

p-ISSN 1607-3274
e-ISSN 2313-688X

Радіоелектроніка
Інформатика
Управління

Радиоэлектроника
Информатика
Управление

Radio Electronics
Computer Science
Control

2017/3

ISSN 1607-3274



9 771607 327005 73 >





Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 3(42) 2017

Заснований у січні 1999 року.

Засновник і видавець – Запорізький національний технічний університет.

ISSN 1607-3274 (друкований), ISSN 2313-688X (електронний).

Запоріжжя

ЗНТУ

2017

Запорожский национальный технический университет

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал

Выходит четыре раза в год

№ 3(42) 2017

Основан в январе 1999 года.

Основатель и издатель – Запорожский национальный технический университет.

ISSN 1607-3274 (печатный), ISSN 2313-688X (электронный).

Запорожье

ЗНТУ

2017

Zaporizhzhya National Technical University

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal

Published four times per year

№3(42) 2017

Founded in January 1999.

Founder and publisher – Zaporizhzhya National Technical University.

ISSN 1607-3274 (print), ISSN 2313-688X (on-line).

Zaporizhzhya

ZNTU

2017

Науковий журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління» (скорочена назва – РІУ) видається Запорізьким національним технічним університетом (ЗНТУ) з 1999 р. періодичністю чотири номери на рік.

Зареєстрований Державним комітетом інформаційної політики, телебачення та радіомовлення 29.01.2003 р. Свідцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації серія КВ №6904.

ISSN 1607-3274 (друкований), **ISSN 2313-688X** (електронний).

Наказом Міністерства освіти і науки України № 1328 від 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року» **журнал включений до переліку наукових фахових видань України**, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних та технічних наук.

В журналі безкоштовно публікуються наукові статті англійською, російською та українською мовами.

Правила оформлення статей подано на сайті: <http://ric.zntu.edu.ua/information/authors>.

Журнал забезпечує **безкоштовний відкритий он-лайн доступ** до повнотекстових публікацій.

Журнал дозволяє авторам мати авторські права і зберігати права на видання без обмежень. Журнал дозволяє користувачам читати, завантажувати, копіювати, поширювати, друкувати, шукати або посилатися на повні тексти своїх статей. Журнал дозволяє повторне використання його вмісту у відповідності з СС ліцензією СС-ВУ.

Опублікованими статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

Журнал входить до наукометричної бази Web of Science.

Журнал реферується та індексується у провідних міжнародних та національних реферативних журналах і наукометричних базах даних, а також розміщується у цифрових архівах та бібліотеках з безкоштовним доступом у режимі on-line (у т. ч. DOAJ, DOI, CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИИЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, ВІНТИ, Джерело), повний перелік яких подано на сайті: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22914).

Тематика журналу містить: радіофізику, мікро-, нано- і радіоелектроніку, апаратне і програмне забезпечення комп'ютерної техніки, комп'ютерні мережі і телекомунікації, теорію алгоритмів і програмування, оптимізацію і дослідження операцій, міжмашинну і людино-машинну взаємодію, математичне і комп'ютерне моделювання, обробку даних і сигналів, управління в технічних системах, штучний інтелект, включаючи системи, засновані на знаннях, і експертні системи, інтелектуальний аналіз даних, розпізнавання образів, штучні нейронні і нейро-нечіткі мережі, нечітку логіку, колективний інтелект і мультиагентні системи, гібридні системи.

Усі статті, пропоновані до публікації, одержують **об'єктивний розгляд**, що оцінюється за суттю без урахування раси, статі, віросповідання, етнічного походження, громадянства або політичної філософії автора(ів).

Усі статті проходять двоступінчасте закрите (анонімне для автора) **рецензування** штатними редакторами і незалежними рецензентами – провідними вченими за профілем журналу.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор – Субботін С. О., д-р. техн. наук, Україна

Заст. головного редактора – Піза Д. М., д-р техн. наук, Україна

Члени редколегії:

Андрюлідакіс Й., д-р філософії, Греція

Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна

Бодяньський Є. В., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з управління

Васильєв С. М., д-р фіз.-мат. наук, академік РАН, Росія

Гімплевич Ю. Б., д-р техн. наук, Україна

Горбань О. М., д-р фіз.-мат. наук, Великобританія

Дробахін О. О., д-р фіз.-мат. наук, Україна

Зайцева О. М., канд. фіз.-мат. наук, Словаччина

Камеяма М., д-р техн. наук, Японія

Карпуков Л. М., д-р техн. наук, Україна

Корніч Г. В., д-р фіз.-мат. наук, Україна, редактор розділу з радіофізики

Кулік А. С., д-р техн. наук, Україна

Лебедев Д. В., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з управління

Левашенко В. Г., канд. фіз.-мат. наук, Словаччина

Лиснянський А., канд. техн. наук, Ізраїль

Марковська-Качмар У., д-р наук, Польща

Олещук В. О., канд. фіз.-мат. наук, Норвегія, редактор розділу з радіоелектроніки

Онуфрієнко В. М., д-р фіз.-мат. наук, Україна

Папшицький М., д-р філософії, Польща

Погосов В. В., д-р фіз.-мат. наук, Україна

Рубель О. І., канд. техн. наук, Канада

Хаханов В. І., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з інформатики

Шарпанських О. А., д-р філософії, Нідерланди, редактор розділу з інформатики

Рекомендовано до видання вченою радою ЗНТУ, протокол № 2 від 10.10.2017.

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом ЗНТУ.

Веб-сайт журналу: <http://ric.zntu.edu.ua>.

Адреса редакції: Редакція журналу «РІУ», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна.

Тел: (061) 769-82-96 – редакційно-видавничий відділ

Факс: (061) 764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

Научный журнал «Радиоэлектроника, информатика, управление» (сокращенное название – РИУ) издается Запорожским национальным техническим университетом (ЗНТУ) с 1999 г. периодичностью четыре номера в год.

Зарегистрирован Государственным комитетом информационной политики, телевидения и радиовещания 29.01.2003 г. (Свидетельство о государственной регистрации печатного средства массовой информации серия КВ №6904).

ISSN 1607-3274 (печатный), **ISSN 2313-688X** (электронный).

Приказом Министерства образования и науки Украины № 1328 от 21.12.2015 г. «Об утверждении решений Аттестационной коллегии Министерства относительно деятельности специализированных ученых советов от 15 декабря 2015 года» **журнал включен в перечень научных профессиональных изданий Украины**, в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата физико-математических и технических наук.

В журнале бесплатно публикуются научные статьи на английском, русском и украинском языках.

Правила оформления статей представлены на сайте: <http://ric.zntu.edu.ua/information/authors>.

Журнал обеспечивает **бесплатный открытый он-лайн доступ** к полнотекстовым публикациям. Журнал разрешает авторам иметь авторские права и сохранять права на издание без ограничений. Журнал разрешает пользователям читать, загружать, копировать, распространять, печатать, искать или ссылаться на полные тексты своих статей. Журнал разрешает повторное использование его содержания в соответствии с СС лицензией СС-BY.

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

Журнал входит в наукометрическую базу Web of Science.

Журнал реферруется и индексируется в ведущих международных и национальных реферативных журналах и наукометрических базах данных, а также размещается в цифровых архивах и библиотеках с бесплатным доступом on-line (в т.ч. DOAJ, DOI, CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, ВИНТИ, Джэрэло), полный перечень которых представлен на сайте: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

Журнал распространяется по Каталогу периодических изданий Украины (подписной индекс – 22914).

Тематика журнала включает: радиофизику, микро-, нано- и радиоэлектронику, аппаратное и программное обеспечение компьютерной техники, компьютерные сети и телекоммуникации, теорию алгоритмов и программирования, оптимизацию и исследование операций, межмашинное и человеко-машинное взаимодействие, математическое и компьютерное моделирование, обработку данных и сигналов, управление в технических системах, искусственный интеллект, включая системы, основанные на знаниях, и экспертные системы, интеллектуальный анализ данных, распознавание образов, искусственные нейронные и нейро-нечеткие сети, нечеткую логику, коллективный интеллект и мультиагентные системы, гибридные системы.

Все статьи, предлагаемые к публикации, получают **объективное рассмотрение**, которое оценивается по существу без учета расы, пола, вероисповедания, этнического происхождения, гражданства или политической философии автора(ов).

Все статьи проходят двухступенчатое закрытое (анонимное для автора) **рецензирование** штатными редакторами и независимыми рецензентами – ведущими учеными по профилю журнала.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор – Субботин С. А., д-р техн. наук, Украина

Зам. главного редактора – Пиза Д. М., д-р техн. наук, Украина

Члены редколлегии:

Андроидакис И., д-р философии, Греция

Безрук В. М., д-р техн. наук, Украина

Бодянский Е. В., д-р техн. наук, Украина, редактор раздела по управлению

Васильев С. Н., д-р физ.-мат. наук, академик РАН, Россия

Гимпилевич Ю. Б., д-р техн. наук, Украина

Горбань А. Н., д-р физ.-мат. наук, Великобритания

Дробахин О. О., д-р физ.-мат. наук, Украина

Зайцева Е. Н., канд. физ.-мат. наук, Словакия

Камеяма М., д-р техн. наук, Япония

Карпуков Л. М., д-р техн. наук, Украина

Корнич Г. В., д-р физ.-мат. наук, Украина, редактор раздела по радиофизике

Кулик А. С., д-р техн. наук, Украина

Лебедев Д. В., д-р техн. наук, Украина, редактор раздела по управлению

Левашенко В. Г., канд. физ.-мат. наук, Словакия

Лиснянский А., канд. техн. наук, Израиль

Марковска-Качмар У., д-р наук, Польша

Олещук В. А., канд. физ.-мат. наук, Норвегия, редактор радиоэлектроники

Онуфриенко В. М., д-р физ.-мат. наук, Украина

Папшицкий М., д-р философии, Польша

Погосов В. В., д-р физ.-мат. наук, Украина

Рубель О. И., канд. техн. наук, Канада

Хаханов В. И., д-р техн. наук, Украина, редактор раздела по информатике

Шарпанских А. А., доктор философии, Нидерланды – редактор раздела по информатике

Рекомендовано к изданию ученым советом ЗНТУ, протокол № 2 от 10.10.2017.

Журнал сверстан редакционно-издательским отделом ЗНТУ.

Веб-сайт журнала: <http://ric.zntu.edu.ua>

Адрес редакции: Редакция журнала «РИУ», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина.

Тел.: +38-061-769-82-96 – редакционно-издательский отдел

Факс: (061) 764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Запорожский национальный технический университет, 2017

The scientific journal «Radio Electronics, Computer Science, Control» is published by the Zaporizhzhya National Technical University (ZNTU). since 1999 with periodicity four numbers per year.

The journal is registered by the State Committee for information policy, television and radio broadcasting of Ukraine in 29.01.2003. The journal has a State Registration Certificate of printed mass media (series KB №6904).

ISSN 1607-3274 (print), **ISSN 2313-688X** (on-line).

By the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine from 21.12.2015 № 1328 “On approval of the decision of the Certifying Collegium of the Ministry on the activities of the specialized scientific councils dated 15 December 2015” **journal is included in the list of scientific specialized periodicals of Ukraine**, where the results of dissertations for Doctor of Science and Doctor of Philosophy in Mathematics and Technical Sciences may be published.

The journal publishes scientific articles in English, Russian, and Ukrainian free of charge.

The **article formatting rules** are presented on the site: <http://ric.zntu.edu.ua/information/authors>.

The journal provides policy of **on-line open (free of charge) access** for full-text publications. The journal allow the authors to hold the copyright without restrictions and to retain publishing rights without restrictions. The journal allow readers to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of its articles. The journal allow reuse and remixing of its content, in accordance with a CC license CC-BY.

Published articles have a unique digital object identifier (DOI).

The journal is included into Web of Science.

The journal is abstracted and indexed in leading international and national abstracting journals and scientometric databases, and also placed to the digital archives and libraries with a free on-line access (including DOAJ, DOI, CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИИЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, VINITI (All-Russian Institute of scientific and technical information), Djerelo), full list of which is presented on the site: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

The journal is distributed: by the Catalogue of Ukrainian periodicals (the catalog number is 22914).

The journal scope: radio physics, micro-, nano- and radio electronics, computer hardware and software, computer networks and telecommunications, algorithm and programming theory, optimization and operations research, machine-machine and man-machine interfacing, mathematical modeling and computer simulation, data and signal processing, control in technical systems, artificial intelligence, including knowledge-based and expert systems, data mining, pattern recognition, artificial neural and neuro-fuzzy networks, fuzzy logics, swarm intelligence and multiagent systems, hybrid systems.

All articles proposed for publication receive an **objective review** that evaluates substantially without regard to race, sex, religion, ethnic origin, nationality, or political philosophy of the author(s).

All articles undergo a two-stage **blind peer review** by the editorial staff and independent reviewers – the leading scientists on the profile of the journal.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: S. A. Subbotin, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

Deputy Editor-in-Chief: D. M. Piza, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

Members of Editorial Board:

I. Androulidakis, Ph. D, Greece

V. M. Bezruk, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

Ye. V. Bodyanskiy, Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Control section editor

O. O. Drobakhin, Doctor of Science in Physics and Mathematics

Yu. B. Gimpilevich, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

A. N. Gorban, Doctor of Science in Physics and Mathematics, United Kingdom

V. I. Hahanov, Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Computer Science section editor

M. Kameyama, Doctor of Science, Japan

L. M. Karpukov, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

G. V. Kornich, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine, Radio Physics section editor

A. S. Kulik, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

D. V. Lebedev, Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Control section editor

V. G. Levashenko, Ph.D, Slovakia

A. Lisnianski, Ph.D, Israel

U. Markowska-Kaczmar, Doctor of Science, Poland

V. A. Oleshchuk, Ph.D in Physics and Mathematics, Norway, Radio Electronics section editor

V. M. Onufrienko, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine

M. Paprzycki, Ph.D, Poland

V. V. Pogosov, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine

O. I. Rubel, Ph.D, Canada

A. A. Sharpanskykh, Ph.D, Netherlands, Computer Science section editor

S. N. Vassilyev, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Academician of Russian Academy of Sciences, Russia

E. N. Zaitseva, Ph.D, Slovakia

Recommended for publication by the Academic Council of ZNTU, protocol № 2 dated 10.10.2017.

The journal is imposed by the editorial-publishing department of ZNTU.

The journal web-site is <http://ric.zntu.edu.ua>.

The address of the editorial office: Editorial office of the journal «Radio Electronics, Computer Science, Control», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy street, 64, Zaporizhzhya, 69063, Ukraine.

Tel.: +38-061-769-82-96 – the editorial-publishing department.

Fax: +38-061-764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Zaporizhzhya National Technical University, 2017

ЗМІСТ

РАДІОФІЗИКА.....	7
<i>Григорчак І. І., Іващишин Ф. О., Борисюк А. К., Швець Р. Я., Кулик Ю. О.</i> КЛАТРАТНІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ МУЛЬТИФЕРОЇКИ, СИНТЕЗОВАНІ В СИСТЕМІ GaSe-NaNO ₂ -FeSO ₄ . ВПЛИВ КОІНТЕРКАЛЯЦІЇ.....	7
РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....	20
<i>Лиза Д. М., Семенов Д. С., Мороз Г. В.</i> АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ФИЛЬТРА В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ПОМЕХ.....	20
<i>Ципоренко В. В., Ципоренко В. Г., Хоменко М. Ф.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОДІЇ БЕЗПОШУКОВОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО КОРЕЛЯЦІЙНО- ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ З ПОДВІЙНИМ КОРЕЛЯЦІЙНИМ ОБРОБЛЕННЯМ.....	28
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	36
<i>Братусь О. В.</i> СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З АДАПТИВНИМИ БЛОКАМИ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНИХ РАДІОФЛЮКСІВ.....	36
<i>Вовк С. М.</i> МЕТОД ЧИСЛЕННОГО ДИФФЕРЕНЦІРОВАНИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ ДАННЫХ С ВЫБРОСАМИ.....	44
<i>Касянчук М. Н.</i> ПОСТРОЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СОВЕРШЕННОЙ ФОРМЫ СИСТЕМЫ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАКТОРИЗАЦИИ.....	53
<i>Чопоров С. В.</i> ГИБРИДНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СПЛОШНЫХ ТЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЯВНЫХ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ.....	60
<i>Чуб І. А., Новожилова М. В., Матухно В. В.</i> МОДЕЛЮВАННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ З ВИБУХОМ ХМАРИ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ.....	71
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	78
<i>Гороховатский В. А., Пуятин Е. П., Столяров В. С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ СТРУКТУРНЫХ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ.....	78
<i>Журавська І. М., Мусієнко М. П.</i> СИНТЕЗ МАРШРУТІВ СУБ-РОЇВ БЕЗПЛОТНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ХОПФІЛДА ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ ТЕРИТОРІЙ.....	86
<i>Коробчинський М. В., Чирун Л. Б., Висоцька В. А., Нич М. О.</i> ОСОБЛИВОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЧІВ У КІБЕРСПОРТІ.....	95
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	106
<i>Данильченко А. О.</i> РОЗПАРАЛЕЛЮВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ ГЛОК ТА МЕЖ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ПРО ПАРОСПОЛУЧЕННЯ ЗІ ЗНИКАЮЧИМИ ДУГАМИ.....	106
<i>Имамвердиев Я. Н., Сухостат Л. В.</i> ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ.....	113
<i>Кузьма К. Т.</i> ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕВІРКИ РІВНЯ ЗНАНЬ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ПОСЛІДОВНОГО АНАЛІЗУ.....	121
<i>Фауре Э. В.</i> ФАКТОРИАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ С ИСПРАВЛЕНИЕМ ОШИБОК.....	130
<i>Oliinyk A., Subbotin S., Skrupsky S., Lovkin V., Zaiko T.</i> INFORMATION TECHNOLOGY OF DIAGNOSIS MODELS SYNTHESIS BASED ON PARALLEL COMPUTING.....	139
<i>Yelmanova E. S., Romanushyn Y. M.</i> NO-REFERENCE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF GENERALIZED CONTRAST FOR COMPLEX IMAGES.....	152
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	161
<i>Луценко І. А., Фомовская Е. В., Оксанич І. Г., Сердюк О. Ю.</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЕРИФИКАЦИИ КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	161
<i>Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V.</i> AUTOMATIC CONTROL OF THE ORE SUSPENSION SOLID PHASE PARAMETERS USING HIGH-ENERGY ULTRASOUND.....	175
<i>Нагорный В. В.</i> АВТОМАТИЗОВАННЕ УПРАВЛЕННЯ РЕЖИМАМИ РЕЗАННЯ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ІНДИВІДУАЛЬНОГО РЕСУРСА РЕЖУЩЕГО ІНСТРУМЕНТА.....	183
<i>Сафоник А. П., Клепач М. І., Таргоній І. М.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕАКТОРІВ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТОКІВ ПРИ КОНТРОЛІ КОНЦЕНТРАЦІЇ КИСНЮ.....	192

CONTENTS

RADIOPHYSICS.....	7
<i>Grygorchak I. I., Ivashchyshyn F. O., Borysiuk A. K., Shvets R. Ya., Kulyk Yu. O.</i>	
CLATHRATE SEMICONDUCTOR MULTIFERROICS, SYNTHESIZED IN SYSTEM GaSE-NaNO ₂ -FeSO ₄ AND INFLUENCE OF COINTERCALATION MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING.....	7
RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	20
<i>Piza D. M., Semenov D. S., Moroz G. V.</i>	
ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ADAPTIVE POLARIZING FILTER UNDER THE SIMULTANEOUS ACTION OF ACTIVE AND PASSIVE NOISE.....	20
<i>Tsymporenko V. V., Tsymporenko V. G., Khomenko M. F.</i>	
RESEARCH OF FAST-ACTION OF THE DIRECT DIGITAL METHOD OF SPECTRAL CORRELATIVE-INTERFEROMETRIC DIRECTION FINDING WITH DOUBLE CORRELATION PROCESSING.....	28
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....	36
<i>Bratus O. V.</i>	
DECISION MAKING SUPPORT SYSTEM WITH ADAPTIVE UNITS OF RESTORING AND FORECASTING OF SOLAR RADIO FLUXES.....	36
<i>Vovk S. M.</i>	
METHOD FOR NUMERICAL DIFFERENTIATION OF NOISY DATA WITH OUTLIERS.....	44
<i>Kasianchuk M. M.</i>	
THE CONSTRUCTION OF THE MODIFIED PERFECT FORM OF RESIDUAL CLASSES SYSTEM USING FACTORIZATION.....	53
<i>Choporov S. V.</i>	
HYBRID REPRESENTATION OF SOLIDS USING IMPLICIT AND PARAMETRIC FUNCTIONS.....	60
<i>Chub I. A., Novozhylva M. V., Matuhno V. V.</i>	
MODELLING OF EMERGENCY WITH THE EXPLOSION OF GAS-AIR MIXTURE CLOUD.....	71
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	78
<i>Gorokhovatsky V. A., Putyatin Y. P., Stolyarov V. S.</i>	
RESEARCH OF EFFECTIVENESS OF STRUCTURAL IMAGE CLASSIFICATION METHODS USING CLUSTER DATA MODEL.....	78
<i>Zhuravska I. M., Musiyenko M. P.</i>	
THE SYNTHESIS OF ROUTES OF UAVS' SUB-SWARMS BASED ON HOPFIELD NEURAL NETWORK FOR INSPECTION OF TERRITORIES.....	86
<i>Korobchynskiy M. V., Chyrun L. B., Vysotska V. A., Nych M. O.</i>	
MATCHES PROGNOSTICATION FEATURES AND PERSPECTIVES IN CYBERSPORT.....	95
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....	106
<i>Danylchenko A.</i>	
PARALLELING MODIFIED METHOD OF BRANCH AND BOUND TO SOLVE PROBLEM OF MATCHING CURVES FROM ENDANGERED OR THREATENED.....	106
<i>Imamverdiyev Y. N., Sukhostat L. V.</i>	
NETWORK TRAFFIC ANOMALIES DETECTION BASED ON INFORMATIVE FEATURES.....	113
<i>Kuzma K. T.</i>	
COMPUTER TECHNOLOGIES OF VERIFICATION OF KNOWLEDGE BASED ON THE METHOD OF SEQUENTIAL ANALYSIS.....	121
<i>Faure E. V.</i>	
FACTORIAL CODING WITH ERROR CORRECTION.....	130
<i>Oliinyk A., Subbotin S., Skrupsky S., Lovkin V., Zaiko T.</i>	
INFORMATION TECHNOLOGY OF DIAGNOSIS MODELS SYNTHESIS BASED ON PARALLEL COMPUTING.....	139
<i>Yelmanova E. S., Romanyshyn Y. M.</i>	
NO-REFERENCE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF GENERALIZED CONTRAST FOR COMPLEX IMAGES.....	152
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	161
<i>Lutsenko I., Fomovskaya E., Oksanych I., Serdiuk O.</i>	
DEVELOPMENT OF CRITERION VERIFICATION METHOD FOR OPTIMIZATION OF OPERATIONAL PROCESSES WITH THE DISTRIBUTED PARAMETERS.....	161
<i>Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V.</i>	
AUTOMATIC CONTROL OF THE ORE SUSPENSION SOLID PHASE PARAMETERS USING HIGH-ENERGY ULTRASOUND.....	175
<i>Nahorny V. V.</i>	
AUTOMATED CONTROL CUTTING BASED PREDICTION OF INDIVIDUAL LIFE OF THE CUTTING TOOL.....	183
<i>Safonyk A. P., Klepach M. I., Targoniy I. M.</i>	
RESEARCH AND AUTOMATION OF BIOLOGICAL REACTORS OF EFFLUENT WITH THE OXYGEN CONCENTRATION CONTROL.....	192

РАДИОФИЗИКА

РАДИОФИЗИКА

RADIOPHYSICS

УДК 621.382.049.77

Григорчак І. І.¹, Іващишин Ф. О.², Борисюк А. К.³, Швець Р. Я.⁴, Кулик Ю. О.⁵

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

²Канд. техн. наук, докторант кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

³Старший науковий співробітник кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

⁴Канд. техн. наук, науковий співробітник кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

⁵Канд. фіз.-мат. наук, провідний спеціаліст кафедри фізики металів Львівського національного університету імені Івана Франка, Львів, Україна

КЛАТРАТНІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ МУЛЬТИФЕРОЇКИ, СИНТЕЗОВАНІ В СИСТЕМІ GaSe-NaNO₂-FeSO₄. ВПЛИВ КОІНТЕРКАЛЯЦІЇ

Актуальність. Розглянуто задачу накопичення електричної енергії не в електрохімічний спосіб, а за участі електронів та їх спінів, тобто створення так званих квантових акумуляторів та спінових конденсаторів. Об'єктом дослідження є синтезовані клатрати 4-кратно розширеної матриці GaSe з гостьовими компонентами – нітритом натрію (NaNO₂), сульфатом заліза (FeSO₄) та їх коінтеркаляції NaNO₂ ⊕ FeSO₄.

Мета роботи – синтез гетероструктурованих нанокомпозитних матеріалів, які володіли б великою міжфазною поверхнею розділу і забезпечували анізотропію електропровідності в залежності від напрямку; досягнення в таких матеріалах високих значень діелектричної проникності в поєднанні з меншим від 1 значенням тангенса кута електричних втрат.

Метод. Запропоновано інтеркаляційний підхід до створення гетероструктурованих нанокомпозитних матеріалів, що дозволяє використовувати велику варіабельність гетероінгредієнтів створювати задані складні атомно-молекулярні комплекси типу «господар-гість» та комплекси ієрархічної будови «субгосподар-господар-гість». Методом рентгенівської дифрактометрії виявлено структурні зміни макрокомпозиту NaNO₂ ⊕ FeSO₄ при переході до гостьової нанообмеженої геометрії. На основі частотних залежностей питомого комплексного імпедансу з'ясовані закономірності струмопроходження та накопичення заряду в синтезованих наногібридах і вплив на них власне коінтеркаляції гостьових компонентів. Імпедансні фото- і магнетовідгуки виявили для певних архітектур гігантські фотодіелектричний, магніторезистивний та магнітоємнісний ефекти за кімнатних температур, які відкривають нові можливості їх практичного застосування у якості високочутливих сенсорів постійного магнітного поля та поля світлової хвилі.

Результати. Сформовано клатрати GaSe<NaNO₂>, GaSe<FeSO₄> та GaSe<NaNO₂ ⊕ FeSO₄>. Виявлено накопичення електричного заряду на міжфазних межах. Зафіксовано при кімнатній температурі ефекти від'ємної фотопровідності та гігантського магнітоопору; значне зростання фото-ЕРС; гігантський фотодіелектричний і магнітоємнісний ефекти.

Висновки. Коінтеркаляція NaNO₂ ⊕ FeSO₄ істотноше модифікує енергетичний спектр GaSe, ніж їх поокреме впровадження.

Синтезовані клатрати є перспективними (з коінтеркаляційною архітектурою найбільше) для нових підходів у технології надчутливих сенсорів магнітного поля і поля світлової хвилі за кімнатних температур ємнісного типу, а також до створення квантових акумуляторів і квантових конденсаторів – новітньої альтернативи хімічним джерелам струму.

Ключові слова: супрамолекулярні ансамблі, клатрати, наногібриди, селенід галія, імпедансна спектроскопія, фотодіелектричний ефект, магнітоємність, квантові акумулятори, спінові конденсатори.

НОМЕНКЛАТУРА

$\eta(T)$ – параметр порядку;
 σ_s – питома намагніченість насичення зразка;
 δ_H – коефіцієнт магнітоопору;
 $\rho(0)$ – опір електричного струму при відсутності магнітного поля;
 $\rho(H)$ – електроопір в магнітному полі напруженості H ;
 $\text{tg}\delta$ – тангенс кута електричних втрат;
 $\epsilon(\omega)$ – частотні залежності діелектричної проникності;

$\epsilon(T)$ – температурні залежності діелектричної проникності;

$\epsilon(H)$ – діелектрична проникність в магнітному полі;

$\epsilon(0)$ – діелектрична проникність;

ϕ – магнітоємність;

kT – енергія іонізації;

T – температура.

ВСТУП

Поступ в автономній енергетиці все частіше пов'язують з створенням наносистем, які би перетворювали та

накопичували електричну енергію не в електрохімічний спосіб. Мова іде про перехід на новий – квантовий рівень перетворення, накопичення і зберігання енергії. Одним із перспективних напрямів досліджень в цьому плані являється синтез гетероструктурованих нанокомпозитних матеріалів, які володіли б великою міжфазною поверхнею розділу і забезпечували анізотропію електропровідності в залежності від напрямку. Для таких структур ставиться вимога досягнення великих значень діелектричної проникності ($> 10^5$) в поєднанні з тангенсом кута електричних втрат меншим 1, особливо для частот менших від 10–2 Гц. За вище наведених умов теоретично передбачалося [1, 2] можливість накопичення інжектованих електронів на межах розділу наногетерофаз, а відповідні гетеро структури являтимуть собою квантовий акумулятор. Іншим не менш перспективним напрямком являється синтез гетероструктурованих нанокомпозитних матеріалів із неоднорідним розподілом магнітної фази, в результаті чого енергія постійного магнітного поля перетворювалася би в електричну в процесі магнітного квантового тунелювання. Останнє явище являє собою не що інше як квантовий конденсатор. Авторами роботи [3] було отримано $ЕРС = 21$ мВ при температурі 3К в постійному магнітному полі з індукцією 1 Тл хоч за законом Фарадея $ЕРС$ не повинна була б виникати під дією статичного магнітного поля. Також велику зацікавленість представляє перехід від резистивних надчутливих сенсорів магнітного поля і поля світлової хвилі за кімнатних температур до ємнісних.

Однак традиційні методи їх отримання, такі як вакуумне нанесення, фотолітографія, синтетична техніка Ленгмюра-Блоджетт мають певні застереження, пов'язані з обмеженою варіабельністю у виборі різноманітних гетероінгредієнтів та проблематичністю синтезу конфігурацій «господар-гість». Проте саме в останніх системах можна досягати не тільки цілеспрямованої зміни вихідної атомно-молекулярної структури та силових полів матеріалів-«господарів», але і формувати у кристалічному полі на атомно-молекулярному рівні певні структури, а в майбутньому і цілі функціональні блоки, що, безсумнівно, забезпечить суттєвий прогрес в наноелектроніці. Альтернативою є інтеркаляційні технології, які здатні створювати складні атомно-молекулярні комплекси, користуючись певною послідовністю хімічних реакцій, забезпечуючи одночасно надійну антикоагуляційну матричну ізоляцію наносистем. В цьому ракурсі сьогодні до найперспективніших напрямів досліджень відноситься, зокрема технологія інтеркаляційного формування періодично нано/мезо масштабованих структур, а також формування магнетоелектретного стану та магнетоємнісного зв'язку в інтеркалатах з магнітоактивними гостьовими компонентами.

Отже, метою роботи є розроблення наукових основ формування інтеркалатних гетерофазних структур з різною нанообмеженою геометрією, складом і рівнем ієрархічності архітектури, скероване на перетворення та накопичення електричної енергії на квантовому рівні та максималізацію можливостей сенсорики електромагнітного поля. Також будуть досліджені фізичні властивості отриманих наноібридів та їх поведінка у зовнішніх полях.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На основі напівпровідників із шаруватою монокристалічною будовою шляхом інтеркаляції між шари сегнетоелектричного та магнітоактивного контенту, а також їх коінтеркаляції, сформувати гетероструктуровані нанокомпозити із потрібною δ -топологією гостьового контенту. Дослідити їх фізичні властивості. Вивчити вплив зовнішніх постійних магнітного поля та поля світлової хвилі на процеси струмопроходження, поляризації і накопичення заряду. Досягнути умов квантового накопичення і зберігання електричної енергії. Отримати високочутливі матеріали зовнішнього постійного магнітного поля та поля світлової хвилі ємнісного типу.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Сьогоднішній інтенсивний розвиток сегнетоелектричних наноструктур актуалізував фундаментальне питання про розмірні ефекти в сегнетоелектричній поляризації [4] (існування критичного розміру сегнетоелектричних доменів, зміна температури Кюрі). Для експериментальних свідчень цього найоптимальнішим виявилось (див. [5–11] і посилання в них) застосування пористих матриць, характерний розмір пор яких лежить в нанометровому діапазоні. Перевага таких структур зумовлена можливістю керування розмірами і взаємним розташуванням впроваджених сегнетоелектричних фаз за рахунок використання різної геометрії сітки пор. Проведені дослідження виявили значні зміни у параметрах фазових переходів для наноструктурованих речовин в умовах нанообмеженої геометрії. При цьому, величини і характер цих змін є залежними від виду пористої матриці та гостьового контенту. Так, для наночастинок NaNO_2 виявлено зсув температури сегнетоелектричного фазового переходу у низькотемпературну область на 18 К порівняно з об'ємним матеріалом і різкий ріст діелектричної проникності відповідно від 10^2 до 10^5 (діелектрична проникність нанокомпозиту $\text{SBA-15} < \text{NaNO}_2 >$ з розміром пор 52 \AA складала 103) [12]. Аналогічна ситуація властива і для сульфату амонію в порах молекулярно-граткової матриці МСМ-41 з розміром пор 40 \AA [13]. В цьому разі діелектрична проникність є суттєво меншою (235 проти 27 для макроструктурованого). А ось для змішаного сегнетоелектричного гостьового контенту $\text{NaNO}_2 \oplus \text{KNO}_3$ в порах МСМ-41 виявлено зсув температури сегнетоелектричного фазового переходу у високотемпературну область з одночасним зростанням діелектричної проникності нанокомпозиту $\text{МСМ-41} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{KNO}_3 >$ до 104 [14]. Більше того, в [15] показано, що структурний параметр порядку $\eta(T)$ для нітриту натрію в пористому склі з діаметром пор 3200 і 200 \AA практично співпадає з залежністю для масивного матеріалу, в той час як для NaNO_2 в опалах ця залежність суттєво відрізняється як від спостережуваної в масивному матеріалі, так і від NaNO_2 в пористих склах з діаметром 30 і 70 \AA .

Водночас, останнє десятиліття ознаменувалося і бурхливим розвитком робіт в галузі наноманетизму, квантової когерентної спінтроники. Виявлені при цьому магнітні аномалії нанокомпозитів так і не отримали єдиної інтерпретації. Так, в роботі [16] допускається, що розу-

порядкування і зменшення розмірів призводить до появи магнітного порядку в титанатах перехідних металів в порах опалових матриць при значно вищих температурах, ніж у відповідних об'ємних матеріалах. З іншого боку, у нанопорах можуть формуватися наночастинки магнітних окислів настільки малих розмірів, що вони не виявляються методом рентгенівської дифракції через сильне розширення піків, але вносять суттєвий вклад в намагніченість. Останнє дещо корелює з результатами роботи [17], у відповідності до яких, процес імплантації іонів заліза в аморфний діоксид кремнію супроводжується виникненням оксидної форми наночастинок заліза внаслідок руйнування зв'язків Si-O-Si і утворення зв'язків Si-Si та Fe-O. Ситуація ускладнюється ще і тим, що, як було показано в [18], різна магнітна поведінка нанокompatитів опалових матриць з включеннями магнетиту може зумовлюватися агломерацією магнітних частинок в опаловій матриці різної морфології.

Слід зазначити, що стан заліза в системі залежить не тільки від природи попередника активного компонента, але і від типу носія, який виявляє суттєвий вплив на розмір і будову залізвмісних частинок. Так у силікагелі, просоченому FeSO_4 залізо знаходиться у високоспіновому тривалентному стані. При цьому в системі спостерігаються три позиції тривалентного заліза з помітно більшою електронною заселеністю, ніж у вихідному об'ємному матеріалі [19]. В системах на основі оксиду алюмінію теж спостерігаються три позиції заліза, але відрізняються тільки спотворенням локального оточення.

Вище наведений аналіз показує, що розуміння закономірностей як сегнетоелектричної так і магнітної поведінки інкапсуляційних нанокompatитів є далеко не повним. Незаперечним є лише те, що фізичні властивості наночастинок в умовах обмеженої гостьової геометрії значно відрізняються від властивостей відповідних об'ємних матеріалів як за рахунок квантово-розмірних ефектів, так і за рахунок взаємодії зі стінками матриць. Вивчення викликаних нанокompatитом змін властивостей матеріалів є необхідною умовою для успішного застосування нанокompatитів на основі пористих матриць. Саме в цьому ракурсі слід зазначити, що заміна діелектричної матриці на напівпровідникову забезпечує не тільки більш широкі можливості у варіюванні властивостями нанокompatитів, але і призводить до появи нових унікальних явищ і ефектів. Наприклад, як встановлено нами в [20], для $\text{InSe} \langle \text{NaNO}_2 \rangle$ спостерігається гігантський зсув точки Кюрі у низькотемпературну область на 125 К. В таких інтеркалатах виявлено інверсію осі анізотропії електропровідності та майже десятикратне зростання фоточутливості. Водночас, у синтезованій нами спін-блокаторній наноструктурі з почерговими напівпровідниковими і магнітоактивними нанопрошарками реалізується гігантський магніторезистивний ефект при кімнатних температурах та слабких магнітних полях, проявляється сильна магніто-фазова чутливість та досягається високочастотний індуктивний відгук, керований постійним електричним полем, прикладеним перпендикулярно до нанопрошарків [21].

В такому контексті виникає дуже цікава перспектива – формування нового класу мультифероїків – наносегне-

томагнетиків, поляризаційні і магнітні властивості яких визначаються електронною енергетичною топологією. Останнє дає підстави сподіватися на розвинення поляроїки як аналога спінтроники. Слід додати, якщо мультифероїкам в об'ємному стані присвячено достатньо велике число праць (наприклад [22] і посилання в ній), то публікації, присвячені їхнім клатратним архітектурам нам невідомі. Тому метою даної роботи якраз і є заповнення в певній мірі цієї прогалини.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для досягнення поставленої мети в якості матеріалу-господаря вибирався фоточутливий напівпровідниковий квазідвовимірний селенід галію (GaSe), а в якості сегнетоелектричного і магнітоактивного гостьових контентів відповідно нітрит натрію (NaNO_2) та сульфат заліза дво-валентного (FeSO_4).

Вирощені методом Бріджмена-Стокбаргера монокристали GaSe володіли яскраво вираженою шаруватою структурою і р-типом провідності. Ширина забороненої зони (за оптичними даними) складала 2,02 еВ. Як добре відомо [23], вони характеризуються наявністю «гостьових» позицій – орієнтованих перпендикулярно до кристалографічної осі С областей дії слабких ван-дер-ваальсових сил. Впровадження в означені внутрішньокристалічні проміжки чужорідних іонів, атомів чи молекул відоме як явище інтеркаляції [24]. Крім того, монокристалам властива висока фоточутливість у видимій області спектра.

Вибір нітриту натрію в якості сегнетоелектрика ґрунтувався на його здатності у розплавленому стані безпосередньо інтеркалювати монокристали селеніду галію за рахунок неспарених електронів на атомах азоту. Сульфат заліза, катіонна складова якого має великий спіновий магнітний момент, обирався як відомий прекурсор для синтезу наномагнетиту.

Формування інтеркалатних структур проводився за інтеркаляційною методикою, описаною нами в [20, 25].

Рентгенівські дифракційні спектри отримували на дифрактометрі в $\text{CuK}\alpha$ випромінюванні, монохроматизованому відбиванням від площин (200) монокристалу LiF , встановленому на первинному пучку, в симетричному варіанті $\theta-2\theta$ сканування.

Для дослідження магнітних характеристик отриманих інтеркалатів використовували вібраційний магнітометр, який являє собою високочутливий інструмент для визначення магнітних характеристик різних магнітних матеріалів, включаючи парамагнетики, магнітні порошки, тонкі плівки, магнітні стрічки і диски, магнітом'які матеріали, матеріали для постійних магнітів, високотемпературні напівпровідники. Зразки можуть досліджуватися в сильних і слабких магнітних полях, при різних температурах.

Імпедансні виміри проводилися в напрямку кристалографічної осі С в діапазоні частот 10^{-3} – 10^6 Гц за допомогою вимірювального комплексу «AUTOLAB» фірми «Eco Chemie» (Нідерланди), укомплектованого комп'ютерними програмами FRA-2 та GPES. Видалення сумнівних точок проводилося фільтром Дирихле [26, 27]. Частотні залежності комплексного імпедансу Z аналізувалися графоаналітичним методом в середовищі програмного пакету ZView 2.3 (Scribner Associates). По-

хибки апроксимації не перевищували 4%. Адекватність побудованих імпедансних моделей пакету експериментальних даних була підтверджена повністю випадковим характером частотних залежностей залишкових різниць першого порядку [26, 27].

З метою визначення локальних енергетичних рівнів проводили вимірювання струмів термостимульованої деполаризації.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На основі обраних матеріалів синтезували як одинарні інтеркалати $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$, $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$, так і коінтеркалат $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$. Інтеркаляцію нітриту натрія проводили шляхом поміщення в його розплав монокристалу GaSe , в процесі чого відбувалося N-стадійне впорядкування «гостьового» компоненту, що приводило до значного зростання відстані між окремими шарами монокристалу. Формування макрокомпозиту $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ відбувалося шляхом сплавлення вихідних прекурсорів у співвідношенні 1:1 (за об'ємом), після чого проводили, по аналогії до попереднього випадку, коінтеркаляцію монокристалу GaSe . Для синтезу інтеркалату $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$, була використана більш складна – тристадійна схема кристалізації [20, 25]. Однак слід відмітити, що для усіх інтеркалатів досягалася однакова ступінь (в даному разі 4-кратного) розширення вихідної матриці, а вміст гостьового контенту контролювався прецизійними гравіметричним і хімічним аналізами.

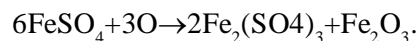
Після синтезу поверхня дослідних зразків була ретельно відмита та нанесені омичні контакти на протилежні грані напівпровідникової матриці в напрямку кристалографічної осі C. Далі були проведені вимірювання імпедансних спектрів, як за нормальних умов, в постійному магнітному полі напруженістю 2,75 кОе так і в полі світлової хвилі при використанні імітатора сонячного випромінювання потужністю 65 Вт. Фізичні поля прикладалися в напрямку пропускання вимірювального сигналу (в напрямку кристалографічної осі C) з метою уникнення дії сили Лоренца.

З метою дослідження локальних домішкових енергетичних рівнів були виміряні струми термостимульованої деполаризації в температурному діапазоні 240÷340 К при сталій швидкості нагріву 1,5 К/хв. Даний температурний діапазон було обрано з практичної точки зору.

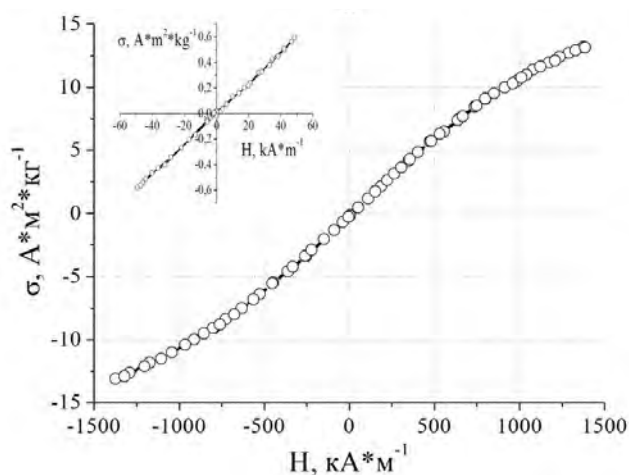
5 РЕЗУЛЬТАТИ

На дифрактограмі макрокомпозиту $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ виявлені максимуми неполярної (несегнетоелектричної) фази NaNO_2 (орторомбічна сингонія, просторова група Immm). Порівняння з літературними даними виявило суттєве зміщення максимумів в сторону більших кутів розсіяння, що вказує на зменшення параметрів елементарної комірки a, b. Параметр c залишається практично незмінним. Водночас помітне зменшення зазначених параметрів не є єдиним неординарним фактом. Викликає здивування відсутність дифракційних рефлексів від FeSO_4 . Для знаходження відповіді на останнє був проведений магнітний аналіз макрокомпозиту. Виявилось, що питома намагніченість насичення зразка, виміряна в магнітному полі напруженістю 800 кА/м склала $\sigma_s = 9,3 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. Криві

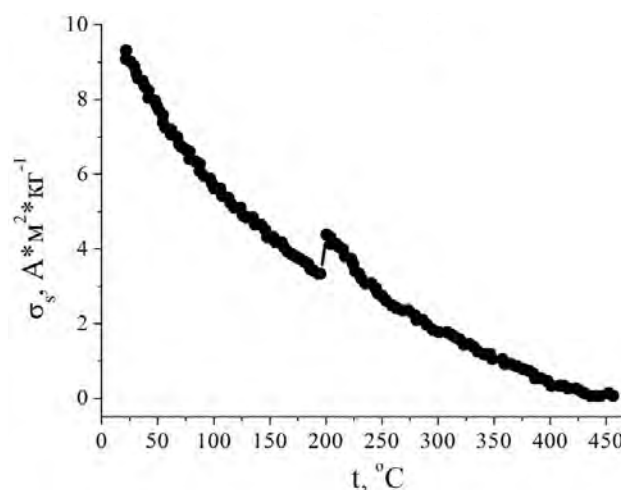
перемагнічування композиту мають безгістерезисний вигляд (рис. 1а) з нульовими значеннями коерцитивної сили та залишкової намагніченості. Імовірно, магнітні властивості зразків обумовлені наявністю в них високодисперсної фази $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, котра може утворюватися в результаті розкладу та окислення FeSO_4 за реакцією:



Проведене з метою магнітометричної ідентифікації магнітної фази в композиті вимірювання температурної залежності питомої намагніченості насичення в магнітному полі напруженістю 800 кА м⁻¹ (рис. 1б) підтвердило припущення про присутність магнітної фази $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Очевидно, її частинки володіють суперпарамагнітними властивостями. Скачок намагніченості в околі 200° С спричинений плавленням солевої матриці NaNO_2 , що супроводжується орієнтацією частинок $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ уздовж прикладеного магнітного поля. Перехід в парамагнітний



а



б

Рисунок 1 – Криві перемагнічування композиту

$\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ в магнітних полях напруженістю до: а – 1500 кА м⁻¹, б – до 50 кА м⁻¹ (вставка) і температурна залежність його питомої намагніченості

стан близько 430°C пов'язаний з переходом фази $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ під час нагрівання вище C в стабільну немагнітну фазу $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Прийнявши значення питомої намагніченості насичення $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ рівним $75\text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$, вміст фази в композиті складає 12%. Висока дисперсність та незначний вміст фази власне і не дали можливості однозначно ідентифікувати її рентгенівським методом. А ось питання чи дійсно при перекристалізації з сульфатом заліза останній блокує сегнетоелектричне впорядкування залишається відкритим.

Поміщення розплаву досліджуваного макрокомполиту в умови нанообмеженої геометрії (між шари матриці GaSe) і кристалізація його «in-situ» призводить до зміни спектрів рентгенівської дифракції (рис. 2). Видно, що інтеркаляція призводить до суттєвого збільшення міжшарової відстані GaSe: зростання параметра c становить $0,4\text{ \AA}$. Профіль максимуму (004) задовільно описується суперпозицією трьох гаусових піків: широкого дифузного максимуму, зміщеного до менших кутів розсіяння, та двох вузьких максимумів, наявність яких може вказувати на формування структурних областей з різними значеннями міжшарової відстані.

Імпедансні дослідження показали, що реальна складова питомого комплексного імпедансу ($\text{Re}Z(\omega)$) макроструктурованого композиту $\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4$ в дослідженому частотному інтервалі має спадний характер при рості частоти. При переведенні $\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4$ в умови гостьової нанообмеженої геометрії $\text{Re}Z$, що визначається делокалізованими носіями (низькочастотнезалежні ділянки), для утвореного інтеркалату $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ зменшується у $3\cdot 10^2$ рази порівняно з відповідним значенням для макрокомполиту та у $4\cdot 10^3$ рази порівняно з вихідною матрицею, демонструючи, тим самим, суттєву зміну як енергетичного спектра так, і можливо, рухливості впоперек нанопрошарків. Водночас, неадитивною є і електропровідність $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$, зумовлена делокалізованими носіями, щодо електропровідностей $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$ і $\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ (рис. 3).

Таким чином, коінтеркаляція даних гостьових компонентів істотноше модифікує енергетичний спектр, ніж їх

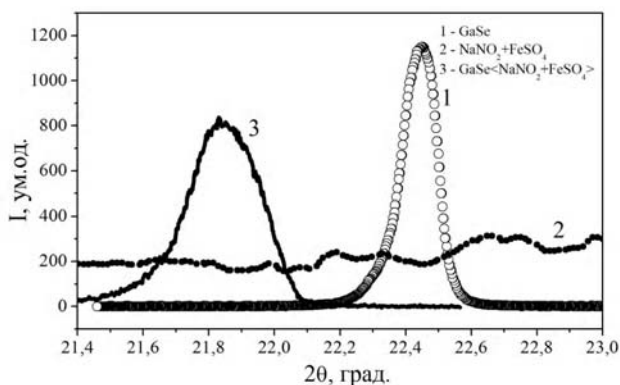


Рисунок 2 – Криві дифракційного відбивання (004) GaSe до (1) та після впровадження композиту $\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4$ (3). (2) – дифрактограма макрокомполиту у аналізованій кутовій області

поокреме введення. Підтвердження цього можна бачити з наведених на рис. 4 спектрів струмів термостимульованої деполяризації, виміряних в режимі короткозамкнутих контактів. Вони засвідчують, також, і квазінеперервність домішкового енергетичного спектра коінтеркалату, причому, на відміну від інтеркалатів, це стосується і мілких рівнів з енергією іонізації $kT < 25\text{ meV}$. Цікаво зазначити, що тільки для $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$ властива релаксація як гомо-, так і гетерозаряду. Для вихідного GaSe струми ТСД при релаксації гомозаряду візуалізуються при температурах вищих від 310 K , а для макрокомполиту $\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4$ візуалізація розпочинається при $T > 270\text{ K}$ і відповідає, головним чином, релаксації гетерозаряду.

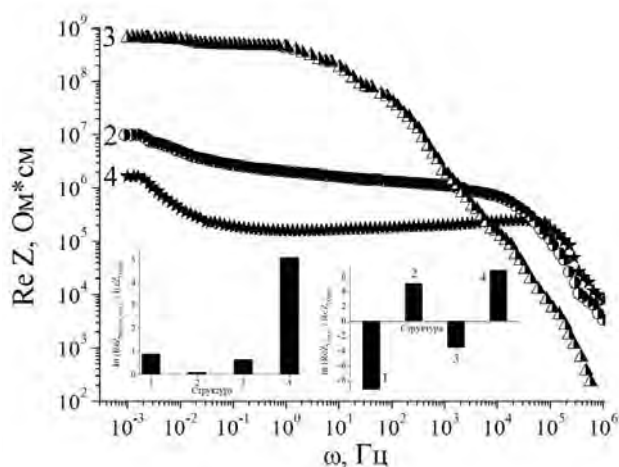


Рисунок 3 – Частотні залежності дійсної складової питомого комплексного імпедансу, перпендикулярного до нанопрошарків $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$ (2), $\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ (3) та коінтеркалату $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ (4). На вставці – імпедансний низькочастотний відгук даних структур на зовнішнє магнітне поле і поле світлової хвилі (1 – вихідна матриця)

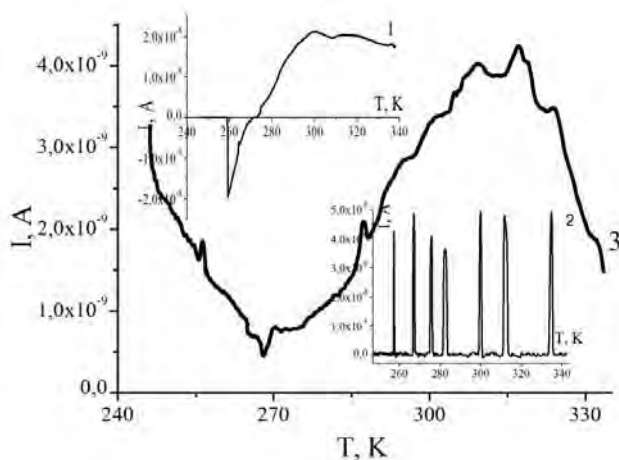


Рисунок 4 – Спектри струмів ТСД перпендикулярних до нанопрошарків $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$ (1), $\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ (2) та коінтеркалату $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ (3)

Відображення співвідношення $\text{Im}Z(\text{Re}Z)$ у площині комплексного імпедансу (діаграма Найквіста) для $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$ та $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ має звичний і очікуваний – дводуговий характер. Кожна з дуг є синтетичною, тобто характеризує розподіленість часів релаксації. Високочастотна дуга відображає струмопроходження в нерозширених пакетах матриці, а низькочастотна – між пакетами. В цьому разі заступна електрична схема має вигляд а на рис. 5, де елемент ВСРЕ [26, 27] моделює струмопроходження в просторово обмеженій області з пастковими центрами поблизу рівня Фермі, а паралельна $R||\text{CPE}$ ланка (CPE елемент сталої фази смісного типу) відображає міжпакетне перенесення заряду. Для інтеркалату $\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ спостерігається більша частотна дисперсія, що супроводжується появою індуктивного відгук (відповідна заступна електрична схема – б).

Вольтамперна характеристика $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ (як і $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$) кардинально відрізняється від квазілінійної (властивої вихідним прекурсорам), набуваючи гістерезисного виду. При цьому, коінтеркаляція сульфату заліза не тільки міняє її форму, але і суттєво підвищує величину струму (рис. б).

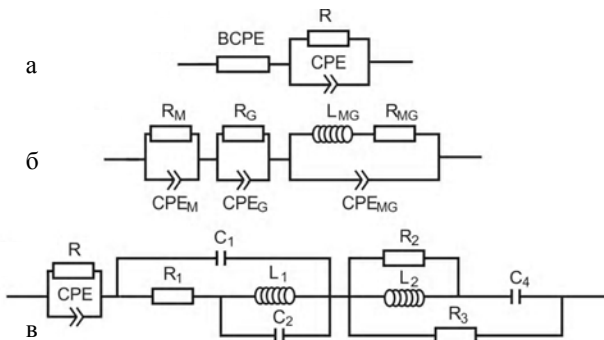


Рисунок 5 – Заступні електричні схеми для годографів імпедансу: а – $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$ і $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$, б – $\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ за нормальних умов; в – $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ в магнітному полі

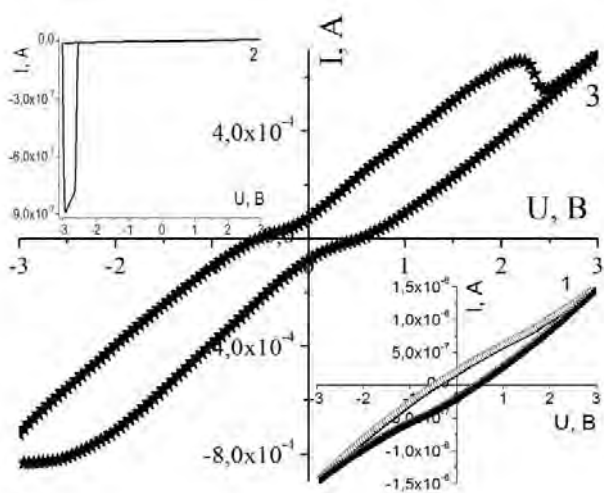


Рисунок 6 – ВАХ для напрямку, перпендикулярного до нанопрошарків $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$ (1), $\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ (2) та коінтеркалату $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ (3)

Завдяки клатратному принципу організації структури синтезованих наногібридів з супрамолекулярним характером взаємодій гість-господар, який забезпечує квазінеперервний розподіл енергетичних станів у забороненій зоні матеріалу господаря, зокрема – і в періодичному полі координаційних дефектів, слід очікувати від них підвищеної сенсорної спроможності. І дійсно, як видно зі вставок до рис. 3, для $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ реалізується гігантський додатній магніторезистивний ефект за кімнатних температур і слабких магнітних полів, який власне забезпечується коінтеркаляцією. За цих умов коефіцієнт магнетоопору, обчислений за формулою

$$\delta_H = \frac{\rho(H)}{\rho(0)}, \text{ складає } 16800 \%.$$

В магнітному полі сильно трансформуються і годограф імпедансу власне для $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ (рис. 7). А саме:

- появляється низькочастотна дуга, центр якої лежить вище (а не нижче, як звикли) осі реальної складової імпедансу;
- появляється низькочастотна вітка, напрямлена під гострим кутом до осі уявної складової комплексного імпедансу.

Якщо першу особливість зазначеної трансформації можна пов'язати з сильною локалізацією носіїв струму, то друга вказує на ефект магнітного блокування постійного струму (відповідна заступна електрична схема с на рис. 5). Найцікавішим є те, що саме в цьому випадку ВАХ (рис. 8) вказує на спостереження «spin-battery» ефекту, величина якого (~ 200мВ) при кімнатній температурі і напруженості магнітного поля 2,75.

З рис. 3 також слідує неординарність поведінки синтезованих структур у полі світлової хвилі. Хоч загалом фоточутливість у резистивному режимі дещо зменшується (чого і слід було очікувати) проте для $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$ та $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ фіксується ефект від'ємної фотопровідності у напрямку, перпендикулярному до нанопрошарків синтезованих клатратів. А ось у фотовольтаїчному режимі отримується практично важ-

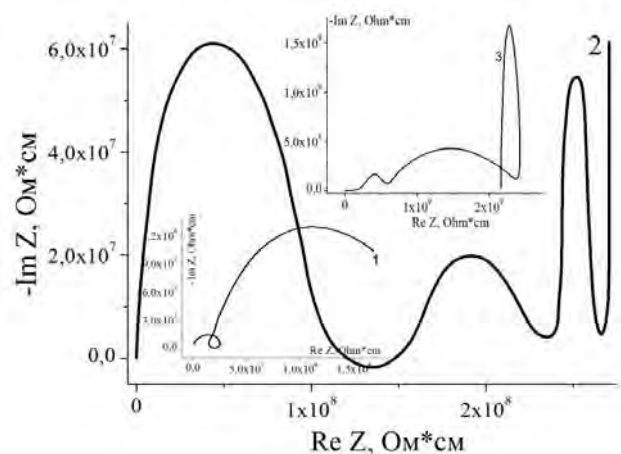


Рисунок 7 – Діаграми Найквіста для напрямку, перпендикулярного до нанопрошарків $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ за нормальних умов (1), в магнітному полі (2) та при освітленні (3)

ливий результат: тільки для коінтеркалату $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ властиве зростання фото-ЕРС від десятків мВ для вихідної матриці (фото-ЕРС Дембера) до сотень мВ (рис. 8).

Синтезовані наногібриди володіють цікавими і поляризаційними властивостями, результати дослідження яких наведені на рис. 9. Виходячи з практичної цінності, – можливості застосування їх для високодобротних конденсаторів радіочастотного діапазону, при аналізі бралися до уваги дані, яким відповідають значення тангенса кута електричних втрат менші від одиниці. Серед отриманих результатів найперше слід виділити два наступних:

- колосальні значення ε у поєднанні з низьким (<1) значенням $\text{tg}\delta$, особливо у низькочастотній області;
- наявність ділянок аномальної частотної дисперсії діелектричної проникності: ріст ε при збільшенні частоти.

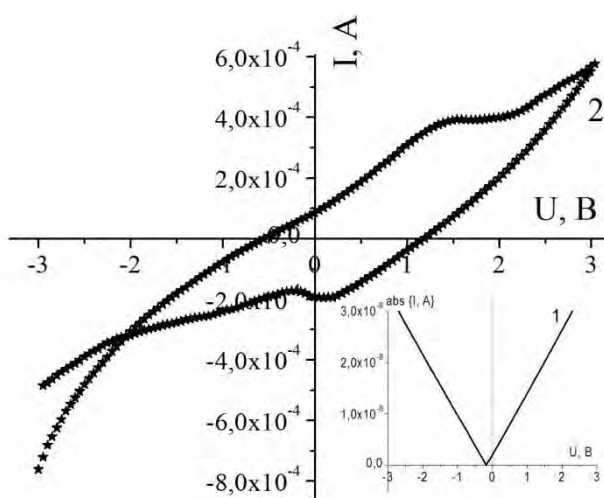


Рисунок 8 – ВАХ для напрямку, перпендикулярного до нанопрошарків $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ в магнітному полі (1) та при освітленні (2)

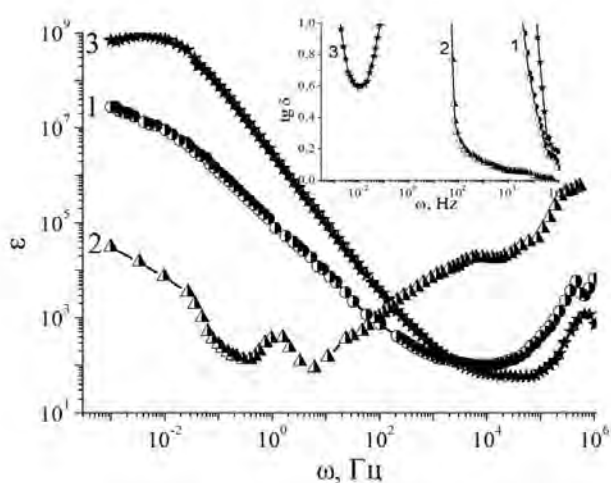
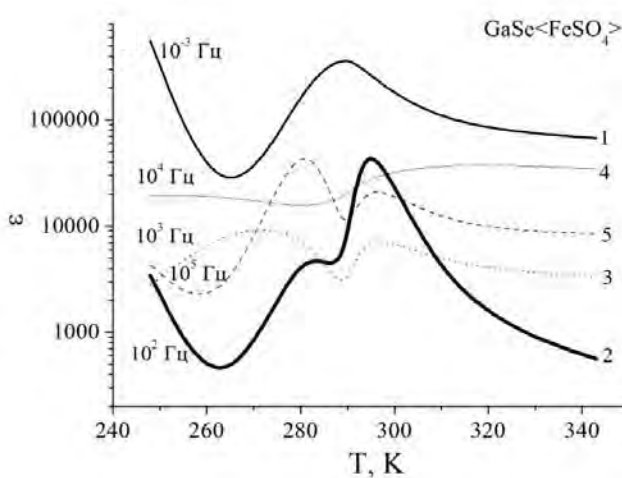


Рисунок 9 – Частотні залежності діелектричної проникності і тангенса кута електричних втрат (вставка), перпендикулярних до нанопрошарків для $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$ (1), $\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ (2) та коінтеркалату $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ (3)

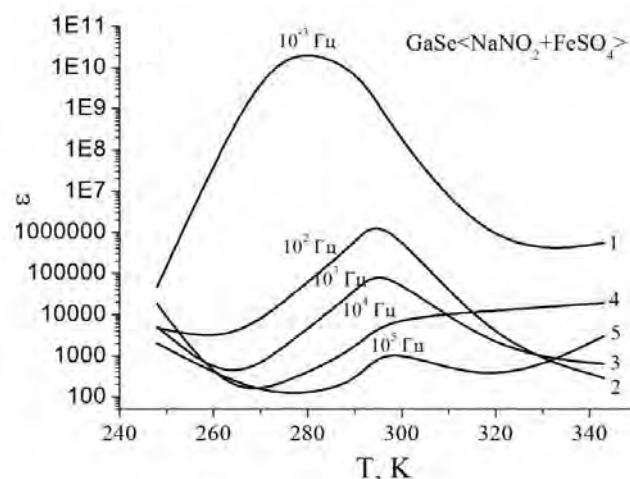
З наведених на рис. 10 температурних залежностей ε для $\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ немонотонну залежність $\varepsilon(T)$ проблематично віднести до сегнетоелектричної поведінки, так як властивий їй різкий спад максимальних значень ε з підвищенням частоти не спостерігається. Натомість він добре представлений для $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$.

