, что

$$\tilde{V}_1(2) \equiv (p + 1)/2 + 2(p - 1)/2 + 4(p + 1)/2 + 8(p + 1)/2 \pmod{15}$$

или $2\tilde{V}_1(2) \equiv 11 \pmod{15}$. Значит, $\text{НОД}(\tilde{V}_1(2), 15) = 1$.

Значение 2-адической сложности для $k = 2, 3, 4$ может быть вычислено тем же самым способом.

Таким образом, показано, что симметричная 2-адическая сложность рассмотренных последовательностей во втором случае достигает максимально возможного значения, а в первом случае близка к нему.

Заключение

В работе исследована симметричная 2-адическая сложность, которые получаются чередованием циклических сдвигов последовательностей Лежандра и их дополнений. Показано, что симметричная 2-адической сложности рассмотренных последовательностей близка к максимально возможной. Полученные результаты развивают и обобщают полученные ранее в [13].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24–21–00442.

Список литературы / References

1. Klapper A., Goresky M. Feedback shift registers, 2-adic span, and combiners with memory // Journal of Cryptology. 1997. 10 (2). 111-147. DOI: 10.1007/s001459900024
2. Goresky M., Klapper A. Algebraic Shift Register Sequences. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
3. Zhang L., Zhang J., Yang M., Feng K. On the 2-adic complexity of the Ding-Helleseth-Martinsen binary sequences // IEEE Transactions on Information Theory. 2020. 66 (7). 4613-4620. DOI: 10.1109/TIT.2020.2964171
4. Sun F., Yue Q., Li X. On the 2-adic complexity of cyclotomic binary sequences of order four // Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing (AAECC), 2023. DOI: 10.1007/S00200-023-00598-3

5. Sun F., Yue Q., Li X. On the 2-adic complexity of cyclotomic binary sequences of order three // *Advances in Mathematics of Communications*. 2022. 16 (4). 985-999. DOI: 10.3934/amc.2022049
6. Xiao Z., Zeng X., Sun Z. 2-Adic complexity of two classes of generalized cyclotomic binary sequences // *International Journal of Foundations Computer Science*. 2016. 27 (7), 879-893. DOI: 10.1142/S0129054116500350
7. Hu H., Feng D. On the 2-adic complexity and the k-error 2-adic complexity of periodic binary sequences // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2008. 54 (2). 874-883. DOI: 10.1109/TIT.2007.913238
8. Xiao Z., Zeng X., Ke M. On the symmetric 2-adic complexity of periodic binary sequences // *Advances in Mathematics of Communications*. 2024. 18 (5). 1303-1314. DOI: 10.3934/amc.2022088
9. Edemskiy V. Symmetric 4-adic complexity of quaternary sequences with low autocorrelation and period pq // *Advances in Mathematics of Communications*. 2024. 18 (6). 1723-1732. DOI: 10.3934/amc.2023017
10. Tang X., Gong G. New constructions of binary sequences with optimal autocorrelation value/magnitude // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2010. 56 (3). 1278-1286. DOI: 10.1109/TIT.2009.2039159
11. Li N., Tang X. On the linear complexity of binary sequences of period $4N$ with optimal autocorrelation value/magnitude // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2011. 57 (11). 7597-7604. DOI: 10.1109/TIT.2011.2159575
12. Xiong H., Qu L., Li C. 2-Adic complexity of binary sequences with interleaved structure // *Finite Fields and their Applications*. 2015. 33. 14-28. DOI: 10.1016/j.ffa.2014.09.009
13. Xiao Z., Zeng X. 2-Adic complexity of two constructions of binary sequences with period $4N$ and optimal autocorrelation magnitude // *Cryptography and Communications*. 2021. 13 (5). 865-885. DOI: 10.1007/s12095-021-00498-8
14. Wang Q., Du X. N. The linear complexity of binary sequences with optimal autocorrelation / *IEEE Transactions on Information Theory*. 2010. 56 (12). 6388-6397. DOI: 10.1109/TIT.2010.2079550

Информация об авторах

Едемский Владимир Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-1368-3827, Vladimir.Edemsky@novsu.ru

Дроганова Дарья Сергеевна – студент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-5010-026X, darya.droganova@gmail.com

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.396:621.396.677:517.956.27

ГРНТИ 47.45.39+27.17.29

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).498-506

Специальность ВАК 2.2.13; 1.3.8

Поступила в редакцию / Received 22.09.2024

Принята к публикации / Accepted 08.11.2024

Научная статья

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН В ПРОСТРАНСТВАХ СОБОЛЕВА

Эминов С. И., Социлин А. В.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация Изучены обратные задачам теории антенн, в которых определяются поверхностные токи по заданной диаграмме направленности. Нахождение аксиальных и азимутальных токов основано на решении операторных уравнений с малым параметром. Для определения азимутальных токов используется интегральный оператор с логарифмической особенностью в ядре, который выполняет роль главного оператора. А для определения аксиальных токов применяется гиперсингулярный интегро-дифференциальный оператор. Применение этих операторов позволяет определить поверхностные токи с нужным поведением на границе. Плотность аксиальных токов при приближении к границе обращается в нуль по корневому закону, а плотность азимутальных токов стремится к бесконечности. Главные операторы уравнений с малым параметром непрерывны и непрерывно обратимы в пространствах Соболева. Поэтому операторные уравнения с малым параметром эквивалентны уравнениям Фредгольма второго рода. Рассмотрен пример численного расчета.

Ключевые слова: *диаграмма направленности, обратные задачи теории антенн, аксиальные токи, азимутальные токи, главные операторы, реализуемость диаграммы направленности*

Для цитирования: Эминов С. И., Социлин А. В. Обратные задачи теории цилиндрических вибраторных антенн в пространствах Соболева // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 498-506. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).498-506

Research Article

INVERSE PROBLEMS OF THE THEORY OF CYLINDRICAL DIPOLE ANTENNAS IN SOBOLEV SPACES

Eminov S. I., Sochilin A. V.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The inverse problems of antenna theory have been studied, in which surface currents are determined according to a given radiation pattern. The determination of axial and azimuthal currents is based on the solution of operator equations with small parameters.

To determine azimuthal currents, an integral operator with a logarithmic feature in the core is used, which acts as the main operator. And a hypersingular integro-differential operator is used to determine axial currents. The use of these operators makes it possible to determine surface currents with the desired behavior at the boundary. The density of axial currents when approaching the boundary vanishes according to the root law, and the density of azimuthal currents tends to infinity.

The main operators of equations with a small parameter are continuous and continuously invertible in Sobolev spaces. Therefore, operator equations with a small parameter are equivalent to Fredholm equations of the second kind. An example of numerical calculation is considered.

Keywords: *radiation pattern, inverse problems of antenna theory, axial currents, azimuthal currents, main operators, feasibility of the directional diagram*

For citation: Eminov S. I., Sochilin A. V. Inverse problems of the theory of cylindrical dipole antennas in Sobolev spaces // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 498-506. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).498-506

Введение

Обратные задачи теории антенн, задачи нахождения поверхностных токов по заданной диаграмме направленности относятся к некорректным, неустойчивым задачам. Они описываются интегральными уравнениями первого рода. В течение долгого времени представлялось проблемным решение подобных задач. Ситуация начала меняться с появлением и развитием математических методов решения уравнений первого рода. В основе ряда методов лежит замена операторного уравнения первого рода на уравнение второго рода с малым параметром. Однако непосредственное применение этих методов не позволяло находить поверхностные токи с требуемым свойством на границе. С другой стороны, получили широкое развитие математические методы решения интегральных уравнений теории дифракции электромагнитных волн на незамкнутых поверхностях. Эти методы позволяют находить поверхностные токи прямых задач теории вибраторных антенн с нужным поведением на границе. Поверхностные токи удовлетворяют условиям Мейкснера на ребре. Представляется перспективным сочетание математических методов решения некорректных задач и методов решения прямых задач теории антенн.