Логічним продовженням отриманих вище результатів є спостережувана нами (рис. 11а) суттєва зміна діелектричної проникності при освітленні видимим світлом.

В нашому випадку величина магнітосмості ξ для синтезованих клатратів на частоті 10 кГц за кімнатних температур в магнітному полі напруженістю 2,75 кОе складає 1120% ($\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$), 1240% ($\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$) та 19000% ($\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$).



а



б

Рисунок 10 – Температурні залежності діелектричної проникності, перпендикулярної до нанопрошарків для $\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ (а) коінтеркалату $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4\rangle$ (б), виміряні на частотах 10^{-3} Гц (1), 10^2 Гц (2), 10^3 Гц (3), 10^4 Гц (4) та 10^5 Гц (5)

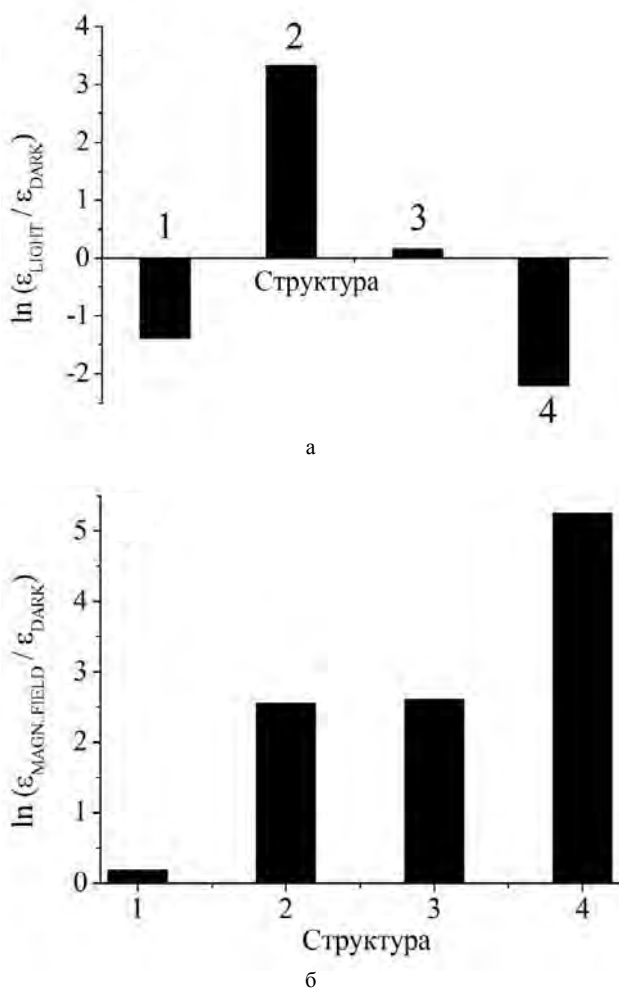


Рисунок 11 – Зміна діелектричної проникності при освітленні та в постійному магнітному полі на частоті 1МГц для $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$ (2), $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$ (3) та коінтеркалату $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ (4). 1 – вихідна матриця

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отримані результати підтверджують структурну організацію отримуваних супрамолекулярних ансамблів у вигляді нерозширених пакетів вихідної матриці, що чергуються з розширеними областями ван-дер-ваальсових зв'язків з гостьовим контентом (описану нами в [25]) у відповідності до механізму стадійного упорядкування в таких системах [20]. Така структурна будова приводить до появи різноманітних квантових ефектів на міжфазних межах.

Одним із проявів таких ефектів є відоме з літературних джерел явище «від'ємної» ємності, якому надається досить пильна увага (наприклад, [28, 29]) завдяки можливості його застосування в наноелектроніці для створення безгіраторних наноліній затримки. Для напівпровідникових клатратів досліджуваного класу воно нами висвітлене в роботах [30, 31].

Гістерезисний вигляд ВАХ (рис. 6) вказує на процеси накопичення заряду на міжфазних межах. Водночас, незвичний вигляд ВАХ властивий і для клатрату конфігурації $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$, зумовлений появою струмового «хвоста» у від'ємній області потенціалів. Його появу можна

віднести до прояву описаного в [32] явища нерівноважного збіднення поверхні напівпровідника, пов'язаного із захопленням неосновних носіїв поверхневими станами на межі розділу напівпровідник|діелектрик.

Важливе практичне значення має і гігантський додатний магніторезистивний ефект отриманий у наноструктурі $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ $\delta_H = 16800\%$. Для порівняння: δ_H для $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ складає 77,3% [33]. Механізм даного ефекту найбільш ймовірно можна пов'язати з зєсманівською модифікацією енергетичного спектра (для додатного ефекту – локалізацією), як це успішно було зроблено авторами цитованої роботи для пояснення гігантського магніторезистивного ефекту при кімнатних температурах.

Отриманий ефект «spin-battery», величина якого (~200мВ) при кімнатній температурі і напруженості магнітного поля 2,75 кОе є на порядок вищою від спостереженого в [3], але при температурі 3 К та напруженості магнітного поля 10 кОе. Іншими словами, саме коінтеркалатна наноструктура $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ є перспективною для практичної реалізації ідеї [34] створення спінового конденсатора.

Ефект від'ємна фотопровідність може бути пояснений, якщо допустити близькість валентної зони господаря і незаповненої смуги станів гостьових кластерів. Тоді при освітленні білим світлом буде відбуватися просторове розділення заряду, в результаті чого нерівноважні електрони будуть накопичуватися у квантових точках, створюючи, тим самим, фотоіндуковані центри прилипання дірок на гетеромежі господар|гість. Локалізація на них основних носіїв струму і викличе зменшення концентрації делокалізованих носіїв струму, тобто спостережуваний ріст найнижкочастотнішої ділянки ReZ. Однак слід звернути увагу на отриманий фотовольтаїчний ефект для коінтеркалату $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$, в результаті якого зафіксовано зростання фото-ЕРС від десятків мВ для вихідної матриці до сотень мВ (рис. 8).

Наявність ділянок аномальної частотної дисперсії діелектричної проникності: ріст ϵ при збільшенні частоти можна пов'язати з додатковою поляризацією, зумовленою перескоками носіїв по локалізованих центрах в околі рівня Фермі [35]. Однак природу колосальних її значень у поєднанні з низьким (<1) значенням $\text{tg}\delta$, особливо у низькочастотній області, пояснити складніше. В останньому контексті добре відомо, що фазами, яким властиве гігантське значення діелектричної проникності в певному температурному околі є сегнетоелектрики. Однак, нами не виявлена візуалізація петель гістерезису (не виключено – через екранування носіями струму), що свідчить про потребу пошуку можливого альтернативного механізму спостережуваних явищ.

Насамперед, у відповідності до вище наведеної особливості енергетичного спектра синтезованих структур та на основі аналізу літературних даних [36–38] спостережуване високе значення діелектричної проникності може бути пов'язане з особливим станом електронної підсистеми, а саме, перерозподілом носіїв заряду між нанопрошарками. За такого перерозподілу, сусідні пари різних фаз заряджені протилежними знаками і їх можна розгля-

дати як диполі, які вносять суттєвий вклад в діелектричну проникність за рахунок зарядової поляризації. Механізм розподілу між різними фазами, при цьому, може бути зумовлений:

- різним значенням хімпотенціалу фаз;
- тунелюванням, при якому час життя електронів на певних рівнях може бути досить великим і система буде заряджена.

Водночас, уже згадуване захоплення заряду пастками в бар'єрному шарі і емісія зарядів в область нанопрошарку – процеси, еквівалентні перемиканню квазидіполів у зовнішньому полі.

Та чи не найбільш цікавим є питання про природу низького значення тангенса кута електричних втрат $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$ у інфранизькочастотній області, поєднання якого з колосальним значенням діелектричної проникності створює реальні перспективи для акумулювання електричної енергії на квантовому рівні без застосування електрохімічних процесів. На жаль, обґрунтованої відповіді на нього поки що немає. Для розкриття його можливого резонансного механізму необхідні окремі дослідження.

В межах такої моделі стає зрозумілою спостережувана нами (рис. 11а) суттєва зміна діелектричної проникності при освітленні видимим світлом. Адже освітлення таких речовин призводить до перерозподілу носіїв заряду по дискретних рівнях, поляризації окремих центрів і зміни густини станів [39]. Це, в свою чергу, викликає зміну діелектричної проникності, тобто фотодіелектричний ефект (ФДЕ). У змінних електричних полях ФДЕ характеризується цілою низкою додаткових особливостей, оскільки існування складного спектра локалізованих станів зумовлює вклад в поляризаційні процеси різних енергетичних рівнів в залежності від частоти електричного поля і освітленості. Водночас, безперечно, не виключається вплив на поляризаційні процеси і безпосередньої взаємодії світлового випромінювання з кристалічною ґраткою. Зазначимо, що загальний характер частотних залежностей $\epsilon(\omega)$ у зовнішніх фізичних полях у принциповому плані міняється тільки для $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$ при освітленні у частотному діапазоні $10^4 \div 10^6$ Гц, переходячи до монотонно спадної поведінки.

Розуміння механізму спостережуваного магнітоємнісного ефекту є досить складним. Магнітоелектрики (див. огляд [40]) не мали практичного застосування через надзвичайно малі величини даного ефекту. Тільки нещодавно появилася публікація про виявлення ефекту гігантської магнітоємності (ГМС) [41]. Під ним розумі-

лося досягнення в TbMnO_3 величини $\wp = \frac{\epsilon(H) - \epsilon(0)}{\epsilon(0)}$

10% при низьких (≤ 18 К) температурах. Це відкриває перспективи заміни традиційно використовуваних індуктивних головок для зчитування інформації з магнітних носіїв на ємнісні магнітоелектричні елементи, що дозволяє зменшити розміри і розсіювання енергії в них.

Очевидно, що в даному разі механізм ГМС є відмінним від того, що реалізується в [41]. Його, у світлі вищенаведеного, найбільш ймовірно пов'язати з земаївською модифікацією енергетичного спектра.

Очевидно, що для остаточної відповіді про природу спостережуваних явищ необхідні подальші поглиблені як експериментальні, так і теоретичні дослідження. І вони будуть того варті, оскільки незаперечно є важливість запропонованих підходів до технології надчутливих сенсорів магнітного поля і поля світлової хвилі за кімнатних температур ємнісного типу, а також до створення квантових акумуляторів і квантових конденсаторів – новітньої альтернативи хімічним джерелам струму.

ВИСНОВКИ

1. На дифрактограмі макрокомпозиту $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$, сформованого шляхом сплавлення вихідних прекурсорів у співвідношенні 1:1 (за об'ємом), присутні максимуми неполярної (несегнетоелектричної) фази (орторомбічна сингонія, просторова група Immm) зі зменшеними параметрами елементарної комірки a , b (параметр c залишається практично незмінним) порівняно з прекурсорною фазою NaNO_2 . Відсутність на ній дифракційних рефлексів від FeSO_4 зумовлена її окислювальним розкладом до $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ з високою дисперсністю та невисоким вмістом (12% за даними магнітного аналізу для $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). При інтеркаляції композиту в GaSe параметра c останнього зростає на $0,4 \text{ \AA}$.

2. Коінтеркаляція $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ істотноше модифікує енергетичний спектр GaSe , ніж їх поокреме впровадження.

3. Вольтамперна характеристика

$\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$ (як і $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 >$) кардинально відрізняється від квазілінійної (властивої вихідним прекурсорам), набуваючи гістерезисного виду. При цьому, коінтеркаляція сульфату заліза не тільки міняє її форму, але і суттєво підвищує величину струму.

4. Коінтеркаляція $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ ініціює гігантський додатний магніторезистивний ефект за кімнатних температур і слабких магнітних полів.

5. Для $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 >$ та $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$ фіксується ефект від'ємної фотопровідності у напрямку, перпендикулярному до нанопрошарків синтезованих клатратів, і лише для коінтеркалату властиве сильне зростання фото-ЕРС.

6. Загальний характер частотних залежностей $\epsilon(\omega)$ у зовнішніх фізичних полях у принциповому плані міняється тільки для $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$ при освітленні у частотному діапазоні $10^4 \div 10^6$ Гц, переходячи до монотонно спадної поведінки.

7. У синтезованих клатратах спостерігається гігантські фотодіелектричний і магнітоємнісний ефекти. Величина

магнітоємності $\wp = \frac{\epsilon(H) - \epsilon(0)}{\epsilon(0)}$ за кімнатних темпера-

тур в магнітному полі напруженістю $2,75 \text{ кОе}$ складає 1120% ($\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 >$), 1240% ($\text{GaSe} < \text{FeSO}_4 >$) та 19000% ($\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$).

8. Синтезовані клатрати є перспективними (з коінтеркалатною архітектурою найбільше) для нових підходів у технології надчутливих сенсорів магнітного поля і поля світлової хвилі за кімнатних температур ємнісного типу,

а також до створення квантових акумуляторів і квантових конденсаторів – новітньої альтернативи хімічним джерелам струму.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи Національного університету «Львівська політехніка» «Фізико-технологічні засади створення наноструктур для квантового генерування і акумулювання електричної енергії» (номер державної реєстрації 0115U000438).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Заявка РСТ ВУ 99/00012 «Quantum-Size Electronic Devices and Operating Conditions Thereof» (International Publication Number: WO 00/41247, 13.07.2000)
2. Krohns S. Colossal dielectric constant up to gigahertz at room temperature / [S. Krohns, P. Lunkenheimer, Ch. Kant et al] // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 94. – P. 122903-1-122903-3. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3105993>
3. Hai P. N. Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions / [P. N. Hai, S. Ohya, M. Tanaka et al] // *Nature.* – 2009. – Vol. 458, № 7237 – P. 489–493. DOI:10.1038/nature07879
4. Фридкин В. М. Критический размер в сегнетоэлектрических наноструктурах / В. М. Фридкин // *Успехи физических наук.* – 2006. – Т. 176, № 2. – С. 203–212. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200602c.0203
5. Temperature Evolution of Sodium Nitrite Structure in a Restricted Geometry / [A. V. Fokin, Yu. A. Kumzerov, N. M. Okuneva et al] // *Physical Review Letters.* – 2002. – Vol. 89, № 17. – P. 175503. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.175503>
6. Vakhrushev S. B. ^{23}Na spin-lattice relaxation of sodium nitrite in confined geometry / [S. B. Vakhrushev, Yu. A. Kumzerov, A. V. Fokin et al] // *Physical Review B.* – 2004. – Vol. 70, № 13. – P. 132102. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.132102>
7. Dielectric properties of mesoporous sieves filled with NaNO_2 / [S. V. Baryshnikov, C. Tien, E. V. Charnaya et al] // *Ferroelectrics.* – 2008. – Vol. 363, № 1. – P. 177–186. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00150190802026127>
8. Coexistence of melted and ferroelectric states in sodium nitrite within mesoporous sieves / [C. Tien, E. V. Charnaya, M. K. Lee et al] // *Physical Review B.* – 2005. – Vol. 72, № 10. – P. 104105. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.104105>
9. Tunable ferroelectric photonic crystals based on porous silicon templates infiltrated by sodium nitrite / [T. V. Murzina, F. Y. Sychev, I. A. Kolmychek, O. A. Aktsiperov] // *Applied Physics Letters.* – 2016. – Vol. 90. – P. 161120–161122. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2724928>
10. NMR studies of structure and ferroelectricity for Rochelle salt nanoparticles embedded into mesoporous sieves / [C. Tien, E. V. Charnaya, M. K. Lee et al] // *Journal of Physics: Condensed Matter.* – 2008. – Vol. 20. – P. 215205. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/21/215205>
11. Yadlovker D. Uniform orientation and size of ferroelectric domains / D. Yadlovker, S. Berger // *Physical Review B.* – 2005. – Vol. 71, № 18. – P. 184112. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.184112>
12. Tien C. Эволюция NaNO_2 в пористых матрицах / [Cheng Tien, E. V. Charnaya, C. V. Baryshnikov et al] // *Физика твердого тела.* – 2004. – Т. 46, № 12. – С. 2224–2228.
13. Диелектрические свойства нанопористой матрицы MCM-41, заполненной сегнетоэлектриком $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ / [С. В. Барышников, Е. В. Чарная, А. Ю. Милинский, А. Ю. Гойхман et al] // *Физика твердого тела.* – 2013. – Т. 55, № 5. – С. 987–990.
14. Диелектрические свойства смешанных сегнетоэлектриков $\text{NaNO}_2\text{-KNO}_3$ в нанопористых силикатных матрицах / [С. В. Барышников, Е. В. Чарная, А. Ю. Милинский et al] // *Физика твердого тела.* – 2009. – Т. 51, № 6. – С. 1172–1176.
15. Температурные зависимости параметра порядка для нитрита натрия, внедренного в пористые стекла и опалы / [А. И. Бескровный, С. Г. Васильевский, С. Б. Вахрушев et al] // *Физика твердого тела.* – 2010. – Т. 52, № 5. – С. 1021–1025.
16. Магнитные свойства ряда нанокмполитов на основе опаловых матриц / [М. К. Lee, Е. В. Чарная, С. Tien] // *Физика твердого тела.* – 2013. – Т. 55, № 3. – С. 572–576.
17. Курмаев Э. З. Наночастицы в аморфном SiO_2 : рентгеновские эмиссионные и абсорбционные свойства / [Э. З. Курмаев, Д. А. Зацепин, С. О. Чолах et al] // *Физика твердого тела.* – 2005. – Т. 47, № 4. – С. 728–730.
18. Свойства 3D-композитов на основе опаловых матриц и магнитных наночастиц / [С. Н. Ивичева, Ю. Ф. Каргин, Е. А. Овченко et al] // *Физика твердого тела.* – 2011. – Т. 53, № 6. – С. 1053–1058.
19. Состояние железа в наночастицах, полученных методом пропитки силикагеля и оксида алюминия раствором FeSO_4 / [Г. А. Бухтиярова, О. Н. Мартынов, С. С. Якушкин et al] // *Физика твердого тела.* – 2010. – Т. 52, № 4. – С. 771–781.
20. Grigorochak I. I. On some physical properties of InSe and GaSe semiconducting crystals intercalated by ferroelectrics / I. I. Grigorochak, V. V. Netyaga, Z. D. Kovalyuk // *Journal of Physics: Condensed Matter.* – 1997. – Vol. 9. – P. L191–L195. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/9/12/001>
21. Покладок Н. Т. Интеркалатные структуры с δ -топологической зоной чередующихся полупроводниковых и магнитоактивных нанослоев и их импедансное поведение в магнитном и электрическом поле / Н. Т. Покладок, И. И. Григорчак, Я. М. Бужук // *Журнал технической физики.* – 2010. – Т. 80, № 2. – С. 77–82.
22. Звездин А. К. Фазовые переходы и гигантский магнитоэлектрический эффект в мультиферроиках / А. К. Звездин, А. П. Пятаков // *Успехи физических наук.* – 2004. – Т. 174, № 4. – С. 465–470. DOI: 10.3367/UFNr.0174.200404n.0465
23. Lies R. M. A. III–VI Compounds / R. M. A. Lies // *Preparation and cryst. growth material with layered structure.* – Dordrecht-Boston, 1977. – P. 225–254.
24. Friend R. H. Electronic Properties of intercalation complexes of the transition metal dichalcogenides / R. H. Friend, A. D. Yoffe // *Advances in Physics.* – 1987. – Vol. 36, № 1. – P. 1–94. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00018738700101951>
25. Grygorchak I. Intercalated Nanostructure Consisting of Inorganic Receptor and Organic Ambipolar Semiconductor / [I. Grygorchak, F. Ivashchyshyn, P. Stakhira et al] // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics.* – 2013. – Vol. 8, № 3 – P. 292–296. DOI: <https://doi.org/10.1166/jno.2013.1464>
26. Стойнов З. Б. Электрохимический импеданс / [З. Б. Стойнов, Б. М. Графов, Б. Савова-Стойнова, В. В. Елкин]. – М.: Наука, 1991. – 336 с.
27. Impedance spectroscopy. Theory, experiment and application / Ed. E. Barsoukov and J. R. Macdonald. – Wiley interscience, 2005. – 585 p.
28. Bisquert J. Inductive behaviour by charge-transfer and relaxation in solid-state electrochemistry / J. Bisquert, H. Randriamahazaka, G. Garcia-Belmonte // *Electrochimica Acta.* – 2005. – Vol. 51. – P. 627–640. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2005.05.025>
29. Implications of the Negative Capacitance Observed at Forwards Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells / [I. Mora-Sero, J. Bisquert, F. Fabregat-Santiago et al] // *Nano Letters.* – 2006. – Vol. 6, № 4. – P. 640–650. DOI: 10.1021/nl052295q
30. Nonorganic semiconductor – Conductive polymer intercalate nanohybrids: Fabrication, properties, application / [F. Ivashchyshyn, I. Grygorchak, P. Stakhira et al] // *Current Applied Physics.* – 2012. – Vol. 12. – P. 160–165. DOI:10.1016/j.cap.2011.05.032

31. Полупроводниковые клатраты с периодически модулированной топологией гостевого сегнетоэлектрического жидкого кристалла в термическом, магнитном и световой волны полях / [Т. Н. Бищанюк, И. И. Григорчак, А. В. Фечан, Ф. О. Иващишин] // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 7. – С. 139–142.
 32. Тихов С. В. Особенности явления неравновесного обеднения, сопровождаемого процессами захвата неосновных носителей поверхностными состояниями, в структурах металл-диэлектрик-полупроводник / [С. В. Тихов, О. Н. Горшков, М. Н. Коряжжина et al] // Письма в журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, № 3. – С. 52–60.
 33. Гигантская объемная магнитострикция и колоссальное магнитосопротивление при комнатных температурах в $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ / [Р. В. Демин, Л. И. Королева, А. З. Муминов, Я. М. Муковский] // Физика твердого тела. – 2006. – Т. 48, № 2. – С. 305–307.
 34. Datta S. Proposal for a “spin capacitor” / S. Datta // Applied physics letters: – 2005. – Vol. 83. – P. 013115(1–3). DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1968417>
 35. Диэлектрические свойства соединений $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}$ / [П. В. Жуковский, Я. Партыка, П. Венгерэк et al] // Физика и техника полупроводников – 2000. – Т. 34, № 10. – С. 1174–1177.
 36. Нагаев Э. Л. Малые металлические частицы / Э. Л. Нагаев // Успехи физических наук. – 1992. – Т. 162, № 9. – С. 49–124. DOI: 10.3367/UFNr.0162.199209b.0049
 37. Болтаев А. П. Аномально высокая низкочастотная эффективная диэлектрическая проницаемость в системе металлических наносторцов / А. П. Болтаев, Ф. А. Пудонин // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2008. – Т. 134, № 3. – С. 587–594.
 38. Беляев Б. А. Спектры импеданса тонких пермаллоевых пленок с наносторцовой структурой / Б. А. Беляев, Н. А. Дрокин // Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54, № 2. – С. 340–346.
 39. Особенности фотодиэлектрического эффекта в слоях $\alpha\text{-As}_2\text{Se}_3$ / [Н. И. Анисимова, В. А. Бордовский, В. И. Грабко, Р. А. Кастро] // Письма в журнал технической физики. – 2013. – Т. 39, № 2. – С. 1–7.
 40. Смоленский Г.А. Сегнетомагнетика / Г. А. Смоленский, И. Е. Чупис // Успехи физических наук. – 1982. – Т. 137, № 3. – С. 415–448. DOI: 10.3367/UFNr.0137.198207b.0415
 41. Magnetic control of ferroelectric polarization / [Т. Kimura, T. Goto, H. Shintani et al] // Nature. – 2003. – Vol. 426, No. 6962. – P. 55–58. DOI:10.1038/nature02018
- Статья надійшла до редакції 09.03.2017.
Після доробки 20.06.2017.

Григорчак И. И.¹, Иващишин Ф. О.², Борисюк А. К.³, Швець Р. Я.⁴, Кулик Ю. О.⁵

¹Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики и наноматериаловедения Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

²Канд. техн. наук, докторант кафедры прикладной физики и наноматериаловедения Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

³Старший научный сотрудник кафедры прикладной физики и наноматериаловедения Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

⁴Канд. техн. наук, научный сотрудник кафедры прикладной физики и наноматериаловедения Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

⁵Канд. физ.- мат. наук, ведущий специалист кафедры физики металлов Львовского национального университета имени Ивана Франко, Львов, Украина

КЛАТРАТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МУЛЬТИФЕРОИКИ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В СИСТЕМЕ $\text{GaSe-NaNO}_2\text{-FeSO}_4$. ВЛИЯНИЕ КОИНТЕРКАЛЯЦИИ

Актуальность. Рассмотрена задача накопления электрической энергии не в электрохимический способ, а с участием электронов и их спинов, то есть создание так называемых квантовых аккумуляторов и спиновых конденсаторов. Объектом исследования являются синтезированные клатраты 4-кратно расширенной матрицы GaSe с гостевыми компонентами – нитритом натрия (NaNO_2), сульфатом железа (FeSO_4) и их коинтеркаляции $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$.

Цель работы – синтез гетероструктурированных нанокompозитных материалов, которые обладали бы большой межфазной поверхностью раздела и обеспечивали анизотропию электропроводности в зависимости от направления; достижения в таких материалах высоких значений диэлектрической проницаемости в сочетании с меньше 1 значением тангенса угла электрических потерь.

Метод. Предложено интеркаляционный подход к созданию гетероструктурированных нанокompозитных материалов, что позволяет используя большую вариабельность гетероингредиентов создавать заданные сложные атомно-молекулярные комплексы типа «хозяин-гость» и комплексы иерархического строения «субхозяин-хозяин-гость». Методом рентгеновской дифрактометрии выявлены структурные изменения макрокомпозиту $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ при переходе к гостевой нанограниченной геометрии. На основе частотных зависимостей удельного комплексного импеданса выяснены закономерности токопрохождения и накопления заряда в синтезированных наногридах и влияние на них собственно коинтеркаляции гостевых компонентов. Импедансные фото- и магнетоотзывы обнаружили для определенных архитектур гигантские фотодиэлектрический, магниторезистивный и магнетоемкостный эффекты при комнатных температурах, которые открывают новые возможности их практического применения в качестве высокочувствительных сенсоров постоянного магнитного поля и поля световой волны.

Результаты. Сформированы клатраты $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2\rangle$, $\text{GaSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ и $\text{GaSe}\langle\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4\rangle$. Выявлено накопление электрического заряда на межфазных пределах. Зафиксировано при комнатной температуре эффекты отрицательной фотопроводимости и гигантского магнетосопротивления; значительный рост фото-ЭДС; гигантский фотодиэлектрический и магнетоемкостный эффекты.

Выводы. Коинтеркаляция $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ существенно модифицирует энергетический спектр GaSe, чем их поотдельное внедрения.

Синтезированные клатраты являются перспективными (с коинтеркалатной архитектурой всего) для новых подходов в технологии сверхчувствительных сенсоров магнитного поля и поля световой волны при комнатных температур емкостного типа, а также к созданию квантовых аккумуляторов и квантовых конденсаторов – новейшей альтернативы химическим источникам тока.

Ключевые слова: супрамолекулярные ансамбли, клатраты, наногриды, селенид галлия, импедансная спектроскопия, фотодиэлектрический эффект, магнетоемкость, квантовые аккумуляторы, спиновые конденсаторы.

Grygorchak I. I.¹, Ivashchysyn F. O.², Borysiuk A. K.³, Shvets R. Ya.⁴, Kulyk Yu. O.⁵

CLATHRATE SEMICONDUCTOR MULTIFERROICS, SYNTHESIZED IN SYSTEM GaSe-NaNO₂-FeSO₄ AND INFLUENCE OF COINTERCALATION

¹Dr.Sc., Professor, Head of Department of Applied Physics and Nanomaterials Science, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

²PhD, Doctoral Candidate of Department of Applied Physics and Nanomaterials Science, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

³Senior Research Fellow of Department of Applied Physics and Nanomaterials Science, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

⁴PhD, Researcher of Department of Applied Physics and Nanomaterials Science, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

⁵PhD, Leading Specialist of Department of Metal Physics, Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

Context. The task for electric energy accumulation in non-electrochemical way but by means of electrons and spins was developed on the basis of quantum accumulators and spin capacitors. Synthesized clathrates of 4 folds expanded GaSe matrix with guest component sodium nitrite NaNO₂, Iron II Sulfate FeSO₄ and combination of them NaNO₂⊕FeSO₄ are the object of research.

Objective. Synthesis of heterostructured nanocomposite materials with large developed interface, anisotropic electric conductance and high values of dielectric permittivity in combination with loss tangent less than 1.

Method. The intercalation approach to heterostructured nanocomposite materials formation was proposed. It allows creating developed atomic-molecular complexes of host-guest type and hierarchical structures of subhost-host-guest type. The X-ray diffractometry data show the structural changes in macro composite NaNO₂⊕FeSO₄ at the transition to the guest nanoscale geometry. With the help of frequency dependence of specific complex impedance the main features of current flow and charge accumulation processes in synthesized nanohybrids and effect of cointercalation were determined. Impedance photo- and magneto- responses show a gigantic photodielectric, magnetoresistive and magnetocapacitive effects at room temperature. These effects open up a new possibilities of theirs application as highly sensitive sensors of constant magnetic and light wave field.

Results. Clathrates GaSe<NaNO₂>, GaSe<FeSO₄> та GaSe<NaNO₂⊕FeSO₄> were synthesized. Electric charge accumulation at the interface was determined. The effects of negative photoconductivity and giant magnetoresistance, drastic increase in photo-EMF, giant photodielectric and magnetocapacitive effects were registered at room temperature.

Conclusions. Cointercalation of NaNO₂⊕FeSO₄ modifies the energetic specter of GaSe more than individual intercalation. Synthesized clathrates are promising materials for novel approaches in technology of highly sensible sensors of capacitive type for magnetic and light wave field at room temperatures as well as for quantum accumulators and quantum capacitors as a new alternative of chemical power sources.

Keywords: supramolecular ensembles, clathrates, nanohybrids, Gallium Selenide, impedance spectroscopy, photodielectric effect, magnetocapacity, quantum accumulators, spin capacitors.

REFERENCES

- Request PCT BY 99/00012 "Quantum-Size Electronic Devices and Operating Conditions Thereof" (International Publication Number: WO 00/41247, 13.07.2000)
- Krohns S., Lunkenheimer P., Kant Ch., Pronin A. V., Brom H. B., Nugroho A. A., Diantoro M., and Loidl A. Colossal dielectric constant up to gigahertz at room temperature, *Appl. Phys. Lett.*, 2009, Vol. 94, pp. 122903-1–122903-3. DOI: 10.1063/1.3105993
- Hai P. N., Ohya S., Tanaka M., Barnes S. E., Maekawa S. Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions, *Nature*, 2009, Vol. 458, No. 7237, pp. 489–493. DOI:10.1038/nature07879
- Fridkin V.M. Critical size in ferroelectric nanostructures, *Physics Uspekhi*, 2006, Vol. 49, pp. 193–202. DOI: 10.1070/PU2006v049n02ABEH005840
- Fokin A. V., Kumzerov Yu. A., Okuneva N. M., Naberezhnov A. A., Vakhrushev S. B., Golosovsky I. V., Kurbakov A. I. Temperature Evolution of Sodium Nitrite Structure in a Restricted Geometry, *Physical Review Letters*, 2002, Vol. 89, No. 17, P. 175503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.175503
- Vakhrushev S. B., Kumzerov Yu. A., Fokin A. V., Naberezhnov A. A., Zalar B., Lebar A., Blinc R. ²³Na spin-lattice relaxation of sodium nitrite in confined geometry, *Physical Review B*, 2004, Vol. 70, No. 13, pp. 132102. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.132102
- Baryshnikov S. V., Tien C., Charnaya E. V., Lee M. K., Michel D., Bohlmann W. Dielectric properties of mesoporous sieves filled with NaNO₂, *Ferroelectrics*, 2008, Vol. 363, No.1, pp. 177–186. DOI: 10.1080/00150190802026127
- Tien C., Charnaya E. V., Lee M. K., Baryshnikov S. V., Sun S. Y., Michel D., Bohlmann W. Coexistence of melted and ferroelectric states in sodium nitrite within mesoporous sieves, *Physical Review B*, 2005, Vol. 72, No. 10, pp. 104–105. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.104105
- Murzina T. V., Sychev F. Y., Kolmychek I. A., Aktsiperov O. A. Tunable ferroelectric photonic crystals based on porous silicon templates infiltrated by sodium nitrite, *Applied Physics Letters*, 2016, Vol. 90, pp. 161120–161122. DOI: 10.1063/1.2724928
- Tien C., Charnaya E. V., Lee M. K., Baryshnikov S. V., Michel D., Böhlmann W. NMR studies of structure and ferroelectricity for Rochelle salt nanoparticles embedded into mesoporous sieves, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, Vol. 20, pp. 215205. DOI: 10.1088/0953-8984/20/21/215205
- Yadlovker D., Berger S. Uniform orientation and size of ferroelectric domains, *Physical Review B*, 2005, Vol. 71, No. 18, pp. 184112. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.184112
- Tien C., Charnaya E. V., Baryshnikov S. V., Lee M. K., Sun S. Y., Michel D., Bohlmann W. Evolution of NaNO₂ in porous matrices, *Physics of the Solid State*, 2004, Vol. 46, No. 12, pp. 2301–2305. DOI:10.1134/1.1841397
- Baryshnikov S. V., Charnaya E. V., Milinskii A. Yu., Goikhman A. Yu., Tien C., Lee M. K., Chang L. J. Dielectric properties of the nanoporous MCM-41 matrix filled with the (NH₄)₂SO₄ ferroelectric, *Physics of the Solid State*, 2013, Vol. 55, No. 5, pp. 1070–1073. DOI: 10.1134/S1063783413050041
- Baryshnikov S. V., Charnaya E. V., Milinskii A. Yu., Stukova E. V., Tien C., Bohlmann W., Michel D. Dielectric properties of mixed NaNO₂-KNO₃ ferroelectrics in nanoporous silicate matrices, *Physics of the Solid State*, 2009, Vol. 51, No. 6, pp. 1243–1247. DOI: 10.1134/S1063783409060262
- Beskrovny A. I., Vasilovski S. G., Vakhrushev S. B., Kurdyukov D. A., Zvorykina O. I., Naberezhnov A. A., Okuneva N. M., Tovar M., Rysiakiewicz-Pasek E., Jaguś P. Temperature dependences of the order parameter for sodium nitrite embedded into porous glasses and opals, *Physics of the Solid State*, 2010, Vol. 52, No. 5, pp. 1092–1097. DOI: 10.1134/S1063783410050410

16. Lee M. K., Charnaya E. V., Tien C., Samoilovich M. I., Chang L. J., Mikushev V. M. Magnetic properties of some opal-based nanocomposites, *Physics of the Solid State*, 2013, Vol. 55, No. 3, pp. 629–633. DOI: 10.1134/S1063783413030165
17. Kurmaev É. Z., Zatsepina D. A., Cholakh S. O., Schmidt B., Harada Y., Tokushima T., Osawa H., Shin S., Takeuchi T. Iron nanoparticles in amorphous SiO₂: X-ray emission and absorption spectra, *Physics of the Solid State*, 2005, Vol. 47, No. 4, pp. 754–757. DOI: 10.1134/1.1913992
18. Ivicheva S. N., Kargin Yu. F., Ovchenkov E. A., Koksharov Yu. A., Yurkov G. Yu. Properties of three-dimensional composites based on opal matrices and magnetic nanoparticles, *Physics of the Solid State*, 2011, Vol. 53, No. 6, P. 1114. DOI: 10.1134/S1063783411060138
19. Bukhtiyarova G. A., Mart'yanov O. N., Yakushkin S. S., Shuvaeva M. A., Bayukov O. A. State of iron in nanoparticles prepared by impregnation of silica gel and aluminum oxide with FeSO₄ solutions, *Physics of the Solid State*, 2010, Vol. 52, No. 4, pp. 826–837. DOI: 10.1134/S1063783410040268
20. Grigorchak I. I., Netyaga V. V., Kovalyuk Z. D. On some physical properties of InSe and GaSe semiconducting crystals intercalated by ferroelectrics, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1997, Vol. 9, pp. L191–L195. DOI: 10.1088/0953-8984/9/12/001
21. Pokladok N. T., Grigorchak I. I., Buzhuk Ya. M. Intercalated structures with a δ topological zone of alternating semiconductors and magnetoactive nanolayers and behavior of their impedance in magnetic and electric fields, *Technical Physics*, 2010, Vol. 80, No. 2, pp. 236–241. DOI: 10.1134/S106378421002012X
22. Zvezdin A. K., Pyatakov A. P. Phase transitions and the giant magnetoelectric effect in multiferroics, *Physics Uspekhi*, 2004, Vol. 47, pp. 416–421. DOI: 10.1070/PU2004v047n04ABEH001752
23. Lies R. M. A. III–VI Compounds, *Preparation and cryst. growth material with layered structure*. Dordrecht-Boston, 1977, pp. 225–254.
24. Friend R. H., Yoffe A. D. Electronic Properties of intercalation complexes of the transition metal dichalcogenides, *Advances in Physics*, 1987, Vol. 36, No. 1, pp. 1–94. DOI: 10.1080/00018738700101951
25. Grygorchak I., Ivashchyshyn F., Stakhira P., Reghu R. R., Cherpak V., and Grazulevicius J. V. Intercalated Nanostructure Consisting of Inorganic Receptor and Organic Ambipolar Semiconductor, *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2013, Vol. 8, No. 3, pp. 292–296. DOI: 10.1166/jno.2013.1464
26. Stoinov Z. B., Grafov B. M., Savova-Stoinova B. S., Elkin V. V. Electrochemical Impedance. Moscow, Nauka, 1991, 336 p.
27. Ed. Barsoukov E. and Macdonald J. R. Impedance spectroscopy. Theory, experiment and application. Wiley interscience, 2005, 585 p.
28. Bisquert J., Randriamahazaka H., Garcia-Belmonte G. Inductive behaviour by charge-transfer and relaxation in solid-state electrochemistry, *Electrochimica Acta*, 2005, Vol. 51, pp. 627–640. DOI: 10.1016/j.electacta.2005.05.025
29. Mora-Sero I., Bisquert J., Fabregat-Santiago F., Garcia-Belmonte G., Zoppi G., Durose K., Proskuryakov Yu., Oja I., Belaidi A., Ditrlich T., Tena-Zaera R., Katty A., Lévy-Clément C., Barrioz V., Irvine S. J. C. Implications of the Negative Capacitance Observed at Forward Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells, *Nano Letters*, 2006, Vol. 6, No. 4, pp. 640–650. DOI: 10.1021/nl052295q
30. Ivashchyshyn F., Grygorchak I., Stakhira P., Cherpak V., Micov M. Nonorganic semiconductor – Conductive polymer intercalate nanohybrids: Fabrication, properties, application, *Current Applied Physics*, 2012, Vol. 12, pp. 160–165. DOI: 10.1016/j.cap.2011.05.032
31. Bishchaniuk T. M., Grygorchak I. I., Fechan A. V., Ivashchyshyn F. O. Semiconductor clathrates with a periodically modulated topology of a host ferroelectric liquid crystal in thermal, magnetic, and light-wave fields, *Technical Physics*, 2014, Vol. 84, No. 7, pp. 1085–1087. DOI: 10.1134/S1063784214070068
32. Tikhov S. V., Gorshkov O. N., Koryazhkina M. N., Antonov I. N., Kasatkin A. P. Specific features of nonequilibrium depletion accompanied by the trapping of minority carriers by surface states in metal-insulator-semiconductor structures, *Technical Physics Letters*, 2016, Vol. 42, No. 2, pp. 138–142. DOI: 10.1134/S1063785016020139
33. Demin R. V., Koroleva L. I., Muminov A. Z., Mukovski- Ya. M. Giant volume magnetostriction and colossal magnetoresistance in La_{0.7}Ba_{0.3}MnO₃ at room temperature, *Physics of the Solid State*, 2006, Vol. 48, No. 2, pp. 322–325. DOI: 10.1134/S1063783406020211
34. Datta S. Proposal for a “spin capacitor”, *Applied physics letters*, 2005, Vol. 83, pp. 013115(1-3). DOI: 10.1063/1.1968417
35. Ćukowski P. V., Partyka J., Wagierek P., Shostak Yu., Sidorenko Yu., Rodzik A. Dielectric properties of Cd_{1-x}Fe_xSe compounds, *Semiconductors*, 2000, Vol. 34, No. 10, pp. 1124–1127. DOI: 10.1134/1.1317568
36. Nagaev E. L. Small metal particles, *Physics Uspekhi*, 1992, Vol. 35, No. 9, pp. 747–782. DOI: 10.1070/PU1992v035n09ABEH002261
37. Boltaev A. P., Pudonin F. A. Anomalously high low-frequency effective permittivity in a system of metal nanoislands, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2008, Vol. 107, No. 3, pp. 501–508. DOI: 10.1134/S1063776108090173
38. Belyaev B. A., Drokin N. A. Impedance spectra of thin permalloy films with a nanoisland structure, *Physics of the Solid State*, 2012, Vol. 54, No. 2, pp. 360–367. DOI: 10.1134/S1063783412020084
39. Anisimova N. I., Bordovskii V. A., Grabko G. I., Castro R. A. Specific features of the photodielectric effect in amorphous As₂Se₃ layers, *Technical Physics Letters*, 2013, Vol. 39, No. 1, pp. 98–100. DOI: 10.1134/S1063785013010318
40. Smolenskii G. A., Chupis I. E. Ferroelectromagnets, *Physics Uspekhi*, 1982, Vol. 25, No. 7, pp. 475–493. DOI: 10.1070/PU1982v025n07ABEH004570
41. Kimura T., Goto T., Shintani H., Ishizaka K., Arima T., Tokura Y. Magnetic control of ferroelectric polarization, *Nature*, 2003, Vol. 426, No. 6962, pp. 55–58. DOI: 10.1038/nature02018

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.396.96

Пиза Д. М.¹, Семенов Д. С.², Мороз Г. В.³¹Д-р техн. наук, профессор кафедры радиотехники, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина²Начальник отдела, казенное предприятие «Научно-производственный комплекс «Искра», г. Запорожье, Украина³Аспирант кафедры радиотехники и телекоммуникаций, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ФИЛЬТРА В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ПОМЕХ

Актуальность. При воздействии комбинированной помехи пространственно-распределенный характер пассивной составляющей разрушает пространственную корреляцию точечных источников активной помехи. Это приводит к существенному ухудшению коэффициента подавления активной составляющей комбинированной помехи. Поэтому актуальным является исследование влияния пассивной составляющей комбинированной помехи на процесс компенсации активной шумовой помехи, а также формирование классифицированной обучающей выборки, порожденной только активной шумовой помехой, для адаптации весовых коэффициентов поляризационного фильтра.

Цель. Исследование частотного метода формирования классификационной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов поляризационного фильтра в условиях одновременного воздействия активных шумовых и пассивных помех, действующих по главному лучу и по боковым лепесткам диаграммы направленности.

Метод. В предложенном методе при формировании классифицированной обучающей выборки используются частотные отличия в ширине спектра активной и пассивной помехи.

Результаты. Разработана имитационная модель адаптивного поляризационного фильтра. Путем анализа процессов формирования весовых коэффициентов установлено, что предложенный метод может обеспечить эффективную компенсацию активной составляющей комбинированной помехи. Проведенные экспериментальные исследования поляризационного фильтра в полигонных условиях подтвердили высокую эффективность подавления активных шумовых помех, действующих по главному лучу диаграммы направленности антенны.

Научная новизна состоит в разработке нового метода и имитационной модели формирования классификационной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов поляризационного фильтра.

Практическая значимость определяется проведенными экспериментальными исследованиями в полигонных условиях с количественными оценками эффективности предложенного метода. Показано, что при использовании частотных отличий в структуре активной и пассивной составляющей комбинированной помехи коэффициент подавления активной шумовой помехи, действующий с направления главного луча диаграммы направленности антенны, может достигать 25 децибел.

Ключевые слова: адаптация, поляризационный фильтр, моделирование, эксперимент.

НОМЕНКЛАТУРА

ААР – адаптивная антенная решетка;
АТ – аттенюатор;
АШП – активная шумовая помеха;
ГШ – генератор шума;
ДНА – диаграмма направленности антенны;
Е – вектор электромагнитного поля;
ПФ – полосовой фильтр;
Р – рупор;

РЛС – радиолокационная станция;
УМ – усилитель мощности;
 \dot{U}_k – комплексное значение амплитуды АШП на входе компенсационного канала;
 \dot{U}_0 – комплексное значение амплитуды АШП на входе основного канала;
 \dot{U}_Σ – комплексное значение амплитуды АШП на выходе поляризационного фильтра;

\dot{W} – комплексное значение весового коэффициента;
 μ – скалярная величина, определяющая глубину корреляционной обратной связи.

ВВЕДЕНИЕ

Для защиты радиолокационных средств от воздействия АШП могут быть использованы как пространственные, так и поляризационные отличия в структуре полезных и помеховых сигналов [1–5]. Пространственную фильтрацию сигналов используют при защите радиолокационных средств от помех, действующих по боковым лепесткам ДНА. Поляризационную фильтрацию используют при воздействии активных шумовых помех, действующих в направлении главного луча ДНА. В качестве элемента адаптации пространственного или поляризационного фильтра используют различного вида автокомпенсаторы помех или ААР.

В результате исследований было установлено [2], что при совместном воздействии активной и пассивной (комбинированной) помехи пространственно-распределенный характер последней разрушает пространственную корреляцию точечных источников активной помехи. Это может привести к существенному ухудшению коэффициента подавления активной составляющей комбинированной помехи. Поэтому исследование влияния пассивной составляющей комбинированной помехи на процесс компенсации АШП является достаточно актуальным. Актуальными также являются вопросы формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора, порожденной только активной шумовой помехой.

Объектом исследования является процесс компенсации активной составляющей комбинированной помехи.

Предметом исследования является математическая модель, а также непосредственно поляризационный адаптивный фильтр в составе РЛС.

Цель данной работы состоит в выборе метода формирования классифицированной обучающей выборки, анализе переходных процессов при формировании весовых коэффициентов поляризационного фильтра и оценке его эффективности в условиях воздействия комбинированных помех.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для уменьшения влияния пассивной составляющей комбинированной помехи на процесс формирования весовых коэффициентов поляризационного фильтра необходимо тем или иным способом сформировать классификационную обучающую выборку, порожденную только активной шумовой помехой. Учитывая значительное превышение коэффициента усиления антенны в направлении главного луча диаграммы направленности по отношению к уровню боковых лепестков, можно считать, что наибольшее влияние пассивной помехи на процесс компенсации активной составляющей комбинированной помехи происходит при ее воздействии по главному лучу.

Кроме того, из [6] по приведенным энергетическим дальностно-азимутальным характеристикам пассивных

помех от подстилающей поверхности земли и гидрометеоров, действующих в нижних лучах диаграммы направленности следует, что их интенсивность относительно собственных шумов приемных устройств составляет 50–60 дБ. Причем пассивные помехи перекрывают всю развертку дальности, что ограничивает эффективность использования корреляционных отличий в структуре активных и пассивных помех при формировании классифицированной обучающей выборки.

Поэтому представлялось целесообразным провести дополнительный анализ переходных процессов в сигнальных цепях имитационной модели [7] поляризационного фильтра при формировании классификационной обучающей выборки [8] с использованием частотных отличий в структуре активных и пассивных помех [9]. Еще одна задача, которая решалась в процессе исследований заключалась в экспериментальной оценке эффективности компенсации активной составляющей комбинированной помехи при формировании обучающей выборки частотным методом в полигонных условиях.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Для формирования классифицированной обучающей выборки могут быть использованы различные отличия в структуре активных и пассивных помех. Это могут быть временные, спектральные, корреляционные или частотные отличия.

В [11] для формирования обучающей выборки используется временной интервал, расположенный в конце дальности действия РЛС, в предположении, что отраженные от гидрометеоров и подстилающей поверхности земли сигналы имеют гораздо меньшую интенсивность. Однако, анализ энергетических дальностно-азимутальных характеристик пассивных помех, приведенных в [6], дает основание считать, что такое решение не обеспечивает формирование классифицированной обучающей выборки в нижних лучах диаграммы направленности антенны. По-видимому это обусловлено увеличением импульсного объема при увеличении дальности.

В патенте [11], в котором обучающая выборка формируется после преобразования Фурье, используются спектральные отличия в структуре пассивных и активных помех. При этом для формирования весовых коэффициентов адаптивных фильтров (пространственных или поляризационных) используются фазовые каналы с номерами $N/2$, где N – количество точек преобразования Фурье. Это объясняется тем, что в фазовых фильтрах основного и компенсационного каналов с номерами $N/2$ вероятность нахождения пассивных помех наименьшая. Основным недостатком такого технического решения является дискретная адаптация весовых коэффициентов на межпачечных интервалах. Это, в условиях динамично меняющейся обстановки, что определяется перемещением источников активных помех или сканированием антенны, приводит к значительному ухудшению компенсации помех.

В [12] предложен корреляционный метод формирования классифицированной обучающей выборки. Метод основан на использовании естественной нестациона-

нарности пассивной помехи во времени (по дальности). Это характерно для сигналов, отраженных как от гидрометеоров, так и от облаков дипольных помех, имеющих локальный характер. Метод реализуется путем текущего анализа распределения модуля межканального нормированного коэффициента корреляции по дальности. Последующий выбор временного интервала с наибольшим значением модуля нормированного коэффициента корреляции соответствует отсутствию пассивной помехи и может обеспечить формирование классифицированной обучающей выборки, порожденной активной шумовой помехой. Однако, анализ энергетических дальностно-азимутальных характеристик пассивных помех [6] дает основание считать, что в случае отражения сигналов от подстилающей поверхности земли и гидрометеоров, покрывающих большие территории (кучево-дождевые облака) качество формирования обучающей выборки может существенно ухудшиться.

Следует отметить, что частотный метод формирования классифицированной обучающей выборки лишен недостатков методов, рассмотренных выше, и может быть использован для формирования весовых коэффициентов адаптивных поляризационных фильтров, включая и нижние лучи диаграммы направленности антенны.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математическая модель адаптивного поляризационного фильтра при поляризационно-временной обработке радиолокационных сигналов для исследования пере-

ходных процессов при воздействии комбинированных помех, разработана в соответствии с его упрощенной структурной схемой, представленной на рис. 1.

В структурную схему поляризационного фильтра 1 входят дуальнополяризованная антенна 2, основной 3 и компенсационный 4 каналы приема и автокомпенсатор активной шумовой помехи 5. В состав автокомпенсатора входят режекторные фильтры 6, устройство комплексного сопряжения 7, комплексный умножитель 8, формирователь весовых коэффициентов 9, сумматор 10 и умножитель 11. В состав поляризационно-временной обработки радиолокационных сигналов также входит устройство преобразования Фурье 12, обеспечивающее временную (спектральную) обработку сигналов.

В качестве алгоритма адаптации поляризационного фильтра использован классический алгоритм Уидроу [13], при котором весовые коэффициенты \dot{W} формируются с использованием корреляционной обратной связи

$$\dot{W}_{k+1} = \dot{W}_k - 2\mu \dot{U}_k^* \dot{U}_\Sigma, \quad (1)$$

где \dot{U}_k и \dot{U}_Σ – комплексные значения амплитуд АШП на входе компенсационного канала и на выходе поляризационного фильтра, соответственно; μ – скалярная величина, определяющая глубину обратной связи. При этом комплексное значение амплитуды на выходе поляризационного фильтра определяется как разность между АШП, действующей на основном входе автокомпенсато-

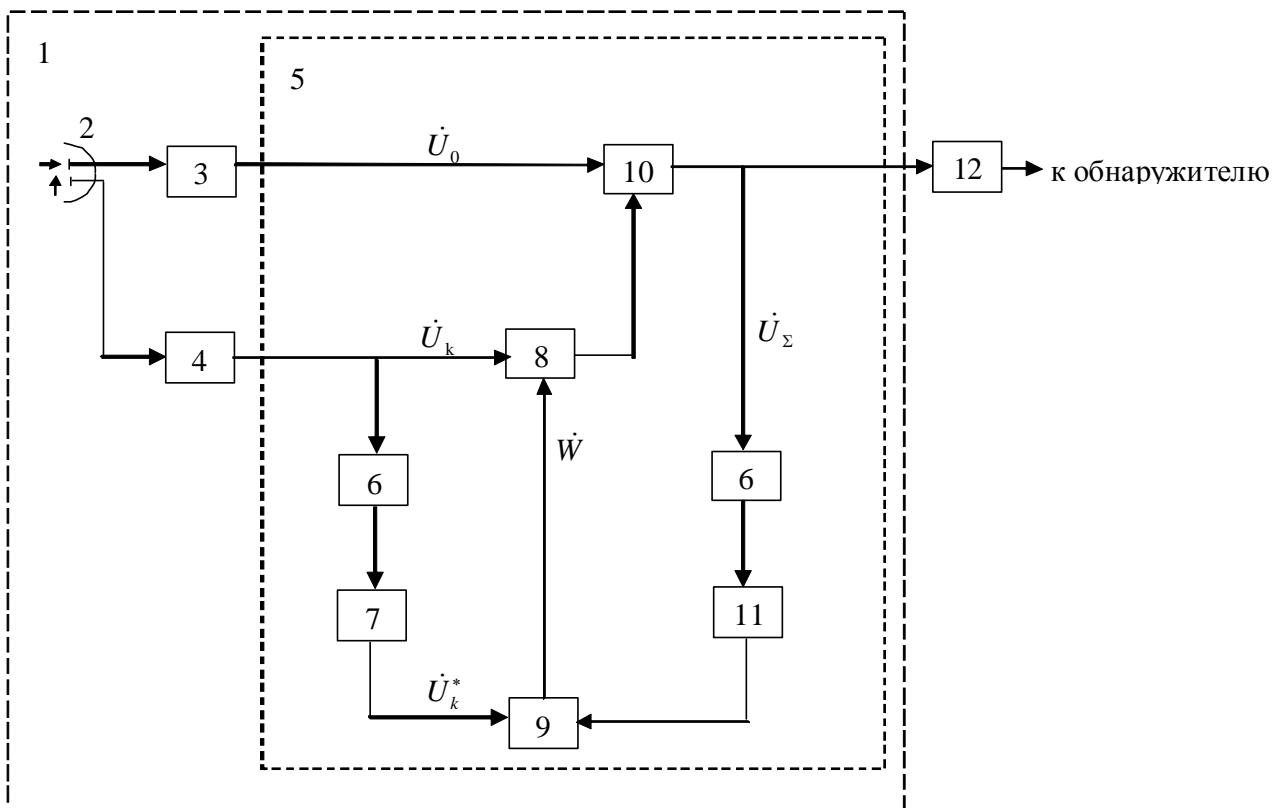


Рисунок 1 – Структурная схема поляризационно-временной обработки радиолокационных сигналов

ра 5, и взвешенным коэффициентом \dot{W} значением помехи, действующей на входе компенсационного канала

$$\dot{U}_{\Sigma} = \dot{U}_0 - \dot{W}\dot{U}_k . \quad (2)$$

Математическая модель поляризационного фильтра является статистической, моделирующей АШП и независимые в каналах приема собственные шумы с нормальным законом распределения вероятностей. Пассивная помеха моделировалась случайным процессом с нормальным законом распределения с последующим ее ограничением по амплитуде и с различным соотношением дисперсий в каналах приема по отношению к активной помехе. Это позволило в дальнейшем определиться с характером влияния пассивной помехи на процесс формирования весовых коэффициентов поляризационного фильтра.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В процессе моделирования исследовалось как влияет режекция пассивной помехи в цепях формирования весовых коэффициентов поляризационного фильтра на качество подавления АШП, а также на процесс его адаптации. При этом отношение активная помеха/шум в ос-

новном канале равнялось 30 дБ, а в компенсационном – 33 дБ. Отношение пассивная помеха/шум в основном канале равнялось 33 дБ, а в компенсационном – 30 дБ.

Результаты моделирования адаптивного поляризационного фильтра с режекцией пассивной помехи (интервал 0–0,4 мс) и без режекции (интервал 0,5–0,9 мс) в цепях формирования весовых коэффициентов представлены на рис. 2.

На рис. 2а показана смесь активной (интервалы 0–0,4 и 0,5–0,9 мс) и пассивной (интервалы 0,1–0,2 и 0,6–0,7 мс) составляющих комбинированной помехи на входе основного канала автокомпенсатора. На рис. 2б представлен результат компенсации комбинированной помехи на выходе поляризационного фильтра с режекцией пассивной составляющей (интервал 0–0,4 мс) и без режекции (интервал 0,5–0,9 мс). На рис. 2в показан процесс формирования модуля весового коэффициента для обоих вариантов построения автокомпенсатора помех.

Анализ результатов моделирования на временных интервалах 0–0,4 и 0,5–0,9 мс (рис. 2б, в) дает основание считать, что режекция пассивной составляющей комбинированной помехи в цепях формирования весовых коэффициентов обеспечивает эффективную компенсацию

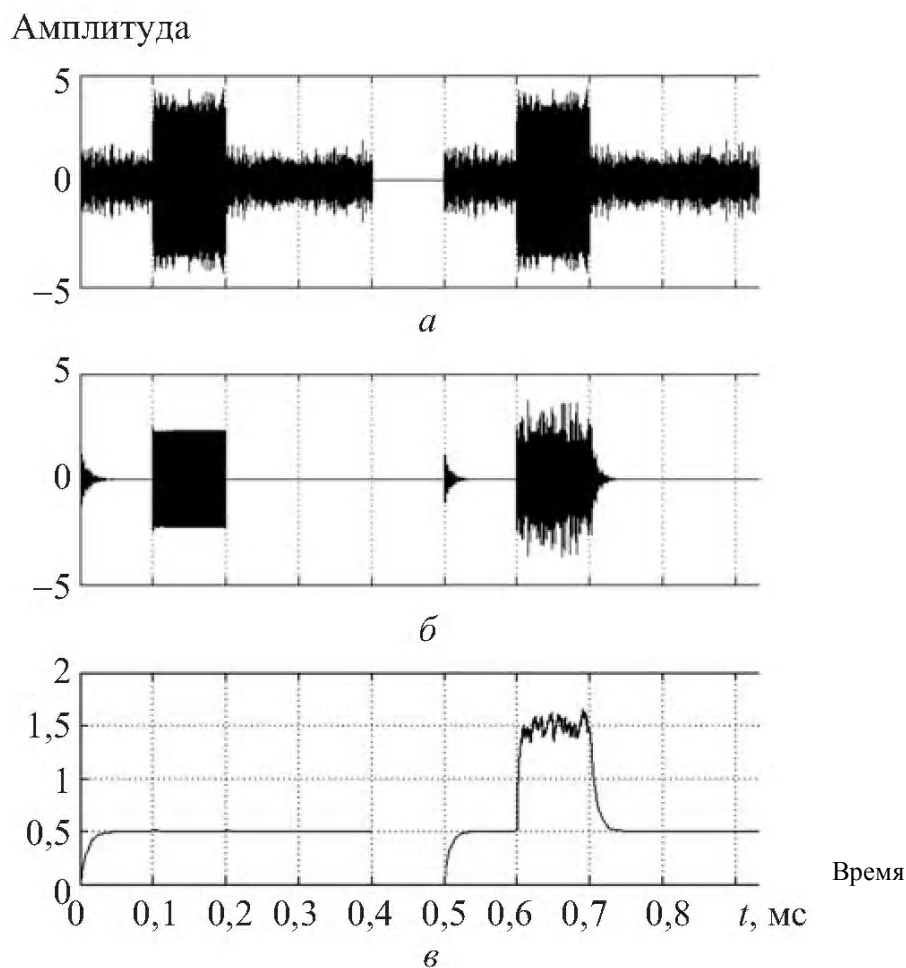


Рисунок 2 – Результаты моделирования поляризационного фильтра:
 а – смесь активной и пассивной помехи на основном входе автокомпенсатора; б – на его выходе; в – процесс формирования модуля весового коэффициента

АШП при одновременном воздействии пассивной помехи. Действительно при режекции пассивной помехи, что реализуется на временном интервале 0–0,4 мс, модуль весового коэффициента после его формирования вначале интервала по АШП достигает значения 0,5 и остается неизменным до конца интервала. Значение модуля весового коэффициента, равное 0,5, соответствует превышению дисперсии АШП в компенсационном канале поляризационного фильтра относительно дисперсии помехи в основном канале, которое по условиям моделирования составляло 3 дБ. Сравнительный анализ процессов формирования весовых коэффициентов при различных вариантах построения автокомпенсатора (рис. 2в) показывает, что на интервале 0,6–0,7 мс (без режекции пассивной помехи) автокомпенсатор находится в режиме перенастраивания на подавление пассивной помехи. Это подтверждается существенным увеличением модуля весового коэффициента до полутора единиц, что объясняется превышением дисперсии пассивной помехи в основном канале поляризационного фильтра над соответствующим значением ее в компенсационном канале.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Представлялось целесообразным в процессе исследований:

- во первых, экспериментально подтвердить полученные результаты моделирования оценкой качества подавления АШП при режекции части энергетического спектра активной помехи, совпадающего со спектром пассивной помехи в цепи корреляционной обратной связи;
- во вторых, количественно оценить возможные потери в качестве компенсации АШП при использовании метода формирования классифицированной обучающей выборки по патенту [8] при смещении источника АШП с направления главного луча в область боковых лепестков ДНА. Это становится важным, когда по техническому заданию на проектирование РЛС необходимо

обеспечить защиту от АШП, действующей как по главному лучу, так и по боковым лепесткам.