Диаграмма направленности заданных поверхностных токов

Связь между диаграммой направленности $\vec{F}(F_\theta, F_\varphi)$ и поверхностным током \vec{j} выражается соотношениями [1,2]:

$$F_\theta(\theta, \varphi) = \iint (\vec{j}, \vec{t}_\theta) \exp(ik\rho \cos\gamma) dS, \quad (1)$$

$$F_\varphi(\theta, \varphi) = \iint (\vec{j}, \vec{t}_\varphi) \exp(ik\rho \cos\gamma) dS \quad (2)$$

$$\rho \cos\gamma = x \cos\varphi \sin\theta + y \sin\varphi \sin\theta + z \cos\theta \quad (3)$$

Здесь интегрирование проводится по поверхности S , k – волновое число, ρ – расстояние между началом системы координат и точкой излучения на поверхности S , (x, y, z) – координаты точки излучения, (R, θ, φ) – координаты точки наблюдения в сферической системе координат, $\vec{t}_\theta, \vec{t}_\varphi$ – орты сферической системы координат, γ – угол между направлениями на точку излучения и точку наблюдения.

Выражения (1)-(3) позволяют найти диаграмму направленности по известным поверхностным токам. В качестве примера рассмотрим отрезок круговой цилиндрической поверхности. В цилиндрических координатах поверхность S задается соотношениями: $r = a, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, -l \leq z \leq l$. Предположим, что токи текут параллельно оси oz и не зависят от азимутальной координаты φ : $\vec{j} = \vec{t}_z j_z(z)$.

Осуществляя интегрирование по переменной φ в выражении (1) и учитывая интегральное представление функции Бесселя целого индекса [3]:

$$J_n(x) = \frac{i^n}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(ix \cos \varphi + in\varphi) d\varphi, \quad (4)$$

получим диаграмму направленности

$$F_\theta(\theta) = \sin\theta J_0(k \sin\theta) \int_0^{2\pi} j_z(z) \exp(ikz \cos\theta) dz, \quad (5)$$

А теперь предположим, что токи направлены по азимутальной координате: $\vec{j} = \vec{t}_\varphi j_\varphi(z)$ и также не зависят от переменной φ . Произведя интегрирование по переменной φ в выражении (2), получим

$$F_\varphi(\theta) = J_1(k \sin\theta) \int_0^{2\pi} j_\varphi(z) \exp(ikz \cos\theta) dz. \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) представляют прямую задачу теории антенн и позволяют найти диаграмму направленности по известным поверхностным токам.

Постановка обратных задач теории вибраторных антенн

Предположим, что известна диаграмма направленности $F_\theta(\theta)$ и требуется найти плотность поверхностных токов $j_z(z)$. Тогда соотношение (5) можно рассмотреть как уравнение относительно $j_z(z)$. После замены $x = \cos\theta$ это уравнение можно записать в виде

$$(Kj)(x) \equiv \int_{-1}^1 j(t) \exp(ikltx) dt = F(x), \quad -1 \leq x \leq 1. \quad (7)$$

К уравнению (7) также приводится соотношение (6) лишь с отличающейся правой частью. Ядро интегрального уравнения (7) является вполне непрерывным, например, в пространстве квадратично суммируемых функций $L_2[-1,1]$ и уравнение (7) представляет интегральное уравнение первого рода. По этой причине не для произвольной правой части уравнение (7) имеет решение, или не всякая диаграмма направленности реализуема [4,5]. В связи с этим ставится задача нахождения поверхностных токов j , которые реализуют близкую диаграмму и имеют как можно меньшую норму в гильбертовом пространстве H . Иначе требуется минимизировать функционал

$$N(j) = \alpha \|j\|^2 + (Kj - F, Kj - F) \quad (8)$$

где α – малый параметр, (\cdot, \cdot) – скалярное произведение в пространстве $L_2[-1, 1]$, а $\|j\|$ – норма в пространстве H , которая определяется с помощью некоторого положительного оператора A : $\|j\|^2 = (Aj, j)$. Далее покажем, что минимум функционала $N(j)$ достигается на решениях уравнения

$$\alpha Aj + K^*Kj = K^*F. \quad (9)$$

Пусть j – решение уравнение (9), а h – произвольный элемент из пространства H . Рассмотрим разность

$$N(j + h) - N(j) = \alpha[j + h, j + h] + (Kj + Kh - F, Kj + Kh - F) - \\ - \alpha[j, j] - (Kj - F, Kj - F)$$

и преобразуем с учетом определения сопряженного оператора

$$N(j + h) - N(j) = \alpha[h, h] + (Kh, Kh) + (h, \alpha Aj + K^*Kj - K^*F) + \\ + (\alpha Aj + K^*Kj - K^*F, h).$$

Учитывая, что j – решение уравнения (9), отсюда получим

$$N(j + h) = N(j) + \alpha[h, h] + (Kh, Kh).$$

Так как в последнем соотношении второе и третье слагаемые неотрицательны, то функционал $N(j)$ достигает минимума на решениях уравнения (9).

Обратимся к уравнению (9). Оператор $T = K^*K$ является самосопряженным и положительным. Если оператор A единичный или положительно определенный, то уравнение (9) имеет единственное решение, которое непрерывно зависит от правой части. В следующем пункте выясним связь между уравнениями (9) и (7).

Теоретическое исследование реализуемости диаграммы направленности

Рассмотрим частный, но важный случай, когда оператор A – единичный, тогда уравнения (7) и (9) примут вид

$$Kj = F, \quad (10)$$

$$\alpha j + K^*Kj = K^*F. \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) рассмотрим в гильбертовом пространстве H [6]. В этом пункте выясним связь между решениями этих уравнений. Хорошо известно [7], что гильбертово пространство представляется в виде прямой суммы

$$H = \overline{R(K)} \oplus N(K^*). \quad (12)$$

Здесь $R(K)$ образ оператора K , а $N(K^*)$ – ядро сопряженного оператора. В соответствии с (12) правая часть (10) единственным образом представляется в виде

суммы: $F = f + g$, $f \in \overline{R(K)}$, $g \in N(K^*)$. Заметим, что $K^*F = K^*f$, и при переходе от уравнения (10) к уравнению (11) теряется g .

Если $F \in R(K)$, то диаграмма **реализуема**, существуют поверхностные токи, создающие диаграмму. Если же $F \in \overline{R(K)}$, то диаграмма называется **аппроксимируемой**. В этих случаях $g = 0$. Если же $g \neq 0$, то диаграмма называется **не аппроксимируемой**. Для эффективного описания этих случаев, используем собственные функции оператора $T = K^*K$. Пусть $T\varphi_n = \lambda_n\varphi_n$, ($\lambda_n > 0$), $T\varphi'_n = 0$, тогда система функций $\{\varphi_n\} \cup \{\varphi'_n\}$ ортонормированна и полна в пространстве H . Также введем функции ψ_n по формуле $\psi_n \cdot \sqrt{\lambda_n} = K\varphi_n$. Система функций $\{\psi_n\}$ полна и ортонормированна в пространстве $\overline{R(K)}$. Справедливы следующие представления [7]

$$j = \sum_n (j, \varphi_n) \varphi_n + \sum_n (j, \varphi'_n) \varphi'_n, \quad (13)$$

$$Kj = \sum_n \sqrt{\lambda_n} (j, \varphi_n) \psi_n, \quad (14)$$

$$K^*F = \sum_n \sqrt{\lambda_n} (F, \psi_n) \varphi_n, \quad (15)$$

$$F = \sum_n (F, \psi_n) \psi_n. \quad (16)$$

Разложение (14) называется каноническим представлением Шмидта вполне непрерывного оператора K . С помощью разложения (13) с учетом свойств функции φ_n и ψ_n найдем решение j^α уравнения (9)

$$j^\alpha = \sum_n \frac{\sqrt{\lambda_n}}{\alpha + \lambda_n} (F, \psi_n) \varphi_n \quad (17)$$