Исследования проведены в полигонных условиях с использованием РЛС 36Д6М. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 3. В дальней зоне устанавливался генератор помехи, содержащий генератор шума (ГШ), полосовой фильтр (ПФ), аттенюатор (АТ) и усилитель мощности (УМ), обеспечивающий необходимый уровень сигнала в приемных каналах. В качестве излучателя использовался рупор Р с ориентацией вектора Е электромагнитного поля, равного 45° относительно радиогоризонта. Излучатель устанавливался на вышке, что обеспечивало при изменении высоты излучателя произвести оценку коэффициента подавления АШП в 4-х угломестных лучах нижней зоны обзора РЛС 36Д6. На входах формирователей весовых коэффициентов автокомпенсатора в каждом угломестном канале были установлены режекторные фильтры с полосой режекции, равной ширине спектра пассивной помехи.

Измерения проводились в каждом угломестном канале при воздействии АШП как по боковым лепесткам, так и по главному лучу ДНА. В первом случае к компенсационному каналу приема подключалась слабонаправленная антенна защиты боковых лепестков с согласованной по отношению к основной антенне поляризации. Во втором случае – ортогональный по поляризации канал защиты главного луча. В результате проведенных измерений установлено, что при формировании классифицированной обучающей выборки по методу, изложенному в [8], усредненное по четырем угломестным каналам значение коэффициента подавления АШП составило 25 дБ в режиме защиты главного луча, в режиме защиты боковых лепестков – 14 дБ.

Уменьшение коэффициента подавления АШП в режиме защиты боковых лепестков ДНА обусловлено формированием весовых коэффициентов на частоте, отличающейся от частоты помехи в сигнальных цепях авто-

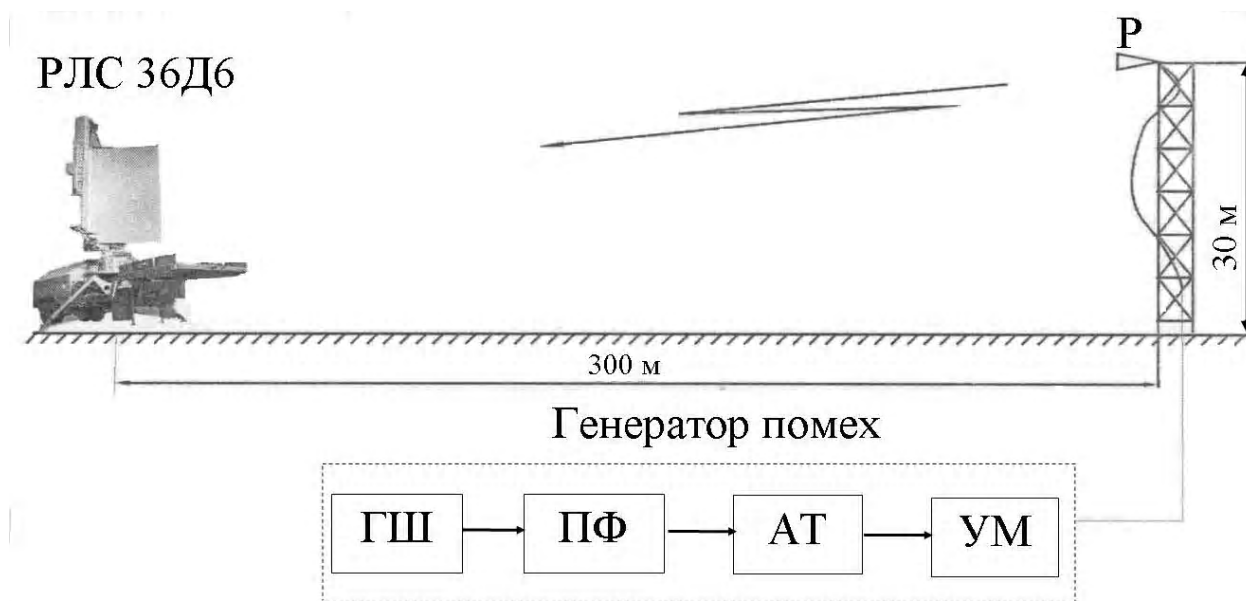


Рисунок 3 – Схема проведения эксперимента

компенсатора. В случае разнесенного приема, что характерно для защиты РЛС от АШП, действующей по боковым лепесткам это приводит к различию фазовых сдвигов в этих цепях на разных частотах. В [14] для устранения возникающих фазовых сдвигов предложено измерять возникающие фазовые сдвиги с последующей автоподстройкой измеренной разности фаз.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2б на интервале 0–0,4 мс представлен выходной сигнал поляризационного фильтра с режекцией пассивной помехи в цепях формирования весовых коэффициентов. Вначале этого интервала виден переходной процесс, обусловленный адаптацией весовых коэффициентов. После этого АШП становится подавленной. Можно только предположить, что на интервале 0,1–0,2 мс, когда одновременно с АШП действует пассивная помеха, АШП подавляется. Однако подтверждением этого является отсутствие переходного процесса, обусловленного адаптацией весовых коэффициентов поляризационного фильтра после окончания воздействия пассивной помехи.

На интервале 0,5–0,9 мс, на котором режекция пассивной помехи не проводится, вначале интервала процесс адаптации весовых коэффициентов происходит аналогично. Однако на интервале 0,6–0,7 мс при одновременном воздействии пассивной помехи происходит ее искажение нескомпенсированной активной помехой. После окончания воздействия пассивной помехи явно виден повторный процесс адаптации поляризационного фильтра для подавления нескомпенсированной АШП. Это свидетельствует о эффективности предложенного метода и адекватности разработанной математической модели.

Полученное в результате проведенного эксперимента значение коэффициента подавления АШП, равное 25 дБ, является максимально возможным. При этом выигрыш в отношении сигнал/помеха реализуется при достаточных больших отличиях в структуре полезного сигнала и АШП. В случае когда таких отличий нет, то нет и выигрыша. Однако, даже в этом случае выигрыш в отношении сигнал/помеха можно обеспечить путем изменения поляризационного базиса, в котором функционирует РЛС.

ВЫВОДЫ

В статье исследован частотный метод формирования классификационной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов поляризационного фильтра в условиях одновременного воздействия активных шумовых и пассивных помех. В предложенном методе формирования обучающей выборки при классификации используются частотные отличия в ширине спектра активной и пассивной помехи.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые разработана математическая модель адаптивного поляризационного фильтра, обеспечивающая исследование переходных процессов при формировании классифицированной обучающей выборки. Путем анализа переходных процессов при формировании весовых коэффициентов установлено, что предложенный метод формирования обучающей выборки

может обеспечить эффективную компенсацию активной составляющей комбинированной помехи, действующей с направления главного луча диаграммы направленности антенны.

Практическая новизна полученных результатов заключается в том, что проведенные экспериментальные исследования поляризационного фильтра с использованием РЛС ЗБДб в полигонных условиях подтвердили высокую эффективность подавления активных шумовых помех, действующих по главному лучу диаграммы направленности антенны. В результате проведенного эксперимента установлено, что усредненное значение коэффициента подавления АШП поляризационным фильтром составило 25дБ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Запорожского национального технического университета «Разработка и усовершенствование алгоритмов обработки сигналов в радиотехнических и телекоммуникационных системах». (номер госрегистрации 0117U000013Т) при финансовой поддержке МОНУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы радиолокации : учеб. пособие для вузов / Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков, И. Н. Бусыгин и др. ; под общ. ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с.
2. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / [А. К. Журавльов, В. А. Хлебников, А. П. Радимов и др.]. – Л. : Изд. Ленинградского университета, 1991. – 544 с.
3. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решетки : введение в теорию / Р. А. Монзинго, Т. Ц. Миллер : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1986. – 448 с.
4. Patent 1 599 035 United Kingdom G01 S 7/36 13/52 Adaptive cancellation arrangement [electronic resource] /Jack Gordon McQueen; filed 31 Mar. 1977; published 30 Sep. 1981, index at acceptance H4D 259 265 36X 40X, access mode: <http://www.directorypatent.com/GB/1599035-a.html>
5. Patent 3881177 United States of America G01 S 7/36 Frequency agile-baseband sidelobe canceller arrangement [electronic resource] / Len Joseph F, Rankin Peter M; filed 12 Mer. 1974; published 29 Apr. 1975, appl. № 450, 543, access mode: <http://www.google.com/patents/US3881177>
6. Леховицкий Д. И. СДЦ в импульсных РЛС: 1. Физический смысл и экстремальные свойства операций оптимальной междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех / Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, Г. А. Жуга // Прикладная радиоэлектроника. – 2011. – Том 10, № 4.
7. Пиза Д. М. Метод компенсации активной составляющей комбинированной помехи в когерентно-импульсной РЛС / Д. М. Пиза, Е. А. Звягинцев, Г. В. Мороз // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2016. – № 6. – С. 23–29. DOI:10.20535/S0021347016060030
8. Пат. 91114 Україна, МПК G01S 7/36 Спосіб захисту радіолокаторів від комбінованих завад, діючих по головному променю діаграми спрямованості антени / Пиза Д. М., Сіренко А. С., Звягинцев С. О.; Запорізький національний технічний університет; заявл. 20.12.2013; опубл. 25.06.2014, Бюл. №12.
9. Перунов Ю. М. Зарубежные радиоэлектронные средства / Ю. М. Перунов, В. В. Мацукевич, А. А. Васильев ; под ред. Ю. М. Перунова. В 4-х книгах. Кн. 2: Системы радиоэлектронной борьбы. – М. : Радиотехника, 2010. – 352 с.

10. Адаптивные алгоритмы компенсации помех : учебно-методическое пособие / [Д. Н. Ивлев, И. Я. Орлов, А. В. Сорокина, Е. С. Фитасов]. – Нижний Новгород : ННГУ им. И. И. Лобачевского, 2014. – 88 с.
11. Пат. 48705 Україна, МПК G01 S 7/36 H04B 15/00. Спосіб компенсації активної складової комбінованої завади / Кононович В. Я., Кукольницький А. П., Залевський О. П., Каспирович О. Г.; Майстер Ю. Л., Денека А. А.; Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра». – № u200911296; Заявл. 2009.11.06; Опубл. 2010.03.25, Бюл. №6, 2010 р. – 4 с.
12. Пат. 78120 Україна, МПК G01S 7/36 Спосіб захисту когерентно-імпульсних радіолокаційних станцій від комбінованих завод / Піза Д. М., Сіренко А. С. ; Запорізький національний технічний університет; заявл. 28.08.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.
13. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов : пер. с англ. / Б. Уидроу, С. Стирнз. – М. : Радио и связь, 1989. – 440 с.
14. Пат. 2444741 Рос. Федерация МПК G01S 7/36 Устройство компенсации активных помех / Анохин В. Д., Симохамед Ф., Анохин Е. В., Кильдошевская В. Г. ; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военный авиационный инженерный университет» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации; заявл. 10.03.2009; опубл. 10.03.2012, Бюл. № 7. – 5 с.

Статья поступила в редакцию 09.03.2017.
После доработки 21.05.2017.

Піза Д. М.¹, Семенов Д. С.², Мороз Г. В.³

¹Д-р техн. наук, професор кафедри радіотехніки, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна

²Начальник відділу, Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра», м. Запоріжжя, Україна

³Аспірант кафедри радіотехніки та телекомунікацій, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОГО ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ФІЛЬТРА В УМОВАХ ОДНОЧАСНОГО ВПЛИВУ АКТИВНИХ І ПАСИВНИХ ЗАВАД

Актуальність. В умовах дії комбінованої завади просторово-розподілений характер пасивної складової руйнує просторову кореляцію точкових джерел активної завади. Це спричиняє суттєве погіршення коефіцієнта подавлення активної складової комбінованої завади. Тому актуальними є дослідження впливу пасивної завади на процес компенсації активної шумової завади, а також методи формування класифікаційної навчальної вибірки, породженої тільки активною завадою, для адаптації вагових коефіцієнтів поляризаційного фільтра.

Ціль. Дослідження частотного методу формування класифікаційної навчальної вибірки для адаптації вагових коефіцієнтів поляризаційного фільтра в умовах одночасної дії активних шумових та пасивних завод, які діють по головному променю та бокових пелюстках діаграми спрямованості антени.

Метод. В запропонованому методі при формуванні класифікаційної навчальної вибірки використовуються частотні відмінності в ширині спектра активної та пасивної завади.

Результати. Розроблена імітаційна модель адаптації поляризаційного фільтра. Шляхом аналізу процесів формування вагових коефіцієнтів встановлено, що запропонований метод може забезпечити ефективну компенсацію активної складової комбінованої завади. Проведені експериментальні дослідження поляризаційного фільтра в полігонних умовах підтвердили високу ефективність подавлення активних шумових завод, які діють по головному променю діаграми спрямованості антени.

Наукова новизна полягає в розробці нового методу та імітаційної моделі формування класифікаційної навчальної вибірки для адаптації вагових коефіцієнтів поляризаційного фільтра.

Практична значимість визначається проведеними експериментальними дослідженнями в полігонних умовах з кількісними оцінками ефективності запропонованого методу. Показано, що при використанні частотних відмінностей в структурі активної і пасивної складової комбінованої завади коефіцієнт подавлення активної шумової завади, діючий з напрямку головного променя діаграми спрямованості антени, може досягати 25 децибел.

Ключові слова: адаптація, поляризаційний фільтр, моделювання, експеримент.

Piza D. M.¹, Semenov D. S.², Moroz G. V.³

¹Dr. Sc. the Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

²Head of the Department, State Enterprise “Scientific-Industrial Complex “Iskra”, Zaporizhzhya, Ukraine

³PhD student of the Department of Radio Engineering and Telecommunications, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ADAPTIVE POLARIZING FILTER UNDER THE SIMULTANEOUS ACTION OF ACTIVE AND PASSIVE NOISE

Context. The spatially-distributed nature of the passive component destroys the spatial correlation of point sources of active interference under the influence of combined interference. This leads to a significant degradation in the suppression coefficient of the active component of the combined interference. Therefore, it is relevant to research the influence of the passive component of the combined interference on the process of compensation of active noise interference, as well as the formation of a classified training sample generated with only active interference, to adapt the weighting coefficients of the polarization filter.

Objective is research of the frequency method that used for the formation of a classification training sample for the adaptation of the polarization filter's weighting coefficients under conditions of simultaneous acting of active noise and passive interference along the main beam of the antenna pattern.

Method. The proposed method uses the frequency differences in the width of the spectrum of active and passive interference for training sample forming.

Results. The simulation model of the adaptive polarization filter was developed. It was found with analyzing of the formation of weight coefficients that the proposed method can provide effective compensation of the active component of the combined interference. The conducted experimental researches of the polarization filter in the field conditions confirmed the high efficiency of suppression of active noise interference that acts along the main beam of the antenna pattern.

Scientific novelty is consist in the development of a new method and an imitation model for the formation of a classification training sample for the adaptation of the weight coefficients of a polarization filter.

Practical significance was determined by the conducted experimental researches in the field conditions with quantitative estimates of the effectiveness of the proposed method. It was shown that using of the frequency differences in the structure of the active and passive components of the combined noise, it is possible to achieve of the cancellation factor equal 25 decibels and more for the active noise that act in the direction of the main beam of antenna pattern.

Keywords: adaptation, a polarizing filter, clutter, jammer, training sample.

REFERENCES

1. Shirman Ya. D., Golikov V. N., Busygin I. N. i dr. ; pod obshh. red. Ya. D. Shirmana Teoreticheskie osnovy radiolokacii: ucheb. posobie dlya vuzov. Moscow, Sov. radio, 1970, 560 p.
2. Zhuravl'ov A. K., Xlebnikov V. A., Radimov A. P. Adaptivnye radiotekhnicheskie sistemy s antennymi reshetkami. Leningrad, Izd. Leningradskogo universiteta, 1991, 544 p.
3. Monzingo R. A., Miller T. C. : per. s angl. Adaptivnye antennye reshetki : Vvedenie v teoriyu. Moscow, Radio i svyaz', 1986, 448 p.
4. Patent 1 599 035 United Kingdom G01 S 7/36 13/52 Adaptive cancellation arrangement [electronic resource]/Jack Gordon McQueen; filed 31 Mar. 1977; published 30 Sep. 1981, index at acceptance H4D 259 265 36X 40X, access mode: <http://www.directorypatent.com/GB/1599035-a.html>
5. Len Joseph F, Rankin Peter M Patent 3881177 United States of America G01 S 7/36 Frequency agile-baseband sidelobe canceller arrangement [electronic resource]; filed 12 Mer. 1974; published 29 Apr. 1975, appl. № 450, 543, access mode: <http://www.google.com/patents/US3881177>
6. Ryabuxa V. P., Rachkov D. S., Semenyaka A. V., Katyushin E. A. Ocenka intervala fiksacii prostranstvennogo vesovogo vektora pri posledovatel'noj prostranstvenno-vremennoj obrabotke signalov na fone kombinirovannyx pomex, *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Radioelektronika*, 2012, No. 10, pp. 13–25.
7. Zalevskij A. P., Piza D. M., Presnyak I. S., Sirenko A. S., Ocenka e'ffektivnosti prostranstvenno-vremennoj i vremya-prostranstvennoj fil'tracii signalov v kogerentno-impul'snyx RLS, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2012, No. 2, pp. 39–44.
8. Piza D. M., Sirenko A. S., Zvyagincev E. O Pat. 91114 Ukraïna, MPK G01S 7/36 Sposib zaxistu radiolokatoriv vid kombinovanix zavud, diyuchix po golovnomu promenyu diagrami spryamovanosti anteni. Zaporiz'kij nacional'nij tekhnichnij universitet; zayavl. 20.12.2013; opubl. 25.06.2014, Byul. №12.
9. Perunov Yu. M., Macukevich V. V., Vasil'ev A. A. Pod red. Yu. M. Perunova. Zarubezhnye radioelektronnye sredstva V 4-x knigax. Kn.2: Sistemy radioelektronnoj bor'by. Moscow, Radiotekhnika, 2010, 352 p.
10. Ivlev D. N., Orlov I. Ya., Sorokina A. V., Fitasov E. S. Adaptivnye algoritmy kompensacii pomex : uchebno-metodicheskoe posobie. Nizhnij Novgorod, NNGU im. I. I. Lobachevskogo, 2014, 88 p.
11. Kononovich V. Ya., Kukul'nic'kij A. P., Zalevs'kij O. P., Kaspirovich O. G., Majster Yu. L., Deneka A. A.; Pat. 48705 Ukraïna, MPK G01 S 7/36 H04B 15/00. Sposib kompensacii aktivnoi skladovoi kombinovanoi zavadi ; Kazenne pidpriemstvo "Naukovo-virobnichij kompleks "Iskra". № u200911296; Zayavl. 2009.11.06; Opubl. 2010.03.25, Byul. №6, 2010 r., 4 p.
12. Piza D. M., Sirenko A. S. Pat. 78120 Ukraïna, MPK G01S 7/36 Sposib zaxistu kogerentno-impul'snix radiolokacijnix stancij vid kombinovanix zavud; Zaporiz'kij nacional'nij tekhnichnij universitet; zayavl. 28.08.2012; opubl. 11.03.2013, Byul. № 5.
13. Uidrou B., Stirnz S. Adaptivnaya obrabotka signalov : per. s angl. Moscow, Radio i svyaz', 1989, 440 p.
14. Anokhin V. D., Simokhamed F., Anokhin Ye. V., Kil'dyushevskaya V. G. Pat. 2444741 Ros. Federatsiya MPK G01S 7/36 Ustroystvo kompensacii aktivnykh pomekh, zayavitel' i patentoobladatel', Federal'noye gosudarstvennoye obrazovatel'noye uchrezhdeniye vysshego professional'nogo obrazovaniya «Voyennyj aviatsonnyj inzhenernyj universitet». g. Voronezh Ministerstva oborony Rossiyskoy Federatsii; zayavl. 10.03.2009; opubl. 10.03.2012, Byul. № 7, 5 p.

Ципоренко В. В.¹, Ципоренко В. Г.², Хоменко М. Ф.³¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна,²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна,³Старший викладач кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОДІЇ БЕЗПОШУКОВОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ З ПОДВІЙНИМ КОРЕЛЯЦІЙНИМ ОБРОБЛЕННЯМ

Актуальність. На сьогодні пеленгування радіоелектронних засобів повинно здійснюватись в умовах складної електромагнітної обстановки, великої апіорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, а також в умовах реального масштабу часу реалізації. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для вказаних умов є використання широкосмугових цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів.

Мета. Метою статті є оцінка сумарних часових витрат, швидкодії та відносної часової ефективності безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням.

Метод. В роботі виконано аналітичні дослідження сумарних часових витрат кореляційно-інтерферометричного алгоритмів пеленгування та експериментальні дослідження відносної часової ефективності.

Результати. Виконано аналітичну оцінку сумарних часових витрат, швидкодії та відносної часової ефективності безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням. За умов мінімальних апаратних витрат, тобто при використанні одноканальної системи обробки даних визначено, що досліджений безпошуковий метод пеленгування забезпечує пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу. Досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність порівняно з відомим пошуковим цифровим спектральним кореляційно-інтерферометричним методом пеленгування.

Висновки. Порівняльний аналіз показав, що досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність, яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування.

Ключові слова: кореляційно-інтерферометричний метод, безпошукове радіопеленгування, швидкодія, часова ефективність.

НОМЕНКЛАТУРА

АР – антенна решітка;

ДРВ – джерело радіовипромінювання;

ЕМО – електромагнітна обстановка;

ШПФ – швидке перетворення Фур'є.

c – швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вільному просторі;

d – величина антенної бази;

D_θ – робочий сектор пеленгування;

f_{IF} – значення циклічної проміжної частоти;

F_d – частота дискретизації;

h_θ – дискретність просторового кореляційного аналізу напрямку на ДРВ;

k_L, k_H – номери частотних складових спектра прийнятого радіовипромінювання на проміжній частоті, що відповідають його нижній $\omega_{IF.L}$ та верхній $\omega_{IF.H}$ граничним частотам, відповідно;

M – кількість сигналів у прийнятій суміші;

$n_1(t), n_2(t)$ – власний адитивний білий гаусів шум першого та другого радіоканалів;

$N_{\theta,max}$ – максимальна кількість пеленгів, яку можна отримати за секунду;

N_S – кількість набраних часових відліків прийнятих сумішей радіовипромінювань;

$S(t)$ – прийнятий квазінеперервний випадковий стаціонарний сигнал;

$S_1(t), S_2(t)$ – сигнал, що приймається першою та другою антеною;

t – змінна часу;

T_a – час аналізу прийнятих сумішей радіовипромінювань;

T_P – сумарні часові витрати для оцінки одного пеленга;

T_{SA} – часові витрати спектрального аналізу на проміжній частоті прийнятих сумішей радіовипромінювань;

T_1 – тривалість однієї операції комплексного множення з накопичуванням;

T_C – витрати подвійного кореляційного оброблення спектрів;

T_V – сумарні часові витрати на обробку сигналів відомого пошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування;

$U_1(t), U_2(t)$ – прийнята адитивна суміш радіовипромінювань першою та другою антеною;

$U_1(\omega_{IF,k}), U_2(\omega_{IF,k})$ – амплітудні спектри прийнятих сумішей радіовипромінювань, отримані на проміжній частоті;

Δ – смуга пропускання радіоприймача пеленгатора;

$\Delta\omega$ – частотний перетворювальний зсув;

$\Delta\varphi_{\Delta,k} = \Delta\varphi(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) - \Delta\varphi(\omega_{IF,k})$ – різницевий фазовий спектр другого добутку спектрів сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$;

$\hat{\theta}$ – оцінка напрямку на ДРВ;

θ – випадковий невідомий напрямок;

μ_T – відносна часова ефективність;

τ_S – апіорі невідома затримка радіосигналу, що є випадковою величиною;

$\hat{\tau}_D$ – оцінка затримки сигналу між двома антенами;

$\omega_{IF,L}$, $\omega_{IF,H}$ – нижня та верхня граничні частоти

прийнятого радіовипромінювання на проміжній частоті;
 ω_{IF} – значення колової проміжної частоти.

ВСТУП

На сьогодні в автоматизованих системах радіомоніторингу пеленгування радіоелектронних засобів повинно здійснюватись в умовах складної електромагнітної обстановки (ЕМО), великої апіорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, а також в умовах реального масштабу часу реалізації. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для вказаних умов є використання ширококутових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів із застосуванням цифрового оброблення комплексних спектрів прийнятої суміші радіовипромінювань [1].

Основною перевагою кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є висока точність пеленгування джерел ширококутових радіовипромінювань при невеликих (менше 0дБ) відношеннях сигнал/шум. Це зумовлено наступними факторами: можливість використання ефективних алгоритмів оброблення сигналів в умовах апіорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань; можливість ефективної компенсації завад і спотворень, що зумовлені впливом сторонніх об'єктів і елементів АР. Також технологія кореляційно-інтерферометричного пеленгування дає можливість використання різноманітних конфігурацій АР, що дозволяє розширювати область однозначного пеленгування і збільшувати просторову розрізнявальну здатність [2].

Зазвичай кореляційно-інтерферометричне пеленгування реалізується пошуковим компенсаційним методом з пошуком такого значення компенсуючої затримки, яке забезпечує максимум взаємної кореляційної функції. Недоліком цього методу є великі часові або апаратні витрати та неможливість пеленгування джерел радіовипромінювань із розширеним спектром у реальному масштабі часу з високою точністю. Тому дослідження по підвищенню швидкодії кореляційно-інтерферометричного пеленгування при використанні одноканального корелятора при забезпеченні високої точності є актуальною задачею.

Таким чином, не вирішеною раніше частиною загальної проблеми розробки швидкодіючих кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є дослідження швидкодії безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Відповідно до не вирішеної раніше проблеми розробки і дослідження ефективності кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, метою статті є: оцінка сумарних часових витрат T_p , швидкодії $N_{\theta, \max}$ та відносної часової ефективності μ_T безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

– оцінка сумарних часових витрат для отримання одного пеленгу згідно досліджуваного та відомого пошукового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування;

– оцінка швидкодії пеленгування;

– відносної часової ефективності досліджуваного методу шляхом моделювання.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Результати досліджень по аналізу та синтезу конфігурацій АР, а також впливу їх параметрів на завадостійкість та точність кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів представлені в великій кількості сучасних наукових праць.

В роботі [3] запропоновано кореляційний метод пеленгування, що має підвищену точність пеленгування. Метод базується на збільшенні крутизни взаємної кореляційної пеленгаційної характеристики. Однак швидкодія пеленгування та можливість роботи пеленгатора в реальному масштабі часу не досліджена.

У роботах [4, 5] досліджені пошукові кореляційно-інтерферометричні методи оцінки напрямку на ДРВ з використанням АР, які ефективно реалізуються в цифровій формі. Ці методи використовують багатоітераційний компенсаційний алгоритм оцінки затримки прийому радіовипромінювання рознесеними в просторі пеленгаційними каналами. Це обумовлює низьку швидкодію пеленгування.

В роботі [6] в результаті проведених досліджень безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням отримано аналітичні оцінки дисперсії похибки пеленгування для умов великого та малого відношення сигнал/шум на вході пеленгаційних каналів. Проведено імітаційне моделювання роботи пеленгатора та визначено його основні точнісні характеристики. Актуальним є подальше його дослідження з метою мінімізації обчислювальних витрат і підвищення швидкодії пеленгування.

У роботах [7–9] досліджені нелінійні спектральні методи пеленгування, які забезпечують високу просторову роздільну здатність прийнятих випромінювань. Такі методи мають ряд суттєвих для систем радіомоніторингу недоліків, таких як великий час обробки сигналів, що в кілька разів більший ніж для пошукового кореляційно-інтерферометричного методу пеленгування; необхідність точної апіорної інформації про кількість прийнятих в суміші випромінювань; зміщення оцінок напрямків, що погіршує точність пеленгування; втрата стійкості роботи при низьких (близько 10дБ) входних відно-

шеннях сигнал/шум. В результаті часова ефективність застосування спектральних методів пеленгування, що визначається, в першу чергу, відношенням швидкодія/точність пеленгування, в системах радіомоніторингу недостатня. Це підтверджується відсутністю їх використання в сучасних цифрових пеленгаторах систем радіомоніторингу [1, 2].

В роботах [10–12] досліджено застосування АР різної конфігурації для покращення ефективності пеленгування ДРВ. Застосування АР забезпечує можливість швидкого просторового сканування в широкому робочому секторі, можливість ефективного подавлення завад.

Таким чином, для використання в автоматизованих системах радіомоніторингу розробка та дослідження швидкодії і часової ефективності кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є актуальною задачею.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Виконаємо аналіз швидкодії радіопеленгатора з мінімальними апаратурними витратами, що працює згідно безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням [6].

Нехай в горизонтальній площині з випадкового невідомого напрямку θ приймається квазінеперервний випадковий стаціонарний сигнал $S(t)$ двома радіоканалами, що рознесені у просторі на величину d антенної бази і мають статистично незалежні власні шуми $n_1(t)$ і $n_2(t)$ відповідно. Нехай $S_1(t)$ – сигнал, що приймається в адитивній суміші $U_1(t)$ зі статистично незалежним білим гаусовим шумом $n_1(t)$ впродовж часового інтервалу $t \in [0, T_a]$ першою антенною, а $S_2(t)$ – сигнал, що приймається в адитивній суміші $U_2(t)$ зі статистично незалежним білим гаусовим шумом $n_2(t)$ також впродовж часового інтервалу $t \in [0, T_a]$ другою антенною. Шуми $n_1(t)$ і $n_2(t)$ та сигнали $S_1(t)$ та $S_2(t)$ є обмеженими смугою Δ . Вихідні умови запишемо наступним чином:

$$\begin{aligned} U_1(t) &= S_1(t) + n_1(t); \\ U_2(t) &= S_2(t) + n_2(t); \\ S_2(t) &= S_1(t - \tau_S). \end{aligned} \quad (1)$$

Згідно досліджуваного методу пеленгування оцінка $\hat{\theta}$ здійснюється наступним чином:

$$\hat{\theta} = \arccos(c \cdot \hat{\tau}_D / d);$$

$$\hat{\tau}_D = (1 / \Delta\omega) \cdot \arctg \frac{\sum_{k=k_L}^{k_H} U_1(\omega_{IF,k}) \cdot U_2(\omega_{IF,k}) \cdot U_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot \sin[\Delta\varphi_{\Delta,k}]}{\sum_{k=k_L}^{k_H} U_1(\omega_{IF,k}) \cdot U_2(\omega_{IF,k}) \cdot U_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot \cos[\Delta\varphi_{\Delta,k}]} \quad (2)$$

Для аналізу швидкодії радіопеленгатора оцінимо часові витрати на оброблення $U_1(t)$ та $U_2(t)$ в смузі Δ .

Особливістю алгоритму оброблення (2) прийнятих радіовипромінювань $U_1(t)$ та $U_2(t)$ є використання алгоритму ШПФ. Оскільки основною операцією, що виконується при такій реалізації кореляційно-інтерферометричного пеленгування є множення з накопичуванням [13], то тривалість пеленгування доцільно оцінювати через загальну кількість операцій множення з накопичуванням, що необхідно виконати для оцінки пеленга на ДРВ. Швидкодію пеленгування будемо оцінювати через максимальну кількість пеленгів $N_{\theta, \max}$, яку можна отримати за секунду при заданій тривалості процесу аналізу T_a .

Структурна схема досліджуваного пеленгатора зображена на рис. 1. Особливості роботи пеленгатора рис. 1 наступні. Для пеленгування в секторі $[0; 360]^\circ$ суміш радіовипромінювань приймається двома парами антен, що розташовані у просторі під прямим кутом. При використанні двоканального радіоприймача антени А2, А3 трихелементної АР попарно з опорною антенною А1 послідовно в часі комутуються до двоканального радіоприймача із спільним гетеродином. На проміжній частоті протягом часу аналізу T_a вихідні сигнали радіоприймача перетворюються в цифрову форму і записуються в пам'ять ЕОМ. Отримані масиви відліків, прийнятих сумішей радіовипромінювань, обробляються згідно рівняння (2), розробленого в [6] методу пеленгування.

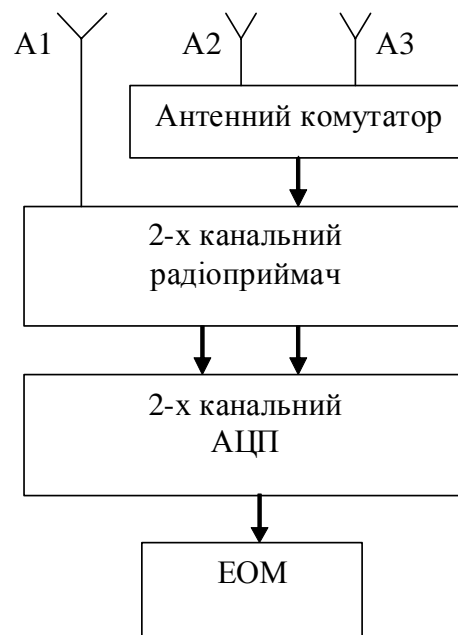


Рисунок 1 – Структурна схема досліджуваного пеленгатора

Тривалість виконання ШПФ та кореляційного аналізу доцільно визначати через кількість операцій комплексно-множення [13]. В результаті для оцінки одного пеленга сумарні часові витрати T_P складаються з витрат часового спектрального аналізу T_{SA} сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$ радіовипромінювань, що виконується на проміжній частоті $\omega_{IF,k}$, витрат T_C подвійного кореляційного оброблення, що складається з першого перемноження комплексних спектрів: $U_1(j\omega_{IF,k}) \cdot U_2(j\omega_{IF,k})$, другого перемноження отриманого взаємного комплексного спектра $U_1(j\omega_{IF,k}) \cdot U_2(j\omega_{IF,k})$ на його зсунуту на $\Delta\omega$ за частотою копію $U_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega)$:

$$T_P = T_{SA} + T_C. \quad (3)$$

Для мінімізації часових витрат часового спектрального аналізу його доцільно реалізувати на основі швидких алгоритмів, наприклад, алгоритму ШПФ [13]. В цьому випадку тривалість T_{SA} часового спектрального аналізу сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$ радіовипромінювань дорівнює:

$$T_{SA} = 2 \cdot N_S \cdot \log_2 N_S \cdot T_1. \quad (4)$$

Часові витрати подвійного кореляційного оброблення:

$$T_C = (0,5 \cdot N_S + 0,5 \cdot N_S) \cdot T_1 = N_S \cdot T_1. \quad (5)$$

Таким чином, загальні часові витрати T_P на здійснення оброблення прийнятої суміші сигналів згідно безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням з урахуванням рівнянь (3)–(5) дорівнюють:

$$T_P = T_1 \cdot (2 \cdot N_S \cdot \log_2 N_S + N_S). \quad (6)$$

Швидкодія пеленгування $N_{\theta, \max}$ повинна визначатися за умови оброблення прийнятої суміші радіовипромінювань в реальному масштабі часу, тобто при $T_P < T_a$ наступним чином:

$$N_{\theta, \max} = M / T_a. \quad (7)$$

Для прикладу, для типових умов [1, 2] ЕМО при пеленгуванні в реальному масштабі часу та при мінімальній кількості радіовипромінювань $M = 1$ в межах смуги Δ , та при заданій тривалості процесу аналізу $T_a = 10^{-3}$ с забезпечується максимальна швидкодія $N_{\theta, \max} = M / T_a = 1 / 10^{-3} = 10^3$ пеленгів за секунду.

Виконаємо дослідження відносної часової ефективності μ_T реалізації безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням порівняно з відомим цифровим кореляційним пошуковим методом пеленгування, що також використовує цифрові методи спектрального аналізу [4, 5].

Відмінністю відомих пошукових методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування є знаходження кореляційної функції з кількістю кроків (D_θ / h_θ) перемно-

жування N_S спектральних відліків двох сигналів. З урахуванням цього сумарні часові витрати T_V на обробку сигналів відомого методу пеленгування дорівнюють:

$$T_V = T_1 \cdot (2 \cdot N_S \cdot \log_2 N_S + 0,5 N_S \cdot (D_\theta / h_\theta)). \quad (8)$$

Аналіз рівняння (8) показує, що часові витрати T_V суттєво залежать від h_θ . Цей фактор зумовлює велику тривалість оброблення та загальні часові витрати $T_V > T_a$ більші за тривалість аналізу радіовипромінювань, що робить неможливим пеленгування в реальному масштабі часу з високою точністю за умови застосування одноканальної системи оброблення даних, наприклад, сучасного сигнального процесора типу TMS320. Можливе також суттєве збільшення дискретності оцінки пеленгу h_θ , що погіршує точність пеленгування, або застосування багато процесорної схеми оброблення, що суттєво збільшує вартість пеленгатора.

Швидкодія пеленгування при $T_V > T_a$ буде визначатися згідно рівняння: $N_\theta = M / T_V < N_{\theta, \max}$.

В результаті відносна часова ефективність μ_T безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням з урахуванням (6) та (8) визначається згідно з рівнянням:

$$\mu_T = \frac{T_V}{T_P} = \frac{2 \cdot \log_2 N_S + 0,5 \cdot (D_\theta / h_\theta)}{2 \cdot \log_2 N_S + 1}. \quad (9)$$

Аналіз рівняння (9) показує, що оскільки $(D_\theta / h_\theta) \gg 2 \cdot \log_2 N_S$, то $\mu_T \gg 1$, що підтверджує високу ефективність досліджуваного методу пеленгування.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Проведемо з урахуванням рівняння (6) дослідження залежності загальних часових витрат T_P від ширини смуги пропускання радіопеленгатора Δ для наступних типових початкових умов: значення проміжної частоти $f_{IF} = 10,7$ МГц; частота дискретизації F_d вибрана згідно теореми відліків: $F_d = 2 \cdot (f_{IF} + 0,5\Delta)$; тривалість процесу аналізу в кожному пеленгаційному радіоканалі $T_a = 10^{-3}$ с; кількість часових сигналних відліків визначається згідно з рівнянням: $N_S = T_a \cdot F_d$; робочий сектор пеленгування $D_\theta = 360^\circ$; крок оцінки напрямку $h_\theta = 0,6^\circ$.

Дослідження проведемо для умови, що цифрове оброблення сигналів буде виконуватись з використанням ноутбука середньої обчислювальної продуктивності, який, наприклад, має $T_1 = 0,1 \cdot 10^{-9}$ с при перемноженні 32-розрядних комплексних чисел, що гірше ніж для кращих сигналних процесорів типу TMS320c6678 [13].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Отримані згідно рівнянь (6) та (8) залежності T_P та T_V від ширини смуги пропускання радіопеленгатора Δ [МГц] для досліджуваного та відомого методів пеленгування наведено на рис. 2. Також горизонтальною лінією показано тривалість T_a процесу аналізу.

Аналіз рис. 2 показує, що загальні часові витрати T_P на здійснення оброблення прийнятої суміші сигналів згідно алгоритму (2) менші за тривалість T_a процесу аналізу при $\Delta < 500$ МГц, а для відомого пошукового радіопеленгатора при $\Delta < 10$ МГц навіть при визначенні кореляційної функції з кроком $h_\theta = 0,6^\circ$. Великий крок оцінки напрямку $h_\theta = 0,6^\circ$ спричиняє додаткову методичну похибку пеленгування до $h_\theta / 2 = 0,3^\circ$.

Таким чином, для пеленгування згідно безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням в реальному масштабі часу може бути використаний радіоприймач з шириною смуги пропускання до 500 МГц та одноканальною системою оброблення даних, що дозволить здешевити комплекс радіомоніторинга шляхом використання ноутбука середньої обчислювальної продуктивності замість потужного багатоканального комплексу. Також у досліджуваного радіопеленгатора похибка дискретності $h_\theta / 2 = 0,3^\circ$ пеленгування відсутня внаслідок прямої оцінки затримки сигналу.

Проведемо дослідження залежності відносної часової ефективності μ_T від ширини смуги Δ пропускання радіоприймача пеленгатора при $D_\theta = 360^\circ$; $h_\theta = 0,1^\circ$; $T_a = 10^{-3}$ с. Отриману залежність, згідно з рівнянням (9), наведено на рис. 3.

Аналіз залежностей на рис. 3 показує, що відносна часова ефективність μ_T відповідного запропонованого пеленгатора обернено пропорційна ширині смуги Δ , та перевищує 100 разів при $\Delta < 100$ МГц.

Таким чином, виконані дослідження швидкодії показали, що досліджений безпошуковий пеленгатор забезпечує пеленгування усіх радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу, має високу відносну часову ефективність μ_T , яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування. При цьому швидкодія пеленгування становить $N_{\theta, \max} = M / T_a = 1/10^{-3} = 10^3$ пеленгів за секунду.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отримана оцінка сумарних часових витрат T_P та відносної часової ефективності μ_T безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням показала, що досліджений безпошуковий метод пеленгування забезпечує пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу. Досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність μ_T , яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування.

Отримані результати доцільно використовувати при реалізації апаратури систем радіомоніторингу та радіонавігації, які функціонують в складній динамічній ЕМО.

Дані дослідження є продовженням роботи по розробці безпошукових цифрових спектральних кореляційно-інтерферометричних методів пеленгування.

В подальшому необхідно провести оптимізацію конфігурації АР для використання досліджуваного методу пеленгування в широкому діапазоні робочих частот.

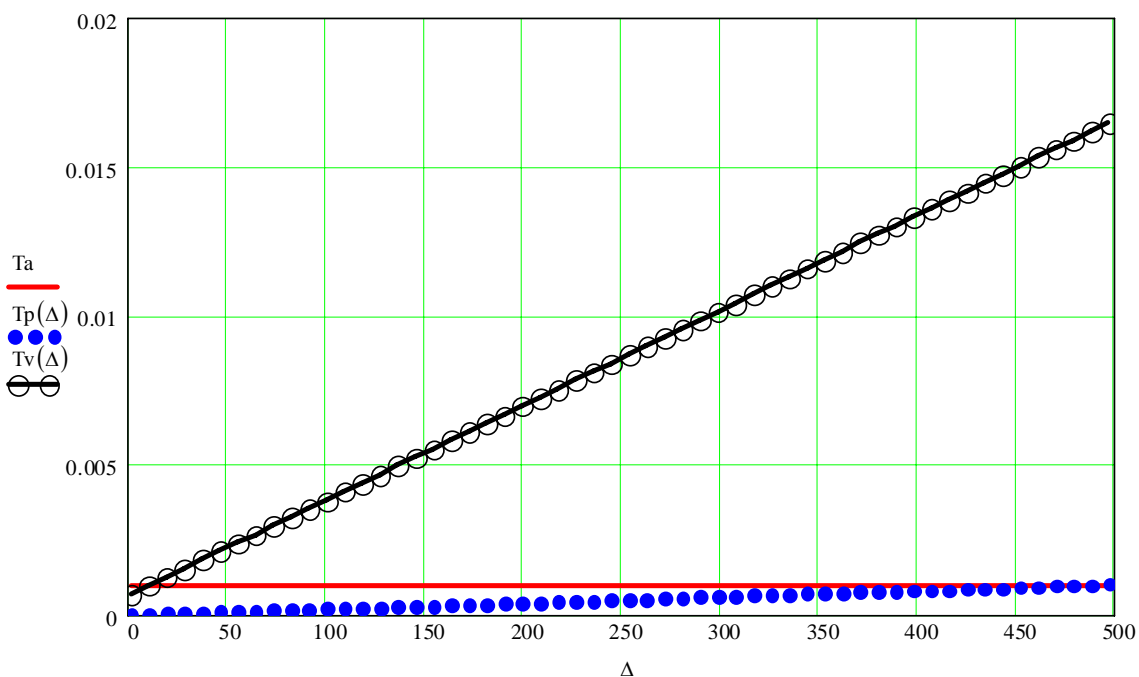


Рисунок 2 – Залежності загальних часових витрат T_P та T_V досліджуваного та відомого кореляційно-інтерферометричного пеленгатора від ширини Δ

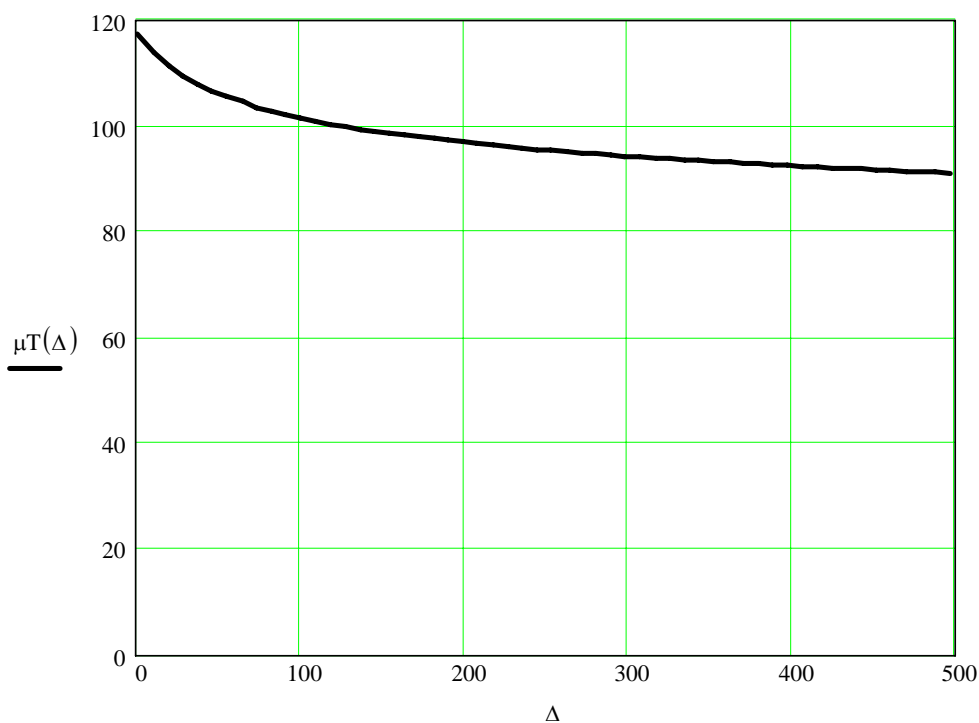


Рисунок 3 – Залежність відносної часової ефективності μ_T від ширини смуги Δ

ВИСНОВКИ

Виконано оцінку сумарних часових витрат T_p для отримання одного пеленга відомого пошукового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування та досліджуваного безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням. За умов мінімальних апаратних витрат, тобто при використанні одноканальної системи обробки даних визначено, що досліджений безпошуковий метод пеленгування забезпечує пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу.

Оцінено швидкодню пеленгування. Для типових умов ЕМО при пеленгуванні в реальному масштабі часу та при мінімальній кількості радіовипромінювань $M = 1$ в межах смуги Δ пропускання радіоканалів пеленгатора, тривалості процесу аналізу $T_a = 10^{-3}$ с, забезпечується максимальна швидкодня $N_{\theta, \max} = 10^3$ пеленгів за секунду.

Отримано аналітичну оцінку відносної часової ефективності μ_T досліджуваного безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням. В результаті моделювання визначено, що досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність μ_T , яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин ; под

- ред. А. М. Рембовского; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2010. – 624 с.
2. Слободянюк П. В. Довідник з радіомоніторингу / П. В. Слободянюк, В. Г. Благодарний, В. С. Ступак; під заг. ред. П. В. Слободянюка. – Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2008. – 588 с.: іл.
3. Sorochan A. G. Correlation direction finder with two OMNI-directional antennas / A. G. Sorochan // Microwave and Telecommunication Technology : 23rd International Conference CriMiCo-2013, Sevastopol, 8–14 September, 2013 : proceedings. – Crimea, 2013. – P. 298–299.
4. Jung-Hoon L. Interferometer direction-finding system with improved DF accuracy using two different array configurations / L. Jung-Hoon, W. Jong-Myung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2014. – Vol. 14. – P. 719–722. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291
5. Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source / [Y. Jian, C. Wangjie, L. Lei, N. Xiaokang] // Signal Processing : 12th International Conference ICSP-2014, Hangzhou, 19–23 October, 2014 : proceedings. – Mengqi Zhou, 2014. – P. 52–57. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7014968
6. Ципоренко В. В. Дослідження безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з подвійним кореляційним обробленням / В. В. Ципоренко // Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник «Радіотехніка». – 2012. – № 170. – С. 172–179.
7. Kaluri V. R. Gold-MUSIC: A Variation on MUSIC to Accurately Determine Peaks of the Spectrum / V. R. Kaluri, V. Shridhar // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, № 4. – P. 2263–2268. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232893
8. Super-resolution direction finding with far-separated subarrays using virtual array elements / [W. Chen, X. Xu, S. Wen, Z. Cao] // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2011. – Vol. 5, № 8. – P. 824–834. DOI: 10.1049/iet-rsn.2010.0289
9. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT / [F. Xiao, N. D. Sidiropoulos, M. Wing-Kin, J. Tranter] // Acoustics, Speech and Signal Processing : 2014 IEEE International Conference

- ICASSP, Florence, 4–9 May, 2014 ; proceedings. – Pisa : Marco Luise, 2014. – P. 7749–7753. DOI: 10.1109/ASSP.2014.6855108
10. Jung-Hoon L. Method for Obtaining Three- and Four-Element Array Spacing for Interferometer Direction-Finding System / L. Jung-Hoon, L. Jong-Hwan, W. Jong-Myung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2016. – Vol. 15. – P. 897–900. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2479224
11. Houcem G. Direction-finding arrays of directional sensors for randomly located sources / G. Houcem, P. D. Jean, M. J. Larsys Sergio // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2016. – Vol. 52, № 4. – P. 1995–2003. DOI: 10.1109/TAES.2016.150655
12. Demonstration of an Electrically Small Antenna Array for UHF Direction-of-Arrival Estimation / [J. S. Matthew, D. C. Schmitz, D. M. Anderson, L. J. Douglas, T. B. Jennifer] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, № 3. – P. 1371–1377. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227921
13. Proakis J. G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, 4th Edition / J. G. Proakis, D. G. Manolakis. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006. – 1077 p.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2017.
Після доробки 27.04.2017.

Ципоренко В. В.¹, Ципоренко В. Г.², Хоменко Н. Ф.³

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів і телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів і телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

³Старший преподаватель кафедры радиотехники, радиоэлектронных аппаратов и телекоммуникаций Житомирского государственного технологического университета, Житомир, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ БЕСПОИСКОВОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОГО КОРРЕЛЯЦИОННО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ С ДВОЙНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Актуальность. На сегодня пеленгование радиоэлектронных средств должно осуществляться в условиях сложной электромагнитной обстановки, большой априорной неопределенности относительно параметров радиоизлучений, а также в условиях реального масштаба времени реализации. Перспективным направлением реализации пеленгования для указанных условий является использование широкополосных цифровых корреляционно-интерферометрических радиопеленгаторов.

Цель. Целью статьи является оценка суммарных временных затрат, быстродействия и относительной временной эффективности беспойскового цифрового метода корреляционно-интерферометрического пеленгования с двойной корреляционной обработкой.

Метод. В работе выполнены аналитические исследования суммарных временных затрат корреляционно-интерферометрических алгоритмов пеленгования и экспериментальные исследования относительной временной эффективности.

Результаты. Выполнено аналитическую оценку суммарных временных затрат, быстродействия и относительной временной эффективности беспойскового цифрового метода корреляционно-интерферометрического пеленгования с двойной корреляционной обработкой. При минимальных аппаратных затратах, то есть при использовании одноканальной системы обработки данных, определено, что исследованный беспойсковый метод пеленгования обеспечивает пеленгование радиоизлучений, попадающих в полосу частот одновременного анализа с возможной шириной до 500 МГц в реальном масштабе времени. Исследованный метод пеленгования имеет высокую относительную временную эффективность по сравнению с известным поисковым цифровым спектральным корреляционно-интерферометрическим методом пеленгования.

Выводы. Сравнительный анализ показал, что исследованный метод пеленгования имеет высокую относительную временную эффективность, которая в 100 раз больше, чем у известного поискового цифрового спектрального корреляционно-интерферометрического метода пеленгования.

Ключевые слова: корреляционно-интерферометрический метод, беспойсковое радиопеленгование, быстродействие, временная эффективность.

Tsyorenko V. V.¹, Tsyorenko V. G.², Khomenko M. F.³

¹PhD, Associate professor, Associate professor of Department of Radio Engineering, Radioelectronic Devices and Telecommunication Systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

²PhD, Associate professor, Associate professor of Department of Radio Engineering, Radioelectronic Devices and Telecommunication Systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

³Senior lecturer of Department of Radio Engineering, Radioelectronic Devices and Telecommunication Systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

RESEARCH OF FAST-ACTION OF THE DIRECT DIGITAL METHOD OF SPECTRAL CORRELATIVE-INTERFEROMETRIC DIRECTION FINDING WITH DOUBLE CORRELATION PROCESSING

Contex. At present, the direction finding of radio electronic means should be carried out under conditions of a complex electromagnetic situation, a large a priori uncertainty regarding the parameters of radio emissions, and also in conditions of a real-time implementation. A promising direction in the direction finding implementation for these conditions is the use of broadband digital correlation-interferometric radio direction finders.

Objective. The aim of the article is to estimate the total time costs, speed and relative time efficiency of the direct digital method of spectral correlative-interferometric direction finding with double correlation processing.

Method. Analytic studies of total time costs of correlation-interferometric direction finding algorithms and experimental studies of relative time efficiency are performed in the work.

Results. Analytical estimation of total time costs, speed and relative time efficiency of the direct digital method of spectral correlative-interferometric direction finding with double correlation processing is performed. With minimal hardware costs, that is, using a single-channel data processing system, it is determined that the investigated direct direction finding method provides direction finding of radio emissions entering the frequency band of simultaneous analysis with a possible width of up to 500 MHz in real time. The investigated direction finding method has relative time efficiency in 100 times higher in comparison with the known search digital spectral correlation-interferometric method of direction finding.

Conclusions. Comparative analysis has shown that the investigated direction finding method has a high relative time efficiency exceeding 100 times in comparison with the known search digital spectral correlation-interferometric method of direction finding.

Keywords: correlative-interferometric method; direct direction finding; fast-action; time efficiency.

REFERENCES

1. Rembovskiy A. M. Ashychmin A. V., Kozmin V. A. ; pod red. A. M. Rembovskogo.; 2-ye izd., pererab. i dop. Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva. Moscow, Goriacziaia liniya, Telekom, 2010, 624 p.
2. Slobodyanuk P. V., Blagodarny V. G., Stupak V. S. ; Pid. zag. red. P. V. Slobodyanuka. Dovidnyk z radiomonitoringu. Nizhyn, TOV «Vydavnytstvo «Aspekt-Poligraf», 2008, 588 p.: il.
3. Sorochan A. G. Correlation direction finder with two OMNI-directional antennas, *Microwave and Telecommunication Technology : 23rd International Conference CriMiCo-2013, Sevastopol, 8–14 September, 2013 : proceedings.* Crimea, 2013, pp. 298–299.
4. Jung-Hoon L., Jong-Myung W. Interferometer direction-finding system with improved DF accuracy using two different array configurations, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, Vol. 14, pp. 719–722. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291
5. Jian Y., Wangjie C., Lei L., Xiaokang N. Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source, *Signal Processing : 12th International Conference ICSP-2014, Hangzhou, 19–23 October, 2014 : proceedings.* Mengqi Zhou, 2014, pp. 52–57. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7014968
6. Tsyporenko V. V. Doslidzennua bezposhukovogo tsifrovogo metodu spektralnogo koreluatsijno-interferometrychnogo radiopelenguvannua z podvijnym koreluatsijnym obroblynnuam, *Vseukrainskiy mizhvidomchyj naukovo-tehnichnyj zbirnyk «Radiotekhnika»*, 2012, No. 170, pp. 172–179.
7. Kaluri V. R., Shridhar V. Gold-MUSIC: A Variation on MUSIC to Accurately Determine Peaks of the Spectrum, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, Vol. 61, No. 4, pp. 2263–2268. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232893
8. Chen W., Xu X., Wen S., Cao Z. Super-resolution direction finding with far-separated subarrays using virtual array elements, *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, Vol. 5, No. 8, pp. 824–834. DOI: 10.1049/iet-rsn.2010.0289
9. Xiao F., Sidiropoulos N. D., Wing-Kin M., Tranter J. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT, *Acoustics, Speech and Signal Processing : 2014 IEEE International Conference ICASSP, Florence, 4–9 May, 2014 : proceedings.* Pisa, Marco Luise, 2014, pp. 7749–7753. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855108
10. Jung-Hoon L., Jong-Hwan L., Jong-Myung W. Method for Obtaining Three- and Four-Element Array Spacing for Interferometer Direction-Finding System, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, Vol. 15, pp. 897–900. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2479224
11. Houcem G., Jean P. D., Larsys Sergio M. J. Direction-finding arrays of directional sensors for randomly located sources, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 1995–2003. DOI: 10.1109/TAES.2016.150655
12. Matthew J. S., Schmitz D. C., Anderson D. M., Douglas L. J., Jennifer T. B. Demonstration of an Electrically Small Antenna Array for UHF Direction-of-Arrival Estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, Vol. 61, No. 3, pp. 1371–1377. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227921
13. Proakis J. G., Manolakis D. G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, 4th Edition. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006, 1077 p.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

УДК 681.5.015

Братусь О. В.

Здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З АДАПТИВНИМИ БЛОКАМИ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНИХ РАДІОФЛЮКСІВ

Актуальність. Створення нових методів для відновлення та прогнозування сонячних даних, нових систем підтримки прийняття рішень для обробки сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см є актуальними задачами, тому що це дасть можливість виконувати правильно та автоматизовано попередню обробку даних та подальше прогнозування.

Мета. Розробити метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень та прогнозування часових рядів; створити інтегральний критерій адекватності моделі та критерій близькості для застосування при відновленні істинних закономірностей розвитку часових рядів; створити систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см з використанням розроблених методів; застосувати розроблені методи для реальних даних та порівняти з традиційними методами.

Метод. Для досягнення поставленої мети використано такі методи: розроблений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування; метод експоненційного згладжування; метод 13-місячного ковзного середнього; експоненційний підхід, запропонований Хетеуесем, Уілсоном та Рейхманом.

Результати. Розроблено метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень часових рядів та для прогнозування часових рядів. Створено інтегральний критерій адекватності моделі та критерій близькості. Розроблено систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування сонячних даних. Виконано практичне застосування розроблених методів для реальних даних та порівняння з традиційними методами.

Висновки. Розроблений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу порівняно з усіма традиційними методами при відновленні пропущених значень, істинних закономірностей та прогнозуванні сонячних радіофлюксів.

Ключові слова: метод ковзного двобічного експоненційного згладжування, відновлення пропущених значень часових рядів, відновлення істинних закономірностей часових рядів, система підтримки прийняття рішень, інтегральний критерій адекватності моделі, критерій близькості, сонячні радіофлюкси при довжині хвилі 10,7 см.

НОМЕНКЛАТУРА

БД – база даних;
ЕЗ – експоненційне згладжування;
ЕП – експоненційний підхід;
індекс F10.7 – місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см;
КДЕЗ – ковзне двобічне експоненційне згладжування;
СКБД – система керування базою даних;
ТКС – 13-місячне ковзне середнє;
 a – амплітуда циклу;
 b – час у місяцях від мінімуму до максимуму;
 c – асиметрія циклу;
DW – статистика Дарбіна-Уотсона;
 $e(k)$ – похибка моделі у k -й момент часу;

$e(k-1)$ – похибка моделі у $(k-1)$ -й момент часу;
 $f(i)$ – функція, що описує фази росту і падіння сонячних даних в i -й момент часу, що вимірюється у місяцях, i_0 – початковий момент часу;
MAPE – середня відсоткова абсолютна похибка;
 N – кількість значень у вибірці даних;
 n – номер циклу;
 R^2 – коефіцієнт детермінації;
RMSE – середньоквадратична похибка;
 S_k – значення експоненційного середнього в k -й момент часу;
 S_{k-1} – значення експоненційного середнього в

$(k-1)$ -й момент часу;

S_k^* – значення експоненційного середнього у зворотному часі в k -й момент часу;

S_{k+1}^* – значення експоненційного середнього у зворотному часі в $(k+1)$ -й момент часу;

SFU – одиниця виміру сонячних радіофлюксів (Solar Flux Unit);

SSE – сума квадратів похибок моделі;

U – коефіцієнт Тейла;

$Var[y(k)]$ – фактична дисперсія основної змінної $y(k)$, обчислена на основі вибірки даних;

$\hat{Var}[y(k)]$ – дисперсія основної змінної $\hat{y}(k)$, оціненої за моделлю;

$y(k)$ – значення ряду в k -й момент часу;

$\hat{y}(k)$ – оцінка значення ряду, що отримана за певною математичною моделлю;

α – коефіцієнт згладжування;

ρ – коефіцієнт автокореляції для $e(k)$ та $e(k-1)$, тобто при зміщенні $S=1$.