Расчетные функционалы обратных задач

Требуется найти поверхностные токи, которые реализуют близкую диаграмму и имеют как можно меньшую норму. Разность между реализованной и заданной диаграммой, или невязка, определяется формулой $Kj^\alpha - F$. Используя формулу (17) для решения уравнения (9), найдем норму и невязку

$$\|j^\alpha\|^2 = \sum_n \left| \frac{\sqrt{\lambda_n}}{\alpha + \lambda_n} \right|^2 |(f, \psi_n)|^2 \quad (18)$$

$$\|Kj^\alpha - F\|^2 = \sum_n \left| \frac{\alpha}{\alpha + \lambda_n} \right|^2 |(f, \psi_n)|^2 + \|g\|^2. \quad (19)$$

Функция (18) монотонно убывает, а функция (19) монотонно возрастает. Из последнего неравенства имеем $\|Kj^\alpha - F\| \geq \|g\|$, и если $g \neq 0$, то невязка строго положительна. Если же $g = 0$ или диаграмма аппроксимируема, то невязка стремится к нулю, когда α стремится к нулю. Если наряду с последним условием также выполняется неравенство $\lim \|j^\alpha\| < +\infty$, когда α стремится к нулю, то диаграмма реализуема. В этом случае $j^\alpha \rightarrow j_0$, где $j_0 = \sum_n \frac{1}{\sqrt{\lambda_n}} (F, \psi_n) \varphi_n$.

Таким образом, по свойствам функционалов $\|Kj^\alpha - F\|$ и $\|j^\alpha\|$ можно определить реализуема или аппроксимируема заданная диаграмма направленности. Вычисление последних функционалов производится на основе решения уравнения (9) различными численными методами.

Уравнения с малым параметром в пространствах Соболева

Свойства уравнения (9) зависят от пространства H и оператора A . Чтобы поверхностные токи обладали необходимым поведением на ребре, пространства и операторы возьмем из прямой задачи дифракции электромагнитных волн на отрезке кругового цилиндра. Как и в работе [8], используем пространства Соболева и операторы прямых задач. Для азимутальных и аксиальных поверхностных токов имеем уравнения с малым параметром

$$\alpha Lj_\varphi + K^*Kj_\varphi = K^*F, \quad (20)$$

$$\alpha Aj_z + K^*Kj_z = K^*F, \quad (21)$$

где

$$(Lj_\varphi)(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 j_\varphi(t) \ln \frac{1}{|\tau-t|} dt,$$

$$(Aj_z)(\tau) = \frac{1}{\pi} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{-1}^1 j_z(t) \frac{\partial}{\partial t} \ln \frac{1}{|\tau-t|} dt.$$

Как показано в работе [8], интегральный оператор с логарифмической особенностью L непрерывно и взаимно однозначно отображает пространство $H_{-\frac{1}{2}}(-1,1)$ на все пространство $\tilde{H}_{\frac{1}{2}}(-1,1)$. Обратный оператор L^{-1} также непрерывен. Поэтому уравнение (20) рассмотрим из пространства $H_{-\frac{1}{2}}(-1,1)$ в пространство $\tilde{H}_{\frac{1}{2}}(-1,1)$.

Гиперсингулярный оператор A непрерывно и взаимно однозначно отображает пространство $H_{\frac{1}{2}}(-1,1)$ на все пространство $\tilde{H}_{-\frac{1}{2}}(-1,1)$, обратный оператор A^{-1} непрерывен. Уравнение (21) рассмотрим из пространства $H_{\frac{1}{2}}(-1,1)$ в пространство $\tilde{H}_{-\frac{1}{2}}(-1,1)$. С учетом этих свойств уравнения (20) и (21) эквивалентны уравнениям Фредгольма второго рода

$$\alpha j_{\varphi} + L^{-1}K^*Kj_{\varphi} = L^{-1}K^*F, \tag{22}$$

$$\alpha j_z + A^{-1}K^*Kj_z = A^{-1}K^*F \tag{23}$$

Для этих уравнений применима изложенная выше теория операторных уравнений Фредгольма второго рода с малым параметром. Для решения уравнения (20) будем применять систему функций

$$\psi_1(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\pi \ln 2}} \frac{1}{\sqrt{1-\tau^2}}, \quad \psi_n(\tau) = \sqrt{\frac{2n}{\pi}} \frac{\cos(n \arccos(\tau))}{\sqrt{1-\tau^2}}, \quad n = 2, 3, 4 \dots \tag{24}$$

а для решения уравнения (21) используем функции

$$\varphi_n(\tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi n}} \sin(n \arccos(\tau)), \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{25}$$

Матрицы операторов L и A в соответствующих базисах являются единичными.

Пример численного расчета.

Правую часть уравнений (20) и (21) зададим в виде $F(x) = (1 - x^2)^m$. С ростом m диаграмма $F(x)$ становится узкой и труднореализуемой. В таблицах 1 и 2 приведены результаты решения уравнений (20) и (21) соответственно. При этом $kl = \pi/2$, $N = 10$. Результаты демонстрируют уменьшение невязки при уменьшении параметра α и увеличение нормы поверхностных токов.

Таблица 1. Результат решения уравнения (20)

α	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}
$\ Kj^{\alpha} - F\ $	0,307	0,227	0,173
$\ j^{\alpha}\ _{\frac{1}{2}}$	0,711	12,64	30,27

Таблица 2. Результат решения уравнения (21)

α	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}
$\ Kj^{\alpha} - F\ $	0,365	0,310	0,221
$\ j^{\alpha}\ _{\frac{1}{2}}$	1,74	4,49	22,86

Заключение

Таким образом, в работе изучены обратные задачам теории антенн, в которых по заданной диаграмме направленности определяются поверхностные токи. Для азимутальных и аксиальных поверхностных токов, не зависящих от координаты φ , получены операторные уравнения с малым параметром. Функциональные пространства выбраны таким образом, чтобы главные операторы этих уравнений были непрерывны и непрерывно обратимы. В результате операторные уравнения с малым параметром эквивалентны уравнениям Фредгольма второго рода. Рассмотрен пример численного расчета.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации НИР "Математическое моделирование природных процессов", выполняемой по государственному заданию в сфере научной деятельности.

Список литературы

1. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л. Антенно-фидерные устройства. Москва: Советское Радио, 1961. 816 с.
2. Бахрах Л. Д., Кременецкий С. Д. Синтез излучающих систем: теория и методы расчета. Москва: Советское Радио, 1974. 232 с.
3. Васильев Е. Н. Возбуждение тел вращения. Москва: Радио и связь, 1987. 272 с.
4. Каценеленбаум Б. З. Проблемы аппроксимируемости электромагнитного поля. Москва: Наука; Физматлит, 1996. 232 с.
5. Иванов В. К., Васин В. В., Танана В. П. Теория линейных некорректных задач и ее приложения. Москва: Наука, 1978. 206 с.
6. Эминов И. С., Эминов С. И. Синтез поверхностных Е-поляризованных токов на полосе // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2012. 52 (7). 1354-1360.
7. Бирман М. Ш., Соломяк М. З. Спектральная теория самосопряженных операторов в гильбертовом пространстве: учебное пособие. Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1980. 264 с.
8. Эминов С. И. Аналитическое обращение операторной матрицы задачи дифракции на отрезке цилиндра в пространствах Соболева // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2021. 61 (3). 450-456. DOI: 10.31857/S0044466921030054

References

1. Drabkin A. L., Zuzenko V. L. Antenna-feeder devices [Antenna-feeder devices]. Moscow: Sovetskoe Radio, 1961. 816 p.
2. Bakhrakh L. D., Kremenetsky S. D. Sintez izluchayushchih sistem: teoriya i metody rascheta [Synthesis of radiating systems: theory and calculation methods]. Moscow: Sovetskoe Radio, 1974. 232 p.
3. Vasiliev E. N. Vozbuzhdenie tel vrashcheniya [Excitation of bodies of rotation]. Moscow: Radio and Communications, 1987. 272 p.