ВСТУП

Існує особливий клас задач, які неможливо розв'язати за допомогою алгоритмів оптимальної фільтрації. До них відносяться, наприклад, задачі обробки даних про сонячну активність, задачі океанографічних досліджень. Ці задачі мають певні особливості, які дозволяють розглядати їх як задачі з уточнення минулих по відношенню до теперішнього часу параметрів. Такі задачі можуть вирішуватися методом згладжування. Актуальною задачею є відновлення істинних прихованих закономірностей динамічних процесів при обробці експериментальних даних, що описують сонячну активність, таких, як числа Вольфа та сонячні радіофлюкси при довжині хвилі 10,7 см. Складною задачею є побудова моделі за даними, що описують сонячну активність, оскільки фізичні процеси, що відбуваються на Сонці, є недостатньо вивченими та об'єм даних є обмеженим.

Дослідження стосовно створення нових методів для відновлення істинних закономірностей, відновлення пропущених значень та прогнозування даних про сонячну активність є актуальними задачами на сьогоднішній день, тому що це дасть можливість виконувати правильно попередню обробку даних та більш точно виконувати подальше прогнозування. Створення ефективних систем підтримки прийняття рішень для обробки сонячних даних також є актуальним, оскільки це дасть можливість автоматизовано обробляти дані з використанням необхідних методів.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Створення системи підтримки прийняття рішень для відновлення істинних закономірностей, пропущених значень та прогнозування сонячних радіофлюксів з використанням нових ефективних методів є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Мета роботи:

1) розробити метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень часових рядів;

2) запропонувати інтегральний критерій адекватності моделі та критерій близькості для застосування при відновленні істинних закономірностей розвитку часових рядів;

3) розробити метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для прогнозування часових рядів;

4) створити систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см, що складається з чотирьох блоків: попереднього аналізу даних, відновлення закономірностей розвитку часових рядів, прогнозування часових рядів та графічного відображення отриманих результатів. Застосувати усі розроблені методи у системі підтримки прийняття рішень;

5) застосувати створений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см та порівняти з методом експоненційного згладжування;

6) застосувати розроблений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення істинних закономірностей сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см та порівняти з методом 13-місячного ковзного середнього;

7) застосувати створений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для прогнозування сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см та порівняти з експоненційним підходом, запропонованим Хетеуєм, Уілсоном та Рейхманом.

Таким чином, реалізація наведених вище завдань дасть можливість виконувати ефективний аналіз та прогнозування сонячних радіофлюксів.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Дослідження можливостей відновлення істинних закономірностей та прогнозування сонячних даних займали різні групи науковців. У розглянутих роботах також можна прослідкувати розвиток наукової думки стосовно цього питання.

Хетеуей та інші у роботі [1] пропонують рівняння для опису моделі 11-річного сонячного циклу. У більш пізній статті цих авторів [2] запропоновано метод розрахунку 13-місячного ковзного середнього для обробки даних про сонячну активність. На даний момент цей метод є широко розповсюдженим. Сальвадор у роботі [3] пропонує математичну модель для циклу чисел Вольфа з використанням припливно-обертальної теорії Ієна Вілсона. У статті [4] виконується дослідження похибок методу 13-місячного ковзного середнього та визначено умови, за яких застосування цього методу при аналізі сонячної активності викривляє значні особливості цього процесу.

Проблемою прогнозування сонячних даних також займалось багато науковців. Хетеуей та інші у роботі [1] показують, що запропоноване рівняння для опису моделі 11-річного сонячного циклу може бути застосованим для прогнозування. У роботі [2] зроблено докладний огляд багатьох існуючих методів прогнозування

сонячних даних, зокрема, всі методи прогнозування поділено на регресійні та методи, що базуються на аналізі попередніх даних. Ноблем та Вітландом у статті [5] запропоновано байєсівський підхід для прогнозування сонячних циклів з використанням рівняння Фокера-Планка. У роботі [3] показано, що запропоновану модель можна використати не тільки для опису закономірностей, але й для прогнозування чисел Вольфа.

У наведених роботах розглянуто багато методів для відновлення закономірностей та прогнозування сонячних даних. Проте також у цих роботах наведено певні критичні дослідження, що показують недоліки вже розроблених методів за певних умов. Тому задача розробки нових методів для відновлення закономірностей, пропущених даних та прогнозування сонячних даних є актуальною на сьогоднішній день. Також задача створення систем підтримки прийняття рішень для обробки сонячних даних є актуальною, оскільки це дасть можливість автоматизовано обробляти дані з використанням необхідних методів.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У роботі [6] запропоновано метод ковзного двобічного експоненційного згладжування, що полягає у побудові цього методу на інтервалі 13, щоб працювати з даними у такому ж діапазоні, як і для 13-місячного ковзного середнього. Цей метод є розвитком та вдосконаленням квазіоптимальної процедури згладжування, наведеної у роботі [7].

Перша частина процедури ковзного двобічного тринадцятимісячного експоненційного згладжування полягає в отриманні оцінок за допомогою традиційного методу експоненційного згладжування [6]. При цьому початкове наближення обирається рівним першому значенню ряду з відповідного інтервалу на кожному ковзному тринадцятимісячному інтервалі. Ця процедура описується наступною формулою:

$$S_k = \alpha \cdot y(k) + (1 - \alpha) \cdot S_{k-1}, \quad (1)$$

де періоди часу $k = 1, \dots, 13, k = 2, \dots, 14, \dots, k = N - 12, \dots, N$ [6].

Для визначення оптимального значення параметра згладжування розглянемо такі статистичні характеристики, що використовуються для оцінювання якості побудованої моделі у цілому: R^2 , SSE , DW .

Характеристика R^2 обчислюється за такою формулою [8]:

$$R^2 = \frac{\hat{\text{Var}}\{y(k)\}}{\text{Var}\{y(k)\}}. \quad (2)$$

Характеристика DW обчислюється таким чином [8]:

$$DW = 2 - 2 \cdot \rho. \quad (3)$$

У формулі (3) значення ρ для $e(k)$ і $e(k-1)$ обчислюється таким чином [8]:

$$\rho = \frac{\sum_{k=2}^N e(k) \cdot e(k-1)}{\sum_{k=1}^N [e(k)]^2}.$$

Характеристика SSE обчислюється за такою формулою [8]:

$$SSE = \sum_{k=1}^N [\hat{y}(k) - y(k)]^2. \quad (4)$$

У цій роботі запропоновано такий інтегральний критерій адекватності моделі:

$$I = |1 - R^2| + |2 - DW|. \quad (5)$$

Критерієм вибору оптимального значення параметра згладжування є мінімум значень SSE та інтегрального критерію I , що обчислюються, відповідно, за формулами (4) та (5).

Друга частина процедури ковзного двобічного експоненційного згладжування полягає у застосуванні до отриманих оцінок процедури згладжування у зворотному часі на кожному інтервалі $k = N - 1, \dots, N - 12, k = N - 2, \dots, N - 13, \dots, k = 12, \dots, 1$ [6].

Кожне уточнене значення S_k^* розраховується так [6]:

$$S_k^* = \alpha \cdot S_k + (1 - \alpha) \cdot S_{k+1}^*, \quad (6)$$

де значення $k = N - 1, \dots, N - 12, \dots, k = 12, \dots, 1$, початкові значення $S_N^* = S_N, \dots, S_{13}^* = S_{13}$.

Критерієм вибору оптимального значення параметра згладжування є мінімум значень SSE та інтегрального критерію I , що обчислюються за формулами (4) та (5), відповідно, але при цьому в якості вхідних значень при обчисленні цих характеристик використовуються значення S_k . При обчисленні уточненої оцінки S_k^* ваги оцінок S_k надходять на вхід алгоритму у зворотному часі.

Після цього в якості оцінки значення вибірки даних використовується отримане значення у середній точці з кожного інтервалу, тобто на інтервалі $k = 1, \dots, 13$ взято

значення S_7^* , на інтервалі $k = 2, \dots, 14$ взято значення S_8^* і т. д. Оцінки для перших шести та останніх шести значень вибірки даних взято як відповідні значення експоненційного середнього у зворотному часі на першому та останньому інтервалах оцінювання відповідно, тобто S_1^*, \dots, S_6^* на інтервалі $k = 1, \dots, 13$ та S_{N-5}^*, \dots, S_N^* на інтервалі $k = N - 12, \dots, N$.

Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування запропоновано застосовувати для прогнозування значень часових рядів таким чином: необхідно використовувати повну описану процедуру і розрахунки проводяться за формулами (1) та (6), при цьому значення параметра згладжування використовується таке ж, як і для всіх відомих значень, в якості початкового значення використовується останнє відоме значення.

Відновлення пропущених значень часових рядів з отриманням максимально точних значень замість пропущених є важливим для виконання подальшої обробки ряду, наприклад, для прогнозування. У статті з викорис-

танням методу ковзного двобічного експоненційного згладжування розроблено два алгоритми для відновлення пропущених значень ряду.

Алгоритм №1

Якщо перед пропуском знаходиться від 1 до 7 значень ряду, то для знаходження параметра згладжування на кожному з етапів ковзного двобічного експоненційного згладжування за критерієм мінімізації значень, що описуються рівняннями (4) та (5), запропоновано брати значення ряду, що знаходяться після пропущеного значення. Розглядається в якості граничного кількісного значення 7, тому що при застосуванні методу ковзного двобічного середнього на першому інтервалі обирається сьома оцінка. Після цього зі значенням початкового наближення, рівним середньому арифметичному серед усіх відомих значень та з використанням в якості відомого значення виміру останнього значення перед пропущеним значенням запропоновано застосовувати процедуру ковзного двобічного експоненційного згладжування, що описується рівняннями (1) та (6) відповідно.

Алгоритм №2

Якщо перед пропуском знаходиться більше семи значень ряду, то для знаходження параметра згладжування на кожному з етапів ковзного двобічного експоненційного згладжування за критерієм мінімізації значень, що описуються рівняннями (4) та (5), запропоновано брати значення ряду, що знаходяться перед пропущеним значенням. Потім зі значенням початкового наближення, рівним середньому арифметичному серед усіх відомих значень, та з використанням в якості відомого значення виміру останнього значення перед пропущеним значенням запропоновано застосовувати процедуру ковзного двобічного експоненційного згладжування, що описується рівняннями (1) та (6) відповідно.

Таким чином, метод ковзного двобічного експоненційного згладжування може бути ефективно застосованим для відновлення пропущених значень часових рядів.

У процесі виконання дослідження розроблено систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см за даними офіційного сайту Центру прогнозування космічної погоди Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США [9], що складається з чотирьох блоків: попереднього аналізу даних, відновлення закономірностей розвитку часових рядів, прогнозування часових рядів та графічного відображення отриманих результатів. Її архітектуру наведено на рис. 1.

Блок попереднього аналізу даних містить можливість завантаження даних з бази даних, з текстового файлу та безпосереднього введення даних. Також цей блок містить можливість запису отриманих результатів до бази даних та текстового файлу. У блоці попереднього аналізу даних реалізовані процедури відновлення пропущених даних за допомогою таких методів: методу ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) за алгоритмами № 1 та № 2; методу експоненційного згладжування за формулами (1) та (4)–(5).

Для оцінювання якості побудованих моделей у цілому при відновленні пропущених значень обчислюються такі статистичні характеристики: R^2 , SSE , DW за формулами (2), (3), (4) відповідно.

Метод 13-місячного ковзного середнього традиційно використовується для аналізу варіацій сонячної активності [2]. Проте цей метод може викривляти величини тривалості сонячного циклу, максимуму та мінімуму, що показано у роботі [2], оскільки він не відфільтровує високочастотні коливання з періодом менше одного року. За цим методом 13-місячне ковзне середнє з центром у k -ому місяці розраховується таким чином [2]:

$$\hat{y}(k) = \frac{1}{24} \sum_{i=-6}^5 y(k+i) + \frac{1}{24} \sum_{i=-5}^6 y(k+i). \quad (7)$$

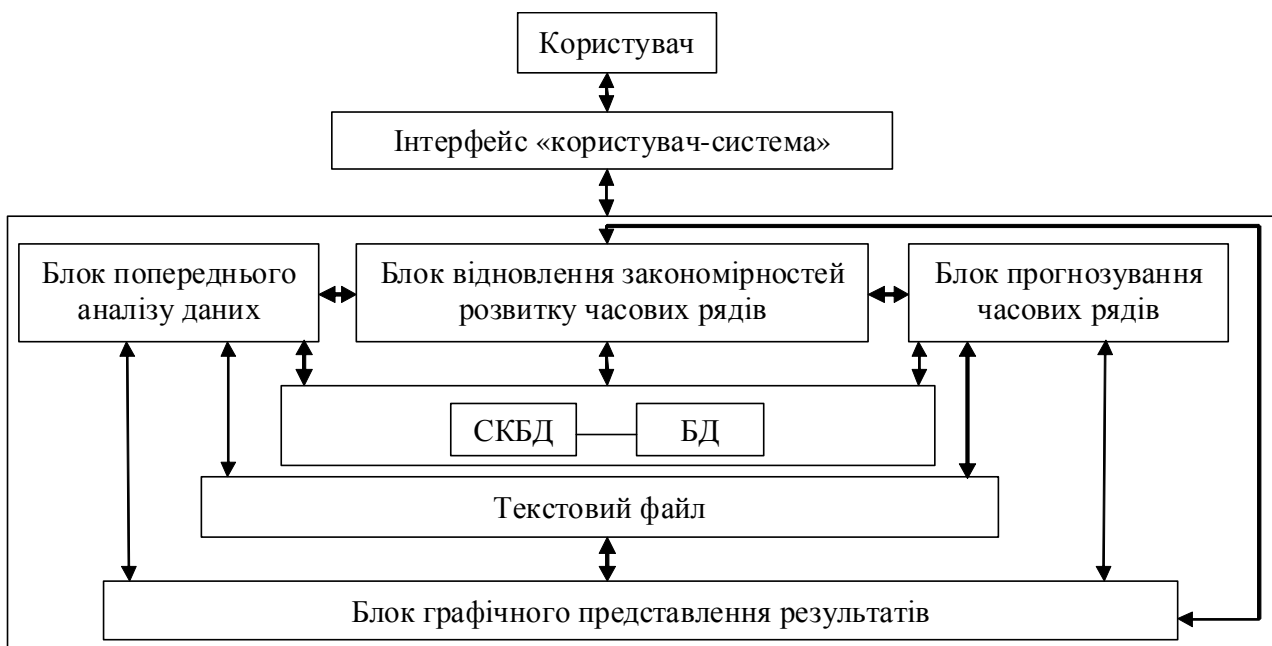


Рисунок 1 – Архітектура системи підтримки прийняття рішень

Блок відновлення закономірностей розвитку часових рядів містить можливість побудови моделі ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4)–(6) та моделі 13-місячного ковзного середнього за формулою (7). Для перевірки ефективності побудованих моделей використовується критерій близькості. Критерій близькості полягає у мінімізації значення SSE , що обчислюється за формулою (4). У системі реалізовано процедуру вибору кращого методу відновлення закономірностей за значеннями цього критерію, результати можна записати до бази даних та до текстового файлу.

Блок прогнозування часових рядів містить можливість побудови моделі ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) з використанням останнього відомого значення ряду в якості початкового значення для прогнозування. Також цей блок містить можливість побудови моделі, запропонованої у роботі [1]:

$$f(i) = \frac{a \cdot (i - i_0)^3}{\exp((i - i_0)^2 / b^2) - c}, \quad (8)$$

$$b(a) = 27,12 + 25,15 / (a \cdot 10^3)^{1/4}, \quad (9)$$

$$a(n) = 9,2 \times 10^{-4} + 8,0 \times 10^{-5} n. \quad (10)$$

Обчислюються значення прогнозних характеристик для побудованих моделей: $RMSE$, $MAPE$ та U . Характеристика $RMSE$ обчислюється так [10]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [y(i) - \hat{y}(i)]^2}. \quad (11)$$

Значення $MAPE$ розраховується наступним чином [10]:

$$MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|y(i) - \hat{y}(i)|}{|y(i)|} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Значення U обчислюється за наступною формулою [10]:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [y(i) - \hat{y}(i)]^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [y(i)]^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [\hat{y}(i)]^2}}. \quad (13)$$

Отримані результати прогнозування можуть бути записані до БД або до текстового файлу.

Блок графічного представлення результатів містить форми для побудови графіків оцінок значень ряду, отриманих за моделями, та вхідних даних, які були завантажені з певного джерела або введені ручним способом. Цей блок дає можливість наочного представлення отриманих результатів.

Таким чином, розроблена система підтримки прийняття рішень надає можливість виконувати відновлення істинних закономірностей, пропущених значень часових рядів, прогнозування часових рядів та отримувати графічне представлення результатів.

Таким чином, розроблена система підтримки прийняття рішень надає можливість виконувати відновлення істинних закономірностей, пропущених значень часових рядів, прогнозування часових рядів та отримувати графічне представлення результатів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На основі вибірки даних про місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см в одиницях виміру SFU з січня 2013 року до березня 2016 року (39 значень) за даними офіційного сайту Центру прогнозування космічної погоди Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США [9] виконується дослідження стосовно штучного створення пропусків та відновлення пропущених значень.

Відновлення пропущених значень індексу F10.7 виконується за допомогою таких методів: методу ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) за алгоритмами № 1 та № 2; методу експоненційного згладжування за формулами (1) та (4)–(5). Для оцінювання якості побудованих моделей у цілому при відновленні пропущених значень обчислюються статистичні характеристики за формулами (2), (3), (4).

Випадок № 1

У вибірці даних щодо індексу F10.7 зробимо штучний пропуск 3 значень з номерами $N = 7, 8, 9$ та виконаємо відновлення за двома описаними вище методами.

Випадок № 2

У вибірці даних щодо індексу F10.7 зробимо штучний пропуск 3 значень з номерами $N = 30, 31, 32$ та виконаємо відновлення за двома описаними вище методами.

На основі цієї ж вибірки даних про місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см відновлюються істинні значення ряду. До цих даних застосовано метод ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) та метод 13-місячного ковзного середнього за формулою (7). Для порівняння отриманих результатів використано критерій близькості, що полягає у пошуку мінімуму для виразу (4).

На основі вибірки даних про місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см в одиницях виміру SFU з січня 2013 року до грудня 2015 року (36 значень) [9] виконується прогнозування значень на наступні 3 місяці. Прогнозування виконується за допомогою методу ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) та методу, що описується формулами (8)–(10).

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У табл. 1 наведено статистичні характеристики, що показують якість побудованих моделей у цілому для випадку №1 при відновленні значень індексу F10.7, розраховані за формулами (2), (3), (4) на проміжку $N = 1, \dots, 39$ для моделей ЕЗ, КДЕЗ. У табл. 2 наведено статистичні характеристики моделей ЕЗ, КДЕЗ для випадку №2 при відновленні значень індексу F10.7.

На рис. 2 показано виміряні значення індексу F10.7 та результати, отримані за кожною з моделей при відновленні істинних значень ряду.

У табл. 3 наведено значення критерію близькості, що розраховується за формулою (4), для КДЕЗ, ТКС. У табл. 4 наведено прогнозні характеристики, розраховані за формулами (11), (12), (13) відповідно на проміжку $N = 37, \dots, 39$ для КДЕЗ та для ЕП, що описується формулами (8)–(10).

Таблиця 1 – Статистичні характеристики моделей

Статистична характеристика	ЕЗ	КДЕЗ
R^2	0,9477	0,9565
SSE	103,3539	100,1215
DW	1,3125	1,3372

Таблиця 2 – Статистичні характеристики моделей

Статистична характеристика	ЕЗ	КДЕЗ
R^2	0,9451	0,9975
SSE	274,1465	95,3291
DW	1,2370	1,9452

Таблиця 3 – Значення критеріїв близькості для моделей

Назва критерію	КДЕЗ	ТКС
SSE	2441,2	6115,3

Таблиця 4 – Значення прогнозних характеристик для моделей

Прогнозна характеристика	ЕП	КДЕЗ
$RMSE$	20,1355	18,1569
$MAPE$	8,8084	7,6241
U	0,0065	0,0051

6 ОБГОВОРЕННЯ

У статті виконано відновлення пропущених значень часових рядів, відновлення істинних закономірностей та прогнозування часових рядів. На кожному етапі відбувається порівняння з вже відомими методами, що застосовуються для сонячних даних.

За значеннями статистичних характеристик, наведених у табл. 1 та табл. 2, можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу порівняно з методом експоненційного згладжування при відновленні пропущених значень індексу F10.7. Тому можна стверджувати, що запропонований метод є ефективним для відновлення пропущених значень часових рядів за різних початкових умов.

Дж. М. Херст у роботі [11] розглянув вплив ширини вікна на зміну характеристик точності ковзного середнього і показав, що ковзне середнє може значно викривити процес, знизити короткочасні коливання, у той час, як коливання, період яких значно перевищує ширину вікна, відновлюються майже без викривлень. На рис. 2 показано, що на часовому інтервалі [10, 25] для моделі, побудованої за методом 13-місячного ковзного середнього, відбувається суттєве викривлення процесу: на часових інтервалах [10, 15] та [20, 25] коливання обнуляються, на інтервалі [15, 20] відбувається обергання коливань індексу F10.7. У той же час, ковзне двобічне експоненційне

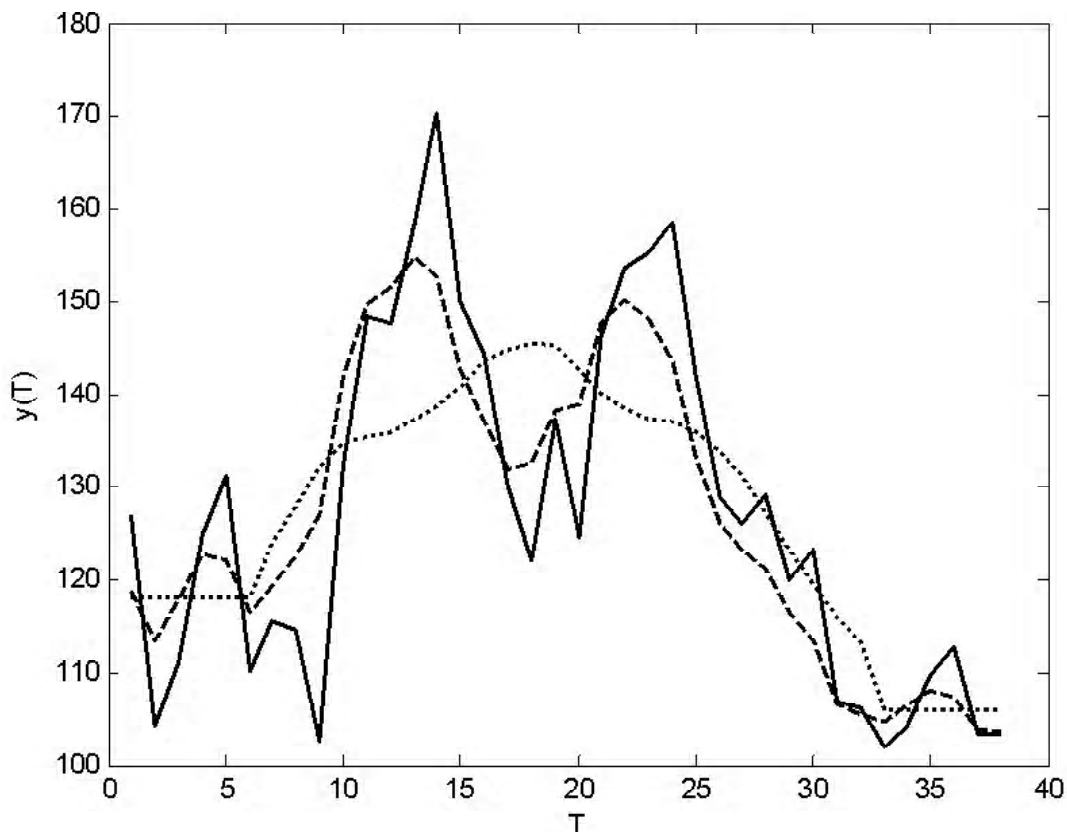


Рисунок 2 – Значення $y(i)$ та $\hat{y}(i)$ для вибірки значень індексу F10.7: — виміряні значення $y(i)$; --- оцінки $\hat{y}(i)$, отримані за методом ковзного двобічного експоненційного згладжування; ... — оцінки $\hat{y}(i)$, отримані за методом 13-місячного ковзного середнього

згладжування не викривляє коливання під час відновлення істинних закономірностей індексу F10.7.

Застосовуючи критерій близькості до значень, наведених у табл. 3, можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу у порівнянні з методом 13-місячного ковзного середнього при відновленні істинних закономірностей індексу F10.7.

За значеннями прогнозних характеристик у табл. 4 можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу порівняно із традиційним експоненційним підходом при прогнозуванні.

ВИСНОВКИ

У статті з використанням методу ковзного двобічного експоненційного згладжування розроблено два алгоритми для відновлення пропущених значень часового ряду за різних початкових умов. Ці алгоритми застосовано для відновлення значень індексу F10.7 та виконано порівняння з методом експоненційного згладжування. Отримані результати показують перевагу розробленого методу над методом експоненційного згладжування.

Запропоновано інтегральний критерій для оцінювання адекватності побудованих моделей при відновленні істинних закономірностей часових рядів. Створено критерій близькості для оцінювання ефективності відновлення істинних закономірностей часових рядів. Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування застосовано для відновлення істинних закономірностей значень індексу F10.7 та виконано порівняння з методом 13-місячного ковзного середнього. Показано, що ковзне двобічне експоненційне згладжування не викривляє коливання під час відновлення істинних закономірностей часового ряду. Застосовуючи критерій близькості до отриманих значень можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу у порівнянні з методом 13-місячного ковзного середнього.

Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування застосовано для прогнозування значень індексу F10.7 та виконано порівняння з традиційним експоненційним підходом. За значеннями прогнозних характеристик метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу при прогнозуванні.

У процесі виконання дослідження розроблено систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см. У цій системі підтримки прийняття рішень застосовано розроблені алгоритми відновлення пропущених значень часових рядів за допомогою методу ковзного двобічного експоненційного згладжування, є можливість відновлення істинних закономірностей часових рядів за допомогою цього методу та застосовано метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для прогнозування часових рядів.

Таким чином, у роботі розроблено новий метод для аналізу та прогнозування сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см. Запропоновано систему підтримки прийняття рішень, в якій реалізовано створені методи

та яка дає можливість виконувати автоматизований аналіз і прогнозування сонячних даних.

Перспективами подальших досліджень є створення нових вдосконалених методів для аналізу та прогнозування сонячних даних, створення сучасних ефективних систем підтримки прийняття рішень для забезпечення ще більш швидкої та точної обробки часових рядів.

ПОДЯКИ

Роботу виконано у межах зареєстрованої наукової тематики кафедри Математичних методів системного аналізу Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», зокрема «Розробка методології системного аналізу, моделювання та оцінювання фінансових ризиків» (номер держреєстрації 0115U000356).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Hathaway D. H. The shape of the sunspot cycle / D. H. Hathaway, R. M. Wilson, E. J. Reichmann // *Solar Physics*. – 1994. – Vol. 151, No. 1. – P. 177-190. DOI: 10.1007/BF00654090.
- Hathaway D. H. A synthesis of solar cycle prediction techniques / D. H. Hathaway, R. M. Wilson, E. J. Reichmann // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104, No. A10. – P. 22375–22388. DOI: 10.1029/1999JA900313.
- Salvador R. J. A mathematical model of the sunspot cycle for the past 1000 yr / R. J. Salvador // *Pattern recognition in physics*. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 117–122. DOI:10.5194/prp-1-117-2013.
- Киян М. А. Применения алгоритмов сглаживания для предварительной обработки статистических солнечных данных / М. А. Киян, Е. В. Фабричева, В. Н. Подладчиков // *Системні дослідження та інформаційні технології*. – 2014. – № 2. – С. 68–76.
- Noble P. L. A Bayesian Approach to Forecasting Solar Cycles Using a Fokker–Planck Equation / P. L. Noble, M. S. Wheatland // *Solar Physics*. – 2012. – Vol. 276, No. 1. – P. 363–381. DOI: 10.1007/s11207-011-9884-5.
- Братусь О. В. Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення закономірностей динамічних процесів / О. В. Братусь, В. М. Подладчиков, Т. В. Подладчикова // *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2016: Одинадцята міжнародна науково-практична конференція, Жукин, 27 червня–1 липня 2016 р.: тези доповідей*. – Чернівці: ЧНТУ, 2016. – С. 28-31.
- Pankratova N. D. Quasioptimal smoothing as a tool for the analysis of complex semistructured dynamic processes / N. D. Pankratova, T. V. Podladchikova, D. G. Strelkov // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2009. – Vol. 45, No. 6. – P. 916-923. DOI: 10.1007/s10559-009-9176-3.
- Tsay R. S. *Analysis of Financial Time Series* / R. S. Tsay. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2010. – 715 p.
- Official site of the Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration of the USA [Electronic resource] – Available at: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/weekly/RecentIndices.txt>
- Бідюк П. І. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень / П. І. Бідюк, Л. О. Коршевнюк. – Київ : ННК «ПСА» НТУУ «КПІ», 2010. – 340 с.
- Hurst J. M. *The Profit Magic of Stock Transaction Timing* / J. M. Hurst. – Englewood Cliffs : Prentice-Hall, Inc., 1970 – 224 p.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2016.

Після доробки 10.02.2017.

Братусь Е. В.

Соискатель научной степени кандидата технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С АДАПТИВНЫМИ БЛОКАМИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ РАДИОФЛЮКСОВ

Актуальность. Создание новых методов для восстановления и прогнозирования солнечных данных, новых систем поддержки принятия решений для обработки солнечных радиофлюксов при длине волны 10,7 см являются актуальными задачами, потому что это даст возможность выполнять правильно и автоматизировано предварительную обработку данных и дальнейшее прогнозирование.

Цель. Разработать метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания для восстановления пропущенных значений и прогнозирования временных рядов; создать интегральный критерий адекватности модели и критерий близости для применения при восстановлении истинных закономерностей развития временных рядов; создать систему поддержки принятия решений для анализа и прогнозирования солнечных радиофлюксов при длине волны 10,7 см с использованием разработанных методов; применить разработанные методы для реальных данных и сравнить с традиционными методами.

Метод. Для достижения поставленной цели использованы такие методы: разработанный метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания; метод экспоненциального сглаживания; метод 13-месячного скользящего среднего; экспоненциальный подход, предложенный Хетеузем, Уилсоном и Рейхманом.

Результаты. Разработан метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания для восстановления пропущенных значений временных рядов и для прогнозирования временных рядов. Созданы интегральный критерий адекватности модели и критерий близости. Разработана система поддержки принятия решений для анализа и прогнозирования солнечных данных. Выполнено практическое применение разработанных методов для реальных данных и сравнение с традиционными методами.

Выводы. Разработанный метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания показывает преимущество в сравнении со всеми традиционными методами при восстановлении пропущенных значений, истинных закономерностей и прогнозировании солнечных радиофлюксов.

Ключевые слова: метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания, восстановление пропущенных значений временных рядов, восстановление истинных закономерностей временных рядов, система поддержки принятия решений, интегральный критерий адекватности модели, критерий близости, солнечные радиофлюксы при длине волны 10,7 см.

Bratus O. V.

Applicant for PhD degree of technical sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

DECISION MAKING SUPPORT SYSTEM WITH ADAPTIVE UNITS OF RESTORING AND FORECASTING OF SOLAR RADIO FLUXES

Context. Creation of new methods for solar data restoring and forecasting, new decision making support systems for processing of solar radio fluxes at a wavelength of 10.7 cm are topical problems, because it will give an opportunity to perform preliminary data processing and further forecasting correctly and automated.

Objective. To develop moving two-sided exponential smoothing method for restoring of missed values and forecasting of time series; to create integral criterion of model adequacy and the proximity criterion for using for restoring of the true regularities of time series evolution; to develop decision making support system for analysis and forecasting of solar radio fluxes at a wavelength of 10.7 cm with using of developed methods; to apply developed methods for real data and to compare with traditional methods.

Method. For achieving of formulated goal the following methods were used: developed moving two-sided exponential smoothing method; exponential smoothing method; 13-month running mean method; exponential approach, which was suggested by Hathaway, Wilson and Reichmann.

Results. Moving two-sided exponential smoothing method for restoring of missed values of time series and for forecasting of time series was developed. The integral criterion of model adequacy and the proximity criterion were created. Decision making support system for analysis and forecasting of solar data was developed. Practical application of developed methods for real data and comparison with traditional methods were performed.

Conclusions. Developed moving two-sided exponential smoothing method is shown superiority in comparison with all traditional methods in the restoring of missed values, true regularities and forecasting of solar radio fluxes.

Keywords: moving two-sided exponential smoothing method, restoring of missed time series values, restoring of the true regularities of time series, decision making support system, integral criterion of model adequacy, proximity criterion, solar radio fluxes at a wavelength of 10.7 cm.

REFERENCES

1. Hathaway D. H., Wilson R. M., Reichmann E. J. The shape of the sunspot cycle, *Solar Physics*, 1994, Vol. 151, No. 1, pp. 177–190. DOI: 10.1007/BF00654090.
2. Hathaway D. H., Wilson R. M., Reichmann E. J. A synthesis of solar cycle prediction techniques, *Journal of Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. A10, pp. 22375–22388. DOI: 10.1029/1999JA900313.
3. Salvador R. J. A mathematical model of the sunspot cycle for the past 1000 yr, *Pattern recognition in physics*, 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 117–122. DOI: 10.5194/prp-1-117-2013.
4. Kiyani M. A., Fabrichева O. V., Podladchikov V. M. Primeneniya algoritmov sglazhivaniya dlja predvaritel'noj obrabotki statisticheskikh solnechnykh dannykh, *Systemni doslidzhennja ta informacijni tehnologii*, No. 2, Kyiv, 2014, pp. 68–76 [in Russian].
5. Noble P. L., Wheatland M. S. A Bayesian Approach to Forecasting Solar Cycles Using a Fokker–Planck Equation, *Solar Physics*, 2012, Vol. 276, No. 1, pp. 363–381. DOI: 10.1007/s11207-011-9884-5.
6. Bratus O. V., Podladchikov V. M., Podladchikova T. V. Metod kovznogo dvobichnogo eksponencijnogo zgladzhuvannja dlja vidnovlennja zakonmirstej dynamichnyh procesiv, *Matematychna ta imitacijne modeljuvannja system. MODS 2016: Odyndacjata mizhnarodna naukovo-praktychna konferencija: tezy dopovidej*. Chernihiv, Ukraine: CNUT, 2016, pp. 28–31 [in Ukrainian].
7. Pankratova N. D., Podladchikova T. V., Strelkov D. G., Quasioptimal smoothing as a tool for the analysis of complex semistructured dynamic processes, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2009, Vol. 45, No. 6, pp. 916–923. DOI: 10.1007/s10559-009-9176-3.
8. Tsay R. S. Analysis of Financial Time Series. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010, 715 p.
9. Official site of the Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration of the USA [Electronic resource]. Available at: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/weekly/RecentIndices.txt>
10. Biduyk P. I., Korshevnyuk L. O. Proektuvannja komp'juternykh informacijnyh system pidtrymky pryjnattja rishen'. Kyiv, Ukraine: ESC "IASA" NTUU "KPI", 2010, 340 p. [in Ukrainian].
11. Hurst J. M. The Profit Magic of Stock Transaction Timing. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1970, 224 p.

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ ДАННЫХ С ВЫБРОСАМИ

Актуальность. Применение традиционных методов численного дифференцирования к зашумленным данным с выбросами приводит к значительным ошибкам. Объектом данного исследования является процесс численного дифференцирования таких данных.

Цель работы – разработка метода численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами, который позволяет получить гладкую аппроксимацию их первой производной и, соответственно, гладкую аппроксимацию самих данных.

Метод. Предложенный метод численного дифференцирования основан на решении задачи минимизации сглаживающего функционала, который построен на критерии минимума протяженности невязки решения и ограничении энергии первой производной решения. Критерий минимума протяженности задает основную часть функционала и обеспечивает его устойчивое поведение по отношению к аддитивному шуму и выбросам. Ограничение задает стабилизирующую часть функционала и обеспечивает гладкость решения задачи. Вклад указанных частей регулируется с помощью параметра регуляризации. Поскольку основная часть сглаживающего функционала не является выпуклой, то задача его минимизации является задачей нелинейного невыпуклого программирования. Для численного решения этой задачи используется метод сопряженных градиентов, в котором величина шага вдоль направления спуска определяется на множестве пробных шагов. Эти шаги минимизируют отдельные компоненты основной и стабилизирующей частей сглаживающего функционала, что позволяет переходить из одного локального минимума функционала в другой более глубокий локальный минимум.

Результаты. Моделирование задачи численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами и обработка экспериментальных данных, которые представляли собой спектры фотолуминесценции при наличии в их составе узких линейчатых спектральных составляющих, подтвердили эффективность предложенного метода.

Выводы. Предложенный метод может быть использован для численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами. При этом он позволяет получить гладкую аппроксимацию первой производной исходных данных и гладкую аппроксимацию самих исходных данных. Данный метод можно обобщить на случай негладкого решения путем построения стабилизирующей части функционала на основе ограничения полной вариации решения.

Ключевые слова: численное дифференцирование, гладкая аппроксимация, критерий минимума протяженности.

НОМЕНКЛАТУРА

A – оператор (матрица) антидифференцирования;

D – оператор (матрица) дифференцирования;

E – функционал;

N – количество дискретных отсчетов;

a_{jn} – элемент матрицы **A**;

a_{kj}^T – элемент матрицы \mathbf{A}^T , которая получена транспонированием матрицы **A**;

e – вспомогательный вектор;

e_j – элемент вектора **e**;

d_{jn} – элемент матрицы **D**;

$\mathbf{grad}^{(t)}$ – вектор градиента на t -ой итерации;

$h^{(t)}$ – шаг вдоль направления спуска на t -ой итерации;

и;

$\mathbf{p}^{(t)}$ – вектор направления спуска на t -ой итерации;

q – свободный параметр, который отвечает за степень сглаживания значений;

t – номер итерации;

u – вектор искомого решения;

$\mathbf{u}^{(t)}$ – вектор решения на t -ой итерации;

\mathbf{u}' – вектор первой производной искомого решения;

u_n – элемент вектора **u**;

x – независимая переменная;

\hat{x} – точка нормировки функции $\psi^{(\alpha, \beta, q)}(x)$ на единицу;

© Вовк С. М., 2017

DOI 10.15588/1607-3274-2017-3-5

u – вектор исходных зашумленных данных с выбросами;

α – свободный параметр, который отвечает за величину сглаживания значений;

β – свободный параметр, который отвечает за форму закона распределения

γ – параметр регуляризации;

Φ – одномерная целевая функция;

Ψ – неквадратичный функционал, который реализует понятие «протяженность»;

Ψ – стоимостная функция для построения функционала Ψ ;

$\|\dots\|^2$ – квадрат евклидовой нормы;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

Операция дифференцирования является мощным математическим инструментом анализа данных. Она составляет основу многих современных методов спектроскопии [1], астрофизики [2], обработки изображений [3] и мониторинга движения объектов [4]. Поскольку операция дифференцирования является неустойчивой и, следовательно, напрямую не применимой на практике из-за наличия шума и дискретности данных, то были разработаны различные методы численного дифференцирования [5]. При этом одни из них (полиномиальная аппроксимация методом наименьших квадратов, регуляризация Тихонова, сглаживание сплайнами) предполагают гладкое решение [5], а другие (метод регуляриза-

ции на основе ограничения полной вариации решения) предполагают даже разрывное решение [6]. Однако указанные методы плохо работают в случае, когда исходные данные искажены не только шумом, но и выбросами [7]. Это проявляется в виде ошибочных осцилляций решения из-за расплывания выбросов и является следствием того, что функционал невязки решения формируется на основе квадратичной метрики в условиях равноправности вкладов зашумленных элементов данных и выбросов. Для устранения этого недостатка такое равноправие должно быть нарушено.

Целью данной работы является разработка метода численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами для получения гладкой аппроксимации их первой производной и, соответственно, гладкой аппроксимации самих данных. Предложенная постановка задачи заключается в минимизации сглаживающего функционала, который состоит из основной и стабилизирующей частей, а вклад этих частей регулируется с помощью параметра регуляризации. При этом основная часть функционала построена на базе критерия минимума протяженности [8]–[10], который применяется к невязке решения соответствующего интегрального уравнения Вольтерры и который обеспечивает уменьшение вклада выбросов. Стабилизирующая часть функционала построена на основе ограничения квадрата евклидовой нормы первой производной решения и обеспечивает получение гладкого решения задачи. Далее в работе приводится математическая постановка решаемой задачи как в общем, так и в развернутом виде, а также численный метод ее решения на основе метода сопряженных градиентов. В заключительной части работы приводятся результаты численного моделирования и обработки экспериментальных данных.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть функция $g(x)$ непрерывна в интервале $[a, b]$ и имеет производную

$$u(x) = g'(x) = \frac{dg(x)}{dx}; \quad x \in [a, b], \quad (1)$$

причем $g(a)$ задано. Тогда задачу определения производной (1) можно сформулировать как задачу решения линейного интегрального уравнения Вольтерры первого рода [5]

$$\mathbf{A}u(x) = \int_a^x u(z)dz = \hat{g}(x); \quad x \in [a, b], \quad (2)$$

где $\hat{g}(x) = g(x) - g(a)$ [6]. Если $u(x)$ является непрерывной функцией, то $g(x)$ является гладкой функцией. Далее будем считать, что $u(x)$ также является гладкой функцией, полагая существование производной $u'(x)$.

Пусть гладкая функция $f(x)$ аппроксимирует функцию $g(x)$. Тогда, если $u(x)$ найдено, то $f(x)$ можно получить с помощью формулы: $f(x) = g(a) + \int_a^x u(z)dz$.

Пусть значения функции $g(x)$ в N дискретных точках $a \leq x_1 \leq \dots \leq x_N \leq b$ искажены значениями ξ_i адди-

тивного шума с выбросами, образуя числовой вектор исходных данных \mathbf{y} с элементами

$$y_i = g(x_i) + \xi_i; \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Тогда предлагаемая постановка задачи численного дифференцирования имеет следующий общий вид:

$$\arg \min_{\mathbf{u}} \left\{ \Psi[\mathbf{A}\mathbf{u} - \mathbf{y}] + \gamma \|\mathbf{u}'\|^2 \right\}, \quad (4)$$

где $\mathbf{u}' = \mathbf{D}\mathbf{u}$, а неквадратичный функционал Ψ реализует концепцию «протяженность» на основе стоимостной функции [10]

$$\psi^{(\alpha, \beta, q)}(x) = k^{(\alpha, \beta, q)} [(1 + |x|^q / \alpha^q)^{\beta/q} - 1]; \quad |x| < \infty, \quad (5)$$

где $\alpha > 0$; $-\infty < \beta \leq 1$; $0 < q < \infty$; $\beta < q$;

$$k^{(\alpha, \beta, q)} = 1 / [(1 + |\hat{x}|^q / \alpha^q)^{\beta/q} - 1]; \quad \psi^{(\alpha, \beta, q)}(\hat{x}) = 1;$$

$\hat{x} \neq 0$. Для дискретного случая $\Psi[\mathbf{e}] = \sum_{j=1}^N \psi^{(\alpha, \beta, q)}(e_j)$.

Подставляя это выражение вместе с (5) в (4) и задавая линейные операторы \mathbf{A} и \mathbf{D} с помощью соответствующих матриц, получим постановку задачи (4) в развернутом виде:

$$\arg \min_{u_1, \dots, u_N} \left\{ k^{(\alpha, \beta, q)} \sum_{j=1}^N [(1 + |\sum_{n=1}^N a_{jn}u_n - y_j|^q / \alpha^q)^{\beta/q} - 1] + \gamma \sum_{j=1}^N |\sum_{n=1}^N d_{jn}u_n|^2 \right\}. \quad (6)$$

Подчеркнем, что для $0 < \beta \leq 1$ имеем $k^{(\alpha, \beta, q)} > 0$, а для $-\infty < \beta < 0$ имеем $k^{(\alpha, \beta, q)} < 0$. Однако для $\beta = 0$ запись задачи (6) и коэффициента $k^{(\alpha, \beta, q)}$ преобразуется в запись на основе логарифмов [10]. Поэтому для практического использования задачу (6) следует переписать в виде двух задач оптимизации. Так, отбрасывая несущественные коэффициенты, для случая $\beta \neq 0$ из (6) имеем задачу

$$\arg \min_{u_1, \dots, u_N} \left\{ \text{sgn}(\beta) \sum_{j=1}^N [(1 + |\sum_{n=1}^N a_{jn}u_n - y_j|^q / \alpha^q)^{\beta/q}] + \gamma_1 \sum_{j=1}^N |\sum_{n=1}^N d_{jn}u_n|^2 \right\}, \quad (7)$$

где $\gamma_1 = \gamma |(1 + |\hat{x}|^q / \alpha^q)^{\beta/q} - 1|$ и где $\text{sgn}(\beta) = 1$ для $0 < \beta \leq 1$ и $\text{sgn}(\beta) = -1$ для $-\infty < \beta < 0$. Для случая $\beta = 0$ из (6) путем предельного перехода по $\beta \rightarrow 0$ получаем задачу

$$\arg \min_{u_1, \dots, u_N} \left\{ \sum_{j=1}^N \ln[1 + |\sum_{n=1}^N a_{jn}u_n - y_j|^q / \alpha^q] + \gamma_2 \sum_{j=1}^N |\sum_{n=1}^N d_{jn}u_n|^2 \right\}, \quad (8)$$

где $\gamma_2 = \gamma \ln(1 + |\hat{x}|^q / \alpha^q)$. Таким образом, (7) и (8) есть частные случаи (6).

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Основу численного дифференцирования составляют методы аппроксимации [5]. Так, если в окрестности точки x функция $g(x)$ приближается некоторой другой функцией $f(x)$, для которой производная $f'(x)$ в точке x легко вычисляется, то полагают $g'(x) \approx f'(x)$. Наиболее просто такое приближение реализуется с помощью полиномиальной интерполяции. Однако при малой величине шага соответствующие формулы численного дифференцирования становятся плохо обусловленными и при наличии шума в исходных данных приводят к некорректным результатам [5]. Хотя выбор оптимального значения шага решает проблему устойчивости этих вычислений [4], однако при этом остаются следующие недостатки: 1) значения исходной функции могут быть не доступны для всех желаемых значений шага; 2) реализуется кусочно-полиномиальная интерполяция, которая не обеспечивает гладкость решения в точках стыковки полиномов.

Современными методами численного дифференцирования зашумленных данных являются [5]: 1) полиномиальная аппроксимация на базе метода наименьших квадратов; 2) регуляризация Тихонова; 3) сглаживание сплайнами; 4) свертка со сглаживающим ядром Фридриха (Friedrichs mollifier); 5) вариационный метод Ноулеса и Уоллеса (Knowles and Wallace); 6) регуляризация на основе ограничения полной вариации решения (total variation regularization). Сравнение первых пяти методов показало преимущество метода регуляризации Тихонова, который заключается в минимизации выпуклого функционала [5]

$$E(\mathbf{u}) = \|\mathbf{A}\mathbf{u} - \mathbf{y}\|^2 + \gamma \|\mathbf{D}_k \mathbf{u}\|^2, \quad (9)$$

с дифференциальным оператором \mathbf{D}_k порядка k [5]. Важным является то, что задача (9) имеет аналитическое решение [5]

$$\mathbf{u} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \gamma \mathbf{D}_k^T \mathbf{D}_k)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y}. \quad (10)$$

Метод регуляризации на основе ограничения полной вариации решения предназначен для случаев, когда искомая производная имеет разрывы. Данный метод заключается в минимизации функционала [5]

$$E(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{A}\mathbf{u} - \mathbf{y}\|^2 + \gamma \sum_{j=1}^{n-1} \sqrt{(u_{j+1} - u_j)^2 + \varepsilon}, \quad (11)$$

в котором малая положительная величина ε необходима для дифференцируемости (11) при $\mathbf{u}' = 0$ [6]. Задача (11) также сформулирована в [2], где указано, что путем изменения ε стабилизирующая часть функционала (11) меняется от L_1 -нормы производной решения \mathbf{u}' , что заставляет решение \mathbf{u} , быть кусочно-постоянным, до L_2 -нормы \mathbf{u}' , что заставляет \mathbf{u} быть гладким. С геометрической точки зрения, стабилизирующая часть функционала (11) задает длину кривой, которая описывает график функции $u(x)/\sqrt{\varepsilon}$. Минимизация длины этой кривой приводит к ее спрямлению и уменьшает осцилляции в решении.

Однако методы, которые основаны на решении задачи (2) в рамках квадратичных метрик, дают плохие результаты для случая, когда исходные данные искажены выбросами. Это обусловлено расплыванием выбросов из-за их сглаживания, причем чем больше количество выбросов и чем больше их амплитуды, тем хуже результат численного дифференцирования. Для подавления выбросов обычно применяют метод медианной фильтрации [4]. Однако более эффективными методами обработки зашумленных данных с выбросами являются методы «мирадной» [11] и «меридианной» [12] фильтрации. Эти методы разработаны для фильтрации шумов импульсного типа с «тяжелыми» хвостами их закона распределения, а именно шума с законом распределения Коши и шума с «меридианным» законом распределения. В [10] дано обобщение этих методов и предложен общий подход к построению методов фильтрации, который основан на требовании минимизировать временную протяженность (длительность) получаемого решения. Эффективность этого подхода достигается путем настройки его трех свободных параметров, которые связаны с масштабом (дисперсией) шума, величиной «тяжести» хвостов и формой закона распределения. При этом возможна настройка как на обычный шум с законом распределения Гаусса или Лапласа, так и на шум импульсного типа с законом обобщенного распределения Коши, а также на комбинацию этих шумов. Данный подход кладется в основу предлагаемого метода численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Далее рассмотрим только задачу (8) по следующим причинам: 1) простота записи из-за отсутствия свободного параметра β ; 2) рассмотрение задачи (7) выполняется аналогично.

В общем случае задача (8) имеет только численное решение. Чтобы получить его, используем метод сопряженных градиентов, который задан с помощью следующей вычислительной схемы:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{(t+1)} &= \mathbf{u}^{(t)} + h^{(t)} \mathbf{p}^{(t)}, \quad t \geq 0; \\ \mathbf{p}^{(0)} &= -\mathbf{grad}^{(0)}; \quad t = 0; \\ \mathbf{p}^{(t)} &= -\mathbf{grad}^{(t)} + b^{(t-1)} \mathbf{p}^{(t-1)}; \quad t \geq 1; \\ b^{(t-1)} &= \|\mathbf{grad}^{(t)}\|^2 / \|\mathbf{grad}^{(t-1)}\|^2; \\ h^{(t)} &= \arg \min_{h \geq 0} \Phi(\mathbf{u}^{(t)} + h \mathbf{p}^{(t)}). \end{aligned} \quad (12)$$

В (12) одномерная целевая функция $\Phi(\mathbf{u}^{(t)} + h \mathbf{p}^{(t)})$ зависит от h и получается подстановкой элементов вектора $\mathbf{u}^{(t)} + h \mathbf{p}^{(t)}$ в выражение, записанное в фигурных скобках задачи (8). Далее рассмотрим вопросы построения вектора градиента и минимизации одномерной целевой функции для случая $q = 2$, который обеспечивает оптимальную (в смысле критерия максимального правдоподобия) обработку данных, искаженных шумом Коши [10].

Из необходимого условия минимума (8) для случая $q = 2$ получаем систему из N нелинейных уравнений

$$\sum_{j=1}^N a_{kj}^T \frac{v_j}{v_j^2 + \alpha^2} + \gamma_2 \sum_{n=1}^N \hat{d}_{kn} u_n = 0; \quad k = 1, \dots, N, \quad (13)$$

где $v_j = (\sum_{n=1}^N a_{jn} u_n - y_j)$ задает элемент вектора невязки

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{u} - \mathbf{y}, \quad \hat{d}_{kj} = \sum_{n=1}^N d_{kn}^T d_{nj}$$

$\mathbf{D}^T \mathbf{D}$. Левая часть (13) представляет собой k -ый элемент вектора градиента.

Решение одномерной задачи: $h^{(t)} = \arg \min_h \Phi(\mathbf{u}^{(t)} + h\mathbf{p}^{(t)})$ заключается в выборе вели-

чины шага h вдоль направления спуска $\mathbf{p}^{(t)}$. Так как Φ не является унимодальной функцией, то для решения этой задачи используем метод оптимального пассивного поиска на множестве «пробных шагов». Это множество включает шаги с такими условными названиями: «шаги, которые обнуляют компоненты невязки решения», «шаги, которые обнуляют компоненты стабилизирующей части функционала» и «шаг по методу Ньютона».

Шаги, которые обнуляют компоненты невязки решения, определяются формулой

$$h_j^{[1]} = - \left(\sum_{n=1}^N a_{jn} u_n^{(t)} - y_j \right) / \left(\sum_{n=1}^N a_{jn} p_n^{(t)} \right); \quad j = 1, \dots, N, \quad (14)$$

т.е. на каждой итерации существует N таких шагов.

Шаги, которые обнуляют компоненты стабилизирующей части функционала, получаются из условия равенства нулю этих компонент. Рассматривая стабилизирующую часть функционала в (8) как скалярное произведение: $\|\mathbf{u}'\|^2 = (\mathbf{D}\mathbf{u}, \mathbf{D}\mathbf{u}) = (\mathbf{D}^T \mathbf{D}\mathbf{u}, \mathbf{u})$, из условия равенства нулю каждой из компонент скалярного произведения $(\mathbf{D}^T \mathbf{D}(\mathbf{u}^{(t)} + h\mathbf{p}^{(t)}), (\mathbf{u}^{(t)} + h\mathbf{p}^{(t)}))$ получаем два набора из N шагов:

$$h_n^{[2]} = -u_n^{(t)} / p_n^{(t)}; \quad n = 1, \dots, N, \quad (15)$$

$$h_n^{[3]} = - \sum_{j=1}^N \hat{d}_{nj} u_j^{(t)} / \sum_{j=1}^N \hat{d}_{nj} p_j^{(t)}; \quad n = 1, \dots, N. \quad (16)$$

Шаг, который отвечает методу Ньютона, используется при условии, что решение находится в окрестности некоторого локального минимума. Этот шаг задается формулой

$$h^{[4]} = -(\mathbf{g}^{(t)}, \mathbf{p}^{(t)}) / ([\mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \gamma_2 \mathbf{D}^T \mathbf{D}] \mathbf{p}^{(t)}, \mathbf{p}^{(t)}), \quad (17)$$

где $\mathbf{Q} = \text{diag} \left(\dots, \frac{(\alpha^2 - [v_j^{(t)}]^2)}{(\alpha^2 + [v_j^{(t)}]^2)^2}, \dots \right)$ есть $N \times N$ диаго-

нальная матрица, зависящая от α^2 и от вектора невязки

$\mathbf{v}^{(t)}$ на t -ой итерации. Всего существует один такой шаг на t -ой итерации.

Пробные шаги не являются оптимальными, но они являются квазиоптимальными, так как приводят к уменьшению значения функции Φ . Алгоритм поиска на множестве пробных шагов следующий. Сначала по формулам (14)–(17) генерируются значения пробных шагов.

Затем в качестве $h^{(t)}$ выбирается тот шаг, для которого Φ принимает наименьшее значение. Но если шаг $h^{[4]}$, который отвечает методу Ньютона, оказывается наилучшим N раз подряд, то выполняется обновление направления спуска по формуле: $\mathbf{p}^{(t)} = -\mathbf{grad}^{(t)}$. Если число выполненных итераций равно N , то также выполняется обновление направление спуска. Если ни один из пробных шагов не приводит к уменьшению значения Φ , то $h^{(t)}$ полагается равным нулю и выполняется обновление направление спуска. Если $h^{(t)}$ равно нулю дважды подряд, то итерационный процесс метода сопряженных градиентов завершается.

Матрицы \mathbf{A} и \mathbf{D} имеют следующее строение:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 1 & 1 & 0 & 0 \dots \\ 1 & 1 & 1 & 0 \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \dots \\ 0 & -1 & 1 & 0 \dots \\ 0 & 0 & -1 & 1 \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}.$$

Матрица \mathbf{A} имеет размер $N \times N$, а матрица \mathbf{D} имеет размер $N \times (N-1)$. Матрицы $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ и $\mathbf{D}^T \mathbf{D}$ имеют размер $N \times N$. Когда решение \mathbf{u} получено, то возможно

построить вектор \mathbf{f} с элементами $f_i = g(a) + \sum_{k=1}^i u_k$, ко-

торый аппроксимирует вектор исходных данных \mathbf{y} .

Решение задачи численного дифференцирования чувствительно к выбору значения $g(a)$. Если $g(a)$ априорно не задано, то часто полагают $g(a) = y_1$ [6]. Однако такой выбор даст плохой результат для случая, когда первый отсчет y_1 содержит выброс. Для устранения этого недостатка можно решить задачу в «обратном направлении» следования дискретных отсчетов y_i , предполагая отсутствие выброса в последнем отсчете y_N . Тогда в полученном решении \mathbf{u} потребуется обратить направление следования элементов и умножить их на -1 . Но если выбросы есть и в первом, и в последнем отсчетах, то следует сделать два подобных прохода. При этом сначала задача решается в «обратном направлении». В результате выброс в y_N будет размыт, но выброс в y_1 будет подавлен. Далее получаем вектор \mathbf{f} (его элементы будут следовать в «обратном направлении»), полагаем $y_1 = f_N$ и решаем задачу в «прямом направлении». Такой алгоритм условно назовем двухпроходовым алгоритмом.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для демонстрации возможностей предложенного метода были выполнены моделирование задачи численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами и обработка экспериментальных данных со спектрами фотолюминесценции (ФЛ). Важная цель моделирования состояла в том, чтобы имитировать шумовую обстановку, характерную для измерений спектра ФЛ, и настроить параметры метода на нее. При этом параметры $\beta = 0$ и $q = 2$ были фиксированы, а настройке подлежали только параметры α и γ_2 .

Спектр ФЛ моделировался в диапазоне длин волн 380–720 нм с шагом $\Delta\lambda = 0,5$ нм, что отвечало $N = 681$ дискретным отсчетам $x_i = i \cdot \Delta\lambda$; $i = 1, \dots, N$, причем $a = x_1$ и $b = x_N$. Модель спектра задавалась суммой пяти гауссовых функций с параметрами: $A_1 = 3000$, $m_1 = 410\Delta\lambda$, $\sigma_1 = 40\Delta\lambda$; $A_2 = 700$, $m_2 = 310\Delta\lambda$, $\sigma_2 = 40\Delta\lambda$; $A_3 = 250$, $m_3 = 210\Delta\lambda$, $\sigma_3 = 40\Delta\lambda$; $A_4 = 350$, $m_4 = 500\Delta\lambda$, $\sigma_4 = 40\Delta\lambda$; $A_5 = 100$, $m_5 = 580\Delta\lambda$, $\sigma_5 = 40\Delta\lambda$, где A_i , m_i и σ_i есть амплитуда, местоположение и полуширина i -ой гауссовой функции. Амплитуды задавались в условных единицах в пределах диапазона значений 16-разрядного АЦП, а привязка местоположения гауссовых функций к шкале длин волн выполнялась по формуле: $m_i^{[\lambda]} = 380 + m_i - \Delta\lambda$; $i = 1, \dots, N$. Так, если $m_1 = 410\Delta\lambda$, то $m_1^{[\lambda]} = 584,5$ нм. К сумме гауссовых функций добавлялся постоянный фон амплитуды $A_0 = 50$ и шум.

При измерениях спектров ФЛ с помощью фотоэлектронного умножителя шум можно считать аддитивным, а его модель задавать суммой шума, который зависит от сигнала, и теплового шума. В результате оценивания значений параметров этой модели на основе экспериментальных данных для нескольких спектров ФЛ, шум был описан соотношением: $\xi_i = |g(x_i)|^{1/2} \eta_i + 15\zeta_i$, где η_i и ζ_i есть значения гауссовых случайных величин с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, а число 15 указывает на величину стандартного отклонения теплового шума (что составляет 4 двоичных разряда из допустимых 16 разрядов). Однако далее шумовая обстановка дополнительно ухудшалась за счет добавления положительных выбросов с вероятностью их появления 0,03 и равномерным распределением их амплитуды в интервале $[0, 2000]$.

Непосредственно для обработки экспериментальных данных использовались те зависимости спектров ФЛ, которые помимо широких «гладких» составляющих спектра содержали очень узкие и достаточно большие по амплитуде составляющие линейчатого спектра, которые интерпретировались как выбросы значений. Задача обработки состояла в получении гладких зависимостей как для исходного спектра ФЛ, так и для его первой производной.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования задачи численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами при имитации шумовой обстановки, характерной для измерений спектра ФЛ, представлены на рис. 1.

На рис. 1а приведена исходная последовательность зашумленных данных с выбросами, а на рис. 1б – результат ее численного дифференцирования обычным методом вычисления правой разностной производной (например, это выполняет функция `diff()` среды Matlab). Видно, что результат такого дифференцирования является неудовлетворительным.

На рис. 1в и рис. 1г приведен результат применения метода регуляризации Тихонова (9) для $k = 1$ с оптимальным значением параметра регуляризации, где пунктирная линия отвечает истинной зависимости, а сплошная линия отвечает полученной зависимости. Видно, что выбросы исказили искомое решение (рис. 1г), вызывая неверное поведение хвостов полученной зависимости. При этом относительная ошибка решения и относительная ошибка аппроксимации составили 11,2% и 4,1%, соответственно. Набор статистики по 100 реализациям шума дал усредненные значения этих показателей величиной в 12,7% и 4,2%, соответственно.

На рис. 1д и рис. 1е приведены результаты применения предложенного метода после использования двухпроходного алгоритма (242 итерации на первом проходе и 188 итераций на втором проходе) для $\alpha^2 = 10000$ и $\gamma_2 = 10000$, где пунктирная линия отвечает истинной зависимости, а сплошная линия отвечает полученной зависимости. Видно, что на обоих графиках сплошная линия практически полностью накрыла пунктирную линию. При этом относительная ошибка решения и относительная ошибка аппроксимации составили 4,9% и 1,2%, соответственно. Набор статистики по 100 реализациям шума дал усредненные значения этих показателей величиной в 5,7% и 1,4%, соответственно.

На рис. 2 приведено три экспериментальных зависимости спектров ФЛ кристаллов ZnS:Mn, а также результаты их сглаживания и численного дифференцирования предложенным методом для $\alpha^2 = 10000$ и $\gamma_2 = 10000$. При этом использовался двухпроходный алгоритм, причем для обработки первой экспериментальной зависимости потребовалась 251 итерация на первом проходе и 293 итерации на втором проходе, для обработки второй экспериментальной зависимости – соответственно 133 и 127 итераций, а для третьей экспериментальной зависимости – 254 и 227 итераций, соответственно.

Видно, что выбросы на экспериментальных кривых расположены не случайно, а их ширина у основания составляет примерно 2,5 нм. По этой причине их следует рассматривать как детерминированные линейчатые составляющие спектра ФЛ, получая последние путем вычитания сглаженной зависимости из исходной зависимости данных. Также следует отметить, что применение метода регуляризации Тихонова превращало такие выбросы на экспериментальных кривых в достаточно широкие «холмы», что приводило к появлению нефизических осцилляций в результатах численного дифференцирования.

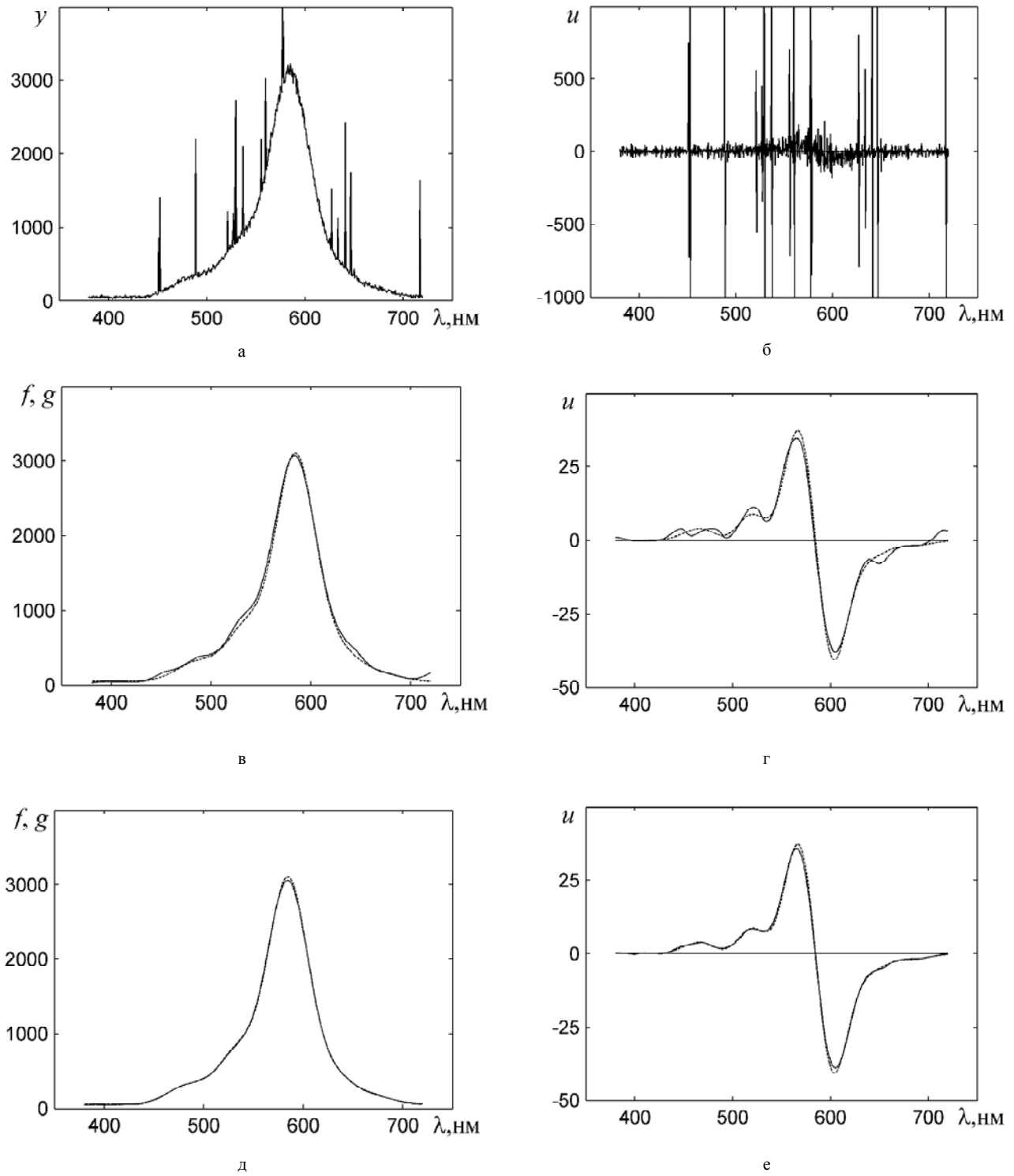


Рисунок 1 – Результаты моделирования:

а, б – данные и их численное дифференцирование обычным методом; в, г – сглаживание данных и численное дифференцирование методом Тихонова; д, е – сглаживание и численное дифференцирование предложенным методом

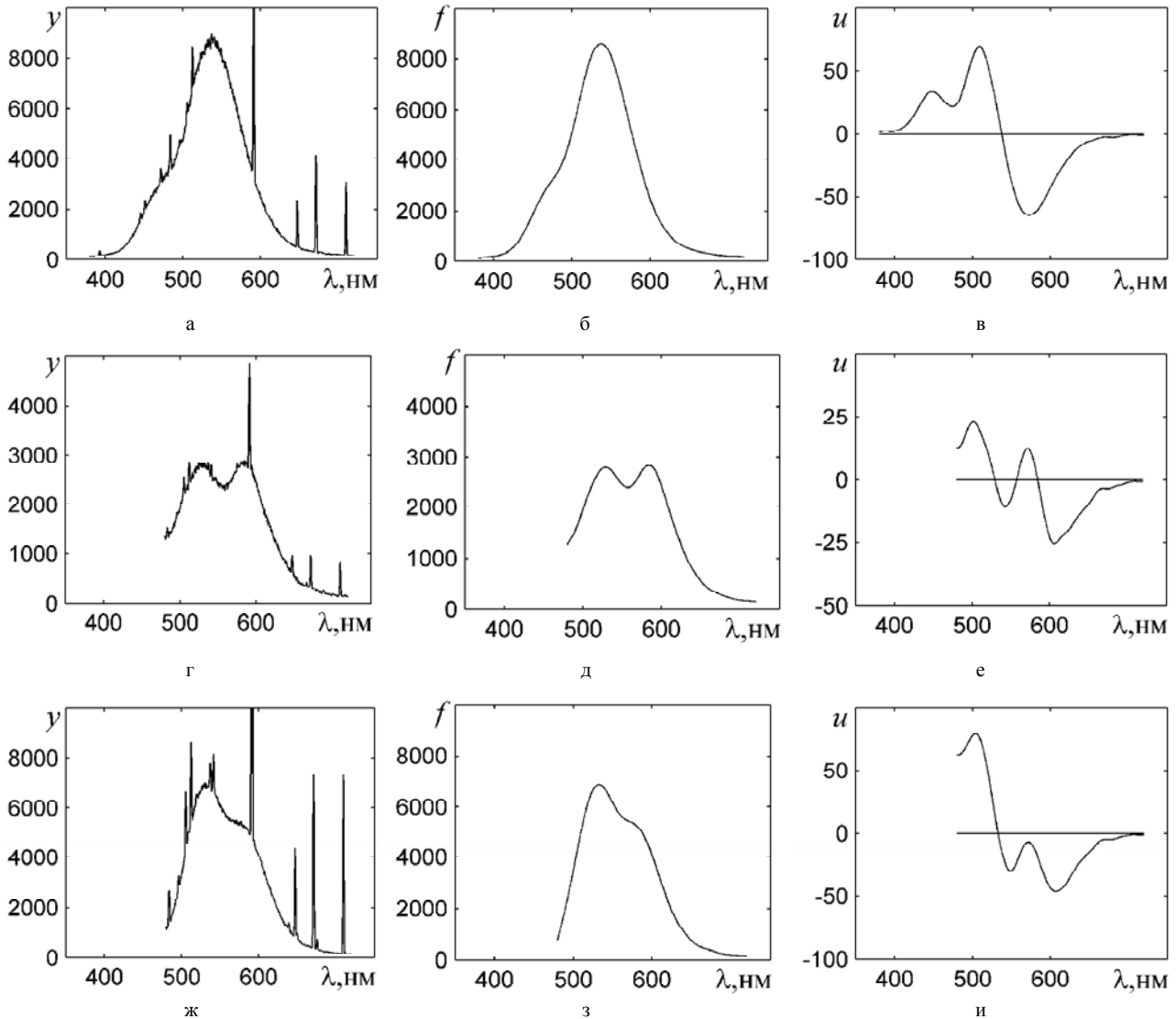


Рисунок 2 – Обработка экспериментальных данных:
а, г, ж – исходные данные; б, д, з – сглаженные данные; в, е, и – первая производная

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования и обработки экспериментальных данных демонстрируют эффективность предложенного метода. Это во многом определяется хорошим качеством настройки его свободных параметров α , β , q и параметра регуляризации γ_2 . Поскольку для заданной шумовой обстановки была типична некоторая шумовая полоса с выбросами значений, то для грубой настройки на эту шумовую обстановку в качестве прототипа был выбран шум импульсного типа с законом распределения Коши [11]. Для этого шума $\beta = 0$, $q = 2$, а α должно настраиваться на полуширину шумовой полосы (т.е. на масштаб шума Коши) [10]. Вторым настраиваемым параметром был параметр регуляризации γ_2 , который имеет смысл отношения величины протяженности невязки решения к величине энергии производной решения. На практике настройка параметров α и γ_2 выполнялась на этапе численного моделирования типовых за-

дач данного класса путем минимизации абсолютной ошибки решения. Затем полученные значения этих параметров применялись к другим задачам этого класса, в том числе, к задачам с экспериментальными данными. Хотя более точная настройка β и q позволяет улучшить результаты [10], однако здесь она не выполнялась.

При решении задачи одномерной оптимизации наилучшими шагами более часто оказывались пробные шаги, которые обнуляли компоненты стабилизирующей части функционала, а менее часто – шаги, которые обнуляли невязку решения. Шаги, которые отвечали методу Ньютона, при вычислениях практически не использовались, что указывает на их низкую эффективность для решения подобных задач.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод может быть использован для численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами. При этом он позволяет получить гладкую

аппроксимацию первой производной от исходных данных и, соответственно, гладкую аппроксимацию самих исходных данных.

Результаты моделирования и обработки экспериментальных данных, которые представляли собой спектры фотолюминесценции при наличии в их составе узких линейчатых спектральных составляющих, подтвердили эффективность предложенного метода.

Метод можно обобщить на случай негладкого решения путем построения стабилизирующей части функционала на основе ограничения полной вариации решения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Днепропетровского национального университета «Методы и информационные технологии цифровой обработки многоканальных данных» (номер государственной регистрации 0116U001297). Автор выражает благодарность проф. Коваленко А. В. и инж. Плахтию Е. Г. за предоставленные экспериментальные данные и полезное обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Derivative spectroscopy and the continuous relaxation spectrum / [A. R. Davies, R. S. Anderssen, F. R. de Hoog, N. J. Goulding] / *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2016. – Vol. 233, July. – P. 107–118. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2016.01.018.
2. Autonomous Gaussian decomposition / [R. R. Lindner, C. Vera-Ciro, C. E. Murray and other] // *The Astronomical Journal*. – 2015. – Vol. 149, No. 4. – P. 138–149. DOI: 10.1088/0004-6256/149/4/138.
3. Maitra I. K. Adaptive Edge Detection Method towards Features Extraction from Diverse Medical Imaging Technologies / I. K. Maitra, S. K. Bandhyopadhyay // *Intelligent Multidimensional Data Clustering and Analysis*. – 2016. – Chapter 7. – P. 159–192. DOI: 10.4018/978-1-5225-1776-4
4. Selected algorithms for measurement data processing in impulse-radar-based system for monitoring of human movements /

Вовк С. М.

Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації Дніпропетровського національного університету, Дніпро, Україна

МЕТОД ЧИСЕЛЬНОГО ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ЗАШУМЛЕНИХ ДАНИХ З ВИКИДАМИ

Актуальність. Застосування традиційних методів чисельного диференціювання до зашумлених даних з викидами призводить до значних похибок. Об'єктом цього дослідження є процес чисельного диференціювання таких даних.

Мета роботи – розробка методу чисельного диференціювання зашумлених даних з викидами, який дозволяє отримати гладку аппроксимацию їх першої похідної та, відповідно, гладку аппроксимацию самих даних.

Метод. Запропонований метод чисельного диференціювання заснований на рішенні задачі мінімізації згладжувального функціонала, який побудований на критерії мінімуму протяжності відхилення та обмеженні енергії першої похідної рішення. Критерій мінімуму протяжності формує основну частину функціонала й забезпечує його стійку поведінку у відношенні до адитивного шуму й викидів. Обмеження формує стабілізуювальну частину функціонала й забезпечує гладкість рішення задачі. Внесок зазначених частин регулюється за допомогою параметра регуляризації. Оскільки основна частина згладжувального функціонала не є опуклою, то задача його мінімізації є задачею нелінійного неопуклого програмування. Для чисельного рішення цієї задачі використовується метод спряжених градієнтів, в якому величина кроку вздовж напрямку спуска визначається на множині випробувальних кроків. Ці кроки мінімізують окремі компоненти основної та стабілізуювальної частин функціонала, що дозволяє переходити з одного локального мінімуму функціонала в інший більш глибокий локальний мінімум.

Результати. Моделювання задачі чисельного диференціювання зашумлених даних з викидами та обробка експериментальних даних, які являли собою спектри фотолюминесценції з присутністю в їх складі вузьких лінійчатих спектральних складових, засвідчили ефективність запропонованого методу.

Висновки. Запропонований метод може бути використаний для чисельного диференціювання зашумлених зашумлених даних з викидами. При цьому він дозволяє отримати гладку аппроксимацию першої похідної початкових даних, а також гладку аппроксимацию самих початкових даних. Поданий метод можна узагальнити на випадок негладкого рішення шляхом побудови стабілізуювальної частини функціонала на основі обмеження повної варіації рішення.

Ключові слова: чисельне диференціювання, гладка аппроксимация, критерій мінімуму протяжності.

- [A. Mikkina, J. Wagner, P. Mazurek, R. Z. Morawski] // *Journal of Physics*. – 2016. – Vol. Conference Series 772. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/772/1/012057.
5. Knowles I. Methods for numerical differentiation of noisy data / I. Knowles, R. J. Renka // *Electronic Journal of Differential Equations*. – 2014. – Vol. Conference 21. – P. 235–246.
 6. Chartrand R. Numerical differentiation of noisy, nonsmooth data / R. Chartrand // *ISRN Applied Mathematics*. – 2011. – Vol. 2011. – P. 1–11. DOI: 10.5402/2011/164564.
 7. Liao H. Outlier Impact and Accommodation Methods: Multiple Comparisons of Type I Error Rates / H. Liao, Y. Li, G. Brooks // *Journal of Modern Applied Statistical Methods*. – 2016. – Vol. 15, May. – No. 1. – P. 452–471.
 8. Borulko V. F. Principle of minimum extent in spatial spectrum extrapolation problems of complex-valued sources / V. F. Borulko, S. M. Vovk // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2013. – Vol. 72, No. 7. – P. 581–592. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i7.30.
 9. Вовк С. М. Двойственный метод минимума пространственной протяженности для робастного оценивания параметров дипольных источников излучения / С. М. Вовк, В. Ф. Борулько // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2014. – № 2. – С. 8–17. DOI: 10.15588/1607-3274-2014-2-1.
 10. Vovk S. M. General approach to building the methods of filtering based on the minimum duration principle / S. M. Vovk // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2016. – Vol. 59. – № 7. – P. 281–292. DOI: 10.3103/S0735272716070013.
 11. Gonzalez J. G. Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environments / J. G. Gonzalez, G. R. Arce // *IEEE Trans. on Signal Processing*. – 2001. – Vol. 49, No. 2. – P. 438–441. DOI: 10.1109/78.902126.
 12. Aysal T. C. Meridian filtering for robust signal processing / T. C. Aysal, K. E. Barner // *IEEE Trans. on Signal Processing*. – 2007. – Vol. 55, No. 8. – P. 3949–3962. DOI: 10.1109/TSP.2007.894383.

Статья поступила в редакцию 01.02.2017.
После доработки 22.04.2017.

Vovk S. M.

PhD, Associate professor, Associate professor of Department of Automated Systems of Information Processing, Dnipropetrovs'k National University, Dnipro, Ukraine

METHOD FOR NUMERICAL DIFFERENTIATION OF NOISY DATA WITH OUTLIERS

Context. Using of conventional methods of numerical differentiation to the noisy data with outliers leads to significant errors. The object of this study is the process of numerical differentiation of such data.

Objective. The goal of this work is the development of a method of numerical differentiation of the noisy data with outliers to obtain a smooth approximation of the first derivative of original data as well as a smooth approximation of the original data themselves.

Method. The proposed method of numerical differentiation is based on solving the problem of minimizing the smoothing functional, which is built on the criteria of a minimum of extent of the solution residual and of an energy constraint of the first derivative of solution. The minimum-extent criterion defines the main part of functional and ensures its stable behavior with respect to the additive noise and outliers. The energy constraint defines the stabilizing part of the functional and provides a smooth solution of the problem. The contribution of these parts is controlled by a regularization parameter. Since the main part of smoothing functional is not convex, then the minimization problem is the non-convex nonlinear programming problem. For the numerical solution of this problem the conjugate gradient method is used. In this method the step size along the descent direction is defined on the set of test steps. These steps minimize the individual components of the main and stabilizing parts of the smoothing functional that allows to move from the one local minimum of the functional to another deeper local minimum.

Results. Simulation of the problem of numerical differentiation of noisy data with outliers and processing of the experimental data, which are photoluminescence spectra with narrow line components in their compositions, confirmed the performance of the proposed method.

Conclusions. The proposed method can be used for numerical differentiation of noisy data with outliers. It provides a smooth approximation of the first derivative of the original data, as well as a smooth approximation of the original data themselves. This method can be generalized to the case of non-smooth solutions by constructing a stabilizing part of the functional based on the criterion of minimum total variation.

Keywords: numerical differentiation, smooth approximation, minimum-extent criteria.

REFERENCES

1. Davies A. R., Anderssen R. S., de Hoog F. R., Goulding N. J. Derivative spectroscopy and the continuous relaxation spectrum, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2016, Vol. 233, pp. 107–118. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2016.01.018.
2. Lindner R. R., Vera-Ciro C., Murray C. E., Stanimirovic S., Babler B. L., Heiles C., Henebelle P., Goss W. M., Dickey J. Autonomous Gaussian decomposition, *The Astronomical Journal*, 2015, Vol. 149, No. 4, pp. 138–149. DOI: 10.1088/0004-6256/149/4/138.
3. Maitra I. K., Bandhyopadhyay S. K. Adaptive Edge Detection Method towards Features Extraction from Diverse Medical Imaging Technologies, *Intelligent Multidimensional Data Clustering and Analysis*, 2016, Chapter 7, pp. 159–192. DOI: 10.4018/978-1-5225-1776-4
4. Mikkina A., Wagner J., Mazurek P., Morawski R. Z. Selected algorithms for measurement data processing in impulse-radar-based system for monitoring of human movements, *Journal of Physics*, 2016, Vol. Conference Series 772, pp. 1–6. DOI:10.1088/1742-6596/772/1/012057.
5. Knowles I., Renka R. J. Methods for numerical differentiation of noisy data, *Electronic Journal of Differential Equations*, 2014, Vol. Conference 21, pp. 235–246.
6. Chartrand R. Numerical differentiation of noisy, nonsmooth data, *ISRN Applied Mathematics*, 2011, Vol. 2011, pp. 1–11. DOI: 10.5402/2011/164564.
7. Liao H., Li Y., Brooks G. Outlier Impact and Accommodation Methods: Multiple Comparisons of Type I Error Rates, *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 2016, Vol. 15, No. 1, pp. 452–471.
8. Borulko V. F., Vovk S. M. Principle of minimum extent in spatial spectrum extrapolation problems of complex-valued sources, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2013, Vol. 72, No. 7, pp. 581–592. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i7.30.
9. Vovk S. M., Borulko V. F. Dvoystvennyiy metod minimuma prostranstvennoy protyazhennosti dlya robastnogo otsenivaniya parametrov dipolnyih istochnikov izlucheniya, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2014, No. 2, pp. 8–17. DOI: 10.15588/1607-3274-2014-2-1.
10. Vovk S. M. General approach to building the methods of filtering based on the minimum duration principle, *Radioelectronics and Communications Systems*, 2016, Vol. 59, No. 7, pp. 281–292. DOI: 10.3103/S0735272716070013.
11. Gonzalez J. G., Arce G. R. Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environments, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2001, Vol. 49, No. 2, pp. 438–441. DOI: 10.1109/78.902126.
12. Aysal T. C., Barner K. E. Meridian filtering for robust signal processing, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2007, Vol. 55, No. 8, pp. 3949–3962. DOI: 10.1109/TSP.2007.894383.

ПОСТРОЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СОВЕРШЕННОЙ ФОРМЫ СИСТЕМЫ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАКТОРИЗАЦИИ

Актуальность. Решена актуальная задача нахождения модулей системы остаточных классов, в которой повышается скорость перевода чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления.

Цель работы – разработка метода построения четырехмодульной модифицированной совершенной формы системы остаточных классов, в которой отсутствует процедура поиска обратного элемента по модулю при переводе чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления.

Метод. Предложен метод определения набора модулей модифицированной совершенной формы системы остаточных классов на основе факторизации произведения чисел. Использование данного метода позволяет существенно уменьшить вычислительную сложность при выполнении арифметических операций над многоразрядными числами путем распараллеливания процесса вычислений и перевода чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления за счет исключения процедуры поиска обратного элемента по модулю и умножения на базисные числа. Определены условия для нахождения любого количества модулей модифицированной совершенной формы системы остаточных классов, два из которых являются неизвестными. Приведен пример использования предложенного метода для четырехмодульной модифицированной совершенной формы системы остаточных классов, в котором получены все возможные наборы модулей при заданном наименьшем модуле. Представлены табличные значения и проанализированы графические зависимости полученных модулей.

Результаты. Использование предложенного метода подбора модулей, которые образуют модифицированную совершенную форму, позволит увеличить быстродействие вычислительных систем, работающих в системе остаточных классов.

Выводы. Впервые предложен метод построения четырехмодульной модифицированной совершенной формы системы остаточных классов на основе факторизации, в которой отсутствует сложная процедура поиска обратного элемента по модулю. Это позволяет упростить процессы вычислений над многоразрядными числами и перевода чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления.

Ключевые слова: система остаточных классов, базисные числа, система модулей, модифицированная совершенная форма, разрядность чисел, факторизация.

НОМЕНКЛАТУРА

МСФ – модифицированная совершенная форма;

СОК – система остаточных классов;

СФ – совершенная форма;

b_1, b_2, \dots, b_n – запись числа в системе остаточных классов;

k_1 – ряд натуральных чисел;

k_2 – ряд целых чисел;

n – количество модулей;

N – запись числа в десятичной системе исчисления;

p_1, p_2, \dots, p_n – модули;

P – произведение модулей.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время непозиционные системы исчисления привлекают все больше внимания с целью использования их в современных вычислительных системах [1]. Это объясняется тем, что в связи со значительным ростом объемов вычислений и увеличением разрядности используемых чисел [2] существенно проявляются недостатки двоичной системы (например, ее многоразрядность, последовательная структура, наличие междурядных переносов [3]), которые в большой степени замедляют быстродействие вычислительных систем. Перечисленные недостатки отсутствуют в некоторых непозиционных системах исчисления, например, в системе остаточных классов (СОК) [4], что делает ее исполь-

зование весьма перспективным. В частности, СОК можно эффективно использовать при выполнении целочисленных операций модулярной арифметики над много-разрядными числами: сложения, вычитания, умножения, возведения в степень [5] и т.д. Это особенно актуально для современной асимметричной криптографии (алгоритмы RSA, Эль-Гамала, Рабина, электронной цифровой подписи [6]), больших матричных вычислений, разработки методов помехозащищенного кодирования [7], других задач дискретной и прикладной математики [8]. Кроме того, очень важным положительным свойством СОК является возможность распараллеливания процесса вычислений согласно модулярной арифметике с низкой разрядностью модулей [4].

К отрицательным сторонам СОК относятся целочисленность операндов, трудности выполнения арифметических операций деления и сравнения [9], а также определения переполнения разрядной сетки. Еще одним недостатком, который существенно замедлил развитие СОК, является сложность перевода в позиционные системы исчисления [4], что связано с необходимостью поиска обратного элемента по модулю.

Объект исследования – процесс перевода чисел из СОК в десятичную систему исчисления. Предметом исследования выступают модули СОК, для которых отсутствует процедура поиска обратного элемента по модулю.

Целью данной работы являлась разработка метода построения четырехмодульной модифицированной со-

вершенной формы системы остаточных классов, в которой отсутствует процедура поиска обратного элемента по модулю при переводе чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Теоретической основой СОК является теория чисел [10]. Любое целое десятичное число N представляется в СОК в виде набора (b_1, b_2, \dots, b_n) наименьших положительных остатков от деления этого числа на фиксированные натуральные попарно взаимно простые числа p_1, p_2, \dots, p_n ($b_i = N \bmod p_i$), которые называются модулями (n – количество модулей). При этом должно выполняться

неравенство $0 \leq N < P-1$, где $P = \prod_{i=1}^n p_i$ – число, которое опре-

ределяет условие переполнения разрядности вычислений.

При обратном преобразовании из СОК в десятичную систему исчисления используется китайская теорема об остатках:

$$N = \left(\sum_{i=1}^n b_i B_i \right) \bmod P, \tag{1}$$

где $B_i = M_i m_i$, $M_i = \frac{P}{p_i}$, $m_i = M_i^{-1} \bmod p_i$ – базисные числа.

Нахождение обратных элементов по модулю характеризуется значительной вычислительной сложностью и в теории чисел реализуется полным перебором возможных вариантов, с помощью алгоритма Евклида или теоремы Эйлера [11]. Поэтому разработка метода построения СОК, в которой отсутствует данная процедура, является актуальной задачей.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В работе [12] описана совершенная форма (СФ) СОК, в которой выполняется условие $M_i \bmod p_i = 1$, что позволяет избежать процедуры поиска обратного элемента и умножения в (1) на базисные числа m_i . Выражение (1) в этом случае упрощается:

$$N = \left(\sum_{i=1}^n b_i M_i \right) \bmod P. \tag{2}$$

В [13], [14] путем решения систем конгруэнций получено выражение для поиска набора модулей СФ СОК:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i} = k_1 + \frac{1}{\prod_{i=1}^n p_i}, \tag{3}$$

где $k_1 = 1, 2, 3, \dots$

В [15] решена задача и определены условия для аналитического нахождения m_i . Однако у всех этих случаях значения p_i быстро увеличиваются, что неприемлемо при необходимости использования модулей одинаковой разрядности.

В [12] предложена модифицированная совершенная

форма (МСФ) СОК, в которой $M_i \bmod p_i = \pm 1$, что также исключает выполнение операции поиска обратного элемента. Вычисления (1) происходят согласно формулы

$$N = \left(\sum_{i=1}^n b_i m_i M_i \right) \bmod P, m_i = \pm 1. \tag{4}$$

В [16] разработан метод построения МСФ СОК из трех модулей на примере $p_2 - p_1 = 5$. В [17] представлены теоретические основы построения трехмодульной МСФ СОК в общем случае. Однако в настоящее время отсутствуют универсальные методы нахождения любого количества модулей, которые удовлетворяют условиям МСФ СОК.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассуждения, аналогичные представленным в [13], [14] для СФ СОК (выражение (3)), приводят к условию, которое должно выполняться для МСФ СОК:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i} = k_2 \pm \frac{1}{\prod_{i=1}^n p_i}, \tag{5}$$

где $k_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

В отличие от СФ СОК, где все модули положительные и поэтому $k_1 > 0$, в МСФ СОК модули имеют разные знаки и для упрощения задачи можно принять $k_2 = 0$, что соответствует наибольшему диапазону вычислений при заданном количестве модулей. Таким образом, уравнение (5) представим следующим выражением:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_3} + \dots + \frac{1}{p_{n-1}} + \frac{1}{p_n} = \pm \frac{1}{p_1 p_2 p_3 \dots p_{n-1} p_n}. \tag{6}$$

Следует отметить, что условию $m_i = 1$ отвечают положительные значения модулей p_i , а условию $m_i = -1$ – отрицательные. Кроме того, если в СФ СОК наименьшие модули строго определены ($p_1 = 2, p_2 = 3$) [14], то в МСФ СОК они могут изменяться произвольным образом.

Пусть неизвестными будут два последних модуля p_{n-1} и p_n . Тогда (6) представим в виде диофантового уравнения второй степени:

$$p_{n-1} p_n (p_2 p_3 \dots p_{n-2} + p_1 p_3 \dots p_{n-2} + \dots + p_1 p_2 \dots p_{n-3}) + p_1 p_2 \dots p_{n-2} (p_{n-1} + p_{n-2}) = \pm 1. \tag{7}$$

Введем обозначение:

$$p_{n-1, n} = \frac{a, b - p_1 p_2 \dots p_{n-2}}{p_2 p_3 \dots p_{n-2} + p_1 p_3 \dots p_{n-2} + \dots + p_1 p_2 \dots p_{n-3}}. \tag{8}$$

После подстановки (8) в (7) и соответствующих математических преобразований получаем выражение для целочисленного решения (7):

$$\pm (p_2 p_3 \dots p_{n-2} + p_1 p_3 \dots p_{n-2} + \dots + p_1 p_2 \dots p_{n-3}) + (p_1 p_2 p_{n-2})^2 = ab. \tag{9}$$

Это означает, что левую часть (9) надо факторизировать, на основании чего определяются параметры a и b . Кроме этого, модули p_n и p_{n-1} должны быть целыми числами. Поэтому из (8) следует:

$$(a, b - p_1 p_2 \dots p_{n-2}) \bmod (p_2 p_3 \dots p_{n-2} + p_1 p_3 \dots p_{n-2} + \dots + p_1 p_2 \dots p_{n-3}) = 0. \tag{10}$$

Выражения (9) и (10) определяют условия для нахождения любого количества модулей МСФ СОК, два из которых неизвестны.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В качестве примера предложенного метода рассмотрим МСФ СОК, состоящую из четырех модулей. Условия (8)–(10) трансформируются таким образом:

$$p_{3,4} = \frac{a, b - p_1 p_2}{p_1 + p_2}; \pm(p_1 + p_2) + (p_1 p_2)^2 = ab;$$

$$(a, b - p_1 p_2) \bmod (p_1 + p_2) = 0. \quad (11)$$

Из (6) видно, что при $n=4$ значения p_1 и p_2 должны иметь разные знаки. Считая модуль p_1 положительным, наибольшее количество вариантов будет при условии $p_2 = -(p_1 + 1)$, так как в этом случае третье условие (11) выполняется всегда. Первые два приобретут такой вид:

$$p_{3,4} = -(a, b + p_1^2 + p_1); \pm 1 + (p_1(p_1 + 1))^2 = ab. \quad (12)$$

Примем $p_1 = 7$, тогда $p_2 = -8$ и из (12) получаем:

$$p_{3,4} = -(a, b + 56) \text{ и } ab = \pm 1 + 3136 = \begin{cases} 3135 = 3 \cdot 5 \cdot 11 \cdot 19 \\ 3137 \end{cases}.$$

Численные расчеты показывают, что для $p_1 = 7$ в других случаях, кроме $p_2 = -8$, наибольшее количество вариантов наборов модулей будет при $p_2 = -9$ и $p_2 = -11$. Тогда уравнения (11) приобретут соответственно такой вид:

$$p_{3,4} = -\frac{a, b + 63}{2}; \pm 2 + 63^2 = ab; (a, b - 63) \bmod 2 = 0. \quad (13)$$

Таблица 1 – Возможные варианты систем из четырех модулей для МСФ СОК при $p_1 = 7, p_2 = -8$ (в скобках – разрядность модулей и диапазона вычислений)

№	p_1, p_2	ab	a	b	p_3	p_4	P
1	7 (3), -8 (4)	3135	1	3135	-57 (6)	-3191 (12)	10185672 (24)
2			-1	-3135	-55 (6)	3079 (12)	9483320 (24)
3			3	1045	-59 (6)	-1101 (11)	3637704 (22)
4			-3	-1045	-53 (6)	989 (10)	2935352 (22)
5			5	627	-61 (6)	-683 (10)	2333128 (22)
6			-5	-627	-51 (6)	571 (10)	1630776 (21)
7			11	285	-67 (7)	-341 (9)	1279432 (21)
8			-11	-285	-45 (6)	229 (8)	577080 (20)
9			15	209	-71 (7)	-265 (9)	1053640 (21)
10			-15	-209	-41 (6)	153 (8)	351288 (19)
11			19	165	-75 (7)	-221 (8)	928200 (20)
12			-19	-165	-37 (6)	109 (7)	225848 (18)
13			33	95	-89 (7)	-151 (8)	752584 (20)
14			-33	-95	-23 (5)	39 (6)	50232 (16)
15			55	57	-111 (7)	-113 (7)	702408 (20)
16			-55	-57	-1 (1)	1 (1)	56 (6)
17		3137	1	3137	-57 (6)	-3193 (12)	10192056 (24)
18			-1	-3137	-55 (6)	3081 (12)	9489480 (24)

Таблица 2 – Упорядочение модулей

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_3	1	23	37	41	45	51	53	55	55
p_4	1	39	109	153	229	571	989	3079	3081
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
p_3	57	57	59	61	67	71	75	89	111
p_4	3191	3193	1101	683	341	265	221	151	113

$$p_{3,4} = -\frac{a, b + 77}{4}; \pm 4 + 77^2 = ab; (a, b - 77) \bmod 4 = 0. \quad (14)$$

Отсюда следует, что

$$ab = \pm 2 + 3969 = \begin{cases} 3967 \\ 3971 = 11 \cdot 19 \cdot 19 \end{cases} \text{ для } p_2 = -9 \text{ и}$$

$$ab = \pm 4 + 5929 = \begin{cases} 5925 = 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 79 \\ 5933 = 17 \cdot 349 \end{cases} \text{ для } p_2 = -11.$$

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 представлены всевозможные варианты систем из четырех модулей для МСФ СОК при $p_1 = 7, p_2 = -8$ согласно (10) (в скобках указана разрядность модулей и диапазона вычислений в двоичной системе исчисления).

Для построения графика зависимости модулей их необходимо перенумеровать в порядке увеличения абсолютной величины p_3 , что представлено в таблице 2.

На рисунке 1 показан характер изменения значений модулей p_3 и p_4 в зависимости от номера модуля согласно таблицы 2 в логарифмической шкале с основанием 2.

В таблице 3 приведены упорядоченные значения абсолютных величин модулей, полученные из (12) аналогично таблице 2, при $p_2 = -9$ и $p_2 = -11$, а также граница диапазона вычислений P (в скобках указана разрядность представленных чисел).

На рисунке 2 показаны графики зависимости значений модулей p_3 и p_4 (сплошной линией – для $p_2 = -9$, пунктирной – для $p_2 = -11$) в зависимости от номера модуля согласно таблицы 3 в логарифмической шкале с основанием 2.

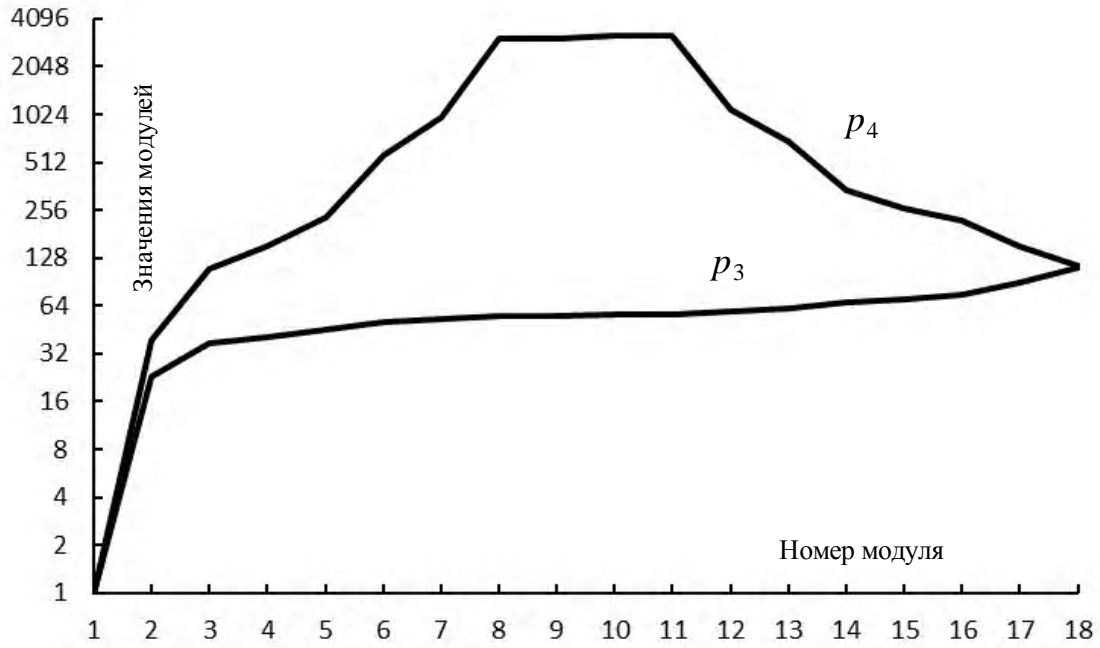


Рисунок 1 – Характер изменения значений модулей p_3 и p_4 при $p_1=7, p_2=-8$ в зависимости от номера модуля согласно таблицы 2

Таблица 3 – Упорядоченные значения абсолютных величин модулей p_3 и p_4 при $p_2=-9$ и $p_2=-11$ (в скобках – разрядность модулей и диапазона вычислений)

p_2	p_3, p_4	1	2	3	4	5	6	7	8
9 (4)	p_3	22(5)	26(5)	31(5)	31(5)	32(6)	32(6)	37(6)	41(6)
	p_4	73(7)	149(8)	1952(11)	1954(11)	2015(11)	2017(11)	212(8)	136(8)
	P	101178 (17)	244062 (18)	3812256 (22)	3816162 (22)	4062240 (22)	4066272 (22)	494172 (19)	351288 (19)
11 (4)	p_3	13(4)	15(4)	18(5)	19(5)	19(5)	20(5)	23(5)	38(6)
	p_4	40(6)	68(7)	277(9)	1462(11)	1464(11)	513(10)	118(7)	39(6)
	P	40040 (16)	78540 (17)	383922 (19)	2138906 (22)	2141832 (22)	790020 (20)	208978 (18)	114114 (17)

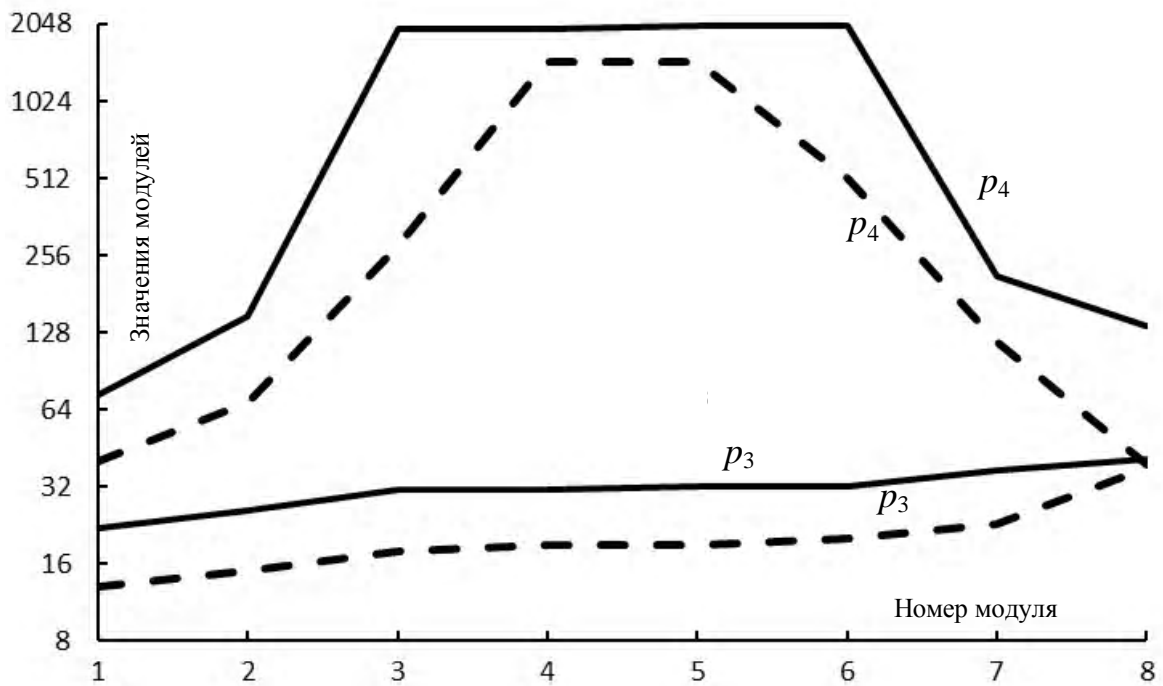


Рисунок 2 – Характер изменения значений модулей p_3 и p_4 при $p_1=7, p_2=-9$ (сплошная линия) и $p_2=-11$ (пунктирная линия) в зависимости от номера модуля согласно таблицы 3

В таблице 4 представлены остальные возможные варианты наборов модулей МСФ СОК при $p_1=7$, полученные согласно условиям (11).

Таблица 4 – Возможные варианты систем из четырех модулей для МСФ СОК при $p_1=7, p_2=-10, -12, -13, -15$ (в скобках – разрядность модулей и диапазона вычислений)

p_2	p_3	p_4	P
-10 (4)	-23 (5)	1609 (11)	2590490 (22)
	-23 (5)	1611 (11)	2593710 (22)
	-43 (6)	-51 (6)	153510 (18)
-12 (4)	-17 (5)	-1427 (11)	2037756 (22)
	-17 (5)	-1429 (11)	2040612 (22)
	-19 (5)	-145 (8)	231420 (18)
-13 (4)	-15 (4)	1364 (11)	1861860 (21)
	-15 (4)	1366 (11)	1864590 (21)
	-16 (5)	-291 (9)	423696 (19)
-15 (4)	-16 (5)	-73 (7)	122640 (17)

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Из таблицы 1 следует, что наибольший диапазон вычислений будет в том случае, когда каждый следующий модуль на единицу больше от произведения абсолютных величин предыдущих. Строка 16 таблицы 1 показывает, что числа 7 и -8 образуют МСФ СОК, поскольку $7 \bmod 8 = -1 \bmod 8$ и $8 \bmod 7 = 1$. Модулям $p_3 = -55$ и $p_3 = -57$ ($p_3 = p_1 \cdot p_2 \pm 1$) соответствуют по два разных значения p_4 .

Из рисунка 1 видно, что модуль p_3 относительно медленно увеличивается. В то же время, график для модуля p_4 увеличивается интенсивнее, приходит к плоскому максимуму посередине номерного диапазона модулей, а потом убывает к значению модуля p_3 .

При $p_2 = -9$ и $p_2 = -11$ из (13) и (14) следует, что параметры a и b есть нечетными числами, поэтому третье условие из (13) выполняется при всех возможных значениях a и b , а третье условие (12) – только для половины возможных вариантов параметров a и b .

Графики на рисунке 2 ведут себя аналогично рисунку 1, но при $p_2 = -9$ максимум становится шире.

Из таблицы 4 видно, что большинство вариантов получены при $a = \pm 1$, когда четвертый модуль на единицу отличается от произведения трех предыдущих, что соответствует наибольшей границе диапазона вычислений.

ВЫВОДЫ

В работе решена задача построения четырехмодульной модифицированной совершенной формы системы остаточных классов, в которой отсутствует процедура поиска обратного элемента по модулю.

Научная новизна результатов, полученных в статье, состоит в том, что впервые предложен метод построения четырехмодульной модифицированной совершенной формы системы остаточных классов на основе факторизации, в которой отсутствуют обладающие большой вычислительной сложностью процедуры поиска обратного элемента по модулю и умножения на базисные числа, что позволяет упростить выполнение арифмети-

ческих операций над многозначными числами путем распараллеливания процесса вычислений и перевод чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что использование предложенного метода подбора модулей, которые образуют модифицированную совершенную форму, позволит увеличить быстродействие вычислительных систем, работающих в системе остаточных классов.

Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы определить условия для нахождения модулей модифицированной совершенной формы системы остаточных классов, три и больше из которых являются неизвестными, а также программная и аппаратная реализация предложенного и запланированных методов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы «Обработка многозначных чисел в системе остаточных классов» кафедры компьютерной инженерии Тернопольского национального экономического университета, государственный регистрационный номер 0115U001607.

Автор выражает благодарность кандидатам технических наук, доцентам кафедры компьютерной инженерии Тернопольского национального экономического университета Якименко Игорю Зиновьевичу и Ивасьеву Степану Владимировичу за моральную поддержку при написании работы и полезное обсуждение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николайчук Я. М. Теорія джерел інформації / Я. М. Николайчук. – Тернопіль : ТзОВ «Терно-граф», 2010. – 536 с.
2. Advanced method of factorization of multi-bit numbers based on Fermat's theorem in the system of residual classes / [M. Karpinski, S. Ivasiev, I. Yakymenko et al.] // Control, Automation and Systems : 16th International Conference, Gyeongju, 16–19 October 2016 : proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2016. – P. 1484–1486. DOI: 10.1109/ICCAS.2016.7832500.
3. Рабинович З. Л. Типовые операции в вычислительных машинах / З. Л. Рабинович, В. А. Раманаускас. – К. : Техника, 1980. – 264 с.
4. Акушский И. Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И. Я. Акушский, Д. И. Юдицкий. – М. : Сов. радио, 1968. – 440 с.
5. Vector Module Exponential in the Remaining Classes System / [Kozaczko D., Ivasiev S., Yakymenko I. et al.] // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications : IEEE 8th International Conference, Warsaw, 24–26 September 2015 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2015. – P. 161–163.
6. Теорія алгоритмів RSA та Ель-Гамала в розмежованій системі числення Радемахера-Крестенсона / [М. М. Касянчук, І. З. Якименко, О. І. Волинський та ін.] // Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. – 2011. – № 3. – С. 265–273.
7. Jun S. Method and Device for Image Coding & Transferring Based on Residue Number System / S. Jun, V. Yatskiv // Journal Sensors & Transducers. – 2013. – Vol.148, №1. – P. 60–65.
8. Krasnobayev V. Method of Increasing the Reliability of Verification of Data Represented in a Residue Number System / V. Krasnobayev, S. Koshman, M. Mavrina // Cybernetics and Systems Analysis. – 2014. – Vol. 50, № 6. – P. 969–976. DOI: 10.1007/s10559-014-9688-3.

9. Krasnobayev V. A. A Method for Arithmetic Comparison of Data Represented in a Residue Number System / V. A. Krasnobayev, A. S. Yanko, S. A. Koshman // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2016. – Vol. 52, № 1. – P. 145–150. DOI: 10.1007/s10559-016-9809-2.
10. Бухштаб А. А. Теория чисел / А. А. Бухштаб. – М. : Просвещение, 1966. – 384 с.
11. Вербіцький О. В. Вступ до криптології / О. В. Вербіцький. – Львів : ВНТЛ, 1998. – 248 с.
12. Касянчук М. М. Теорія та математичні закономірності досконалої форми системи залишкових класів / М. М. Касянчук // Питання оптимізації обчислень: XXXV Міжнародний симпозіум, Кацивелі, 24–29 вересня 2009 р. : тези доповідей. – Київ : Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова, 2009. – С. 306–310.
13. Algorithms of findings of perfect shape modules of remaining classes system / [M. Kasianchuk, I. Yakymenko, I. Pazdriy et al.] // *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics : XIII International Conference, Polyana-Svalyava, 23–25 February 2015 : Proceedings*. – L'viv : Lviv Polytechnic National University, 2015. – P. 168–171.
14. Аналітичний пошук модулів досконалої форми системи залишкових класів та їх використання в китайській теоремі про залишки / [М. М. Касянчук, І. З. Якименко, І. Р. Паздрій та ін.] // *Вісник Хмельницького національного університету : технічні науки*. – 2015. - №1. – С. 170–176.
15. Nykolaychuk Ya. M. Theoretical Foundations for the Analytical Computation of Coefficients of Basic Numbers of Krestenson's Transformation / Ya. M. Nykolaychuk, M. M. Kasianchuk, I. Z. Yakymenko // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2014. – Vol. 50, № 5. – P. 649–654. DOI: 10.1007/s10559-014-9654-0.
16. Nykolaychuk Ya. M. Theoretical Foundations of the Modified Perfect Form of Residue Number System / Ya. M. Nykolaychuk, M. M. Kasianchuk, I. Z. Yakymenko // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2016. – Vol. 52, № 2. – P. 219–223. DOI: 10.1007/s10559-016-9817-2.
17. Kasianchuk M. N. Theory and Methods of Constructing of Modules System of the Perfect Modified Form of the System of Residual Classes / M. N. Kasianchuk, Y. N. Nykolaychuk, I. Z. Yakymenko // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2016. – Vol.48, № 8. – P. 56–63. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i8.60.

Статья поступила в редакцию 22.12.2016.
После доработки 13.03.2017.

Касянчук М. М.

Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна

ПОБУДОВА МОДИФІКОВАНОЇ ДОСКОНАЛОЇ ФОРМИ СИСТЕМИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАКТОРИЗАЦІЇ

Актуальність. Вирішено актуальне завдання знаходження модулів системи залишкових класів, в якій підвищується швидкість переведення чисел із системи залишкових класів у десяткову систему числення.

Мета роботи – розробка методу побудови чотирьохмодульної модифікованої досконалої форми системи залишкових класів, в якій відсутня процедура пошуку оберненого елемента за модулем при переведенні чисел із системи залишкових класів у десяткову систему числення.

Метод. Запропоновано метод визначення набору модулів модифікованої досконалої форми системи залишкових класів на основі факторизації добутку чисел. Використання даного методу дозволяє істотно зменшити обчислювальну складність при виконанні арифметичних операцій над багаторозрядними числами шляхом розпаралелювання процесу обчислень та переведенні чисел із системи залишкових класів у десяткову систему числення за рахунок уникнення процедури пошуку оберненого елемента за модулем і множення на базисні числа. Визначено умови для знаходження будь-якої кількості модулів модифікованої досконалої форми системи залишкових класів, два з яких є невідомими. Наведено приклад використання запропонованого методу для чотирьохмодульної модифікованої досконалої форми системи залишкових класів, в якому отримані всі можливі набори модулів при заданому найменшому модулі. Представлено табличні значення та проаналізовані графічні залежності отриманих модулів.

Результати. Використання запропонованого методу підбору модулів, що утворюють модифіковану досконалу форму, дозволить збільшити швидкість обчислювальних систем, які працюють у системі залишкових класів.

Висновки. Вперше запропоновано метод побудови чотирьохмодульної модифікованої досконалої форми системи залишкових класів на основі факторизації, в якій відсутня складна процедура пошуку оберненого елемента за модулем. Це дозволяє спростити процеси обчислень над багаторозрядними числами і переведення чисел із системи залишкових класів у десяткову систему числення.

Ключові слова: система залишкових класів, базисні числа, система модулів, модифікована досконала форма, розрядність чисел, факторизація.

Kasianchuk M. M.

PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Computer Engineering, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine

THE CONSTRUCTION OF THE MODIFIED PERFECT FORM OF RESIDUAL CLASSES SYSTEM USING FACTORIZATION

Context. The urgent task of finding modules of the system of residue classes, which characterize by increasing the speed of transition of numbers from the system of residue classes into decimal number system.

Objective is to develop a method of constructing modified fourth-module perfect form of the system of residue classes without procedure of finding of the absolute value for inverse element under number transition from residue number system to decimal number system.

Method. The method of determining a set of modules if modified perfect form of system's of residue number was proposed which was based on factorization of numbers product. Usage of this form significantly reduced the computational complexity when arithmetic operations were performing on multi-digital numbers and transferring of numbers from the system of residual classes in the decimal system of calculation by eliminating of the searching procedure of the inverse element in absolute value and multiplying by the basic numbers. The conditions of discovering of any absolute number of modified perfect form of system of residual classes and two of them are unknown. An example of the proposed method for forth-module with modified perfect form system, which received all possible sets of modules with given smallest module. Tabular amounts are presented and analyzed according to the received image of modules.

Results. Utilization of the proposed method of modules selection which has constructed modified perfect form allows to increase the performance of computing systems operating in the system residual classes.

Conclusions. It's the first time of discover of the method which allows to construct modified fourth-module perfect form of the system of residue classes based on factorization without complicated procedure of finding of the absolute value for inverse element. Present work helps to simplify the process of calculating digit number and transfer numbers from the system of residual classes into decimal system.

Keywords: system of residual classes, basic number, system of modules, modified perfect form, bit numbers, factorization.

REFERENCES

1. Nykolajchuk Ja. M. Teorija dzherel informacii'. Ternopil', TzOV „Terno-graf”, 2010, 536 p.
2. Karpinski M., Ivasiev S., Yakymenko I. et al.] Advanced method of factorization of multi-bit numbers based on Fermat's theorem in the system of residual classes, *Control, Automation and Systems : 16th International Conference, Gyeongju, 16–19 October 2016* : proceedings. Los Alamitos, IEEE, 2016, pp. 1484–1486. DOI: 10.1109/ICCAS.2016.7832500.
3. Rabinovich Z. L., Ramanauskas V. A. Tipovye operacii v vychislitel'nyh mashinah. Kiev, Tehnika, 1980, 264 p.
4. Akushskij I. Ja., Judickij D. I. Mashinnaja arifmetika v ostatocnyh klassah. Moscow, Sov.radio, 1968, 440 p.
5. Kozaczko D., Ivasiev S., Yakymenko I. et al. Vector Module Exponential in the Remaining Classes System, *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications : IEEE 8th International Conference, Warsaw, 24–26 September 2015 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2015, pp. 161–163.
6. Kasjanchuk M. M., Jakymenko I. Z., Volyns'kyj O. I. ta in. Teorija alqorytmiv RSA ta El'– Gamalja v rozmezhovanij systemi chyslennja Rademahera-Krestensona, *Visnyk Hmel'nyc'kogo nacional'nogo universytetu. Tehnichni nauky*, 2011, No. 3, pp. 265–273.
7. Jun S., Yatskiv V. Method and Device for Image Coding & Transferring Based on Residue Number System, *Journal Sensors & Transducers*, 2013, Vol. 148, No. 1, pp. 60–65.
8. Krasnobayev V., Koshman S., Mavrina M. Method of Increasing the Reliability of Verification of Data Represented in a Residue Number System, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, Vol. 50, No. 6, pp. 969–976. DOI:10.1007/s10559-014-9688-3.
9. Krasnobayev V. A., Yanko A. S., Koshman S. A. A Method for Arithmetic Comparison of Data Represented in a Residue Number System, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 145–150. DOI: 10.1007/s10559-016-9809-2.
10. Buhstap A. A. Teorija chisel. Moscow, Prosveshhenie, 1966, 384 p.
11. Verbic'kyj O. V. Vstup do kryptologii'. L'viv, VNTL, 1998, 248 p.
12. Kasjanchuk M. M. Teorija ta matematychni zakonomirnosti doskonaloj formy systemy zalyshkovyh klasiv, *Pytannja optymizacii' obchyslen': HHHV Mizhnarodnyj sympozium, Kacyveli, 24–29 veresnja 2009 r. : tezy dopovidej*. Kyi'v, Instytut kibernetiky im. V. M. Glushkova, 2009, pp. 306–310.
13. Kasjanchuk M., Yakymenko I., Pazdriy I. et al. Algorithms of findings of perfect shape modules of remaining classes system, *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics : XIII International Conference, Polyana-Svalyava, 23–25 February 2015 : Proceedings*. L'viv, Lviv Polytechnic National University, 2015, pp. 168–171.
14. Kasjanchuk M. M., Jakymenko I. Z., Pazdriy I. R. ta in. Analitychnyj poshuk moduliv doskonaloj formy systemy zalyshkovyh klasiv ta i'h vykorystannja v kytajs'kij teoremi pro zalyshky, *Visnyk Hmel'nyc'kogo nacional'nogo universytetu : technichni nauky*, 2015, No. 1, pp. 170–176.
15. Nykolaychuk Ya. M., Kasjanchuk M. M., Yakymenko I. Z. Theoretical Foundations for the Analytical Computation of Coefficients of Basic Numbers of Krestenson's Transformation, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, Vol. 50, No. 5, pp. 649–654. DOI: 10.1007/s10559-014-9654-0.
16. Nykolaychuk Ya. M., Kasjanchuk M. M., Yakymenko I. Z. Theoretical Foundations of the Modified Perfect Form of Residue Number System, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, Vol. 52, No. 2, pp. 219–223. DOI: 10.1007/s10559-016-9817-2.
17. Kasjanchuk M. N., Nykolaychuk Y. N., Yakymenko I. Z. Theory and Methods of Constructing of Modules System of the Perfect Modified Form of the System of Residual Classes, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2016, Vol. 48, No. 8, pp. 56–63. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i8.60.

ГИБРИДНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СПЛОШНЫХ ТЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЯВНЫХ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Актуальность. Рассмотрена проблема представления сплошных тел в системах автоматизации проектных работ. Объектом исследования является процесс представления сплошных тел в системах автоматизации проектных работ.

Цель работы – разработка гибридной схемы представления сплошных тел, использующей неявные функций, R-операций и параметрические функции.

Метод. Для моделирования сплошных тел в статье предложено гибридное представление. Под абстрактным понятием «сплошное тело» в работе понимаются ограниченные и замкнутые подмножества евклидова пространства, которые моделируют физические тела; под схемой представления – синтаксически и семантически корректное отношение между множеством формальных описаний математических моделей и множеством сплошных тел. В основе гибридного представления идея одновременного использования граничного и функционального представлений. Предполагается, что при граничном представлении, области определяются своими границами, описанными при помощи параметрических функций, а при функциональном представлении – при помощи неявных функций с использованием положений теории R-функций. Для гибридного представления используются функции расстояния со знаком, которые позволяют рассматривать подобласти, описанные параметрическими функциями, как аргументы R-операций (конъюнкции, дизъюнкции или отрицания) при построении единой неявной функции, соответствующей сложному телу. Чтобы в произвольной точке вычислить расстояние со знаком до границы области, ограниченной параметрическими функциями, предложено использовать вспомогательное построение адаптивных дискретных моделей контуров. Расстояние от точки до границы аппроксимируется расстоянием от этой точки до ближайшего дискретного элемента. Для определения знака функции используется тест четности.

Результаты. Разработанная гибридная схема представления реализована в программном продукте, на основе которого решены задачи построения моделей сложных тел.

Выводы. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили корректность и работоспособность предложенного математического обеспечения. Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы оптимизировать вычисление функций расстояния со знаком, например, например, при помощи технологий параллельных вычислений.

Ключевые слова: сплошное тело, неявная функция, R функция, параметрическая функция, дискретная модель, функция расстояния, тест четности, автоматизированное проектирование.

НОМЕНКЛАТУРА

$$B_i^n(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \text{ – полином Бернштейна;}$$

$$e_i = (\mathbf{p}_{i0}; \mathbf{p}_{i1}) \text{ – ребро плоского графа;}$$

$\{\mathbf{i}, \mathbf{j}\}$ – ортонормированный базис декартовой системы координат двумерного пространства;

$\{\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}\}$ – ортонормированный базис декартовой системы координат трехмерного пространства;

$\mathbf{p} = (x_p; y_p)$ – радиус-вектор произвольной точки двумерного пространства;

\mathbf{p}_{i0} – радиус-вектор начала ребра e_i ;

\mathbf{p}_{i1} – координата конца ребра e_i ;

$\mathbf{q} = (x_q; y_q; z_q)$ – радиус-вектор произвольной точки трехмерного пространства;

\mathbf{R}^n – n -мерное координатное пространство;

t – скалярный аргумент;

$tr = (\mathbf{q}_{i0}; \mathbf{q}_{i1}; \mathbf{q}_{i2})$ – треугольник, заданный радиус-векторами вершин (упорядоченной тройкой);

$x(t)$ – непрерывная функция параметра t ;

$y(t)$ – непрерывная функция параметра t ;

$[]^T$ – операция транспонирования;

$\|\mathbf{a}\|$ – евклидова норма вектора \mathbf{a} ;

$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle$ – операция вычисления скалярного произведения векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} ;

$[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ – операция вычисления векторного произведения векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} ;

$[t]$ – операция нахождения наибольшего целого, меньшего чем t .