4. Katsenelenbaum B. Z. Problemy approksimiruemosti elektromagnitnogo polya [Problems of approximability of the electromagnetic field]. Moscow: Nauka; Fizmatlit, 1996. 232 p.

5. Ivanov V. K., Vasin V. V., Tanana V. P. Teoriya linejnyh nekorrektnyh zadach i ee prilozheniya [Theory of linear ill-posed problems and its applications]. Moscow: Nauka, 1978. 206 p.

6. Eminov I. S., Eminov S. I. Synthesis of surface E-polarized currents in the band // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2012. 52 (7). 1354-1360.

7. Birman M. S., Solomyak M. Z. Spektral'naya teoriya samosopryazhennykh operatorov v gil'bertovom prostranstve: uchebnoe posobie [Spectral theory of self-adjoint operators in Hilbert space: a textbook]. Leningrad: Publishing House of Leningrad University, 1980. 264 p.

8. Eminov S. I. Analytical inversion of the operator matrix of the diffraction problem on a cylinder segment in Sobolev spaces // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2021. 61 (3). 450-456. DOI: 10.31857/S0044466921030054

Информация об авторах

Эминов Стефан Ильич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9497-8234, Stefan.Eminov@novsu.ru

Сочилин Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 00090001-6857-7418, Andrey.Sochilin@novsu.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК НОВГУ»

Рукопись статьи должна быть тщательно вычитана автором (-ами) перед предоставлением в редакцию журнала.

К рассмотрению принимается только полный комплект документов:

- 1) статья, оформленная строго в соответствии с требованиями;
- 2) лицензионный договор от каждого соавтора статьи;
- 3) экспертное заключение о возможности опубликования (экспортный контроль);
- 4) заключение о возможности открытого опубликования (государственная тайна).

Автор подписывает *Лицензионный договор о предоставлении права использования произведения* на русском языке (для зарубежных авторов – его *английскую версию*). Если у статьи несколько соавторов, лицензионный договор составляется *на каждого из них в отдельности*. При возникновении затруднений воспользуйтесь "Памяткой по заполнению лицензионного договора", высылаемой редакцией по запросу.

В экспертных заключениях *обязательно* должны быть: подпись эксперта (-ов), руководителя экспертной группы или руководителя организации; гербовая печать / печать организации, дата. Отсканированная копия экспертного заключения, лицензионный договор и электронный вариант статьи отправляются в редакцию журнала по адресу электронной почты vestnik@novsu.ru.

Комплект документов считается принятым к рассмотрению *после официального подтверждения*, поступившего ответным письмом с электронной почты журнала. Если у статьи несколько соавторов, необходимо указать, кто является корреспондирующим автором.

Все полученные статьи после рассмотрения по формальным признакам подвергаются обязательному рецензированию. Качество публикуемых статей контролируется редколлегией, в состав которой входят ведущие ученые российских и зарубежных вузов и академических институтов.

Плата с авторов за публикацию не взимается, гонорары не выплачиваются, поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Напоминаем нашим авторам, что научный журнал «Вестник НовГУ» включен в Перечень ВАК с 2010 г., с 2022 г. в ранжированном списке ему присвоена категория К2. Все вопросы, связанные с публикацией, сроками, оформлением сопроводительных документов следует направлять на электронную почту редакции vestnik@novsu.ru.

С уважением, редакция журнала



Журнал «Вестник Новгородского государственного университета» входит в перечень ведущих научных журналов и изданий России, рекомендуемых ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней. Индексируется в базах данных РИНЦ, EBSCO и Ulrich's Periodicals Directory.