ВВЕДЕНИЕ

Важной частью проектирования сложных технических объектов является исследование их эксплуатационных характеристик. Многие технические объекты и конструкции обладают сложной формой и математические модели, используемые для их исследования, как правило, требуют адекватного описания соответствующей геометрической информации. В современных системах автоматизированного проектирования для описания формы объектов разработаны специальные подсистемы. Основой таких подсистем являются схемы представления (representation schemes) сплошных тел (solids). Под абстрактным понятием «сплошное тело» понимаются ограниченные замкнутые подмножества евклидова пространства, которые моделируют физические тела. Схема представления – это синтаксически и семантически корректное отношение между множеством формальных описаний математических моделей и множеством сплошных тел.

В исследованиях по компьютерному моделированию сплошных тел, выполненных в работах А. G. Requicha [1–3], выделены восемь основных схем представления: 1) инженерные чертежи; 2) каркасное представление; 3) представление экземплярами примитивов; 4) воксельное представление; 5) дискретные модели; 6) конструктивная сплошная (блочная) геометрия (Constructive Solid Geometry, CSG); 7) схемы представления разверткой; 8) граничное представление (Vrep);

Анализ приведенных выше «классических» представлений показал, что их практическое применение ограничено или требует значительных усилий для построения моделей сложных геометрических объектов. С точки зрения универсальности одним из наиболее перспективных выглядит функциональное представление, в основе которого использование языка неявных математических функций с конструктивными возможностями теории R-функций, разработанной академиком Рвачевым В. Л. [4–6]. Однако, его использование инженерами весьма затруднительно с точки зрения построения и верификации модели.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Функциональное представление с использованием неявных функций весьма универсально, однако в авиа-, авто- и судостроении весьма распространено использование параметрических кривых или поверхностей (например, поверхностей Безье, β -сплайнов и т. п.), ограничивающих элементы объекта. При этом, построение системы границ (граничного представления) нестандартного объекта (например, с разветвленной структурой технологических отверстий) достаточно трудное. Возможный способ упрощения процесса моделирования геометрических объектов – комбинирование элементов функционального и граничного представлений (гибридное представление), например, путем преобразования граничных моделей в функциональные. Переход от граничного представления примитива (системы параметрических кривых или поверхностей) к эквивалентному функциональному (неявному уравнению) при помощи разрешения соответствующей системы возможен лишь в относительно простых случаях и, следовательно, актуальной является разработка методов решения этой задачи.

В основе граничного представления лежит теорема Жордана-Брауера (обобщение теоремы Жордана для n -мерного пространства), которая гарантирует, что любое $(n-1)$ -мерное подмногообразие в \mathbf{R}^n , гомеоморфное сфере, разбивает пространство на две связные компоненты и является их общей границей. То есть, в двумерном случае плоская простая (не имеющая самопересечений) замкнутая кривая разбивает плоскость на две связные компоненты, одну из которых можно считать внутренней, другую внешней. Аналогично в трехмерном пространстве простая замкнутая поверхность разбивает пространство на две связные компоненты: внутреннюю и внешнюю. Таким образом, можно говорить, что простое ограниченное замкнутое множество $\mathbf{L} \subset \mathbf{R}^n$ представляет некоторый геометрический

объект Ω (при этом \mathbf{L} является границей Ω). При этом справедливо утверждение, что для всякого замкнутого множества \mathbf{L} может быть построено непрерывное неявное уравнение [4], простейший вариант которого – нормальное уравнение

$$\inf_{Y \in \mathbf{L}} \|X - Y\| = 0, \quad X \in \mathbf{R}^n.$$

Функция

$$\text{dist}(X, \mathbf{L}) = \inf_{Y \in \mathbf{L}} \|X - Y\| \quad (1)$$

является расстоянием от точки X до самой ближайшей к ней точки множества \mathbf{L} . Данная функция в произвольной взятой точке X принимает значение, равное радиусу наибольшей гиперсферы с центром в X , полностью заключенной (вписанной) в \mathbf{L} , если X – внутренняя точка \mathbf{L} , и равно радиусу наименьшей гиперсферы с центром в X , касающейся \mathbf{L} , если X – внешняя точка \mathbf{L} .

Предположим, что также дана функция

$$\text{sign}(X, \mathbf{L}) = \begin{cases} +1, & X \in \Omega, \\ -1, & X \notin \Omega, \end{cases} \quad (2)$$

которая равна $+1$ во внутренних точках \mathbf{L} и равна -1 во внешних точках \mathbf{L} . Соответственно функция

$$\text{distance}(X, \mathbf{L}) = \text{sign}(X, \mathbf{L}) \text{dist}(X, \mathbf{L}) \quad (3)$$

будет больше нуля во внутренних точках \mathbf{L} , равна нулю, если $X \in \mathbf{L}$, и меньше нуля во внешних точках \mathbf{L} . Такая функция неявно определяет геометрический объект Ω . Таким образом, задача состоит в построении функций (1) и (2) при условии, что \mathbf{L} – представленная параметрически замкнутая граница.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Говорят, что некоторое множество точек Ω задано неявно, если для каждой точки P определен логический предикат $S(P)$ такой, что

$$\Omega = \{P : S(P) = \text{true}\}.$$

Простейшей формой такого предиката является ограничение на знак некоторой действительной функции в виде неравенства $F(P) \geq 0$. Например, функция $\text{usphere}(x, y, z) = 1 - x^2 - y^2 - z^2$ больше нуля в области, ограниченной единичной сферой, равна нулю на границе этой области и меньше нуля во внешних точках. Функциональное представление на базе неявных функций для более сложных областей можно строить в конструктивной манере, используя логические операции дизъюнкции, конъюнкции или отрицания, которые получили развитие в работах академика Рвачева В. Л. [4–6] и его научной школы. В частности, детальный анализ преобразований координат и суперпозиций с периодическими функциями для функционального представления геометрических объектов с различными типами симметрий выполнен в работах [7–10].

При граничном представлении сплошное тело представляется совокупностью ограничивающих его границ. В двумерном случае область ограничивается кривыми, в трехмерном – поверхностями. Сложные объекты могут быть описаны с использованием фрагментов ориентированных параметрических кривых или поверхностей, а также при помощи логических эйлеровых операций [11–13]. Актуальные научные исследования [14–17] посвящены оптимизации рендеринга поверхностей сплошных тел при использовании граничных моделей в качестве примитивов конструктивной блочной геометрии.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Двумерные области

Пусть простая замкнутая граница некоторой двумерной области представлена параметрической кривой (которая может быть также составной или сплайном)

$$\text{curve}(t) = \mathbf{p} + x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j}, \quad t_0 \leq t \leq t_1, \quad (4)$$

Нахождение расстояния от произвольной точки пространства до ближайшей точки кривой – задача весьма экстенсивная, поэтому заменим кривую $\text{curve}(t)$ ее дискретной моделью для приблизительного вычисления функции (1).

Пусть дискретная модель кривой – это плоский граф, представленный списком n ребер

$$\mathbf{E}_2 = \{e_i = (\mathbf{p}_{i0}; \mathbf{p}_{i1})\}, \quad i = \overline{1, n},$$

тогда функция (1) примет вид

$$\begin{aligned} \text{dist}(x, y, \text{curve}(t)) &= \text{dist}(\mathbf{p}, \text{curve}(t)) \approx \text{dist}_2(\mathbf{p}, \mathbf{E}_2) = \\ &= \min_{e_i = (\mathbf{p}_{i0}; \mathbf{p}_{i1}) \in \mathbf{E}_2} d_2(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1}), \end{aligned} \quad (5)$$

В формуле (5) для определения расстояния от точки \mathbf{p} до отрезка, заданного точками \mathbf{p}_{i0} и \mathbf{p}_{i1} (вершины ребра $e_i = (\mathbf{p}_{i0}; \mathbf{p}_{i1})$), использована функция $d_2(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1})$, которая может быть представлена формулой

$$d_2(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1}) = \begin{cases} \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{i0}\|, & \text{если } \langle \mathbf{p} - \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0} \rangle \leq 0, \\ \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{i1}\|, & \text{если } \langle \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0} \rangle \leq \langle \mathbf{p} - \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0} \rangle, \\ \left\| \mathbf{p} - \left(\mathbf{p}_{i0} + \frac{\langle \mathbf{p} - \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0} \rangle}{\langle \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0} \rangle} (\mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0}) \right) \right\|, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

Стоит отметить, что функцию (6) можно использовать для нахождения расстояния от точки до отрезка в трехмерном случае [18].

Очевидно, что с увеличением числа ребер в графе \mathbf{E}_2 точность формулы (5) будет увеличиваться. Однако кривизна кривой $\text{curve}(t)$ может быть переменной, следовательно, для достижения наилучшей аппроксимации необходимо обеспечить сгущение ребер в области наибольшей кривизны. В таком случае можно воспользоваться следующим алгоритмом.

Алгоритм nonuniform-curve-mesh

Входные данные:

$\text{curve}(t)$, $t_0 \leq t \leq t_1$, – формула кривой, описывающая границу; $n \geq 2$ – количество узлов в начальной дискретной модели контура;

Инициализация:

Построим $\mathbf{E}_t = \{e_i = (t_{i0}; t_{i1})\}$, $t_{i0} = t_0 + ih$,

$t_{i1} = t_0 + (i+1)h$, $h = \frac{t_1 - t_0}{n-1}$, $i = \overline{0, n-2}$ – равномерную

дискретную модель кривой $\text{curve}(t)$ в параметрическом пространстве;

Повторять:

Для каждого $e_i = (t_{i0}; t_{i1}) \in \mathbf{E}_t$:

Если отклонение ребра от границы $> \delta$ то удалить

ребро e_i и добавить два новых ребра: $\left(t_{i0}; \frac{t_{i0} + t_{i1}}{2} \right)$ и

$\left(\frac{t_{i0} + t_{i1}}{2}; t_{i1} \right)$;

До тех пор пока были вставки новых ребер;

Вернуть $\mathbf{E}_2 = \{e_i = (\text{curve}(t_{i0}); \text{curve}(t_{i1}))\}$, $i = \overline{1, |\mathbf{E}_t|}$;

В результате будет построена адаптивная дискретная модель, которую можно использовать для аппроксимации по формуле (5).

Например, область, ограниченная замкнутой кривой

Безье $\text{sbezier}(t) = \sum_{i=0}^9 B_i^9(t) P_i$, $0 \leq t \leq 1$, построенной на

последовательности из 10 контрольных точек: $\mathbf{p}_0 = (0; 0)$, $\mathbf{p}_1 = (0; 3)$, $\mathbf{p}_2 = (1; 3)$, $\mathbf{p}_3 = (1; 1)$, $\mathbf{p}_4 = (4; 1)$, $\mathbf{p}_5 = (4; -1)$, $\mathbf{p}_6 = (1; -1)$, $\mathbf{p}_7 = (1; -3)$, $\mathbf{p}_8 = (0; -3)$ и $\mathbf{p}_9 = (0; 0)$, при $t_0 = 0$ и $t_1 = 1$, $n = 41$ и $\delta = 0,02$ будет представлена дискретной моделью, изображенной на рис. 1.

Граф \mathbf{E}_2 , по сути, является замкнутым многоугольником, аппроксимирующим кривую. В соответствии с теоремой Жордана для построения функции (2) можно воспользоваться тестом четности, возможно, первая реализация которого рассмотрена в работе [19]. Он состоит в том, что из точки P выпускается луч, например, в положительном направлении оси Ox , тогда для определения принадлежности точки многоугольнику достаточно подсчитать число c – количество пересечений луча и ребер графа. Единственный вырожденный случай будет, если луч пересекает ребра в вершине. В таком случае используется такой прием: ребро считается пересеченным, если одна его вершина строго ниже луча, а вторая выше или лежит на луче. В результате функция (2) примет вид

$$\begin{aligned} \text{sign}(x, y, \text{curve}(t)) &= \text{sign}(\mathbf{p}, \text{curve}(t)) \approx \text{sign}_2(\mathbf{p}, \mathbf{E}_2) = \\ &= \begin{cases} +1, & \text{если } c \text{ нечетное,} \\ -1, & \text{иначе.} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

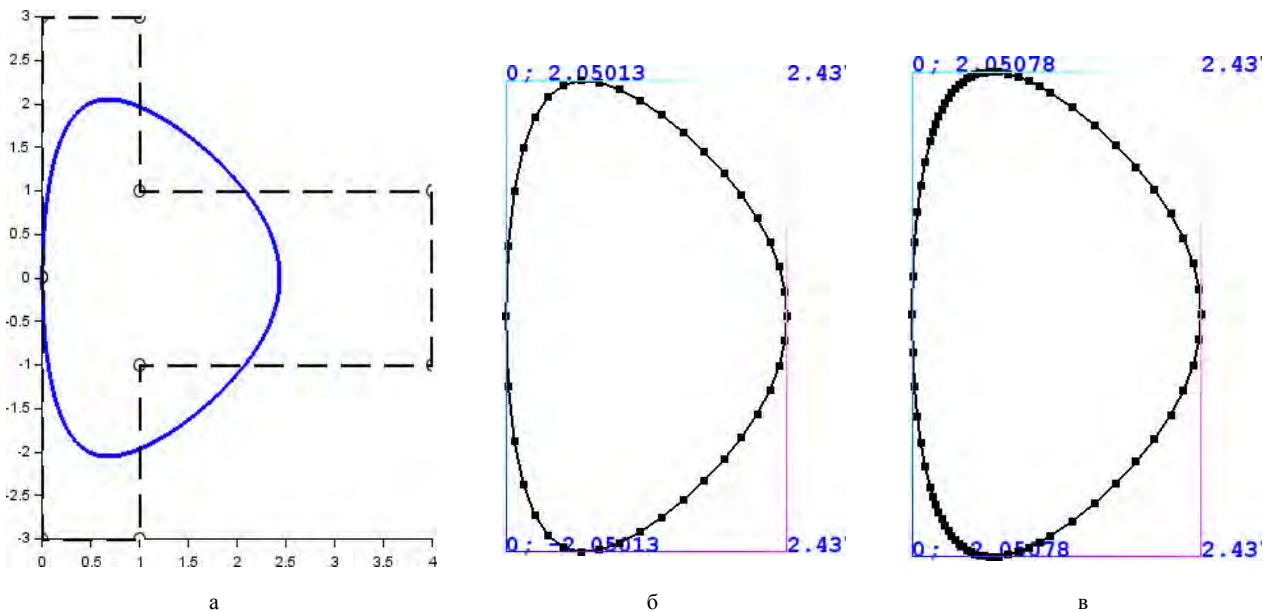


Рисунок 1 – Замкнутая кривая Безье:

а – исходная кривая и ее контрольные точки; б – начальная дискретная модель контура; в – адаптивная дискретная модель контура

Таким образом, абсолютное значение функции (3) может быть определено при помощи формул (5) и (6) с некоторой точностью, определяемой параметрами метода: количеством точек в начальной дискретной модели контура n и параметром точности аппроксимации δ . При этом знак этой функции может быть определен при помощи теста четности (7). Например, для приведенной выше кривой Безье (рис. 1) распределение значений аппроксимации функции (3) при $n = 41$ и $\delta = 0,02$ примет вид, представленный на рис. 2.

2. Трехмерные области

Пусть простая замкнутая граница некоторой трехмерной области задана M лоскутами (патчами, англ. patches), являющимися параметрическими поверхностями вида:

$$\text{surface}_l(u, v) = \mathbf{q} + x(u, v)\mathbf{i} + y(u, v)\mathbf{j} + z(u, v)\mathbf{k},$$

$$u_{l0} \leq u \leq u_{l1}, \quad v_{l0} \leq v \leq v_{l1} \quad l = \overline{1, m}.$$

Как и в двумерном случае, лоскуты $\text{surface}_j(u, v)$, в том числе, могут быть сплайнами или составными поверхностями.

Для нахождения расстояния от произвольной точки пространства до ближайшей точки поверхности построим дискретную модель границы области, используя треугольные элементы. К такой дискретной модели предъявляется только требование согласованности узлов (и ребер в порядке их обхода) элементов.

Пусть дискретная модель поверхности – это множество из n треугольных элементов, нормаль к которым (в порядке обхода узлов) направлена наружу геометрического объекта:

$$\mathbf{E}_3 = \{tr_i = (\mathbf{q}_{i0}; \mathbf{q}_{i1}; \mathbf{q}_{i2})\}, \quad i = \overline{1, n}.$$

В таком случае в формуле (1) для приближенного ее вычисления граница \mathbf{L} может быть заменена дискретной моделью \mathbf{E}_3 :

$$\text{dist}(x, y, z, \mathbf{L}) = \text{dist}(\mathbf{q}, \mathbf{L}) \approx \text{dist}_3(\mathbf{q}, \mathbf{E}_2) =$$

$$= \min_{t_i=(\mathbf{q}_{i0}; \mathbf{q}_{i1}; \mathbf{q}_{i2})} d_3(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i0}, \mathbf{q}_{i1}, \mathbf{q}_{i2}) \quad (8)$$

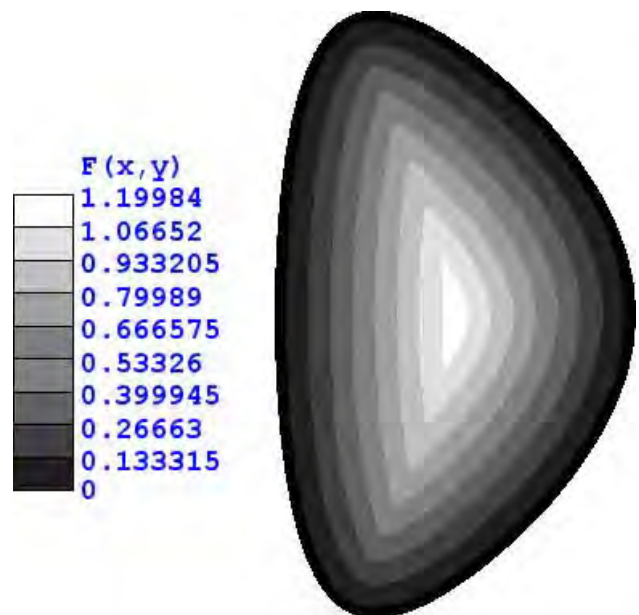


Рисунок 2 – Распределение значений функции (3) в области, ограниченной кривой Безье

В формуле (8) $d_3(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i0}, \mathbf{q}_{i1}, \mathbf{q}_{i2})$ – функция для определения расстояния от точки \mathbf{q} до треугольника, заданного точками \mathbf{q}_{i0} , \mathbf{q}_{i1} и \mathbf{q}_{i2} , которая может быть представлена формулой

$$d_3(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i0}, \mathbf{q}_{i1}, \mathbf{q}_{i2}) = \begin{cases} |l|, & v_0 \geq 0 \wedge v_1 \geq 0 \wedge v_2 \geq 0, \\ \mathbf{q} - \mathbf{q}_{i0}, & v_0 < 0 \wedge v_1 \geq 0 \wedge v_2 < 0, \\ \mathbf{q} - \mathbf{q}_{i1}, & v_0 < 0 \wedge v_1 < 0 \wedge v_2 \geq 0, \\ \mathbf{q} - \mathbf{q}_{i2}, & v_0 \geq 0 \wedge v_1 < 0 \wedge v_2 < 0, \\ d_2(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i0}, \mathbf{q}_{i1}), & v_0 < 0 \wedge v_1 \geq 0 \wedge v_2 \geq 0, \\ d_2(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i1}, \mathbf{q}_{i2}), & v_0 \geq 0 \wedge v_1 < 0 \wedge v_2 \geq 0, \\ d_2(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i2}, \mathbf{q}_{i0}), & v_0 \geq 0 \wedge v_1 \geq 0 \wedge v_2 < 0. \end{cases} \quad (9)$$

В формуле (9): $v_0 = \langle \mathbf{n}, [\mathbf{e}_{01}, \mathbf{c}_0] \rangle$, $v_1 = \langle \mathbf{n}, [\mathbf{e}_{12}, \mathbf{c}_1] \rangle$ и $v_2 = \langle \mathbf{n}, [\mathbf{e}_{20}, \mathbf{c}_2] \rangle$ – значения, используемые для определения взаимного расположения точки и вершин треугольника; $\mathbf{e}_{01} = \mathbf{q}_{i1} - \mathbf{q}_{i0}$, $\mathbf{e}_{12} = \mathbf{q}_{i2} - \mathbf{q}_{i1}$ и $\mathbf{e}_{20} = \mathbf{q}_{i0} - \mathbf{q}_{i2}$ – векторы, образованные сторонами треугольника; $\mathbf{n} = [\mathbf{e}_{01}, -\mathbf{e}_{20}]$ – внешняя нормаль к плоскости треугольника; $l = \frac{\langle \mathbf{q} - \mathbf{q}_{i0}, \mathbf{n} \rangle}{\|\mathbf{n}\|}$ – кратчайшее расстояние от вершины \mathbf{q} до плоскости треугольника; $\mathbf{b} = \mathbf{q} - \frac{l}{\|\mathbf{n}\|} \mathbf{n}$ – радиус-вектор проекции точки \mathbf{q} на плоскость треугольника; $\mathbf{c}_0 = \mathbf{b} - \mathbf{q}_{i0}$, $\mathbf{c}_1 = \mathbf{b} - \mathbf{q}_{i1}$ и $\mathbf{c}_2 = \mathbf{b} - \mathbf{q}_{i2}$ – векторы, направленные из вершин треугольника в \mathbf{b} .

С точки зрения рациональности использования необходимых для вычисления формулы (8) компьютерных ресурсов, как и в двумерном случае, граф \mathbf{E}_3 должен быть адаптивным к кривизне границы. Построение такого графа для множества параметрических лоскутов можно выполнить при помощи следующего алгоритма.

Алгоритм nonuniform-surface-mesh

Входные данные:

M – количество лоскутов; $\text{surface}_l(u, v), u_{l0} \leq u \leq u_{l1}, v_{l0} \leq v \leq v_{l1}, l = \overline{1, M}$ – формула поверхности каждого лоскута; $n_l \geq 2$ – количество узлов в начальной дискретной модели контура вдоль абсциссы параметрических координат; $m_l \geq 2$ – количество узлов в начальной дискретной модели контура вдоль ординаты параметрических координат

Инициализация:

$\mathbf{E}_3 = \emptyset$;

Для $l = 1, \dots, M$:

Для $i = 0, \dots, n_l$:

Для $j = 0, \dots, m_l$:

$$\mathbf{p}_{ij} = \left(u_{i0} + i \frac{u_{i1} - u_{i0}}{n_l - 1}; v_{j0} + j \frac{v_{j1} - v_{j0}}{m_l - 1} \right);$$

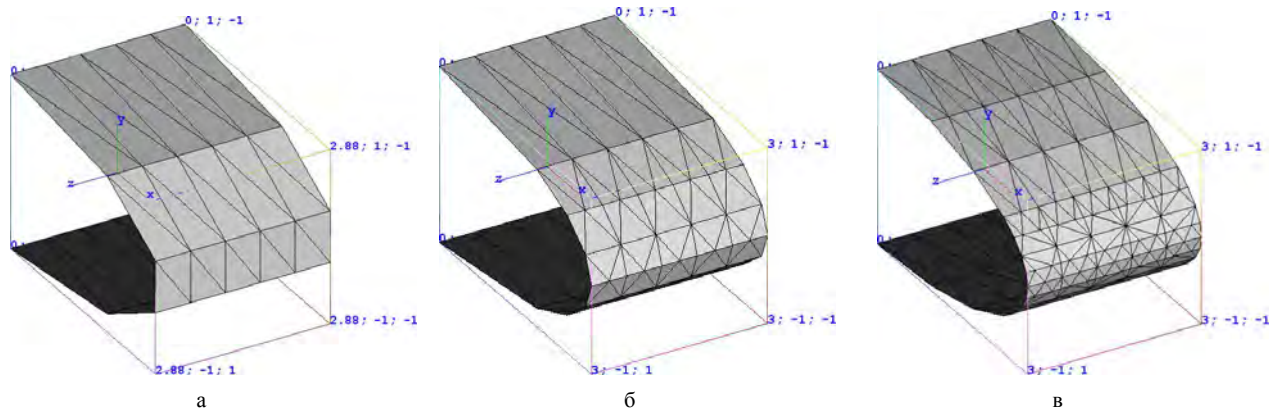


Рисунок 3 – Дискретизация лоскута при $n_l = 6, m_l = 6$: а – без адаптации к кривизне; б – адаптация к кривизне при $\delta = 0,1$; в – адаптация к кривизне при $\delta = 0,05$

$\mathbf{E}_{3l} = \emptyset$;

для $i = 0, \dots, n_l - 1$:

для $j = 0, \dots, m_l - 1$:

Если $\mathbf{p}_{ij} \neq \mathbf{p}_{i+1j}$ и $\mathbf{p}_{ij} \neq \mathbf{p}_{i+1j}$ и $\mathbf{p}_{i+1j} \neq \mathbf{p}_{i+1j+1}$, тогда:

$$\mathbf{E}_{3l} = \mathbf{E}_{3l} \cup (\mathbf{p}_{ij}; \mathbf{p}_{i+1j}; \mathbf{p}_{i+1j+1});$$

Если $\mathbf{p}_{ij} \neq \mathbf{p}_{i+1j+1}$ и $\mathbf{p}_{ij} \neq \mathbf{p}_{ij+1}$ и $\mathbf{p}_{ij+1} \neq \mathbf{p}_{i+1j+1}$, тогда:

$$\mathbf{E}_{3l} = \mathbf{E}_{3l} \cup (\mathbf{p}_{ij}; \mathbf{p}_{i+1j+1}; \mathbf{p}_{ij+1});$$

Повторять:

Для каждого $tr = (\mathbf{p}_0; \mathbf{p}_1; \mathbf{p}_2) \in \mathbf{E}_{3l}$:

Если отклонение ребра $\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_1$ от границы $> \delta$, тогда в множество \mathbf{E}_{3l} вставить узел с координатами $\frac{\mathbf{p}_0 + \mathbf{p}_1}{2}$ и обновить триангуляцию

Иначе если отклонение ребра $\mathbf{p}_1 \mathbf{p}_2$ от границы $> \delta$ тогда в множество \mathbf{E}_{3l} вставить узел с координатами

$$\frac{\mathbf{p}_0 + \mathbf{p}_1}{2} \text{ и обновить триангуляцию}$$

Иначе если отклонение ребра $\mathbf{p}_2 \mathbf{p}_0$ от границы $> \delta$, тогда в множество \mathbf{E}_{3l} вставить узел с координатами

$$\frac{\mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_0}{2} \text{ и обновить триангуляцию;}$$

До тех пор, пока были вставки новых ребер;

$$\mathbf{E}_{tl} = \{tr_i = (\text{surface}(\mathbf{p}_{i0}); \text{surface}(\mathbf{p}_{i1}); \text{surface}(\mathbf{p}_{i2}))\},$$

$$i = \overline{1, |\mathbf{E}_{3l}|};$$

$$\mathbf{E}_3 = \mathbf{E}_3 \cup \mathbf{E}_{tl};$$

Вернуть \mathbf{E}_3 ;

Операция вставки узла и обновления триангуляции в простейшем случае предполагает удаление треугольников, соседних в обрабатываемом ребре, и добавление новых соединением вершин образовавшегося многоугольника со вставляемым в середину ребра узлом. В результате выполнения алгоритма будет построена адаптивная к кривизне поверхности дискретная модель (некоторые примеры адаптации приведены рис. 3), которую можно использовать для аппроксимации по формуле (8)

Результатом работы алгоритма nonuniform-surface-mesh, входными данными которого являются лоскуты ограниченной замкнутой поверхности, будет замкнутый многогранник с треугольными гранями. Для определения знака функции расстояния в точке $\mathbf{q} = (x_q; y_q; z_q)$ на первом шаге строятся многоугольники, образованные сечением многогранника плоскостью $z = z_q$ (аналогично двумерному случаю для устранения возможных вырожденных случаев, определенных касанием плоскостью треугольника, считается, что треугольник пересекается плоскостью, если хотя бы один узел строго глубже и хотя бы один ближе или в плоскости $z = z_q$). Затем используется процедура подсчета числа c – пересечений луча и многоугольника, полностью эквивалентная двумерному случаю. В результате функция определения знака примет вид (7).

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Если исходной кривой будет, например, многоугольник, определенный замкнутой ломанной $\text{segments}(t) = (1-w)\mathbf{p}_i + w\mathbf{p}_{i+1}$, $w = t - i$, $i = \lfloor t \rfloor$, $0 \leq t \leq 12$ с последовательностью вершин $\mathbf{p}_0 = (0; 0)$, $\mathbf{p}_1 = (3; 0)$, $\mathbf{p}_2 = (3; 2)$, $\mathbf{p}_3 = (2; 2)$, $\mathbf{p}_4 = (2; 1)$, $\mathbf{p}_5 = (1; 1)$, $\mathbf{p}_6 = (1; 4)$, $\mathbf{p}_7 = (2; 4)$, $\mathbf{p}_8 = (2; 3)$, $\mathbf{p}_9 = (3; 3)$, $\mathbf{p}_{10} = (3; 5)$, $\mathbf{p}_{11} = (0; 5)$, $\mathbf{p}_{12} = (0; 0)$, при $t_0 = 0$, $t_1 = 12$ и $n = 13$ (значение параметра δ в данном случае не влияет на результат), то распределение значений функции (3) примет вид, представленный на рис. 4.

В работах [20, 21] рассмотрены особенности моделирования профилей крыльев с использованием кривых Безье. Полученные в этих работах результаты позволяют исследовать аэродинамические свойства, но в задачах исследования прочности необходимо учитывать также технологические отверстия. Например, симметричный профиль НАСА 0011 (рис. 5) может быть представлен составной кривой [20]

$$\text{naca}_{0011}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^5 \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \mathbf{t}_i, & 0 \leq t \leq 1, \\ \sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} (t-1)^i (2-t)^{n-i} \mathbf{b}_i, & 1 < t \leq 2, \end{cases}$$

с контрольными точками: $\mathbf{t}_0 = (0; 0)$, $\mathbf{t}_1 = (1,14034; 2,44284)$, $\mathbf{t}_2 = (11,1025; 3,65375)$, $\mathbf{t}_3 = (30,8809; 1,13309)$, $\mathbf{t}_4 = (39,9276; 0,09712)$, $\mathbf{t}_5 = (40; 0)$ (верхний изгиб крыла) и $\mathbf{b}_0 = (0; 0)$, $\mathbf{b}_1 = (1,14034; -2,44284)$, $\mathbf{b}_2 = (11,1025; -3,65375)$, $\mathbf{b}_3 = (30,8809; -1,13309)$, $\mathbf{b}_4 = (39,9276; -0,09712)$, $\mathbf{b}_5 = (40; 0)$ (нижний изгиб крыла).

Стоит отметить, что функции вида (3), построенные для контуров двумерных областей, могут быть использованы в качестве операндов (примитивов) R-операций вместе с рассмотренными выше неявными функциями. Например, профиль крыла с тремя технологическими отверстиями (рис. 6) можно представить функцией

$$f_{\text{naca}}(x, y) = \text{distance}(x, y, \text{naca}_{0011}(t)) \wedge \neg \text{rectangle}(x - x_1, y, w_1, h_1) \wedge \neg \text{circle}(x - x_2, y, r_2) \wedge \neg \text{rectangle}(x - x_3, y, w_3, w_3),$$

где функция $\text{rectangle}(x; y; w; h) = \left[1 - \left(\frac{2x}{w} \right)^2 \right] \wedge \left[1 - \left(\frac{2y}{h} \right)^2 \right]$,

$w > 0$, $h > 0$ соответствует области, ограниченной прямоугольником шириной w и высотой h с центром в начале координат; функция $\text{circle}(x; y; r) = 1 - \frac{x^2 + y^2}{r^2}$

представляет область, ограниченную окружностью радиуса r с центром в начале координат; $x_1, x_2, x_3, w_1, h_1, r_2, w_3$ – параметры положения и размеров отверстий.

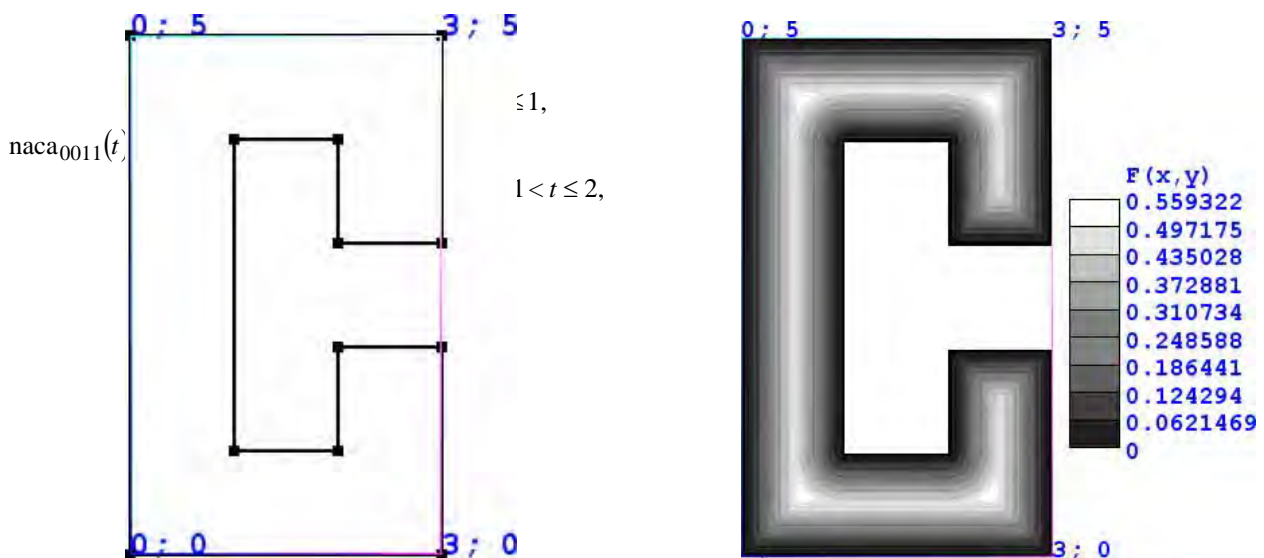


Рисунок 4 – Распределение значений функции (3) для многоугольника

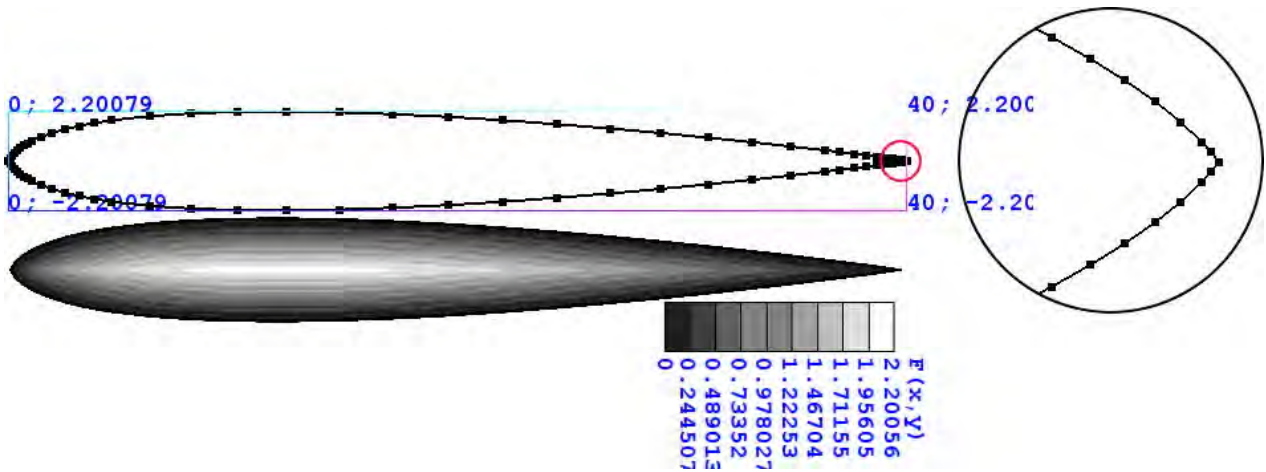


Рисунок 5 – Профиль NASA 0011: дискретная модель контура и распределение значений функции (3)

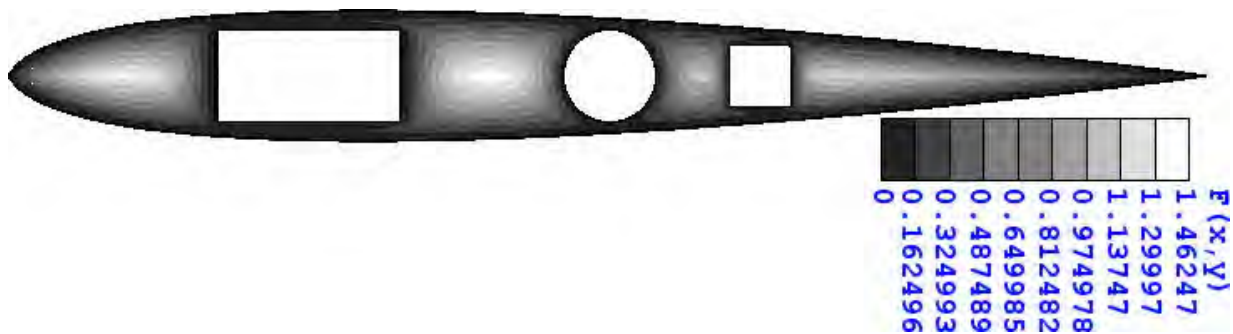


Рисунок 6 – Профиль NASA 0011 с технологическими отверстиями: $x_1 = 10$, $x_2 = 20$, $x_3 = 25$, $w_1 = 6$,

$$h_1 = 3, r_2 = 1,5, w_3 = 2$$

Рассмотрим поверхность модели летательного (рис. 7), определенного шестью лоскутами (поверхностями Безье) с контрольными точками, заданными матрицами:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (0; -4; 0) & (0; -3,9; 0,01) & (0; -1,1; 0,4) & (0; 0; 3) \\ (4; -2; 0) & (4; -1,9; 0,01) & (4; -0,1; 0,4) & (4; 0; 3) \\ (7; -3; 0) & (7; -2,9; 0,01) & (7; -0,1; 0,4) & (2; 0; 1) \\ (8; -1; 0) & (8; -0,9; 0) & (8; 0; 0) & (8; 0; 0) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (8; 1; 0) & (8; 0,9; 0) & (8; 0; 0) & (8; 0; 0) \\ (7; 3; 0) & (7; 2,9; 0,01) & (7; 0,1; 0,4) & (2; 0; 1) \\ (4; 2; 0) & (4; 1,9; 0,01) & (4; 0,1; 0,4) & (4; 0; 3) \\ (0; 4; 0) & (0; 3,9; 0,01) & (0; 1,1; 0,4) & (4; 0; 3) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} (8; -1; 0) & (8; -0,9; 0) & (8; 0; 0) & (8; 0; 0) \\ (7; -3; 0) & (7; -2,9; -0,01) & (7; -0,1; -0,4) & (7; 0; -0,4) \\ (4; -2; 0) & (4; -1,9; -0,01) & (4; -0,1; -0,4) & (4; 0; -0,4) \\ (0; -4; 0) & (0; -3,9; -0,01) & (0; -1,1; -0,4) & (0; 0; -0,4) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} (0; 4; 0) & (0; 3,9; -0,01) & (0; 1,1; -0,4) & (0; 0; -0,4) \\ (4; 2; 0) & (4; 1,9; -0,01) & (4; 0,1; -0,4) & (4; 0; -0,4) \\ (7; 3; 0) & (7; 2,9; -0,01) & (7; 0,1; -0,4) & (7; 0; -0,4) \\ (8; 1; 0) & (8; 0,9; 0) & (8; 0; 0) & (8; 0; 0) \end{bmatrix},$$

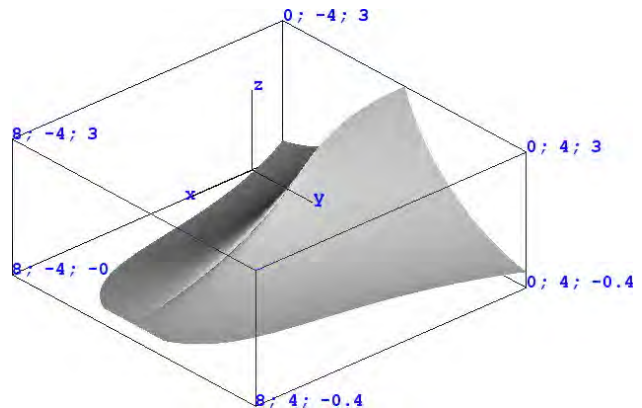


Рисунок 7 – Поверхность летательного аппарата

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} (0; -4; 0) & (0; -3,9; -0,01) & (0; -1,1; -0,4) & (0; 0; -0,4) \\ (0; -4; 0) & (0; -3,9; 0,01) & (0; -1,1; 0,4) & (0; 0; 3) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} (0; 4; 0) & (0; 3,9; 0,01) & (0; 1,1; 0,4) & (0; 0; 3) \\ (0; 4; 0) & (0; 3,9; -0,01) & (0; 1,1; -0,4) & (0; 0; -0,4) \end{bmatrix}.$$

Поверхность каждого такого лоскута, заданного матрицей контрольных точек \mathbf{Q} (размером $n \times m$), описывается известной параметрической формулой:

$$\text{sbezier}(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(u) B_j^m(v) \mathbf{Q}_{ij},$$

$$0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1.$$

Распределения значений функции расстояния со знаком для модели летательного аппарата в сечениях плоскостями $y = 0$ и $z = 0$, соответственно представлены на рис. 8а и 8б.

Как и в двумерном случае, трехмерные функции расстояния могут выступать в качестве операндов R-операций для определения более сложных объектов. Например, для представления модели летательного аппарата в виде, представленном на рис. 9, может быть использована формула

$$F(x, y, z) = \text{distance}(x, y, z, \text{surface}(A, B, C, D, E, F)) \wedge \text{Torp}(x, y - 1.5, z) \wedge \text{Torp}(x, y + 1.5, z), \quad (10)$$

$$\text{Torp}(x, y, z) = x \wedge (r^2(x) - y^2 - z^2) \wedge (4 - x),$$

$$r(x) = \begin{cases} 1 - 0,5x, & x \leq 1, \\ 0,5, & 1 < x \leq 3, \\ 0,5 - 0,5(x - 3), & 3 < x. \end{cases}$$

Распределение значений функции (10) в сечении плоскостью $z = 0$ изображено на рис. 10.

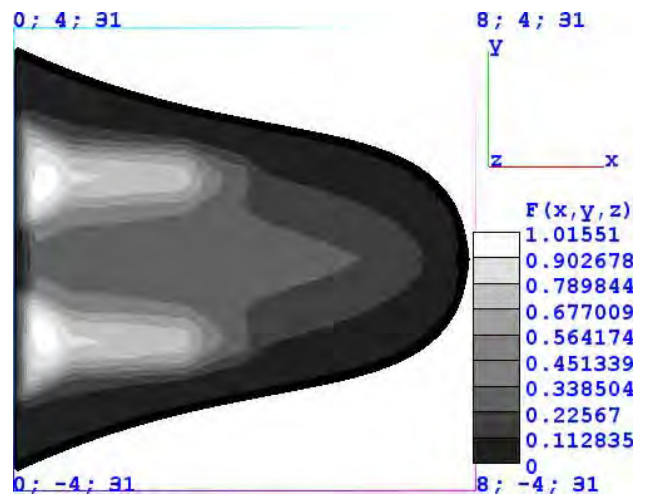


Рисунок 10 – Распределение значений функции (10) в сечении плоскостью

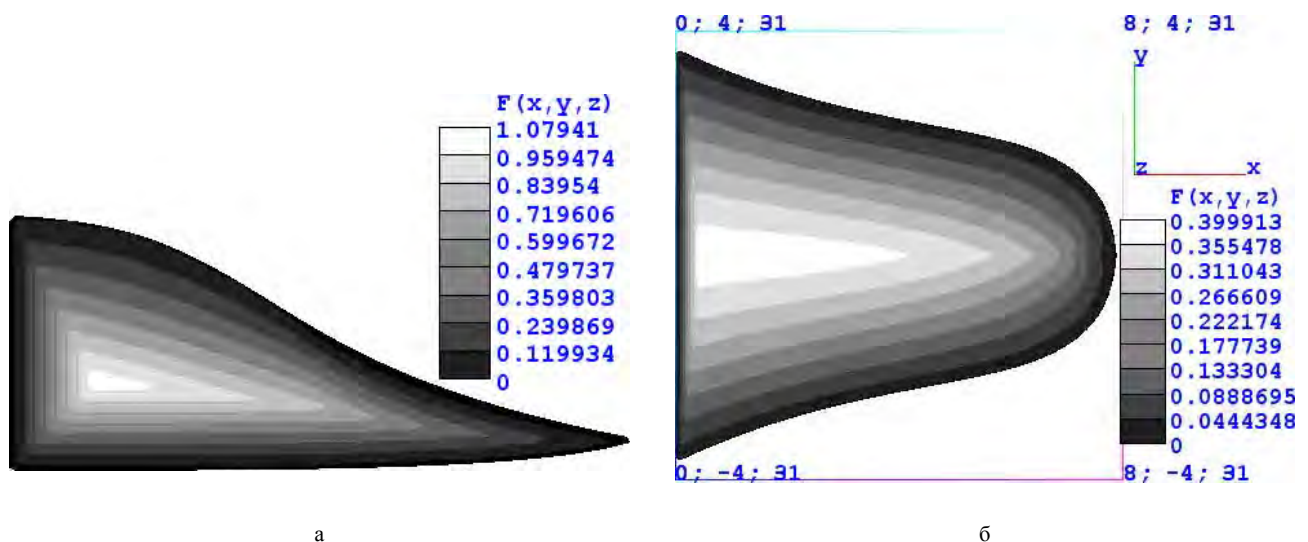


Рисунок 8 – Распределение значений функции расстояния со знаком в сечениях

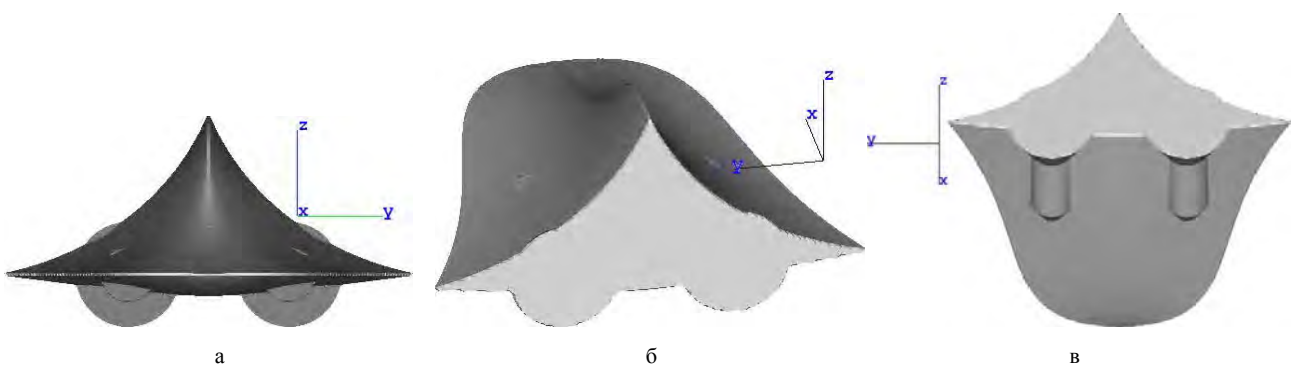


Рисунок 9 – Модель летательного аппарата

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, предложенный математический аппарат позволяет использовать области, границы которых определены при помощи параметрических функций, в качестве операндов R-операций. Полученные модели можно рассматривать как гибридные, совмещающие функциональное представление на базе неявных функций и граничное представление на базе параметрических функций.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

В отличие от существующих работ [4–10], посвященных моделированию геометрических объектов с использованием теории неявных функций и R-функций, предложенный подход позволяет проще описывать области, ограниченные кривыми или поверхностями Безье, b-сплайнами или NURBS. Переход от граничного представления области к дискретному позволяет сравнительно просто автоматизировать данный математический аппарат. Недостатком такого перехода является экстенсивность необходимых вычислений.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе решена актуальная проблема повышение эффективности и адекватности математического моделирования сложных тел. Научная новизна результатов, полученных в статье, состоит в том, что получил дальнейшее развитие функциональный подход, основанный на базе неявных функций и теории R-функций, в части упрощения построения моделей областей, представленных гранично на базе параметрических функций. Практическая значимость результатов заключается том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, на основе которого решены задачи построения моделей сложных тел. Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы оптимизировать вычисление функций расстояния со знаком, например, например, при помощи технологий параллельных вычислений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 3/15 «Математическое моделирование конструкций неоднородной структуры на базе современных информационных технологий» (№ гос. регистрации: 0115U000761).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Requicha A. A. G. Representations for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems / A. A. G. Requicha // *Computing Surveys*. – 1980. – Volume 12, No 4. – P. 437–464. DOI: 10.1145/356827.356833
2. Requicha A. A. G. Solid Modeling: A Historical Summary and Contemporary Assessment / A. A. G. Requicha, H. B. Voelcker // *IEEE Computer Graphics and Applications*. – 1982. – Volume 2, Issue 2. – P. 9–24. DOI: 10.1109/MCG.1982.1674149
3. Requicha A. A. G. Solid Modeling: Current Status and Research Directions / A. A. G. Requicha, H. Voelcker // *IEEE Computer Graphics and Applications*. – 1983. – Volume 3, Issue 7. – P. 25–37. DOI: 10.1109/MCG.1983.26327
4. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения / В. Л. Рвачев. – К. : Наукова Думка, 1982. – 552 с.
5. Рвачев В. Л. Применение метода R-функций к построению уравнений локусов, обладающих симметрией / В. Л. Рвачев,

- В. Шапиро, Т. И. Шейко // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 1999. – 4, № 4. – С. 4–20.
6. Рвачев В. Л. Введение в теорию R-функций / В. Л. Рвачев, Т. И. Шейко // *Проблемы машиностроения*. – 2001. – Т. 4, № 1–2. – С. 46–58.
7. Максименко-Шейко К. В. Автоматизация построения уравнений геометрических объектов в методе R-функций / К. В. Максименко-Шейко, А. М. Мацевитый, Т. И. Шейко // *Кибернетика и системный анализ*. – 2006. – № 2. – С. 148–157.
8. Максименко-Шейко К. В. R-функции в математическом моделировании геометрических объектов, обладающих симметрией / К. В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // *Кибернетика и системный анализ*. – 2008. – № 6. – С. 75–83.
9. Максименко-Шейко К. В. R-функции в математическом моделировании геометрических объектов в 3D по информации в 2D / К. В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // *Вісник Запорізького національного університету : збірник наукових праць. Фізико-математичні науки*. – 2010. – № 1. – С. 98–104.
10. Максименко-Шейко К. В. Математическое моделирование геометрических фракталов с помощью R-функций / К. В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // *Кибернетика и системный анализ*. – 2012. – Т. 48. – № 4. – С. 155–162.
11. Stroud I. *Boundary Representation Modelling Techniques* / Ian Stroud. – London : Springer, 2006. – 808 p. – ISSN: 1846283124.
12. Vaněček G. Brep-index: A Multidimensional Space Partitioning Tree / George Vaněček Jr. // *International Journal of Computational Geometry & Applications*. – 1991. – Volume 1, Issue 3. – P. 243–261. DOI: 10.1142/S0218195991000189
13. Quadros W. R. Defeaturing CAD models using a geometry-based size field and facet-based reduction operators / W. R. Quadros, S. J. Owen // *Engineering with Computers*. – 2012. – Volume 28, Issue 3. – P. 211–224. DOI: 10.1007/s00366-011-0252-8
14. Hable J. Blister: GPU-based rendering of Boolean combinations of free-form triangulated shapes / J. Hable, J. Rossignac // *ACM Transactions on Graphics*. – 2005. – Volume 24, Issue 3. – P. 1024–1031. DOI: 10.1145/1073204.1073306
15. Hable J. CST: constructive solid trimming for rendering BReps and CSG / J. Hable, J. Rossignac // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. – 2007. – Volume 13, Issue 5. – P. 1004–1014. – DOI: 10.1109/TVCG.2007.70411
16. Rossignac J. Direct rendering of Boolean combinations of self-trimmed surfaces / J. Rossignac, I. Fudos, A. Vasilakis // *Computer-Aided Design*. – 2013. – Volume 45, Issue 2. – P. 288–300. DOI: 10.1016/j.cad.2012.10.012
17. Deferred boundary evaluation of complex CSG models / [C. J. Ogayar-Anguita, Á.L. García-Fernández, F. R. Feito-Higuera, R. J. Segura-Sánchez] // *Advances in Engineering Software*. – 2015. – Volume 85, Issue C. – P. 51–60. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2015.03.003
18. Schneider Ph. *Geometric Tools for Computer Graphics (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics)* / Philip Schneider, David H. Eberly. – San Francisco : Morgan Kaufmann Publishers, Elsevier Science, 2003. – 1056 p.
19. Shimrat M. Algorithm 112: Position of Point Relative to Polygon / M. Shimrat // *Communications of the ACM*. – 1962. – Volume 5, Issue 8. – P. 434. DOI: 10.1145/368637.368653
20. Fazil J. Investigation of Airfoil Profile Design using Reverse Engineering Bezier Curve / J. Fazil, V. Jayakumar // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2011. – Volume 6, No 7. – P. 43–52.
21. Parasaram R. K. N. Airfoil Profile Design by Reverse Engineering Bezier Curve / R. Kr. N. Parasaram, T. N. Charyulu // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. – 2012. – Volume 1, No 3. – P. 410–420.

Статья поступила в редакцию 09.03.2017.

После доработки 29.05.2017.

Чопоров С. В.

Канд. техн. наук, доцент кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна

ГІБРИДНЕ ПОДАННЯ СУЦІЛЬНИХ ТІЛ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЯВНИХ І ПАРАМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ

Актуальність. Розглянута проблема подання суцільних тіл у системах автоматизації проектних робіт. Об'єктом дослідження є процес подання суцільних тіл у системах автоматизації проектних робіт.

Мета роботи – розробка гібридної схеми подання геометричних об'єктів, що використовує неявні функції R-операції та параметричні функції.

Метод. Для моделювання суцільних тіл у статті запропоновано гібридне подання. Під абстрактним поняттям «суцільне тіло» у роботі розуміються обмежені замкнені підмножини евклідова простору, які моделюють фізичні тіла, а під схемою подання – синтаксично та семантично коректне відношення між множиною формальних описів математичних моделей та множиною суцільних тіл. В основі гібридного подання покладено ідею одночасного використання граничного і функціонального подань. Вважається, що при граничному поданні, області визначаються власними границями, описаними за допомогою параметричних функцій, а при функціональному поданні – за допомогою неявних функцій з використанням положень теорії R-функцій. Для гібридного подання використовуються функції відстані зі знаком, які дозволяють розглядати області, описані параметричними функціями, як аргументи R-операцій (кон'юнкції, диз'юнкції або заперечення) у процесі побудови єдиної формули для складного тіла. Щоб у довільній точці обчислити відстань зі знаком до границі області, обмеженої параметричними функціями, запропоновано використовувати допоміжну побудову адаптивних дискретних моделей контурів. Відстань від точки до границі апроксимується відстанню від цієї точки до найближчого дискретного елемента. Для визначення знаку функції використовується тест парності.

Результати. Розроблена гібридна схема подання реалізована у програмному продукті, на основі якого вирішенні задачі побудови моделей складних тіл.

Висновки. Проведені обчислювальні експерименти підтвердили коректність і працездатність запропонованого математичного забезпечення. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в оптимізації обчислення функції відстані зі знаком, наприклад, за допомогою технологій паралельних обчислень.

Ключові слова: суцільне тіло, неявна функція, R функція, параметрична функція, дискретна модель, функція відстані, тест парності, автоматизоване проектування.

Choporov S. V.

PhD, Associate Professor of Software Engineering Department, Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhya, Ukraine

HYBRID REPRESENTATION OF SOLIDS USING IMPLICIT AND PARAMETRIC FUNCTIONS

Context. The present article deals with the problem of representation of solids in computer-aided design. The object of the study is a process of representation of solids in computer-aided design.

Objective. The objective of the study is the development of a hybrid representation scheme which uses implicit functions, R-operations and parametric functions.

Method. In the article, a hybrid representation scheme has been suggested to model solids. An abstract notion “solid” denotes bounded and closed subsets of Euclidean space, which model physical bodies. A representation scheme is a syntactically and semantically correct relation between a set of formal models and a set of solids. It is supposed that boundary represented regions are defined by parametric functions. On the other hand, functionally represented regions are defined by implicit functions. The hybrid representation scheme is based on an idea of combining the boundary representation scheme with the functional representation scheme. The hybrid representation scheme uses a signed distance function to transform regions with parametric boundaries into implicitly defined regions. Adaptive discrete models are used to evaluate a signed distance from some point to a boundary of a region which boundaries are defined by parametric functions. A distance from a point to the closest discrete element approximates a distance from a point to a boundary of a region. The parity test has been used to define a sign of a distance.

Results. The developed hybrid representation scheme has been implemented in software and investigated for solving the problems of solid modeling.

Conclusions. Carried out numerical experiments have confirmed the proposed software operability. The prospects for further research may include the development of parallel methods for calculation of a signed distance function.

Keywords: solid, implicit function, R-function, parametric function, discrete model, distance function, parity test, computer-aided design.

REFERENCES

1. Requicha A. A. G. Representations for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems, *Computing Surveys*, 1980, Volume 12, No. 4, pp. 437–464. DOI: 10.1145/356827.356833
2. Requicha A. A. G., Voelcker H. B. Solid Modeling: A Historical Summary and Contemporary Assessment, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1982, Volume 2, Issue 2, pp. 9–24. DOI: 10.1109/MCG.1982.1674149
3. Requicha A. A. G., Voelcker H. Solid Modeling: Current Status and Research Directions, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1983, Volume 3, Issue 7, pp. 25–37. DOI: 10.1109/MCG.1983.26327
4. Rvachev V. L. Teoriya R-funkcij i nekotorye ee prilozheniya. Kiev, Naukova Dumka, 1982, 552 p.
5. Rvachev V. L., Shapiro V., Shejko T. I. Primenenie metoda R-funkcij k postroeniyu uravnenij lokusov, obladayushhix simmetriey, *E'lektromagnitnye volny i e'lektronnye sistemy*, 1999, 4, No. 4, pp. 4–20.
6. Rvachev V. L., Shejko T. I. Vvedenie v teoriyu R-funkcij, *Problemy mashinostroeniya*, 2001, Vol. 4, No. 1–2, pp. 46–58.
7. Maksimenko-Shejko K. V., Macevityj A. M., Shejko T. I. Avtomatizaciya postroeniya uravnenij geometricheskix ob'ektov v metode R-funkcij, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, 2006, No. 2, pp. 148–157.

8. Maksimenko-Shejko K. V., Shejko T. I. R-funkcii v matematicheskom modelirovanii geometricheskix ob'ektov, obladayushhix simmetriej, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, 2008, No. 6, pp. 75–83.
9. Maksimenko-Shejko K. V., Shejko T. I. R-funkcii v matematicheskom modelirovanii geometricheskix ob'ektov v 3D po informacii v 2D, *Visnyk Zaporiz'kogo nacional'nogo universytetu: Zbirnyk naukovyh prac'. Fyzyko-matematychni nauky*, 2010, No. 1, pp. 98–104.
10. Maksimenko-Shejko K. V., Shejko T. I. Matematicheskoe modelirovanie geometricheskix fraktalov s pomoshh'yu R-funkcij, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, 2012, Vol. 48, No. 4, pp. 155–162.
11. Stroud I. *Boundary Representation Modelling Techniques*. London, Springer, 2006, 808 p. ISSN: 1846283124.
12. Vaněček G. Brep-index: A Multidimensional Space Partitioning Tree, *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 1991, Volume 1, Issue 3, pp. 243–261. DOI: 10.1142/S0218195991000189
13. Quadros W. R., Owen S. J. Defeaturing CAD models using a geometry-based size field and facet-based reduction operators, *Engineering with Computers*, 2012, Volume 28, Issue 3, pp. 211–224. DOI: 10.1007/s00366-011-0252-8
14. Hable J., Rossignac J. Blister: GPU-based rendering of Boolean combinations of free-form triangulated shapes, *ACM Transactions on Graphics*, 2005, Volume 24, Issue 3, pp. 1024–1031. DOI: 10.1145/1073204.1073306
15. Hable J., Rossignac J. CST: constructive solid trimming for rendering BReps and CSG, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, Volume 13, Issue 5, pp. 1004–1014. DOI: 10.1109/TVCG.2007.70411
16. Rossignac J., Fudos I., Vasilakis A. Direct rendering of Boolean combinations of self-trimmed surfaces, *Computer-Aided Design*, 2013, Volume 45, Issue 2, pp. 288–300. DOI: 10.1016/j.cad.2012.10.012
17. Ogayar-Anguita C. J., García-Fernández Á.L., Feito-Higueruela F. R., Segura-Sánchez R. J. Deferred boundary evaluation of complex CSG models, *Advances in Engineering Software*, 2015, Volume 85, Issue C, pp. 51–60. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2015.03.003
18. Schneider Ph. Eberly David H. *Geometric Tools for Computer Graphics (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics)*. San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers, Elsevier Science, 2003, 1056 p.
19. Shimrat M. Algorithm 112: Position of Point Relative to Polygon, *Communications of the ACM*, 1962, Volume 5, Issue 8, P. 434. DOI: 10.1145/368637.368653
20. Fazil J., Jayakumar V. Investigation of Airfoil Profile Design using Reverse Engineering Bezier Curve, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Science*, 2011, Volume 6, No. 7, pp. 43–52.
21. Parasaram R. K. N., Charyulu T. N. Airfoil Profile Design by Reverse Engineering Bezier Curve, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2012, Volume 1, No. 3, pp. 410–420.

УДК 515.2

Чуб І. А.¹, Новожилова М. В.², Матухно В. В.³

¹Д-р техн. наук, професор, начальник кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національного університету цивільного захисту України, м. Харків, Україна

²Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри економічної кібернетики та інформаційних технологій Харківського національного університету будівництва і архітектури, м. Харків, Україна

³Ад'юнкт Національного університету цивільного захисту України, м. Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ З ВИБУХОМ ХМАРИ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ

Актуальність. Науково обґрунтоване ранжування рівнів потенційної небезпеки технологічних установок газонафтопереробних підприємств є необхідним для вирішення проблем забезпечення безпеки на всіх стадіях їх життєвого циклу. Діюча в Україні нормативна та методична база є недостатньою щодо розв'язання задач забезпечення вибухобезпеки об'єктів газонафтопереробки в сучасних умовах господарювання.

Мета. Побудова та аналіз математичної моделі техногенної НС з вибухом хмари газоповітряної суміші на технологічному блоці газонафтопереробного підприємства як інструментального засобу визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки блока.

Метод. Проведено структурну та параметричну ідентифікацію інтегрального критерію, який характеризує вибухонебезпеку технологічного блоку в цілому та враховує особливості забудови території, режиму вибуху, характеристик ВНР.

Результати. В роботі вирішена задача визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку газонафтопереробного підприємства.

Висновки. Наукова новизна результатів полягає в тому, що запропонований метод становить подальший розвиток методології та прикладних засобів забезпечення техногенної безпеки, зокрема вибухонебезпеки, потенційно небезпечних промислових об'єктів. Результати чисельних експериментів дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

Ключові слова: вибух, хмара газоповітряної суміші, рівень вибухонебезпеки, ймовірність виникнення надзвичайної ситуації.

НОМЕНКЛАТУРА

АГФУ – абсорбційна газофракціонуюча установка

ВНР – вибухонебезпечна речовина

ГНПП – газонафтопереробне підприємство;

ГПС – газоповітряні суміші;

ЕЛЗУ – електрознесолювальна установка;

НС – надзвичайна ситуація;

ПНО – потенційно-небезпечні об'єкти;

c_{vi} – концентрація ВНР у хмарі ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

c_{sti} – стехіометрична концентрація ВНР, що виникла при НС на i -му обладнанні, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

$c_{pi}(x, y, z, t)$ – функція розподілу концентрації ВНР в об'ємі хмари ГПС, який вибухає;

$c_{вкмрпi}^{\text{верхня}}$ – верхня концентраційна межа розповсюдження полум'я, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

$c_{вкмрпi}^{\text{нижня}}$ – нижня концентраційна межа розповсюдження полум'я, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

E^i – відносний енергетичний потенціал i -го технологічного обладнання;

i – номер технологічного обладнання;

I – кількість елементів технологічного обладнання в технологічному блоці;

I_i – імпульс хвилі тиску вибуху на i -ому об'єкті, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

F_2 – фактор, що входить до складу пробіт-функції Pr_2 ;

J – кількість одиниць технологічного обладнання, яке було зруйновано в результаті вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні;

K – коефіцієнт, що характеризує рівень руйнувань при вибухах;

k_{ij} – коефіцієнт, який залежить від ступеню пошкодження j -го технологічного обладнання від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні;

L_{ij} – відстань між центром j -го технологічного обладнання та центром вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні;

M_{vi} – маса ВНР у хмарі, яка бере участь у вибуху, кг ;

n – тип обладнання технологічного блоку;

ΔP – надмірний тиск у фронті вибуху, Па ;

Pr_2 – пробіт-функція, яка визначає ймовірність руйнування споруд від вибуху;

p_{ij} – ймовірність повного руйнування j -го технологічного обладнання від вибуху хмари ГПС при НС на i -му обладнанні;

$Q_{НС}^{in}$ – ймовірність виникнення НС, яка супроводжується викидом та виникненням хмари ГПС, на i -му технологічному обладнанні n -го типу;

Q_k^{in} – ймовірність розвитку НС по k -му типу;

Q_B^{in} – ймовірність вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС на i -му технологічному обладнанні n -го типу;

q_{iv} – ймовірність реалізації сценарію вибухового перетворення хмари ГПС;

q_{vi} – питома теплота згорання ВНР у викиді при НС на i -му обладнанні, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$;

q_T – питома енергія вибуху тринітротолуолу, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$;

R_i^{100} – радіус зони повних (100%) руйнувань від вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му обладнанні, м ;

R_i^0 – радіус безпечної зони від вибуху хмари ГПС при НС на i -му обладнанні, м ;

S_{vi} – поверхня, на якій досягаються концентрація газоподібної ВНР, що вийшла у повітря при НС на i -му обладнанні, що дорівнює $c_{вкмрпi}$;

S_{H_i} – поверхня, на якій досягаються концентрація газоподібної ВНР, що вийшла у повітря при НС на i -му обладнанні, що дорівнює $c_{\text{нкрмрп}}$;

t – час від початку НС (виникнення хмари ГПС) до вибуху, с;

V_{Bi} – об'єм хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му обладнанні, який вибухає, м³;

v – сценарій розвитку НС;

$v_{зв}$ – швидкість звуку в повітрі, м·с⁻¹;

W_i – тротиловий еквівалент вибуху при НС на i -му обладнанні;

α_{ij} – коефіцієнт, що враховує ступінь впливу ударної хвилі від вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му обладнанні, на j -е технологічне обладнання;

σ – ступінь розширення продуктів згорання;

Λ_i – частковий критерій рівня вибухонебезпеки i -го технологічного обладнання;

Λ – інтегральний критерій рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в цілому;

λ_i – вагова функція i -го технологічного обладнання.

ВСТУП

Зростаюче в останні роки число техногенних НС на ГНПП свідчить про те, що існуюча структура нормативної бази в галузі техногенної безпеки не дозволяє достовірно оцінити рівень їх безпеки. Надзвичайні ситуації на цих об'єктах характеризуються великими об'ємами викидів ВНР, утворенням хмар ГПС, вибухами та пожежами, які приводять до руйнування або пошкодження будівель, споруд, установок.

Науково обгрунтоване ранжування рівнів потенційної безпеки технологічних установок ГНПП є необхідним для вирішення проблем забезпечення безпеки на всіх стадіях життєвого циклу підприємства. Діюча нормативна база в Україні містить не всі необхідні практичні рекомендації щодо визначення рівня та забезпечення вибухонебезпеки об'єктів газонафтопереробки. При цьому слід відмітити складність та трудомісткість методик, відсутність статистичних даних, що дають кількісну оцінку рівню вибухонебезпеки технологічного обладнання та методики їх аналізу.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває задача підвищення точності існуючих методик та розробки нових ефективних підходів до визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єктів газонафтопереробної галузі на основі комплексного аналізу кількісних характеристик надзвичайних ситуацій з вибухами хмар газоповітряних сумішей.

Основною структурною одиницею будь-якого ГНПП є технологічний блок, що являє собою групу апаратів (технологічного обладнання), які можуть бути відключені (ізолювані) від технологічної системи підприємства (виведені з технологічної схеми) без небезпечних змін режиму роботи суміжного технологічного обладнання [1]. Таким чином, рівень вибухонебезпеки підприємства в цілому є адитивною функцією від рівнів вибухонебезпеки окремих технологічних блоків.

Метою статті є побудова та аналіз математичної моделі техногенної НС з вибухом хмари газоповітряної суміші на технологічному блоці ГНПП як інструменталь-

ного засобу визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки блока.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Розглянемо НС з вибухом хмари ГПС, що виникла в результаті руйнування технологічної ємності, що містить горючу речовину в газоподібній фазі, в умовах технологічного блоку ГНПП.

НС характеризується повною розгерметизацією ємності, що супроводжується викидом певної кількості 8 тонн газу з утворенням хмари ГПС. Для оцінки максимально можливих наслідків НС приймаємо, що в хмару перейшла практично вся кількість викинутого газу.

Тоді задача визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в заданих кліматичних умовах та геометричних характеристиках блоку полягає в побудові алгоритму пошуку ймовірностей p_{ij} , вагових функцій λ_i , що моделюють вплив вибуху НС на оточуючі елементи технологічного блоку та в цілому складають інтегральний критерій Λ вибухонебезпеки технологічного блоку.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Аналізу фізичних процесів, що відбуваються при вибухах хмар ГПС, які утворилися при руйнуванні технологічного обладнання, та їх впливу на навколишнє середовище присвячено багато робіт вітчизняних та закордонних дослідників [2–7].

Роботи [2, 3] містять результати математичного моделювання вибухів хмар газоповітряних та пароповітряних сумішей. У теорії вибуху розрізняють детонаційний та дефлаграційний механізми вибухового перетворення. Перший з них – це вибух, при якому запалення наступних шарів вибухової речовини відбувається в результаті стиснення і нагрівання ударною хвилею, такою, що ударна хвиля і зона хімічної реакції йдуть нерозривно одна за одною з постійною надзвуковою швидкістю. Дефлаграційним є вибух з енерговиділенням в об'ємі хмари горючих газоподібних сумішей і аерозолів при поширенні екзотермічної хімічної реакції з дозвуковою швидкістю.

У роботах [4–7] розглядаються питання визначення кількісних характеристик детонаційних та дефлаграційних вибухів вуглеводневих газів та їх сумішей з повітрям в умовах відкритого простору.

Питання аналізу наслідків цих вибухів ГПС у відкритому просторі досліджені меншою мірою. В Україні на даний час відсутній єдиний підхід до прогнозування можливих наслідків вибуху хмар ГПС на об'єктах газонафтопереробки. Вітчизняний нормативний документ [8] містить методику визначення параметрів вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом ВНР в результаті розгерметизації устаткування. Але дана методика не враховує склад вибухонебезпечної суміші та режим її вибуху.

Закордонні джерела [9, 10] при визначенні наслідків вибуху рекомендують розглядати детонаційний режим. Але за статистичними даними до 90% вибухів хмар ГПС відбувається за дефлаграційним механізмом. У роботі [11] розглядаються питання надійності технологічного обладнання потенційно-небезпечних об'єктів (ПНО) та дається аналіз причин виникнення НС, пов'язаних з відмовами технологічного обладнання.

Робота [12] присвячена розробці методики прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом газоповітряної хмари в умовах ГНПП. Методика містить розрахунок параметрів вибуху та оцінку ймовірності пошкодження або руйнування будівель, споруд та технологічних установок.

Аналіз рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах НС з викидами хмар ГПС та розробка методу її зниження передбачає визначення критерію Λ кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки блоку [1]. При цьому критерій Λ є інтегральним, побудова якого виконується на базі часткових критеріїв Λ_i , що кількісно характеризують рівні вибухонебезпеки технологічного обладнання (апаратів) різних типів у складі блоку. Тому при структурній та параметричній ідентифікації часткових критеріїв Λ_i є доцільним урахування особливостей забудови території, режиму вибуху, характеристик ВНР.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Проведемо визначення кількісної оцінки вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП. Покладемо, що технологічний блок, що є об'єктом дослідження, містить I одиниць технологічного обладнання (апаратів).

Приймаємо, що кожна i -а одиниця технологічного обладнання (апарату) технологічного блоку ГНПП, що розглядається у даному дослідженні, може бути п'яти типів ($n = 1, 2, \dots, 5$) – колонне ($n=1$), ємнісне ($n=2$), насосне ($n=3$), теплообмінне ($n=4$) та пічне ($n=5$), рівень небезпеки яких є різним. Це обумовлено особливостями технології, кількістю та видом ВНР тощо.

Вважаємо також, що технологічний блок працює в штатному режимі, якщо усе обладнання справне, а режим НС настає при виході з ладу (повному руйнуванні) хоча б одного апарата, що супроводжується викидом всього вмісту ВНР.

В загальному випадку руйнування технологічного апарата супроводжується НС трьох видів: пожежа, вибух, викид.

Нехай Λ_i – частковий критерій, що кількісно характеризує рівень вибухонебезпеки i -го технологічного обладнання (апарата), $i=1, 2, \dots, I$. Для його визначення пропонується застосування енергетичного показнику вибухонебезпеки за наступною формулою [12]:

$$\Lambda_i = E^i \cdot Q_{НС}^{in} \cdot Q_B^{in} \cdot q_{iv}, n \in \{1, 2, \dots, 5\}, v \in \{1, 2\}. \quad (1)$$

У цьому випадку ймовірність виникнення НС визначається в результаті обробки статистичних даних щодо розподілу аварій вказаного характеру для технологічних

апаратів одного типу, які функціонують у приблизно однакових умовах. У табл. 1 наведені усереднені дані по надійності технологічного обладнання двох блоків ГНПП: абсорбційної газофракціонуючої установки (АГФУ) та електрознесолювальної установки (ЕЛЗУ).

Основну небезпеку при НС на технологічному обладнанні ГНПП являють викиди стислих або скраплених вуглеводних газів. Як показують статистичні дослідження, при миттєвих викидах вуглеводнів горіння та вибух відбуваються практично завжди [12, 13].

У якості приклада в табл. 2 наведено оцінку ймовірності різних сценаріїв розвитку НС з викидом стислого вуглеводневого газу при руйнуванні обладнання колонного типу ($n=1$) блоку АГФУ.

Останній стовпчик табл. 2 містить ймовірності q_{iv} виникнення при реалізації НС визначених типів того чи іншого сценарію розвитку НС на i -му обладнанні колонного типу.

Таким чином, для обладнання колонного типу блока АГФУ ймовірність $Q_{НС}^1$ вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом стислого вуглеводневого газу, дорівнює $Q_{НС}^1 = 0,265$. При цьому, наприклад, ймовірності q_{1v} , які визначають ймовірність протікання вибуху за детонаційним (q_{11}) або дефлаграційним (q_{12}) механізмом, дорівнюють 0,0638 та 0,9362 відповідно.

У частині статті, що залишилася, зосередимось на першому типі НС (табл. 2), опускаючи індекс k .

Інтегральний критерій Λ , який характеризує вибухонебезпеку технологічного блоку в цілому, має вигляд [1]:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i \Lambda_i. \quad (2)$$

Вагові функції λ_i моделюють ступінь впливу вибуху на i -му технологічному апараті на сусіднє обладнання та визначаються як [1]

$$\lambda_i = 1 + \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \Lambda_j. \quad (3)$$

Таблиця 1 – Оцінка ймовірності виникнення НС з викидом ВНР на обладнанні ГНПП в залежності від типу n

Індекс обладнання, n	Тип обладнання	$\cdot Q_{НС}^{in} \cdot \text{рік}^{-1}$	
		АГФУ	ЕЛЗУ
1	Теплообмінне	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$
2	Ємнісне	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$
3	Колонне	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$
4	Пічне	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$
5	Насосне	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 2 – Оцінка ймовірності розвитку НС з викидом стислого вуглеводневого газу при руйнуванні обладнання колонного типу блоку АГФУ

Тип розвитку НС з викидом стислого вуглеводневого газу, k	Ймовірність розвитку НС по k -му типу, Q_k^{in}	Сценарій розвитку НС k -го типу, v	Ймовірність v -го сценарію розвитку НС по k -го типу, q_{ivk}
Вибух ($k=1$)	$Q_1^{in} = Q_B^{in} = 0,265$	Детонаційний вибух	0,0638
		Дефлаграційний вибух	0,9362
Пожежа ($k=2$)	0,7058	Горіння проливу	0,0407
		Вогняна куля	0,8770
		Факельне горіння	0,0823
Викид ($k=3$)	0,0292	Без горіння та вибуху	1,00

Коефіцієнти k_{ij} визначаються наступним чином:

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } L_{ij} \leq R_i^{100}, \\ p_{ij}, & \text{якщо } R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}, \\ 0, & \text{якщо } L_{ij} \geq R_i^0, \end{cases} \quad (4)$$

Відмітимо, що узагальнено ймовірність p_{ij} є оберненою нелінійною функцією відстані L_{ij} між об'єктами i та j .

Коефіцієнт α_{ij} впливу ударної хвилі на сусідні технологічні об'єкти, величина якого залежить від взаємної орієнтації об'єктів i та j , обчислюються з наступних міркувань:

1) для об'єктів у формі паралелепіпеду:

– найбільш небезпечній орієнтації стіни j -го об'єкту по нормалі до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху на i -му об'єкті відповідає найбільше значення $\alpha_{ij}^{\max}=1,1$. Таке ж значення α_{ij} буде відповідати куту $\theta = 0$, тому що при цьому суміжна стіна буде орієнтована по нормалі до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху;

– найбільш безпечній орієнтації стіни j -го об'єкту під кутом 45° до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху на i -му об'єкті відповідає найменше значення $\alpha_{ij}^{\min}=0,9$;

– для інших значень кута θ величина α_{ij} має проміжні значення.

2) для об'єктів сферичної та циліндричної форми:

– значення коефіцієнту α_{ij} не залежить від кута θ та дорівнює $\alpha_{ij}=1,0$.

Для кількісного визначення величини коефіцієнтів α_{ij} у першому випадку пропонується застосування або тригонометричного залежності

$$\alpha_{ij}(\theta) = 2,1 - (\sin \theta + \cos \theta) + 0,22\sin(2\theta), \quad (5)$$

або поліноміальної залежності

$$\alpha_{ij}(\theta) = 0,0001 \theta^2 - 0,0078 \theta + 1,114. \quad (6)$$

У остаточному вигляді вираз (2) запишеться як

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \Lambda_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \Lambda_j. \quad (7)$$

Аналіз (7) свідчить, що для визначення критеріїв Λ_i та Δ необхідно розрахувати параметри вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му технологічному обладнанні.

Для визначення множини k_{ij} необхідно знайти радіуси R_i^{100} зони повних руйнувань та R_i^0 безпечної зони від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні. Як свідчить (4), для j -го технологічного обладнання, що знаходиться від епіцентру вибуху хмари ГПС на відстані L_{ij} , яке задовольняє умові $R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}$, значення k_{ij} обчислюється на основі параметрів вибуху та відстані L_{ij} з використанням пробіт-функції:

$$k_{ij} = p_{ij} = f [Pr_2(\Delta P, I_B, L_{ij})]. \quad (8)$$

Розрахунок основних параметрів вибуху ΔP та I_B хмари ГПС проведемо відповідно до рекомендацій [9, 10, 14]. Розрахунок виконується у наступній послідовності.

1. Визначення ефективного енергетичного запасу E_i хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні:

$$E_i = 2M_{Vi} q_{Vi}, \quad \text{якщо } c_{cti} \geq c_{Vi}, \quad (9)$$

$$E_i = 2M_{Vi} q_{Vi} c_{ct}/c_{Vi}, \quad \text{якщо } c_{cti} < c_{Vi}. \quad (10)$$

Величина M_{Vi} може задаватися у якості початкового параметра, або визначається згідно з [9] як

$$M_{ei} = \frac{1}{3} \iiint_{V_{Bi}} c_{pi}(x, y, z, t) dx dy dz. \quad (11)$$

Об'єм V_{iB} хмари, де можливе займання і горіння (вибух) горючої речовини, є область в просторі, що обмежена поверхнями S_{Bi} та S_{Hi} , на яких досягаються концентрації газоподібної горючої речовини $c_{акмрпi}$ та $c_{нкмрпi}$, де $c_{акмрпi}$, $c_{нкмрпi}$ – відповідно верхня та нижня концентраційні межі розповсюдження полум'я.

2. Розрахунок швидкості фронту полум'я v_{Gi} (м/с) при вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні, проводиться згідно рекомендацій [9, табл. 2] в залежності від класу горючої речовини та рівня забудови оточуючого простору.

3. Визначення безрозмірних відстаней R_{ji} (м) від центру хмари ГПС, що виникла при НС на i -му технологічному обладнанні, до сусідніх об'єктів:

$$R_{ji} = r_{ji} / (E_i/P_0)^{1/3}, \quad (12)$$

де r_{ji} – відстань від центру хмари ГПС, що вибухає, до j -го об'єкта, м; P_0 – нормальний атмосферний тиск, $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па.

Центр хмари ГПС (епіцентр вибуху) визначається як точка у середині відрізка, що з'єднує джерело викиду (i -те технологічне обладнання) з найбільш віддаленою точкою хмари, в якій спостерігається концентрація горючої речовини $c_{нкмрпi}$.

4. Розрахунок основних параметрів вибуху хмари ГПС, до яких відносяться параметри повітряних ударних хвиль вибуху – надмірний тиск ΔP і імпульс хвилі тиску I :

– визначення безрозмірних величин тиску P_{1ji} і імпульсу i_{1ji} для дефлаграційного вибуху для всіх об'єктів ($j = 1, 2, \dots, N-1; j \neq i$):

$$P_{1ji} = \frac{v_{\Gamma}^2}{v_{3B}^2} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(\frac{0,83}{R_{ji}} - \frac{0,14}{R_{ji}^2} \right), \quad (13)$$

$$i_{1ji} = \frac{v_{\Gamma}}{v_{3B}} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(1 - \frac{0,4v_{\Gamma}}{v_{3B}} - \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \left(1 - \frac{0,06}{R_{ji}} + \frac{0,01}{R_{ji}^2} - \frac{0,0025}{R_{ji}^3} \right), \quad (14)$$

де $v_{3B} = 340$ м/с; для газоповітряних сумішей $\sigma = 7$.

– визначення безрозмірних величин тиску P_{2ji} і імпульсу i_{2ji} для детонаційного вибуху для всіх об'єктів ($j = 1, 2, \dots, N-1; j \neq i$):

$$P_{2ji} = \exp(-1,1240 - 1,660 \cdot \ln R_{ji} + 0,2600 \cdot \ln^2 R_{ji}), \quad (15)$$

$$i_{2ji} = \exp(-3,4217 - 0,898 \cdot \ln R_{ji} - 0,0096 \cdot \ln^2 R_{ji}). \quad (16)$$

– визначення остаточної безрозмірних величин тиску P_{ji} і імпульсу I_{ij} для всіх об'єктів ($j = 1, 2, \dots, N-1; j \neq i$):

$$P_{ji} = \min(P_{1ji}, P_{2ji}); i_{ji} = \min(i_{1ji}, i_{2ji}). \quad (17)$$

– визначення розмірних величин надлишкового тиску ΔP_{ij} (Па) і імпульсу I_{ij} (Па·с) в повітряній ударній хвилі для всіх об'єктів:

$$\Delta P_{ij} = P_{ij} \cdot P_0, \quad (18)$$

$$I_{ij} = \frac{i_{ij}}{v_{3B}} \cdot P_0^{2/3} E^{1/3}. \quad (19)$$

5. Розрахунок параметрів зон ураження, до яких відносяться величини радіусів R_i^{100} зони повних руйнувань та R_i^0 безпечної зони. Згідно рекомендацій [9, 10] для обчислення радіусів зон ураження можливо використання формули

$$R_i = \frac{KW_i^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{3180}{W_i}\right)^2\right)^{1/6}}. \quad (20)$$

Коефіцієнт K для границі зони повних руйнувань має значення $K^{100} = 3,8$, для границі безпечної зони – $K^0 = 14$.

Троїловий еквівалент вибуху хмари ГПС визначається як

$$W_i = \frac{0,4q_{vi}}{0,9q_T} M_{vi}, \quad (21)$$

де $q_T = 1,52 \cdot 10^6$ Дж·кг⁻¹.

Для об'єктів, відстані до яких від епіцентру вибуху хмари ГПС задовольняють умовам $R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}$, обчислюються ймовірності p_{ij} повного руйнування промислових споруд і технологічного обладнання із застосуванням пробіт-функції (10).

Згідно [9], пробіт-функція Pr_2 , яка відповідає повному руйнуванню будівель та зовнішнього технологічного обладнання (залишки підлягають зносу) визначається як

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln F_2. \quad (22)$$

Фактор F_2 розраховується за формулою:

$$F_2 = (40000/\Delta P_{ij})^{7,4} + (460/I_{ij})^{11,3}. \quad (23)$$

Після визначення пробіт-функції, згідно з [9, табл. 3] знаходиться ймовірність p_{ij} .

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для отримання кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибу-

хом хмари ГПС проведемо розрахунки згідно запропонованої методики.

Блок має у своєму складі 4 технологічних апарата (обладнання). Розглянемо НС з повною розгерметизацією сферичної технологічної ємності E_1 , яка супроводжується викидом 8 тонн пропану з утворенням хмари ГПС. Для оцінки максимально можливих наслідків НС приймаємо, що в хмару перейшла практично вся кількість викинутого пропану. У вибуховому перетворенні приймає участь 10% маси хмари.

НС сталася влітку, в денний час, в ясну безвітряну погоду. На відстані 50 м, 80 м і 100 м від технологічної ємності розміщуються інші технологічні апарати блоку – колони K_1, K_2 та K_3 , які мають форму прямого кругового циліндру.

Потрібно визначити кількісну оцінку рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП при умові, що НС з вибухом хмари ГПС можлива тільки при руйнуванні ємності E_1 .

Характеристики технологічного обладнання блоку наведено в табл. 3.

Дані для розв'язання задачі:

- вибухонебезпечна речовина – пропан;
- агрегатний стан суміші – газова;
- концентрація газу в суміші, кг/м³ – 0,14;
- маса газу в хмарі, кг – 8000;
- об'єм хмари, м³ – 57000;
- питома теплота згоряння газу, Дж/кг – $4,64 \cdot 10^7$;
- навколишній простір – відкритий;
- відстані до сусідніх об'єктів, м – 50, 80, 100.

Основні параметри вибуху хмари ГПС пропану з повітрям, яка утворилася у наслідок руйнування технологічної ємності були визначені за формулами (9)–(19).

Розрахунок параметрів зон ураження та ймовірностей повного руйнування технологічного обладнання у результаті вибуху хмари пропан-повітряної суміші було виконано за формулами (20)–(23).

Оцінка рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП визначалася за формулами (1)–(8).

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати розрахунків основних параметрів вибуху хмари ГПС, яка виникла в наслідок руйнування ємності E_1 з пропаном, зводимо в табл. 4.

Результати розрахунків параметрів зон ураження та ймовірностей повного руйнування технологічного обладнання у результаті вибуху хмари ГПС, яка виникла в наслідок руйнування ємності E_1 з пропаном, наведено в табл. 5.

Результати визначення оцінки рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП представлено в табл. 6.

Таблиця 3 – Характеристики технологічного обладнання блоку

i	Позначення обладнання	Тип обладнання, n	Q_B^{in}	q_{i2}	$Q_{НС}^{in}$	E^i , Дж
1	E_1	Ємнісне, $n = 2$	0,265	0,9362	$1,21 \cdot 10^{-4}$	24,4
2	K_1	Колонне, $n = 3$	0	0	$1,25 \cdot 10^{-4}$	8,6
3	K_2	Колонне, $n = 3$	0	0	$1,14 \cdot 10^{-4}$	6,2
4	K_3	Колонне, $n = 3$	0	0	$1,24 \cdot 10^{-4}$	11,8

Таблиця 4 – Результати розрахунку основних параметрів вибуху хмари ГПС

i	r_i , м	R_{xi}	Режим вибуху				ΔP_{1i} , Па	I , Па·с
			Дефлаграція		Детонація			
			P_{1xi}	I_{1xi}	P_{2xi}	I_{2xi}		
2	50	0,35	0,46	0,0571	0,96	0,057	$6,2 \cdot 10^4$	$3,68 \cdot 10^4$
3	80	0,5	0,35	0,0496	0,85	0,052	$4,4 \cdot 10^4$	$2,84 \cdot 10^4$
4	100	0,63	0,29	0,0427	0,74	0,049	$2,8 \cdot 10^4$	$2,04 \cdot 10^4$

Таблиця 5 – Результати розрахунку ймовірностей руйнування технологічних установок блоку в наслідок вибуху хмари ГПС

i	r_i , м	R_1^{100} , м	R_1^0 , м	Pr_2	$\% P_{1i}$
2	50	87	321	–	100
3	80			–	100
4	100			4,47	28

Таблиця 6 – Результати визначення оцінки рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку

Λ_1	Λ_2	Λ_3	Λ_4	Λ
0,00073	0,00018	0,00016	0,00034	0,0014

6 ОБГОВОРЕННЯ

Запропонований метод визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП дозволяє отримати більш точну в порівнянні з існуючими методиками оцінку рівня вибухонебезпеки. Цей результат досягається на основі урахування особливостей забудови території, режиму вибуху та характеристик ВНР.

Дана методика може бути застосованою до широкої множини горючих речовин та технологічного обладнання різних типів, що використовуються на ГНПП. Результати чисельних експериментів дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена задача визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП.

Наукова новизна результатів, отриманих в статті, полягає в тому, що запропонований метод визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку становить подальший розвиток методології та прикладних засобів забезпечення техногенної безпеки, зокрема вибухонебезпеки, потенційно небезпечних промислових об'єктів.

Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що програмне забезпечення, що реалізує запропонований метод, є основою математичного забезпечення інформаційної системи підтримки прийняття рішень при проектуванні систем безпеки газонафтопереробних підприємств.

Перспективи подальших досліджень полягають у тому, що запропонована методика уможливує побудову та розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах надзвичайної ситуації з викидом ВНР, утворенням хмари газоповітряної суміші та її вибуховим перетворенням за умови її зве-

дення до задачі оптимізації розміщення технологічних апаратів з урахуванням обмежень на максимально допустимі відстані між складовими блоку.

ПОДЯКИ

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи «Методи оптимізації динамічних ієрархічних систем регіональної техногенної безпеки» (номер державної реєстрації 0115U002026).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Чуб І. А. Модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єктів з вибухами хмар газоповітряних сумішей / І. А. Чуб, В. В. Матухно // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2016. – Вип. 24. – С. 137–142.
- Чернай А. В. Математичне моделювання вимушеного запалювання газоповітряної суміші при розрахунку вражаючих факторів аварійних вибухів / А. В. Чернай, М. М. Налісько // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2016. – № 5. – С. 82–94.
- Van den Berg A. C. Vapor cloud explosion blast modeling / A. C. Van den Berg, C. J. M. Van Wingerden. // ICHEME Symposium Series. – 1994. – No. 124. – P. 393–409.
- Methods for the Calculation of the Physical Effects. – Gevaarlijke Stoffen, 1996. – 870 p.
- Brossard J. Overpressure imposed by blast wave / J. Brossard, P. Bailly, D. Desbordes // Progress in Astronautics and Aeronautics. – 1989. – Vol. 4. – P. 410.
- Giesbrecht H. Analysis of explosion hazards on spontaneous release of inflammable cases / H. Giesbrecht, G. Hemmer, K. Hess // Ger. Chem. Eng. – 1984. – No. 4. – P. 315–325.
- Lee J. H. Blast effects from vapor cloud explosion / J. H. Lee, C. V. Guirao, G. G. Bach // Loss prevention. – 1989. – Vol. 11, No. 1. – P. 59–70.
- ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – Київ: УкрНДІПЗ, 2016. – 42 с.
- Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 208 с.
- РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. – 38 с.
- Попов В. М. Моделирование характеристик потока отказов основных производственных фондов объектов повышенной опасности / В. М. Попов, И. А. Чуб, М. В. Новожилова // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2015. – Вип. 21. – С. 64–70.
- Чуб І. А. Прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші / І. А. Чуб, В. В. Матухно // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2016. – Вип. 23. – С. 186–191.
- Шебеко Ю. Н. Оценка индивидуального и социального риска аварий с пожарами и взрывами для наружных технологических установок / Ю. Н. Шебеко, А. П. Шевчук, В. А. Колосов // Пожаровзрывобезопасность. – 1995. – № 1. – С. 21–29.
- Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2012. – 46 с.

Стаття надійшла до редакції 23.12.2016.

Після доробки 18.01.2017.

Чуб І. А.¹, Новожилова М. В.², Матухно В. В.³

¹Д-р техн. наук, професор, начальник кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національного університету громадянської захисти України, г. Харків, Україна,

²Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувача кафедрою економічної кібернетики та інформаційних технологій, Харківський національний університет будівництва та архітектури, г. Харків, Україна

³Ад'юнкту Національного університету громадянської захисти України, г. Харків, Україна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ СО ВЗРЫВОМ ОБЛАКА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Актуальность. Научно обоснованное ранжирование уровней потенциальной опасности технологических установок газонефтеперерабатывающих предприятий необходимо для решения проблем обеспечения безопасности на всех стадиях их жизненного цикла. Действующая в Украине нормативная и методическая база недостаточна для решения задач обеспечения взрывобезопасности объектов газонефтепереработки в современных условиях хозяйствования.

Цель. Построение и анализ математической модели техногенной чрезвычайной ситуации с взрывом облака газозвдушной смеси на технологическом блоке газонефтеперерабатывающего предприятия как инструментального средства определения количественной оценки уровня взрывоопасности блока.

Метод. Проведена структурная и параметрическая идентификация интегрального критерия, характеризующего взрывоопасность технологического блока в целом и учитывающего особенности застройки территории предприятия, режима взрыва, характеристик взрывоопасных веществ.

Результаты. В работе решена задача определения уровня взрывоопасности отдельного технологического оборудования и в целом технологического блока газонефтеперерабатывающего предприятия.

Выводы. Научная новизна заключается в том, что предложенный метод составляет дальнейшее развитие методологии и прикладных средств обеспечения техногенной безопасности, в частности взрывоопасности, потенциально опасных промышленных объектов. Результаты численных экспериментов позволяют рекомендовать предложенный метод для использования на практике.

Ключевые слова: взрыв, облако газозвдушной смеси, уровень взрывоопасности, вероятность возникновения чрезвычайной ситуации.

Chub I. A.¹, Novozhylva M. V.², Matuhno V. V.³

¹Dr.Sc., Professor, Head of the Department of Fire Prevention in the Settlements, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, Head of the Department of Economic Cybernetics and Information Technologies, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine

³Adjunct, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, Ukraine

MODELLING OF EMERGENCY WITH THE EXPLOSION OF GAS-AIR MIXTURE CLOUD

Context. Science-based ranking of potential danger levels characterizing technological units at gas-oil reprocessing enterprises needs to address safety issues at all stages of their life cycle. Actual Ukrainian normative and methodological framework is insufficient to meet the challenges of explosion at gas-oil reprocessing enterprises in current economic conditions.

Objective. Designing and analyzing mathematical model of tehnogenic emergency with the explosion of gas-air mixture clouds on block of gas-oil reprocessing technological enterprise as the constructive tool for quantify definition of explosive unit level.

Method. Structural and parametric identification of integral criterion characterizing the unit explosiveness as a whole taking into account the peculiarities of enterprise territory development, the explosion regime, characteristics of explosive materials.

Results. The problem of explosion hazard level estimation of separate technological equipment and whole technological block of a gas and oil refinery plant is solved in the work.

Conclusions. The proposed method is a contribution to further development of the methodology and constructive means to ensure the technologic safety, in particular the explosion one, for potentially hazardous industrial objects. Numerical results allow us to recommend the proposed method to be used in practice.

Keywords: explosion, a cloud of gas-air mixture, explosion level, probability of an emergency.

REFERENCES

1. Chub I.A., Matuhno V.V. Model zadachi minimizacii rivnja vibuhonebezpeki ob'ektiv z vybuhamy hmar gazopovitrjanyh sumishej, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2016, Vol. 24, pp. 137–142.
2. Chernaj A.V., Nalys'ko M.M. Matematychnе modeljuvannja vymushenogo zapaljuvannja gazopovitrjanoi' sumishi pry rozrahunku vrazhajuchyh faktoriv avarijnyh vybuhiv, *Naukovyj visnyk Nacional'nogo girnychogo universytetu*, 2016, No. 5, pp. 82–94.
3. Van den Berg A. C., Van Wingerden C. J. M. Vapor cloud explosion blast modeling. *ICHEME Symposium Series*, 1994, No. 124, pp. 393–409.
4. Methods for the Calculation of the Physical Effects. *Gevaarlijke Stoffen*, 1996, 870 p.
5. Brossard J., Bailly P., Desbordes D. Overpressure imposed by blast wave, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1989, Vol. 4, P. 410.
6. Giesbrecht H., Hemmer G., Hess K. et al. Analysis of explosion hazards on spontaneous release of inflammable cases, *Ger. Chem. Eng.*, 1984, No. 4, pp. 315–325.
7. Lee J. H., Guirao C. V., Bach G. G. Blast effects from vapor cloud explosion, *Loss prevention*, 1989, Vol. 11, No. 1, pp. 59–70.
8. DSTU B V.1.1-36:2016. Vyznachennja kategorij prymishhen', budynkiv ta zovnishnih ustanovok za vybuhopozhezhnoju ta pozhezhnoju nebezpekoju. Kyi'v: UkrNDICZ, 2016, 42 p.
9. Metodiki ocenki posledstvij avarij na opasnyh proizvodstvennyh ob'ektah: Sb. dokumentov. Serija 27. Vypusk 2 / Koll. avt. Moscow, ZAO NTC PB, 2010, 208 p.
10. RD 03-409-01. Metodika ocenki posledstvij avarijnyh vzryvov toplivno-vozdushnyh smesej. Moscow, ZAO NTC PB, 2014, 38 p.
11. Popov V. M., Chub I. A., Novozhylva M. V. Modelirovanie harakteristik potoka otkazov osnovnyh proizvodstvennyh fondov ob'ektov povyshennoj opasnosti, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2015, Vol. 21, pp. 64–70.
12. Chub I. A., Matuhno V. V. Prognozuvanna naslidkiv nadzvichainoi situacii z vibuhom xmaru gazopovitranoi sumichi, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2016, Vol. 23, pp. 186–191.
13. Shebeko U. N., Shevzhuk A. P., Kolosov V. A. Ocenka individual'nogo i social'nogo riska avarij s pozhamami i vzryvami dlja naruzhnyh tehnologicheskikh ustanovok, *Pozharovzryvobezopasnost'*, 1995, No. 1, pp. 21–29.
14. Metodika modelirovanija rasprostraneniya avarijnyh vybrosov opasnyh veshhestv. Moscow, ZAO NTC PB, 2012, 46 p.

НЕЙРОИНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.932.2:004.93'1

Гороховатский В. А.¹, Путятин Е. П.², Столяров В. С.³

¹Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и высшей математики, Харьковский учебно-научный институт государственного высшего учебного заведения «Университет банковского дела», Харьков, Украина

²Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

³Студент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ СТРУКТУРНЫХ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ

Актуальность. Повышение результативности и расширение функциональности современных систем компьютерного зрения требуют создания более эффективных методов обработки визуальной информации. Основные задачи структурного распознавания связаны с усовершенствованием информационных технологий классификации в пространстве описаний как множеств дескрипторов ключевых точек изображений, а также необходимостью оценивания действенности распознавания на прикладных образцах. Особое внимание уделяют изучению структуры данных для множества дескрипторов, что напрямую влияет на показатели функционирования систем распознавания.

Цель. Изучение особенностей кластерного представления для множества структурных признаков прикладной базы изображений и оценивание показателей эффективности применения кластерной модели в методах структурного распознавания визуальных объектов в плане получения компактного представления данных.

Метод. Предложено методы распознавания на основе трансформации пространства структурных признаков путем кластеризации и применения кластерных характеристик базы эталонных изображений. Первый метод использует интегральное представление описаний эталонов, второй метод при отнесении структурного элемента к классу опирается на значение вектора статистического распределения в матричном пространстве кластер-эталон. Итогом исследования есть создание методов распознавания и моделей обработки данных в процессе построения векторов релевантности или характеристик классов в трансформированном пространстве признаков.

Результаты. За счет кластерного преобразования пространства структурных признаков сокращается объем вычислительных затрат, и в сотни раз улучшается быстродействие распознавания при сохранении нужной эффективности. Проведено сравнение методов SURF и ORB при формировании структурных признаков, время обработки методом ORB оказалось в 60 раз меньше. С другой стороны, множество дескрипторов SURF более точно отражает особенности формы визуальных объектов.

Проведено моделирование и экспериментальные исследования предложенного метода распознавания в прикладной базе изображений. Подтверждена результативность метода в плане эффективности, получены сравнительные оценки качества распознавания в зависимости от уровня аддитивных помех для анализируемых вариантов обработки.

Выводы. В проведенном исследовании систематизированы и получены перспективные свойства систем распознавания в пространстве структурных признаков изображений. Разработанные методы классификации на основе кластерного описания обеспечивают достаточный уровень различения изображений и высокую помехоустойчивость.

Научная новизна исследования состоит в синтезе метода структурного распознавания изображений путем применения кластерной обработки и построения классифицирующих решений в пространстве кластер-эталон. Переход к векторно-кластерному виду существенно повышает быстродействие распознавания за счет упрощения обработки.

Практическая ценность работы – получение прикладных программных моделей для модификаций метода структурного распознавания и подтверждение результативности и помехоустойчивости предложенной обработки в конкретных примерах баз изображений.

Ключевые слова: компьютерное зрение, структурное распознавание изображений, множество структурных признаков, дескрипторы SURF, дескрипторы ORB, релевантность описаний, вектор характеристик классов, помехоустойчивость метода, быстрое действие распознавания.

НОМЕНКЛАТУРА

$Z = \{Z^j\}_{j=1}^J$ – база эталонных описаний;

Z^j – эталон;

J – число классов;

SURF – Speeded up robust features (ускоренное выделение устойчивых особенностей);

ORB – Oriented FAST and Rotated BRIEF (ориентированный FAST и повернутый BRIEF);

СП – структурный признак;

$M = \{M_i\}_{i=1}^k$ – разбиение на множестве Z ;

k – число классов (кластеров) СП;

$h[Z^j]$ – вектор представления эталона;

$H[Z] = \{h_i^j\}_{j=1}^J \}_{i=1}^k$ – матрица кластерного описания базы изображений;

$m = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ – множество центров кластеров;

$\{a_i^j\}_{j=1}^J \}_{i=1}^k$ – матрица весов эталонов;

$O = \{o_l\}$ – описание распознаваемого визуального объекта;

$\rho(o_l, m_d)$ – метрика на множестве СП;

δ – порог значимости для метрики ρ ;

$r_j = \beta(\alpha^i[O], \alpha^i[Z^j])$ – расстояние (степень релевантности) между кластеризованными векторными описаниями;

ε – порог значимости для минимума релевантности;

$\Sigma = (\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_J)$ – вектор характеристик классов;

$v = \Sigma_{\min} / \Sigma_{\max}$ – показатель эффективности различения эталонов.

ВВЕДЕНИЕ

Узловые задачи компьютерного зрения связаны с формированием полезных выводов и результативных управленческих решений относительно физических объектов реального мира на основе анализа их изображений [1–11]. Преимуществами структурных методов в анализе изображений есть представление визуальных объектов в виде множества независимых структурных элементов, что позволяет в процессе распознавания осуществлять результативные решения по подмножествам элементов и обеспечить нужную устойчивость к помехам на анализируемом изображении [1–3]. Перспективы структурного распознавания связаны с усовершенствованием информационных технологий классификации в пространстве описаний в виде множеств дескрипторов ключевых точек изображений, а также необходимостью оценивания действенности распознавания на прикладных образцах.

Объект исследования – структурное распознавание изображений в компьютерном зрении, описание которых представлено множествами характерных признаков.

Предмет исследования – кластерная модель представления структурного описания объектов с учетом пара-

метров числа кластеров и порогов подобия структурных элементов.

Цель работы – изучение свойств и особенностей кластерного представления для множества структурных признаков прикладной базы изображений и оценивание показателей эффективности применения кластерной модели в методах структурного распознавания визуальных объектов в плане получения компактного представления данных.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Фундаментом структурного распознавания есть априорно заданная база описаний эталонных изображений (алфавит классов), представленная их общей совокупностью СП в виде множества $Z = \{Z^j\}_{j=1}^J$.

Осуществим на множестве Z разбиение $Z = M = \{M_i\}_{i=1}^k$, $M_i \cap M_d = \emptyset$, $M_i \neq \emptyset$. Считаем элементы $z \in M_i$ эквивалентными (равноценными) между собой. Получим две системы классификации $\forall z \in Z$: $\{Z^j\}$ – для эталонных изображений и $\{M_i\}$ – для СП. За счет разбиения $\{M_i\}_{i=1}^k$ описание Z^j эталона трансформируется к целочисленному вектору

$$h[Z^j] = \langle h_1^j, h_2^j, \dots, h_i^j, \dots, h_k^j \rangle, \quad (1)$$

где $h_i^j = \text{card}\{z \mid z \in Z^j \ \& \ z \in M_i\}$. Представление (1) – это образ эталона, полученный в результате кластерного представления, а конечное множество векторов (1) базы из J образцов образует матрицу $H[Z] = \{h_i^j\}_{j=1}^J \}_{i=1}^k$. Строка матрицы H отражает кластерное описание отдельного эталона, а столбец – содержание кластера из числа равноценных элементов разных эталонов.

Представляет интерес изучение свойств и особенностей полученной кластерной структуры данных в плане показателей функционирования методов распознавания, построенных на ее основе.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Современные структурные методы анализа визуальной информации основаны на оценивании подобия дескрипторных описаний анализируемого и эталонного изображений, представленных в виде множеств особых точек – СП [1, 4–6]. Величина подобия отражает степень выполнения бинарного отношения релевантности для двух информационных единиц как описаний визуальных объектов в некотором пространстве признаков.

Множество СП в виде совокупности числовых векторов формируется применением специальных детекторов, наиболее известными среди которых в настоящее время считают SURF и более быстрый при реализации, но менее устойчивый к масштабированию, ORB [3, 5, 7]. SURF оперирует дескрипторами размером 64, ORB –

32 компонента, оба детектора инвариантны к геометрическим преобразованиям смещения, поворота, масштаба. Методы SURF и ORB реализованы в программных средах OpenCV, Matlab, ORB можно использовать в Веб-браузере посредством библиотеки JSFeat.

Построение разбиения в плане получения модели эталонов как групп равнозначных структурных элементов решается различными способами [1]. Один из развиваемых путей – применение кластеризации на множестве Z . Кластерное разбиение можно настроить на имеющуюся структуру данных, определяемую базой. Несомненным преимуществом применения векторной модели (1) при вычислении релевантности образов в целях распознавания в вычислительном плане значительно (в десятки раз) менее затратное, чем сопоставление описания изображения с совокупностью эталонных множеств $\{Z^j\}$ [4].

Можно рассматривать полученный образ (1) объекта как некоторую комбинаторную конфигурацию [8–11], которая организуется из элементов базового множества $m = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$, $m_i \in M_i$, образованного сформированной кластерной структурой. В такой конфигурации визуальный объект изображаем вектором (1), компонента которого равна числу вхождений базового элемента (СП) в описание объекта. Здесь применим также термин «рейтинг встречаемости» для СП. Процесс построения таких конфигураций можно считать самоорганизацией «порядка из беспорядка». Полученное в результате кластеризации базовое множество m центров напрямую зависит от банка образцов $\{Z^j\}$, служащих опорными точками в неограниченном пространстве распознаваемых изображений.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наряду с векторной моделью (1) эталонов распознавание в кластерном представлении имеет дело с матричной информацией: матрица кластерного описания $H[Z] = \{\{h_i^j\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k$, на основе которой вычисляется матрица весов $\{\{\alpha_i^j\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k$ эталонов, а также матрицы подобия/расстояний, которые вычисляются при сопоставлении описаний внутри базы с применением мер сходства в рамках моделей признакового пространства.

В целях построения кластерного описания, которое отображает статистическое распределение классов внутри кластеров и не зависит от числа СП в эталоне, предлагается матрицу H нормировать, причем целесообразна двухэтапная обработка:

1) нормирование в строке матрицы H на число элементов эталона

$$H^* = \{\{h_i^{j*}\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k = \{\{h_i^j / s_j\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k, \quad (2)$$

где $s_j = \text{card}(Z^j)$ – число элементов в эталоне Z^j ;

2) нормирование матрицы (2) на сумму элементов в столбце, чтобы получить распределение классов внутри отдельного кластера

$$H^{**} = \{\{\alpha_i^j\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k = \{\{h_i^{j*} / \sum_{j=1}^J h_i^{j*}\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k. \quad (3)$$

Вектора-строки α^i соответствуют образу эталона в признаковом пространстве кластеров, они есть результатом обучения системы в используемой базе образцов.

Из (3) видно, что $\sum_{d=1}^J \alpha_d^i = 1$, так что α_d^i (относительные веса СП кластера) можно считать оценкой вероятности события, что элемент кластера M_i относится к классу Z^d . В частности, максимальное значение среди компонентов α^i соответствует наиболее вероятному классу принадлежности СП. Очевидно, что значения характеристик α_d^i непосредственно зависят как от содержания базы эталонов, так и от применяемого метода кластеризации, устанавливающего отображение эталон-кластер.

Распознавание в рамках кластерной модели исходит из теоретико-множественного описания данных и реализовано на основе статистико-вероятностного представления (1). Под распознаванием понимаем отнесение описания $O = \{o_l\}$ неизвестного визуального объекта к одному из классов $\{Z^j\}_{j=1}^J$, в результате осуществляется отображение из множества описаний объектов $\{O\}$ в конечное множество номеров классов $\{1, \dots, J\}$.

Сопоставление описания визуального объекта с использованием векторной модели эталонов осуществляется двумя основными способами [6]:

1) путем непосредственного сравнения интегральных характеристик вида (1);

2) поэлементно – каждый элемент объекта отнесем к одному из кластеров M_i , весовые характеристики которого накапливаются на множестве СП объекта.

Рассмотрим формальное содержание методов более подробно.

Метод 1.

1. Причислим элемент $o_l \in O$ объекта к кластеру $M_i \subseteq M$ в соответствии с конкурентным правилом

$$o_l \rightarrow M_i \mid \arg \min \rho(o_l, m_d) = i. \quad (4)$$

Для фильтрации ложных элементов в ходе реализации (4) выполним верификацию минимума m_i : $\rho(o_l, m_l) \leq \delta$. Если условие не выполнено, элемент o_l не относят ни к одному из кластеров.

2. В результате реализации шага 1 $\forall o_l \in O$ формируется описание (1) объекта $O = (h_1, h_2, \dots, h_k)^o$.

3. Вычислим степень r_j релевантности между нормализованными кластерными описаниями (3) объекта и эталонов как расстояние $r_j = \beta(\alpha^i[O], \alpha^i[Z^j])$ между соответствующими строками матриц $\{\alpha_i^j\}$ объекта и эталона в векторном пространстве R^k .

4. Отнесем объект O к классу $d \in \{1, \dots, J\}$ по правилу $d = \arg \min_j r_j$.

В общем случае векторные расстояния $\rho(\dots)$ и $\beta(\dots)$ различны, вместо них применимы также меры подобия, например, коэффициент корреляции, а порог δ опреде-

ляется установленной априорно степенью различимости в базе эталонов и уровнем помех. На шаге 4 применяется проверка значимости минимума релевантности $r_d : r_d \leq \varepsilon$, где ε – порог. При неудовлетворении неравенства класс объекта считаем неопределенным, т.к. не установлено значимое соответствие в имеющемся пространстве эталонов.

Метод 2. Модифицируем распознавание включением векторов α^i в процесс решения. Отнесение элемента o_l в правиле (4) к одному из кластеров на шаге 1 будем сопровождать формированием суммы значений векторов α^i , после анализа всех значимых $o_l \in O$ на шаге 2 получим суммарный для элементов объекта вектор характеристик классов

$$\Sigma = \sum_O \alpha^i = (\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_J), Z_d = \sum_i \alpha_d^i. \quad (5)$$

Суммирование в (5) осуществляем по всем δ -значимым соответствиям кластеров для множества СП объекта. Шаг 4 метода 2 приобретает вид: объект относим к классу $d \in \{1, \dots, J\}$ по правилу:

$$O \rightarrow d \mid d = \arg \max_j \Sigma_j. \quad (6)$$

В методе 2 также могут быть применены проверки значимости при определении кластера (шаг 1) и максимума подобия в (6) (шаг 4). Значимость максимума в (6) может быть подтверждена величиной преобладания глобального максимума над ближайшим из локальных максимумов [1].

Отметим, что поэлементное сопоставление СП в методе 2 в реальных ситуациях обеспечивает большую устойчивость к помехам аномального типа, связанных с ложными объектами и фоном, что характерно для сигналов изображений.

Результативность распознавания в рамках базы изображений (конечного числа классов) с применением конкретного метода и модели данных может быть оценена значениями симметричной матрицы расстояний (метод

1) или матрицей подобия (метод 2). Анализ отклонения минимального значения от нуля в строке матрицы расстояний показывает, насколько близок наиболее похожий среди других эталон с анализируемым, стоящим на диагонали. В матрице подобия эффективность различения эталонов оценим показателем $v = \sum_{\min} / \sum_{\max}$ отношения локального и глобального максимумов при условии, что максимум \sum_{\max} находится на диагонали (событие правильного распознавания).

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Нами разработана программная среда для моделирования и исследования предложенных методов, она включает нахождение эталонных множеств ключевых точек на основе SURF и ORB дескрипторов (библиотеки OpenCV 3.2 и JSFeat), кластеризацию (JavaScript, библиотека K-Means), и вычисление матриц расстояний и подобия для базы изображений.

Изучим свойства и особенности реализации методов распознавания на примере экспериментальной базы морских млекопитающих (рис. 1) при представлении их структурных описаний в рамках 10 кластеров. Заметим, что визуально исследуемые изображения значительно похожи между собой, и в реальных условиях наблюдений их сложно классифицировать даже человеку. Другой особенностью базы есть визуальное подобие 1 и 4-го изображений (кит и китенок). Размеры изображений – 139x309 пикселей. Численный состав эталонов методом SURF [3]: 39, 69, 55 и 28 СП. Кластеризация описаний базы осуществлена методом k -средних [2]. В результате получено описание базы (матрица H) в виде табл. 1.

Наши вычисления показали, что с применением обоих методов достигается безошибочное различение эталонов по 10-ти кластерному представлению, причем эталоны 1 и 4 наиболее схожи между собой, что подтверждается и визуально. Однако для метода 2 кластерные образы эталонов 2–4 оказались в высокой степени подобными, что не гарантирует надежного распознавания в условиях помех. Полученная в результате нормирования матрица весов показана в табл. 2.

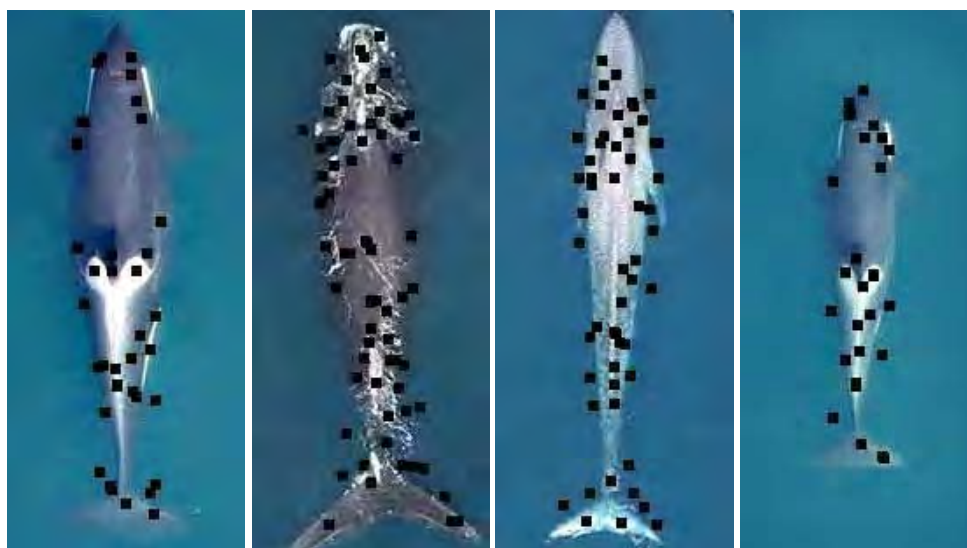


Рисунок 1 – Изображения морских животных базы и координаты СП SURF

Таблица 1 – Количество СП эталонов в кластерном представлении

H	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
Z^1	3	6	2	2	5	3	6	8	0	4
Z^2	11	12	0	15	8	14	9	0	0	0
Z^3	3	2	0	14	5	0	18	13	0	0
Z^4	4	1	2	3	4	5	6	1	1	1

Таблица 2 – Матрица весов для базы морских животных

α^i	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
Z^1	0,18	0,38	0,42	0,08	0,27	0,17	0,19	0,43	0	0,74
Z^2	0,37	0,43	0	0,34	0,24	0,44	0,16	0	0	0
Z^3	0,13	0,09	0	0,40	0,19	0	0,40	0,50	0	0
Z^4	0,33	0,09	0,58	0,17	0,30	0,39	0,26	0,07	1,00	0,26

Как можно увидеть, полученное в табл. 2 представление выглядит достаточно эффективным, т.к. в столбцах 2, 3, 8, 9, 10 наблюдается существенное преобладание весовых коэффициентов для ограниченного числа эталонов. Матрицу подобия (метод 2) для эталонов базы можно вычислить, умножая столбец весов кластера на число СП эталона, оказавшихся в кластере (табл. 1). Матрица расстояния и матрица подобия представлены в табл. 3, 4.

Из табл. 3, 4 видим существенные различия эталонов в пространстве кластеров, в то время как эталоны 1, 4 остаются наиболее схожими.

Ключевым параметром кластерного представления есть число кластеров, которое теоретически связано с порогом эквивалентности для СП. Сокращение объёма вычислений при распознавании прямо пропорционально числу кластеров, в то время как значение вероятности правильного распознавания зависит обратно пропорционально. Матрица кластерного представления в рамках 5 кластеров для базы изображений рис. 1 представлена в табл. 5, а матрица подобия – в табл. 6.

Гистограмма представления первого изображения (рис. 1) в системе 5 и 10 кластеров приведена на рис. 2.

Проведено сравнительное исследование помехоустойчивости разработанных методов при действии аддитивных помех. Компоненты вектора помехи формировались в виде нормально распределенной случайной величины с нулевым математическим ожиданием и заданным значением среднеквадратического отклонения σ , характеризующего отношение сигнал-шум [1]. При $\sigma = 0,1$ для 10-ти кластеров первый метод обеспечивает безошибочное распознавание в пределах изучаемой базы, в то время как для второго метода вероятность P правильного распознавания составила $P = 0,92$. Снижение вероятности связано в основном с высокой степенью подобия изображений 1 и 4 (рис. 1). При $\sigma = 0,2$ вероятности составили 0,91 и 0,9, а при $\sigma = 0,3 - 0,76$ и 0,78. Как видим, в случае аддитивной помехи устойчивость первого метода несколько выше, но не значительно.

Таблица 3 – Матрица расстояний классов

Эталон	1	2	3	4
1	0	58	42	21
2	58	0	58	51
3	42	58	0	47
4	21	51	47	0

Таблица 4 – Матрица подобия

Эталон	1	2	3	4
1	13,21	7,89	9,02	8,88
2	13,96	23,99	13,62	17,42
3	12,72	10,86	20,74	10,68
4	6,38	7,07	5,44	9,11

Таблица 5 – Кластерное представление для 5 кластеров

H	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
Z^1	10	11	3	7	8
Z^2	19	14	0	20	16
Z^3	7	12	4	26	5
Z^4	8	4	3	6	7

Таблица 6 – Матрица подобия для 5 кластеров

Эталон	1	2	3	4
1	10,43	9,65	8,95	9,96
2	17,08	18,60	16,43	16,89
3	12,39	12,85	16,58	12,17
4	7,15	6,86	6,31	7,68

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Кластерное преобразование пространства структурных признаков сокращает объем вычислительных затрат, и в сотни раз улучшается быстрдействие распознавания при сохранении нужной эффективности. Проведено сравнение методов SURF и ORB при формировании структурных признаков: время обработки методом ORB в десятки раз меньше, однако, множество SURF более точно отражает форму визуальных объектов.

Проведено моделирование и экспериментальные исследования предложенных методов распознавания в

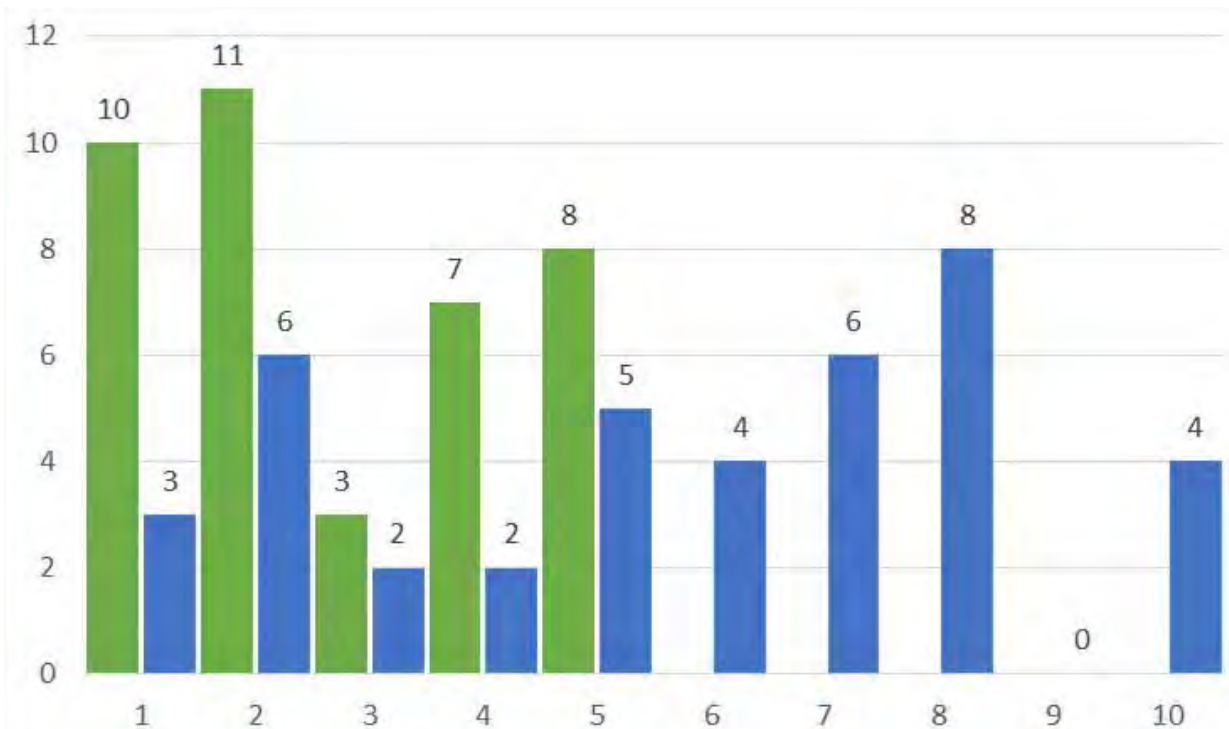


Рисунок 2 – Гистограмма кластеров изображения рис. 1 (зеленый – 5 кластеров, синий – 10 кластеров)

прикладной базе изображений. Подтверждены их работоспособность и результативность, получены сравнительные оценки качества распознавания в зависимости от уровня аддитивных помех для анализируемых вариантов обработки.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнивая значения релевантности Σ для эталонов в табл. 6 и табл. 4 (метод 2), видим, что в строках табл. 6 по сравнению с табл. 4 показатель ν отношения локального и глобального максимумов значительно выше, что говорит о невысоком уровне различимости классов. В табл. 4 величина ν колеблется в пределах 0,63–0,75, в то время как в табл. 6 – $\nu \in [0,78–0,95]$. Таким образом, подобие эталонов между собой в рамках 5 кластеров выше, чем для 10 кластеров. Аналогичная ситуация (снижение различия классов) наблюдается и для матриц расстояний: если минимум среди недиагональных элементов табл. 3 равен 21, а максимум – 58, то для аналогичной таблицы в рамках 5 кластеров они равны 11 и 47. В целом же оба метода при числе кластеров 5 и 10 обеспечивают безошибочное распознавание.

Сравнение методов распознавания при применении разных детекторов (SURF и ORB) показывает, что первый метод более точный и чувствительный к схожести описаний, он различает даже очень близкие между собой изображения. В плане различия близких изображений методы SURF и ORB ведут себя аналогично. Но для ORB наблюдается более высокое значение показателя ν : для 10 кластеров он находится в пределах отрезка 0,85–0,98. Увеличение числа кластеров также не улучшает ситуации.

Детектор ORB формирует примерно в два раза больше дескрипторов: 80, 304, 137 и 46 СП для базы рис. 1. При этом числом дескрипторов можно управлять. Но за

счет более коротких дескрипторов в 32 элемента время кластеризации и распознавания для дескрипторов ORB на порядок меньше, чем для SURF. Для одного из экспериментов время формирования SURF в среднем составило в 62 раза большее значение ($8,29e-4$ сек). С другой стороны, множество дескрипторов SURF, на наш взгляд, более точно отражает особенности формы обрабатываемых визуальных объектов. Дескрипторы ORB при этом образуют скученные множества практически в одних и тех же точках изображения. Пример изображения 2 с координатами дескрипторов ORB приведен на рис. 3.



Рисунок 3 – Изображение и координаты дескрипторов ORB

ВЫВОДЫ

Таким образом, можно считать, что разработанные методы классификации на основе кластерного описания обеспечивают достаточный уровень различения изображений и высокую помехоустойчивость. Кластерное представление в десятки раз сокращает временные затраты на распознавание.

В то же время результативность кластерного распознавания существенно зависит от сформированной системы кластеров в прикладной базе классов, задаваемых эталонами. На этапе обучения системы целесообразно достигать приблизительно равночисленного представле-

ния для множеств структурных признаков эталонов, чтобы полученное кластерное представление приводило к примерно равноценному влиянию всех структурных элементов на результат. Для близких изображений (рис. 1, эталоны 1 и 4) целесообразно строить единое эталонное описание.

Исследования подтвердили мнение о том, что число кластеров в прикладных задачах компьютерного должно быть в диапазоне 5...10.

Эксперименты показали, что формирование дескрипторов ORB осуществляется в десятки раз быстрее, чем дескрипторов SURF. В то же время множество дескрипторов SURF точнее отражает форму объектов.

В зависимости от типа помех предложенные методы имеют разную помехоустойчивость. Первый метод рекомендуем применять при аддитивной помехе и объемных базах изображений, он обеспечивает нужную чувствительность. Зато второй метод на основе анализа каждого структурного элемента обладает лучшей помехоустойчивостью при влиянии локальных (импульсных) помех, приводящих к частичному искажению множества структурных признаков, образующих описание.

Такие параметры методов, как порог эквивалентности структурных признаков, пороги для значимости подобия и степени релевантности при решении о классе, а также число кластеров определяются в процессе обучения для конкретных прикладных баз изображений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Харьковского национального университета радиоэлектроники «Разработка гибридных систем и методов вычислительного интеллекта для обработки потоков нечеткой информации в условиях нестационарности и неопределенности» (номер гос. регистрации 0116U002539).

Гороховатский В. О.¹, Путятин Є. П.², Столяров В. С.³

¹Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий та вищої математики, Харківський навчально-науковий інститут державного вищого навчального закладу «Університет банківської справи», Харків, Україна

²Д-р техн. наук, профессор, завідувач кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

³Студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ СТРУКТУРНИХ МЕТОДІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ КЛАСТЕРНОЇ МОДЕЛІ ДАНИХ

Актуальність. Підвищення результативності та розширення функціональності сучасних систем комп'ютерного зору вимагають створення більш ефективних методів обробки візуальної інформації. Основні завдання структурного розпізнавання пов'язані з удосконаленням інформаційних технологій класифікації в просторі описів як множин дескрипторів ключових точок зображень, а також необхідністю оцінювання дієвості розпізнавання на прикладних зразках. Особливу увагу приділяють вивченню структури даних для множини дескрипторів, що безпосередньо впливає на показники функціонування систем розпізнавання.

Мета. Вивчення особливостей кластерного уявлення для множини структурних ознак прикладної бази зображень і оцінювання показників ефективності застосування кластерної моделі в методах структурного розпізнавання візуальних об'єктів в плані отримання компактного подання даних.

Метод. Запропоновано методи розпізнавання на основі трансформації простору структурних ознак шляхом кластеризації і застосування кластерних характеристик бази еталонних зображень. Перший метод використовує інтегральне уявлення описів еталонів, другий метод при віднесенні структурного елементу до класу спирається на значення вектора статистичного розподілу в матричному просторі кластер-еталон. Підсумком дослідження є створення методів розпізнавання і моделей обробки даних в процесі побудови векторів релевантності або характеристик класів в трансформованому просторі ознак.

Результати. За рахунок кластерного перетворення простору структурних ознак скорочується обсяг обчислювальних витрат, і в сотні разів поліпшується швидкість розпізнавання при збереженні потрібної ефективності. Проведено порівняння методів SURF і ORB при формуванні структурних ознак, час оброблення методом ORB виявився в 60 разів менше. З іншого боку, множина дескрипторів SURF більш точно відображає особливості форми візуальних об'єктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гороховатский В. А. Структурный анализ и интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении / В. А. Гороховатский. – Х. : Компания СМІТ, 2014. – 316 с.
2. Гороховатский В. А. Изучение свойств методов кластеризации применительно к множествам характерных признаков изображений / В. А. Гороховатский, М. Д. Дунаевская, В. А. Струненко // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 5 (142). – С. 124–127.
3. Bay H. Surf: Speeded up robust features / H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool // Computer Vision: Ninth European Conference on Computer Vision, Graz, 7–13 May, 2006: proceedings. – Berlin: Springer, 2006. – P. 404–417.
4. Gorokhovatsky V. A. Efficient Estimation of Visual Object Relevance during Recognition through their Vector Descriptions / V. A. Gorokhovatsky // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – Vol. 75, No. 14. – P. 1271–1283.
5. Rublee E. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF / [E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, G. Bradski] // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), November 06–13, 2011, P. 2564–2571. Режим доступа http://www.willowgarage.com/sites/default/files/orb_final.pdf
6. Гороховатский В. А. Структурное распознавание изображений с применением моделей интеллектуальной обработки и самоорганизации признаков / В. А. Гороховатский, А. В. Гороховатский, А. Е. Берестовский // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2016. – №3 (38). – С. 39–46.
7. Karami E. Image Matching Using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: Performance Comparison for Distorted Images / E. Karami, S. Prasad, M. Shehata. – Режим доступа https://www.researchgate.net/publication/292157133_
8. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications / R. Szeliski. – London : Springer, 2010. – 979 p.
9. Duda R.O. Pattern classification / R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. – 2ed., Wiley, 2000. – 738 p.
10. Manning C. D. Introduction to Information Retrieval / C. D. Manning, P. Raghavan, H. Schutze. – Cambridge, University Press, 2008. – 528 p.
11. Shapiro L. Computer vision / L. Shapiro and G. Stockman. – Prentice Hall, 2001. – 625 p.

Статья поступила в редакцию 16.02.2017.

После доработки 03.03.2017.

Проведено моделювання та експериментальні дослідження запропонованого методу розпізнавання для прикладної бази зображень. Підтверджено результативність методу в плані ефективності, отримані порівняльні оцінки якості розпізнавання в залежності від рівня адитивних перешкод для аналізованих варіантів обробки.

Висновки. У проведеному дослідженні отримані і систематизовані перспективні властивості систем розпізнавання у просторі структурних ознак зображень. Розроблені методи класифікації на основі кластерного опису забезпечують достатній рівень розрізнення зображень і високу стійкість перед перешкодами.

Наукова новизна дослідження полягає в синтезі методу структурного розпізнавання зображень шляхом застосування кластерної обробки і побудови класифікаційних рішень у просторі кластер-еталон. Перехід до векторно-кластерного подання істотно підвищує швидкість розпізнавання за рахунок спрощення обробки.

Практична значущість роботи – отримання прикладних програмних моделей для модифікацій методу структурного розпізнавання і підтвердження результативності та завадостійкості запропонованої обробки в конкретних прикладах баз даних зображень.

Ключові слова: комп'ютерний зір, структурне розпізнавання зображень, множина структурних ознак, дескриптори SURF, дескриптори ORB, релевантність описів, вектор характеристик класів, стійкість методу, швидкість розпізнавання.

Gorokhovatsky V. A.¹, Putyatin Y. P.², Stolyarov V. S.³

¹Dr. Sc., Professor, Department of Information Technology and Higher Mathematics, Kharkov Educational and Scientific Institute of Public Higher Education "University of Banking", Kharkov, Ukraine

²Dr. Sc., Professor, Head of Department of Computer Science, National University of Radio Electronics Kharkov, Kharkov, Ukraine

³Student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine

RESEARCH OF EFFECTIVENESS OF STRUCTURAL IMAGE CLASSIFICATION METHODS USING CLUSTER DATA MODEL

Context. Increasing of productivity and extension of the functionality of modern computer vision systems require more effective methods for visual information processing. Main goals of structural recognition are related with the improvement of information classification technology in the space of features in a form of image key point descriptors, as well as the necessity of recognition performance estimation for application datasets. Particular attention is related to the investigation of data structure for the set of descriptors that directly affects the functioning of the recognition system.

Objective. Investigation of cluster representation for the set of structural features of application dataset was performed as well as the evaluation of cluster model performance in methods of visual objects structural recognition to provide compact representation of data was proposed.

Method. Methods of recognition based on transformation of structural features space by clustering and usage of cluster dataset image features were proposed. First method uses the integral representation of etalon images descriptions, the second one is based on the value of statistical distribution vector in matrix space cluster model during building the association between structural element and class. Result of research is creation of recognition methods and data models during construction of relevance vectors and features of classes in the transformed feature space.

Results. Using cluster transformation of the space of structural features allows to reduce the amount of computational costs, and improves recognition performance preserving desired efficiency in a hundred of times. Comparison between SURF and ORB methods for the formation of structural features was performed, processing time by ORB has appeared to be 60 times less. On the other hand, the set of SURF descriptors closely reflects the shape of visual objects.

Modeling and experimental investigations of proposed recognition method for application dataset was performed. Effectiveness of the method in terms of efficiency was confirmed, comparative estimations of recognition quality depending on the level of additive noise for the analyzed treatment options were obtained.

Conclusions. Paper proposed the systematization and obtaining of perspective properties of recognition systems in the space of structural features of images. Classification methods based on cluster descriptions provide a sufficient level of image discrimination and high noise immunity.

Scientific novelty of the research consists of synthesis of a method of structural image recognition based on the use of cluster processing and the construction of classification decisions in space of etalon cluster. Conversion to the vector-cluster presentation allows to significantly increase the speed of recognition by processing simplification.

Practical value of paper is the obtaining of application program models for the modifications of structural image recognition method with the confirmation of the effectiveness and noise immunity of the proposed approach in a specific image dataset.

Keywords: computer vision, structural image recognition, set of structural features, SURF descriptors, ORB descriptors, relevance of descriptions, vector of characteristics of classes, noise immunity, recognition performance.

REFERENCES

1. Gorohovatskij V. A. Strukturnyj analiz i intellektual'naja obrabotka dannyh v komp'yuternom zrenii. H. Kompanija SMIT, 2014, 316 p.
2. Gorohovatskij V. A., Dunaevskaja M. D., Strunenکو V. A. Izuchenie svojstv metodov klasterizacii primenitel'no k mnozhestvam harakternyh priznakov izobrazhenij, *Sistemi obrobki informacii*, 2016, Vip. 5 (142), pp. 124–127.
3. Bay H., Tuytelaars T., Van L. Gool Surf: Speeded up robust features, *Computer Vision : Ninth European Conference on Computer Vision, Graz, 7–13 May, 2006: proceedings*. Berlin, Springer, 2006, pp. 404–417.
4. Gorokhovatsky V. A. Efficient Estimation of Visual Object Relevance during Recognition through their Vector Descriptions, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2016, Vol. 75, No. 14, pp. 1271–1283.
5. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF, *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), November 06G.13, 2011*, pp. 2564–2571. Rezhim dostupa http://www.willowgarage.com/sites/default/files/orb_final.pdf
6. Gorohovatskij V. A., Gorohovatskij A. V., Berestovskij A. E. Strukturnoe raspoznavanie izobrazhenij s primeneniem modelej intellektual'noj obrabotki i samoorganizacii priznakov, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 3 (38), pp. 39–46.
7. Karami E., Prasad S., Shehata M. Image Matching Using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: Performance Comparison for Distorted Images. Rezhim dostupa https://www.researchgate.net/publication/292157133_
8. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. London, Springer, 2010, 979 p.
9. Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. *Pattern classification*, 2ed. Wiley, 2000, 738 p.
10. Manning C. D., Raghavan P., Schütze H. *Introduction to Information Retrieval*, Cambridge, University Press, 2008, 528 p.
11. Shapiro L. and Stockman G. *Computer vision*. Prentice Hall, 2001, 625 p.

¹Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна

²Д-р техн. наук, професор, декан факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна

СИНТЕЗ МАРШРУТІВ СУБ-РОІВ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ХОПФІЛДА ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ ТЕРИТОРІЙ

Актуальність. Вирішено актуальну задачу економії обмежених енерго-, обчислювальних і технологічних ресурсів малогабаритних безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Мета роботи – створення методу синтезу маршрутів суб-роїв БПЛА, що підвищує час життєздатності зграї БПЛА.

Метод. Запропоновано метод побудови моделей часток («суб-роїв») зграї БПЛА, що виключає дубляж виконання завдання у вузлах координатних сіток, якими покривається досліджувана територія. Суміщення нейронної карти мережі Хопфілда та польотної карти для кожного суб-рою забезпечує повідомлення через модулі бездротового зв'язку між БПЛА факту виконання моніторингового або технологічного завдання будь-яким окремим БПЛА суб-рою решті БПЛА. Запропонований підхід надає можливість використовувати функції самозагоєння суб-роїв зграї птахоподібних об'єктів («боїдів») шляхом перевизначення задач суб-роїв як кібер-фізичної системи у разі втрати окремих боїдів при їх критичному застосуванні. Структура одержуваних моделей поведінки суб-роїв, реалізована у двовимірних просторових коридорах довільної форми з наступною конкатенацією отриманих 2D-рішень, значно спрощує вирішення задачі комівояжера у тривимірному просторі та дозволяє істотно прискорити виконання завдань обстеження ділянок територій.

Результати. Розроблено програмне забезпечення (ПЗ), яке реалізує запропонований метод, що використано при проведенні обчислювальних експериментів по дослідженню властивостей методу.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу і ПЗ, що його реалізує, а також дозволяють рекомендувати їх для застосування на практиці для рішення задач обстеження території з використанням зграї боїдів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, суб-рої, зграя, нейронна мережа Хопфілда, дубляж задач.

НОМЕНКЛАТУРА

БПЛА – безпілотний літальний апарат (дрон, боїд);

ГДК – гранично допустима концентрація;

КФС – кібер-фізична система (англ. *cyber-physical system, CFS*);

НМХ – нейронна мережа Хопфілда;

2D – двовимірний простір (англ. *two-dimensional space*);

3D – тривимірний простір (англ. *three-dimensional space*);

B_{mn} – m -й боїд в n -му суб-рої зграї, який працює в SC_n -му просторовому коридорі;

A_n – матриця подій n -го суб-рою;

D_{ij} – початковий бінарний рівень ij -го нейрону;

$f(v_{ij})$ – функція активації ij -го нейрону;

lat_{ij} – широта ij -го вузла координатної сітки (англ. *latitude*);

lon_{ij} – довгота ij -го вузла координатної сітки (англ. *longitude*);

L – відстань між вузлами координатної сітки;

M – кількість боїдів в суб-рої;

N – кількість суб-роїв в зграї;

P_{ij} – ij -й вузол координатної сітки;

PE_0 – точка закінчення завдання одиночним БПЛА;

PF_n – точка вильоту боїдів n -го суб-рою;

SC_n – n -й просторовий коридор, в якому працює n -й суб-рої зграї;

TSP – задача комівояжера (англ. *travelling salesman problem*);

UAV – *unmanned aerial vehicles*;

x_{ij} – сигнал на вході ij -го нейрону;

y_{ij} – сигнал на виході ij -го нейрону;

v_{ij} – сигнал на виході адаптивного суматора ij -го нейрону;

w_{ij} – ваговий коефіцієнт вузла P_{ij} та ij -го елемента нейронної мережі Хопфілда;

Δt_{ij} – часова затримка поновлення стану ij -го нейрону.

ВСТУП

Все більше поширюється одночасне використання безпілотних апаратів (БПЛА або дронів) в різних галузях цивільно-військового призначення [1, 2]. Аграрний сектор нині є основним споживачем послуг дронів [1]. Необхідно зауважити, що останнім часом зміщується акцент з високотехнологічних дорогих пристроїв у бік дешевих спрощених вузькопрофільованих, з обмеженим набором інтерфейсів та сенсорів, апаратів критичного застосування («мікро-дронів»), втрата яких під час виконання задачі не перешкоджає її успішному завершенню [2]. У разі виходу з строї одного або декількох дронів вони підміняються аналогічними з тієї ж «зграї» або шляхом запуску додаткових апаратів. Тобто, «зграя» виконує адаптивні зміни порядку дронів на льоту та «самозагоєння» суб-роїв. Кожен з дронів в такій роївовій системі підтримує зв'язок з іншими БПЛА. Тут немає лідера чи командира, що дозволяє рою успішно пережити втрату окремих дронів і продовжувати скоординовані дії найчастіше на основі нейронної карти [3].

Треба зазначити, що дрони лише співпрацюють у межах «зграї» та повинні не створювати конфліктні ситуації один одному. Що стосується функцій, то кожна група БПЛА (суб-рій) в межах «зграї» виконує самостійне завдання (або вимірювання різних показників, або відеозйомку, або економне диференційоване обприскування окремих ділянок рослин тощо) та об'єднана так званим «ройовим інтелектом». Сучасна назва «*boïd*» використовується для невеликих та недорогих БПЛА у рої (за умови виконання спільного завдання) або у зграї (якщо кожен суб-рій зграї виконує окрему задачу з спільного завдання зграї), відповідає укороченій версії «птахоподібний об'єкт» (англ. *bird-oid object*) [2].

Ройовий інтелект передбачає скоординовані дії деякої кількості боїдів, які локально взаємодіють між собою і навколишнім середовищем [4]. Хоча кожен боїд слідує простим базовим правилами, але в сукупності система ройового інтелекту демонструє винятково складну спільну поведінку. Вона діє фактично як єдиний великий організм.

Об'єктом роботи є процес планування маршрутів БПЛА якщо не оптимальним чином, то таким, що забезпечує виконання низки задач всією зграєю з найменшою витратою обчислювальних та енергоспожитих ресурсів.

Предметом дослідження є методи синтезу маршрутів суб-роїв, з яких складається зграя боїдів, на основі нейронних мереж Хопфілда (HMX).

Метою роботи є створення такого методу синтезу маршрутів суб-роїв зграї, який забезпечить вирішення задачі комівояжера (англ. TSP) з виключенням дубляжу виконання задач у вузлах, якими промаркована досліджувана територія, та з суттєвим прискоренням синтезу маршрутів БПЛА у порівнянні з існуючими методами. Необхідність досягнення мети обумовлена обмеженістю енергоресурсів боїдів, що не дозволяє виконувати великий обсяг обчислень, якого потребує застосування класичних методів вирішення задачі TSP. Актуальність досліджень підвищується, якщо завдання обстеження територій пов'язані з надзвичайними ситуаціями та потребують негайних рішень в надзвичайно обмежені строки.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Наочними задачами, для вирішення яких доцільно застосовувати зграї (рої) невеликих боїдів з обмеженими обчислювальними та енергоресурсами, наприклад, є вирішення задач агросектору, огляд технічних споруд, моніторинг метеопказників, поширення тріщин при землетрусах, води – при повенях тощо. В подібних задачах завжди актуальними є питання визначення маршруту з моніторингом певних характеристик у визначених вузлах на чітко обмеженій території. Такий маршрут повинен бути, якщо й не оптимальним, але мінімальним за часом та довжиною траєкторії для прийняття своєчасних рішень.

Якщо ці умови не будуть виконані, можливі два варіанта критичного закінчення маршруту зграєю боїдів:

– невиконання задачі обстеження всіх заданих точок маршруту;

– неповернення чисельних боїдів до місця вильоту через зіткнення або закінчення ресурсу елементів електроживлення на борту боїдів.

Враховуючи вищевикладене, задача моніторингу характеристик території з чітко визначеними розмірами може бути приведена до класичної задачі комівояжера з нетрадиційним шляхом вирішення останньої.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Одним з ключових завдань при функціонуванні безпілотних апаратів в недостатньо відомій обстановці є планування безпечних траєкторій, що дозволяє будувати безаварійні маршрути переміщення [3]. Складність синтезу траєкторій для колективів роботів (у статті – зграї боїдів) полягає в тому, що, по-перше, в робочій зоні присутні інші безпілотні апарати (рухливі перешкоди), а по-друге, обчислювальні можливості бортових систем боїдів обмежені, що не дозволяє вирішувати задачу синтезу маршрутів БПЛА з використанням класичних переборних або потенційних алгоритмів.

У роботах [3, 5] розглянуті нові підходи до опису руху і планування маршрутів БПЛА на основі біологічно подібних алгоритмів. Нові методи побудови нейро-нечітких мереж не вимагають завантаження всієї навчальної вибірки в пам'ять комп'ютера та істотно прискорюють процес синтезу моделей [6]. Обмеженням використання таких методів є необхідність розбиття нейромоделі на прямокутні блоки.

З огляду на необхідність в проведеному дослідженні поєднувати нейронну карту [3] з картою польотів, доцільно використовувати для формування матриці стану всіх нейронів мережі алгоритм нейронної мережі Хопфілда [7]. Згодом всередині такої матриці можна виділити області довільної форми, в яких виконується синтез маршрутів БПЛА для вирішення задачі комівояжера.

Існує багато методів рішення TSP-задачі. Однак, такі методи в пошуку оптимального маршруту витрачають значну кількість обчислювальних і часових ресурсів, що зростають у експоненті із зростанням кількості вузлів – до 10 с для 20 точок маршруту [7]. Однак, в швидкодинамічних процесах, пов'язаних зі швидкістю переміщення БПЛА від 20 до 30 м/с [2], просторовий коридор може бути пройдений боїдом швидше, ніж буде розрахований оптимальний маршрут. Тому доцільним є приведення 3D завдання TSP до більш простої і швидко розв'язуваної двовимірної (2D) задачі [8].

Ефективність певного числа рішень досить спірна, але найважливішою вимогою при синтезі маршрутів БПЛА є перевага в швидкості розрахунку. Достатня швидкість для забезпечення безконфліктної поведінки боїдів зграї може бути забезпечена при застосуванні мультиагентного підходу, коли боїди самостійно розв'язують різні за змістом оптимізаційні задачі, що виникають під час роботи системи, за умов відсутності центрального управління [9]. Але такий підхід повинен бути доповненим правилами організації роботи кібер-фізичної системи (КФС), в якій забезпечені умови стабільного бездротового зв'язку для передачі таких карт на входи всіх боїдів суб-рою та ін. [10]. В такій КФС на попередньому етапі (до вильоту зграї) оператору КФС необхідно частково спланувати розподіл агентів (боїдів) зграї на суб-рої, сформувати початкові нейронні карти алгоритму HMX для кожного суб-рою.

У зв'язку з вищесказаним, синтез нейромережевої системи планування маршрутів БПЛА з виключенням дубляжу виконання задач, з урахуванням обмежених апаратних можливостей птахоподібних безпілотних апаратів, є актуальною та своєчасною задачею.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглянемо моделювання групової поведінки зграї боїдів з урахуванням розбиття їх на суб-рої, які виконують аналогічні задачі в обмежених просторових коридорах.

Для економії обчислювальних ресурсів і продовження життя зграї поведінку боїда- «комівояжера» пропонується описувати тільки в географічних координатах (lat_{ij} , lon_{ij}), тобто, вирішувати 2D-задачу TSP. Висота h , на якій повинен переміщатися кожен окремий суб-рій, фіксується в залежності від рельєфу місцевості, над якою працює суб-рій. При такому підході повинна вирішуватися 2D-задача комівояжера в кожному просторовому коридорі, в якому працює окремий суб-рій [9]. На відміну від [6, 9] пропонується в розробленому методі формувати просторові коридори (блоки польотної карти) не прямокутними, а достатньо довільної форми з суміжними межами, без дублювання членства вузлів у суміжних блоках.

Попадання m -го боїда n -го суб-рою в точку з координатами (lat_{ij} , lon_{ij}) визначається або за GPS-координатами, або (за відсутністю зв'язку) порівнянням знімків фотокамери боїда з об'єктами з точною локалізацією, виявленими за Google або Apple мапами. Отже, вхідними даними є масив опорних точок, через які повинен пролетіти боїд (або суб-рій). Для кожного n -го суб-рою вказана точка вильоту PF_n , яка також є точкою фінішу.

Розглянемо план території, який покривається декількома координатними сітками з K рівномірно нанесеними в лінію контрольними вузлами на чітко визначеній відстані L (рис. 1). Кожна координатна сітка – це квадрат 10×10 вузлів, який є планом одного польоту зграї боїдів. Кількість суб-роїв в зграї, точки вильоту кожного суб-рою, висота польоту кожного суб-рою і відстань між вузлами, в яких повинні бути виконані технологічні або моніторингові завдання, визначається оператором цієї КФС перед кожним вильотом.

Якщо задача обстеження території виконується окремим БПЛА, з вильотом у точці PF_0 та закінченням завдання у точці PE_0 (рис. 2), то загальна вартість такого маршруту становить приблизно 2620, якщо вважати, що ваговий коефіцієнт переміщення боїда між вузлами P_{ij} координатної сітки по прямій становить $w_{ij} = 1 \cdot k$, а по діагоналі – $w_{ij} = 1,4 \cdot k$, де k – коефіцієнт, що динамічно змінюється в залежності від швидкості переміщення боїда [2].

Для прискорення обстеження мапи, вкритої декількома координатними сітками (див. рис. 1), доцільно використовувати зграю боїдів, поділену на декілька суб-роїв N , з кількістю M_n боїдів в n -му суб-рої. Для кожного суб-рою складається окрема польотна карта в межах однієї координатної сітки, що відповідає одному вильоту зграї. Пропонується для роботи кожного n -го суб-рою формувати просторовий коридор SC_n довільної форми.

Алгоритм має розуміти варіанти різного положення точок вильоту безпілотних літальних апаратів: виліт всіх

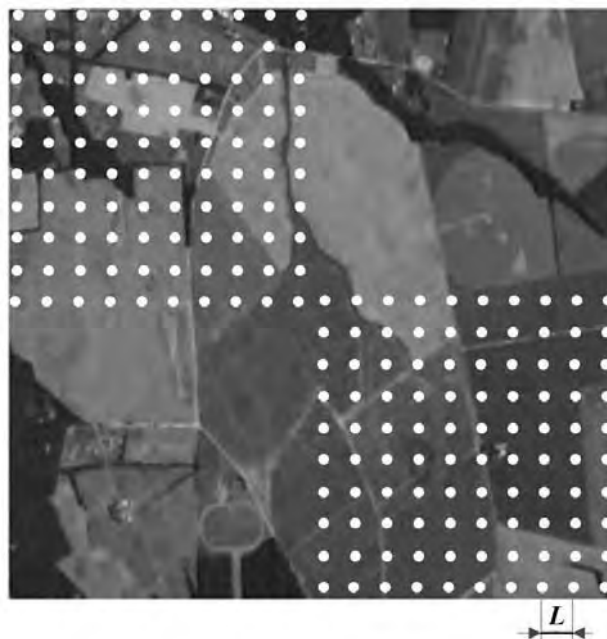


Рисунок 1 – Координатні сітки на мапі

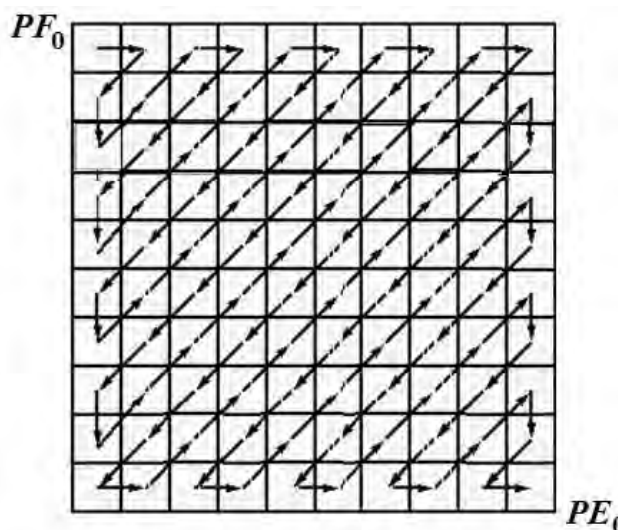


Рисунок 2 – Маршрут обстеження території окремим БПЛА

суб-роїв з однієї спільної точки PF_0 (рис. 3а), або з різних точок вильоту $PF_1 \dots PF_N$ (рис. 3б).

В залежності від кількості та положення точок вильоту кожного суб-рою стає кожна координатна сітка розділяється на просторові коридори SC_n (див. рис. 3). У наведеному прикладі кількість таких коридорів становить $N=4$. В кожному коридорі працює один суб-рій з кількістю боїдів один або більше (максимальна кількість боїдів у зграї M). Кожен вузол координатної сітки входив тільки в один просторовий коридор.

Тоді площа території, яка буде обстежена за один виліт зграї боїдів, залежить від відстані L між кожними двома сусідніми вузлами та кількості вузлів K :

$$S = (K - 1)^2 L^2. \quad (1)$$

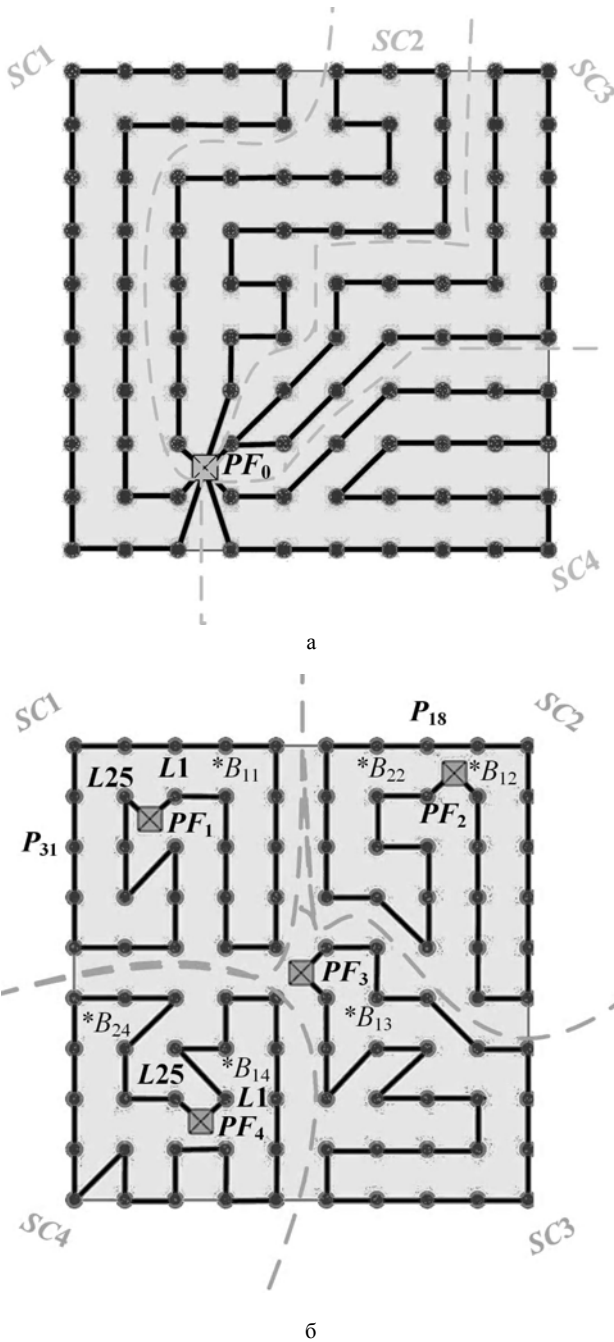


Рисунок 3 – Розподіл координатної сітки польотів на просторові коридори SC_n при $N = 4$:
 а – при спільній точці PF_0 вильоту боїдів ($*B_{ij}$); б – при рознесених точках вильоту PF_n

Дискретна повнозв'язна НМХ складається з одного шару бінарних нейронів, кожен з яких пов'язаний з решетою нейронів і має мережеві вхід і вихід (рис. 4а). Координати цілі (вузли координатної сітки), а також інформація, чи є ці вузли вже обстеженими, надходять на вхід НМХ (рис. 4б), яка являє собою шар адаптивних суматорів із зворотними зв'язками, вихідні сигнали яких надходять з часовою затримкою Δt_{ij} на входи нейронів, в результаті чого вихідний сигнал НМХ формується лише після того, як мережа досягне динамічної рівноваги [3].

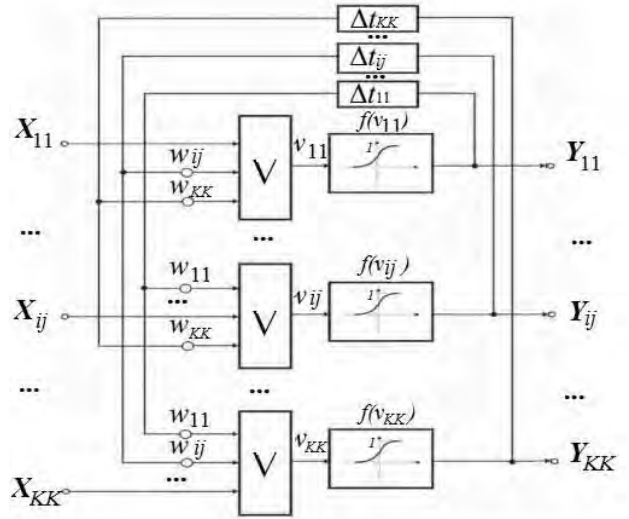
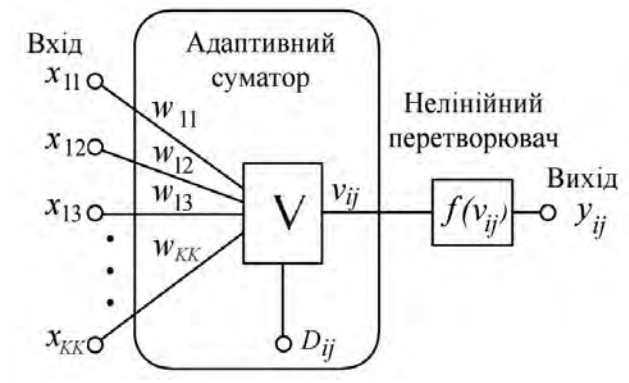


Рисунок 4 – Графічне зображення: а – нейрону; б – НМХ
 Математично подібний нейрон (рис. 4а) описується за допомогою системи рівнянь (2):

$$\begin{cases}
 y_{ij} = f(v_{ij}); v_{ij} = \sum_{i=1}^{K,K} \sum_{j=1}^{K,K} x_{ij} w_{ij} + D_{ij}; \\
 D_{ij} = 1, P_{ij} \notin SC_n; D_{ij} = 0, P_{ij} \in SC_n; \\
 w_{ij} = 1, \text{якщо довжина маршруту між вузлами } L; \\
 w_{ij} = 1,4, \text{якщо довжина маршруту між вузлами } \sqrt{L}^2.
 \end{cases} \quad (2)$$

Початковий бінарний рівень нейрону D_{ij} задається оператором КФС та дорівнює «1», якщо нейрон (вузол польотної карти) не входить до карти суб-рою; дорівнює «0», якщо вузол підлягає обстеженню боїдом даного суб-рою. Штучна мережа Хопфілда «навчається» рішенням задачі диз'юнкції матриць стану вузлів польотної карти (нейронної карти), що, по суті, зводиться до приведення стану всіх нейронів до «1», коли всі вузли польотної карти будуть обстежені. Тобто, у разі здійснення боїдом у вузлі P_{ij} вимірювання будь-якої характеристики, фотографування місцевості та ін., вихідна функція

$f(v_{ij})$ обчислювального процесу на відповідному ij -му нейроні, встановлюється в «1» і передається за правилами НМХ на входи всіх нейронів суб-рою. Якщо інший боїд попадає в точку з такими координатами, обчислювальний процес в цьому боїді не активується, тому що характеристики цієї точки вже виміряні та це відображено у нейронній карті.

Добуток всіх зважених входів $x_{ij} \cdot w_{ij}$ наприкінці задачі повинен бути ненульовим, враховуючи, що в кожній цільовій точці подія відбулася.

Таким чином, виключається дублювання події в кожній точці обстежуваної території, економляться обмежені обчислювальні ресурси комп'ютерних компонентів боїдів, економиться електроживлення і відповідно збільшується час життя зграї.

При плануванні маршруту суб-рою на основі розподіленої НМХ кожен з боїдів суб-рою формує власну нейронну карту і виконує її динамічне коригування за початковими даними і за інформацією від датчиків на боїді. Сформовану нейронну карту боїд по каналу зв'язку передає всім доступним боїдам зграї. У процесі руху боїд отримує нові «знання» про проведені дослідження у вузлах координатної сітки і відповідно до них коригує нейронну карту.

Кількість таких координатних сіток на цільовій мапі відповідає кількості вильотів зграї боїдів для виконання поставленої задачі з обстеження дослідної поверхні.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На початку роботи алгоритму на основі польотної карти створюється квадратна матриця подій K -го порядку, де K – кількість опорних точок в одній стороні побудованої квадратної координатної сітки, що покриває частину цільової території за топологією рис. 3а, яка можлива для моніторингу протягом одного вильоту зграї боїдів. У перетину i -го рядка та j -го стовпця даного масиву записуються «0», якщо точка входить до n -го з N просторових коридорів SC_n , та «1», якщо точка не входить до цього коридору (тобто, для даного суб-рою точка вважається вже обстеженою). Ця ж матриця A є нейронною картою НМХ:

$$\left\{ a_{ij}^{(n)} \mid n = \overline{1, N}; a_{ij}^{(n)} \mid i = \overline{1, K}; a_{ij}^{(n)} \mid j = \overline{1, K} \right\};$$

$$a_{ij}^{(n)} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } a_{ij} \in SC_n; \\ 1, & \text{якщо } a_{ij} \notin SC_n. \end{cases} \quad (3)$$

На другому етапі згідно з запропонованим методом для кожного n го суб-рою складається окрема нейронна карта НМХ A_n за правилами:

$$A = \left\| a_{ij}^{(n)} \right\|_1^K = \left\| \begin{matrix} a_{11}^{(1)} & \dots & a_{1j}^{(n)} & \dots & a_{1K}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1}^{(n)} & \dots & a_{ij}^{(n)} & \dots & a_{iK}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{K1}^{(n)} & \dots & a_{Kj}^{(n)} & \dots & a_{KK}^{(n)} \end{matrix} \right\|. \quad (4)$$

Тобто, якщо $a_{ij}^{(n)} = 1$, то такий вузол для n -го суб-рою вважається вже обстеженим.

На третьому етапі виконується синтез маршрутів боїдів суб-рою в межах кожного n -го просторового коридору.

Розглянемо обмеження технічної реалізації такої топології в зграї БПЛА, що складається з суб-роїв. Після вимірювань та/або відеомоніторингу та/або виконання інших технологічних процесів стан даного вузла в матриці (тобто нейрона матриці Хопфілда) змінюється з «0» на «1» (ставиться ознака, що вузол обстежений). Такий стан нейронної мережі з виходу обстеженого вузла (фактично – з RF-передавача БПЛА) передається на входи всіх інших вузлів, тобто всім БПЛА, в яких би вони вузлах не знаходились в даний час. Таким чином, вхідні сигнали потрапляють на всі нейрони, а вихідними можуть бути сигнали як з усіх нейронів, так і з частини нейронів після декількох циклів функціонування. Тобто, нейронна карта НМХ поновлюється з деякими часовими затримками Δt_{ij} .

Робота алгоритму завершується, коли вже виконаний обліт всіх опорних точок кожного просторового коридору, а також відома довжина шляху кожного маршруту. Маршрут являє собою масив послідовності опорних точок, причому найперша і остання точка – це завжди буде точка вильоту боїда (суб-рою) зграї.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У нашому випадку, коли в зграї використовується шість БПЛА, що працюють у складі 4 суб-роїв в 4 просторових коридорах $SC_1 - SC_4$, можна нарахувати 15 зв'язків у повнозв'язному площинному (2D) графі (рис. 5).

В загальному випадку кількість зв'язків в наведеній топології можна розрахувати за формулою $N \cdot (N-1)/2$, де N – загальна кількість боїдів у зграї. Це означає, якщо для

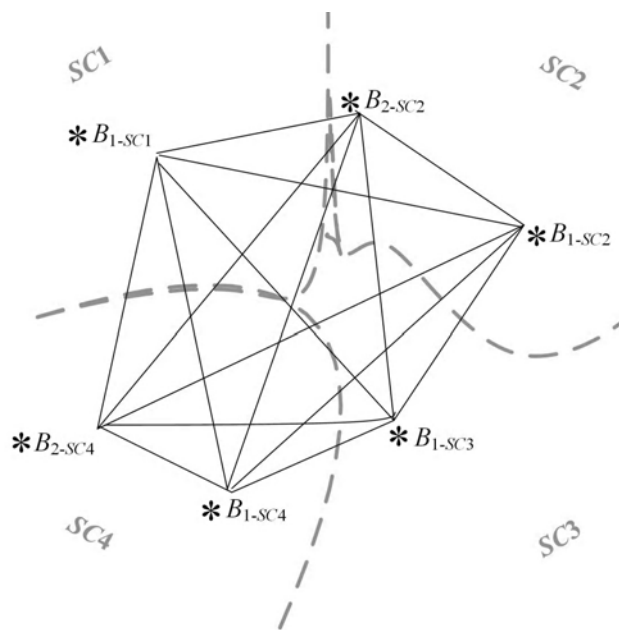


Рисунок 5 – Повнозв'язний граф для $M=6, N=4$

обстеження частини території з 100 координатних вузлів випустити зграю з 100 боїдів, то при цьому потрібно забезпечити 4950 бездротових зв'язків. Навіть якщо врахувати необхідність використання трансферних вузлів для передачі даних на вхід всіх нейронів НМХ (окрім вузла-передавача) при відсутності прямої електромагнітної видимості між боїдами або при перевищенні можливої дальності сигналу [10], наявних обчислювальних та телекомунікаційних ресурсів на борту боїдів розглянутої мережі буде недостатньо.

Тому доцільно вважати, що боїди обмінюються картою НМХ з деякою часовою затримкою, коли відстань між ними не перевищує можливу для телекомунікаційного обміну.

Наприклад, для координатної сітки розміром 10x10 точок, яка поділена на 4 просторові коридори за правилами, наведеними на рис. За, матриці подій A_n для просторових коридорів SC_1 та SC_2 виглядатимуть:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Для інших коридорів SC_n матриця A_n будується аналогічно.

Матриця A повної координатної сітки має розмір $K \times K$ й отримується шляхом поелементної диз'юнкції матриць $A_1 \dots A_4$.

$$A = A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee A_4. \quad (6)$$

Наприклад, після виконання завдань у просторових коридорах SC_1 та SC_2 відповідними суб-роями матриця A , обчислена за формулою (6), набуває вигляду:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

З матриці у (7) видно, що просторові коридори SC_3 та SC_4 ще не обстежені. Якщо у результаті критичного застосування боїди в зазначених коридорах втрачені, тоді оператором КФС повинні бути перевизначені початкові змінні D_{ij} нейронам карт A_1 і A_2 НМХ, і боїди, які звільнились від виконаних завдань у просторових коридорах SC_1 та SC_2 , повинні бути направлені у просторові коридори SC_3 та SC_4 .

Алгоритм закінчується, коли всі значення матриці A повністю обстеженої координатної сітки частини досліджуваної території стають одиничними.

Таким чином, поведінка кожного суб-рою присвячена вирішенню єдиної для такого суб-рою задачі – виконання будь-якої технологічної функції та/або моніторингу характеристик території у призначеному цьому суб-рою просторовому коридорі чітко визначених розмірів та конфігурації, з обов'язковим вимірюванням характеристик (виконанням технологічних функцій) в кожному з наявних на координатній сітці вузлів.

Кожен з цих боїдів буде абсолютно автономною одиницею, яка буде в змозі приймати свої власні рішення і виконувати дії. Але кожен боїд буде в змозі «спілкуватися» з рештою боїдів суб-рою, наслідуючи, таким чином, поведінки рою бджіл і виконуючи спільне завдання.

НМХ може бути корисною в цьому випадку для того, щоб жоден вузол не був обстежений двічі. Для цього треба скористатися властивістю мережі Хопфілда, що з виходу кожного з нейронів подається сигнал на входи всіх інших нейронів. Тоді факт виконання дії (вимірювання, фотографування тощо) у вузлі координатної сітки кожним боїдом стає відомим решті боїдам суб-рою, й такий вузол викреслюється з числа опорних точок, відповідний нейрон переходить в нульовий стан, і боїд не виконує повторної дії в такому вузлу.

Таким чином, глобальні рішення щодо обстеження вузлів координатної сітки приймаються «зграєю» на основі всіх наявних колективних даних. Завдяки цьому суб-рій є універсальним утворенням, що добре пристосовується до групової поведінки членів суб-рою (БПЛА)

та слабо чутливе до втрати деяких його членів. Зграя, що поділена на суб-рої, може втратити деяку кількість боїдів, але все ж залишиться здатною до виконання завдання з обстеження частини мапи, обмеженої координатною сіткою з поділом на просторові коридори.

Проведені експерименти підтвердили працездатність і практичну застосовність запропонованого методу. Результати планування маршрутів боїдів суб-роїв наведені у табл. 1 і табл. 2. У табл. 1 наведені результати застосування запропонованого методу з топологією мережі, при якій для кожного суб-рою власна окрема точка вильоту, за умови застосування боїдів зі швидкістю польоту 5 м/с та відстанню між вузлами координатної сітки $L = 100$ м.

В табл. 2 наведені аналогічні дані для БПЛА, які мають спільну точку вильоту.

З аналізу табл. 1–табл. 2 видно, що запуск суб-роїв з різних точок вильоту скорочує час обстеження території на 10,4%. Але при цьому загальна вартість маршруту зростає на 2,6%. Це означає, що в такому разі треба приділяти більше уваги питанням оптичної навігації, більш точному позиціонуванню БПЛА при здійсненні складного маневрування між вузлами координатної сітки. Необхідно передбачити режим повернення БПЛА на початкову позицію.

Треба відзначити, що при такому підході пройдений суб-роєм шлях не буде мінімальним, і описане рішення є тільки суб-оптимальним для TSP. Але використання мережі Хопфілда дозволяє знаходити задовільні рішення досить швидко, без додаткового аналізу. Це робить можливим використовувати розроблений метод синтезу маршруту відокремленої групи безпілотних апаратів (з конкатенацією декількох двовірних рішень у тривимірному просторі) у швидкодинамічних мережах, наприклад, таких, як зграя боїдів. Використання класичних методів, що дозволяють знаходити оптимальне рішення з використанням множинних ітерацій, може зажадати таких тимчасових і обчислювальних ресурсів, що приведуть до краху зграї боїдів при несвоєчасному отриманні корекції маршруту.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Як видно з табл. 1–табл. 2, запропонований синтезу маршрутів зграї БПЛА з розбиття на суб-рої, що діють в двовірних просторових коридорах, дозволяє істотно

прискорити виконання завдань обстеження ділянок територій. Описаний підхід забезпечує рішення задачі комівояжера з відвідуванням всіх вузлів координатної сітки, що покриває карту частини досліджуваної поверхні, а також високий рівень узагальнення даних моделлю.

Це дозволяє рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

Сформовані матриці подій дозволяють забезпечувати активність моніторингових або функціональних пристроїв БПЛА (відеокамери, метео-датчики, пристрої розпорошення речовин та ін.) тільки у власному просторовому 2D-коридорі, а також і пасивність цих же пристроїв при попаданні деяких БПЛА суб-рою в чужій для нього просторовий коридор. Такий підхід підвищує час життєздатності зграї шляхом виключення дублювання задач у вузлах та економії обмежених енерго-, обчислювальних і технологічних ресурсів БПЛА.

Збільшення кількості БПЛА в кожному суб-рої або ущільнення вузлів координатної сітки прискорює виконання завдання цим суб-роєм, проте веде до значного витрачання загальних ресурсів зграї і до підвищення небезпеки зіткнень БПЛА всередині зграї. Таким чином, вибір характеристик зграї і планування завдань повинні бути спрямовані на пошук оптимального співвідношення K^2/N , що забезпечує прийнятний рівень енергоспоживання, матеріальних і часових витрат на виконання завдання на території.

ВИСНОВКИ

Експерименти показують, що синтез топології суб-роїв безпілотних апаратів з використанням нейронної мережі Хопфілда є доцільним та корисним для підвищення ефективності використання БПЛА при обстеженні територій.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропонований метод маршрутів суб-роїв БПЛА на основі нейронної мережі Хопфілда, який в процесі синтезу маршрутів завдяки формуванню топології суб-роїв з використанням НМХ виключає дубляж виконання моніторингових та/або технологічних функцій зграєю БПЛА у визначених вузлах координатної сітки, якою покривається частина мапи обстежуваної території.

Запропонований метод дозволяє істотно прискорити час обстеження територій, що виконується з викорис-

Таблиця 1 – Результати методу з різних точок вильоту БПЛА

№ суб-рою (просторового коридору)	№ точки вильоту БПЛА	К-сть БПЛА	К-сть вузлів маршруту (разом/розподіл між БПЛА)	Середній час виконання задачі суб-роєм, хв	Загальна вартість маршруту
SC_1	PF_1	1	25/25	8,9	268
SC_2	PF_2	2	25/13 і 12	4,0	268
SC_3	PF_3	1	25/25	8,5	256
SC_4	PF_4	2	25/13 і 12	3,9	252
РАЗОМ:		6	100	23,3	1044

Таблиця 2 – Результати методу з однієї точки вильоту БПЛА

№ суб-рою (просторового коридору)	№ точки вильоту БПЛА	К-сть БПЛА	К-сть вузлів маршруту (разом/розподіл між БПЛА)	Середній час виконання задачі суб-роєм, хв	Загальна вартість маршруту
SC_1	PF_0	1	28/28	9,3	278
SC_2		2	27/14 і 13	4,5	264
SC_3		1	22/22	7,9	236
SC_4		2	23/12 і 11	4,3	240
РАЗОМ:		6	100	26,0	1018

танням БПЛА, підвищити економію обмежених обчислювальних та енергоресурсів безпілотних апаратів, що дозволяє збільшити час їх життя.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в тому, що застосування запропонованого методу дозволяє подовжити час життя зграї ресурсообмежених недорогих птахоподібних об'єктів (боїдів). Експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу. Отримано залежність моделі, синтезованої запропонованим методом, від місця розташування вузлів вильоту кожного суб-рою боїдів. Використання отриманої залежності дозволяє на практиці більш раціонально вибирати місце старту суб-рою, кількість координатних сіток для розбиття досліджуваної поверхні, відстань між вузлами сітки, забезпечуючи прийнятну точність нейромоделі в процесі обстеження вузлів, з забезпеченням зниження загальної вартості маршрутів.

Перспективи подальших досліджень полягають у доповненні запропонованих рішень адаптивною зміною висоти роботи кожного суб-рою в залежності від рівня критичності ситуації на обстежуваній території (пожежа, перевищення ГДК шкідливих речовин тощо).

ПОДЯКИ

Робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Чорноморського національного університету ім. Петра Могили за темами «Створення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від енергії вимірювального сигналу» (держ. реєстр. № 0115U000316, 2015–2016 рр.) та «Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення» (2017–2018 рр.).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ачасова А. Безпілотники – сучасний інструмент для аграрія [Електронний ресурс] / А. Ачасова // АгроPRO. – 2016, Жовтень (спецвипуск). – С. 44–46. – Режим доступу : URL : <https://agropro.club/articles/bezpilotniki-suchasnij-instrument-dlya-agrariya/>.

Журавская И. Н.¹, Мусиенко М. П.²

¹Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, Николаев, Україна

²Д-р техн. наук, професор, декан факультета комп'ютерних наук Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, Николаев, Україна

СИНТЕЗ МАРШРУТОВ СУБ-РОЕВ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ХОПФИЛДА ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ

Актуальность. Решена актуальная задача экономии ограниченных энерго-, вычислительных и технологических ресурсов малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Цель работы – создание метода синтеза маршрутов суб-роев БПЛА, продлевающего время жизнеспособности стаи БПЛА.

Метод. Предложен метод построения моделей частиц («суб-роев») стаи БПЛА, исключающий дублиаж выполнения задачи в узлах координатных сеток, которыми покрывается исследуемая территория. Совмещение нейронной карты сети Хопфилда и полетной карты для каждого суб-роя обеспечивает сообщение через модули беспроводной связи между БПЛА о факте выполнения мониторинговой или технологической задачи любым отдельным БПЛА суб-роя остальным БПЛА. Предложенный подход позволяет использовать функции самозаживления суб-роев стаи птицеподобных объектов («боидов») путем переопределения задач суб-роев как кибер-физической системы в случае потери отдельных боидов при их критическом применении. Структура получаемых моделей поведения суб-роев, реализованная в двумерных пространственных коридорах произвольной формы с последующей конкатенацией полученных 2D-решений, значительно упрощает решение задачи коммивояжера в трехмерном пространстве и позволяет существенно ускорить выполнение задач обследования участков территорий.

Результаты. Разработано программное обеспечение (ПО), реализующее предложенный метод, которое использовано при проведении вычислительных экспериментов по исследованию свойств метода.

2. Perdix fact sheet: Release of the Strategic capabilities office DoD [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf>.
3. Даринцев О. В. Нейросетевой алгоритм планирования траекторий для группы мобильных роботов / О. В. Даринцев, А. Б. Мигранов, Б. С. Юдинцев // Искусственный интеллект ; Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – 2011. – № 1. – С. 154–160.
4. Rahman T. NCP striking pattern in combat situation using boids behaviour / T. Rahman, M. Hariadi, S. Sumpeno // Intelligent technology and its application (ISITIA) : IEEE international seminar, Surabaya, Indonesia, 22–24 May. 2014 : proceedings [Electronic resource]. – Access mode: <http://isitia.its.ac.id/base/index.php/SITIA/2014/paper/viewFile/343/143>.
5. Wang N. Hopfield neural network guided evolutionary algorithm for aircraft penetration path planning / N. Wang, L. Wang, X. Go, L. Chen, L. Shen // Advances in neural network research and applications (LISEE, 67). – Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. – P. 235–243.
6. Субботін С. О. Побудова повністю визначених нейро-нечітких мереж з регулярними розбиттям простору ознак на основі вибірок великого обсягу / С. О. Субботін // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 3. – С. 47–53.
7. Hopfield J. J. What is a Moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration / J. J. Hopfield, C. D. Brody // Proceedings of the NAS of the USA. – 2001. – Vol. 98, No. 3. – P. 1282–1287. DOI: 10.1073/pnas.98.3.1282.
8. Musiyenko M. P. Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors / [M. P. Musiyenko, I. M. Zhuravska, I. V. Kulakovska, A. V. Kulakovska] // Electronics and nanotechnology (ELNANO) : 36th international conference, Kyiv, 19–21 Apr. 2016 : proceedings. – Kyiv : IEEE; NTUU “KPI”, 2016. – P. 382–387. DOI: 10.1109/LNANO.2016.7493090.
9. Melnyk A. Multiagent approach to the distributed autonomous explorations / A. Melnyk, V. Golemba, A. Bochkaryov // Adaptive hardware and systems AHS 2007 : conference, Edinburgh, 5–8 Aug. 2007 : proceedings. – Scotland, UK : NASA/ESA, 2007. – P. 568–572.
10. Журавська І. М. Забезпечення стабільного бездротового зв'язку у кібер-фізичній системі з рухомими об'єктами / І. М. Журавська // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2016. – Т. 5, № 2(31). – С. 58–64. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80784.

Стаття надійшла до редакції 06.02.2017.

Після доробки 02.06.2017.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода и реализующего его ПО, а также позволяют рекомендовать их для применения на практике для решения задач обследования территории с использованием стаи боидов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, суб-рой, стая, нейронная сеть Хопфилда, дублияж задач

Zhuravska I. M.¹, Musiyenko M. P.²

¹Ph.D., Associate Professor, Doctorant of Department of Computer Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, Dean of Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

THE SYNTHESIS OF ROUTES OF UAVS' SUB-SWARMS BASED ON HOPFIELD NEURAL NETWORK FOR INSPECTION OF TERRITORIES

Context. The urgent task the economy of the limited power, computing and technological resources of small unmanned aerial vehicles (UAVs) has been solved.

Objective is a creation of sub-swarms' routes synthesis method with increasing the time of UAV flock viability.

Method. The method for model building of the UAVs' sub-swarm is offered. It allows to avoid the dubbed tasks at any node of grids that cover the survey territory. Combining Hopfield neural network's map and flight map for each sub-swarm provides an information via wireless communication modules of UAV about the executed facts of monitoring or technological tasks by any individual UAV of sub-swarm to rest of UAVs. This approach allows to use the self-healing properties of the sub-swarms in flocks of bird-like objects ("boids") by means redefining the tasks of sub-swarms as a cyber-physical system in case of loss of several boids during a critical usage. The structure of the resulting sub-swarms' behavior models is implemented in two-dimensional spatial corridors of arbitrary shape; then achieved 2D-solving are concatenated. This can significantly speed up the tasks survey territories.

Results. The software implementing proposed method have been developed and used in computational experiments investigating the properties of the method. The experiments confirmed the efficiency of the proposed method and software.

Conclusions. The experiments also allow to recommend them for use in practice to solve the problems survey area using boids' flock.

Keywords: unmanned air vehicle, sub-swarm, flock, Hopfield neural network, dubbed tasks.

REFERENCES

1. Achasova A. Drones – modern tools for farmers [Electronic resource], *AgroPRO*, 2016, Oct. (special issue), pp. 44–46. Access mode: <https://agropro.club/articles/bezpilotniki-suchasnij-instrument-dlya-agrariya/>.
2. Perdix fact sheet: Release of the Strategic capabilities office DoD [Electronic resource]. Access mode: <https://www.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf>.
3. Darintsev O. V., Migranov A. B., Yudincev B. S. Neural network algorithm of planning trajectories for a group of mobile robots, *Artificial Intelligence ; Ufa state aviation technical university*, 2011, No. 1, pp. 154–160.
4. Rahman T., Hariadi M., Sumpeno S. NCP striking pattern in combat situation using boids behaviour, *Intelligent technology and its application (ISITIA) : IEEE international seminar*. Surabaya, Indonesia, 22–24 May, 2014 : proceedings [Electronic resource]. Access mode: <http://isitia.its.ac.id/base/index.php/SITIA/2014/paper/viewFile/343/143>.
5. Wang N., Wang L., Go X., Chen L., Shen L. Hopfield neural network guided evolutionary algorithm for aircraft penetration path planning, *Advances in neural network research and applications (LISEE, 67)*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010, pp. 235–243.
6. Subbotin S. A. Building a fully defined neuro-fuzzy network with a regular partition of a feature space based on large sample, *Radio electronics, computer science, control*, 2016, No. 3, pp. 47–53.
7. Hopfield J. J., Brody C. D. What is a Moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration, *Proceedings of the NAS of the USA*, 2001, Vol. 98, No. 3, pp. 1282–1287. DOI: 10.1073/pnas.98.3.1282.
8. Musiyenko M. P., Zhuravska I. M., Kulakovska I. V., Kulakovska A. V. Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors, *Electronics and nanotechnology (ELNANO) : 36th international conference*, Kyiv, 19–21 Apr. 2016 : proceedings. Kyiv : IEEE; NTUU "KPI", 2016, P. 382–387. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493090.
9. Melnyk A., Golebo V., Bochkaryov A. Multiagent approach to the distributed autonomous explorations, *Adaptive hardware and systems AHS 2007 : conference, Edinburgh, 5–8 Aug. 2007 : proceedings*. Scotland, UK, NASA/ESA, 2007, pp. 568–572.
10. Zhuravska I. Ensuring a stable wireless communication in cyber-physical systems with moving objects, *Technology audit and production reserves*, 2016, Vol. 5, No. 2(31), pp. 58–64. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80784.